



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Mitigación de riesgos asociados al deterioro físico del suelo debido a acciones ambientales mediante el uso de geosintéticos

Treball realitzat per:

**Oscar Jair Andrango Carrillo**

Dirigit per:

**Pere Prat Catalán**

**Alberto Ledesma Villalba**

Màster en:

**Enginyeria de Camins, Canals i Ports**

Barcelona, *28/06/2020*

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE MÀSTER**

## Resumen

Este trabajo se centra en la investigación experimental de un suelo limo-arcilloso, con un contenido de agua del 30% sin compactar, sujeto a un proceso de desecación bajo cámara ambiental (30% de humedad relativa y 25°C de temperatura) y con la presencia de un geosintético a modo de protección. Se llevan a cabo dos ensayos a pequeña y mediana escala en geometrías rectangulares, de 30×20 cm y 5 cm de grosor, y circulares, de 80 cm de diámetro y 20 cm de espesor. Los resultados de ambos experimentos se representan en términos de contenido de humedad, succión, humedad relativa, temperatura y succión total justificando el uso del geosintético para mitigar los problemas que provoca el fenómeno de desecación en los suelos. Además, también se lleva a cabo un análisis del patrón de agrietamiento del suelo mediante imágenes tomadas a lo largo del ensayo cuya duración es de 17 días para las bandejas rectangulares y de 110 días para la bandeja circular.

Por otro lado, se realiza un modelo numérico del ensayo experimental a mediana escala para un estudio termo-hidráulico en 1D del suelo. Se expone cómo crear un modelo numérico para este tipo de investigaciones y cómo afectan los distintos parámetros al comportamiento del suelo mediante un análisis de sensibilidad. Los resultados obtenidos muestran lo observado experimentalmente y también justifican el uso de geosintéticos para la prevención de los riesgos causados por la fisuración de suelos ante fenómenos atmosféricos de desecación.

## **Abstract**

This thesis focuses on the experimental investigation of a silty clay soil with 30% water content under environmental chamber conditions (30% of relative humidity and 25°C of temperature) protected with a geotextile layer. Two experiments are carried out in small and medium scale with rectangular geometries of 30×20 cm and 5 cm thickness and circular shapes of 80 cm diameter and 20 cm thickness. The results of both experiments show the process of desiccation in terms of water content, suction, relative humidity, temperature and total suction justifying the use of geotextiles in order to mitigate the problems caused by the desiccation phenomenon in soils. Moreover, an analysis of the crack pattern is also carried out by means of pictures taken during the experiments with a duration of 17 days and 110 days for the rectangular and circular shapes, respectively.

Furthermore, a numeric model of the medium scale experiment is created in order to carry out a 1D study of the soil in thermohydraulic terms. How to create a numeric model for this kind of experiments and how the different parameters affect to the behaviour of the soil are explained. The results obtained also justify the use of geotextiles in order to protect the soil and mitigate the risks caused by the cracks formed because of desiccation phenomena.

## Resum

Aquest treball es centra en la investigació experimental d'un sòl llimo-argilós, amb un contingut d'aigua del 30% sense compactar, subjecte a un procés de dessecació en una cambra ambiental (30% de humitat relativa y 25°C de temperatura) y amb la presència d'un geosintètic com a protecció. Es duen a terme dos assajos a petita i mitjana escala amb geometries rectangulars, de 30×20 cm y 5 cm de gruix, y circulars, de 80 cm de diàmetre y 20 cm de gruix. Els resultats d'ambdós experiments es representen en termes de contingut d'aigua, succió, humitat relativa, temperatura i succió total justificant l'ús de geosintètics per a evitar els problemes relacionats amb la dessecació dels sòls. A més, també es duu a terme un anàlisi del patró de fissuració del sòl mitjançant imatges obtingudes al llarg dels assaigs la durada de les quals és de 17 dies pels de geometria rectangular i 110 dies pel de geometria circular.

D'altra banda, es realitza un model numèric de l'assaig experimental a mitjana escala per a l'estudi termo-hidràulic en 1D del sòl. S'exposa com crear un model numèric per aquest tipus de investigacions i com afecten els diferents paràmetres al comportament del sòl mitjançant una anàlisi de sensibilitat. Els resultats obtinguts mostren lo observat experimentalment i també justifiquen l'ús de geosintètics per a la prevenció de riscos deguts a la fissuració del sòl davant fenòmens atmosfèrics de dessecació.

## **Agradecimientos**

Expreso mi gratitud al profesorado y al personal de la UPC, en especial a mis tutores Pere y Alberto quienes me han ayudado en todo momento para sacar adelante este trabajo. También agradezco enormemente a David, Abdallah y Josbel por la ayuda prestada durante toda la realización de mi TFM, especialmente, en los primeros pasos de este proyecto dándome ideas y ensuciándose las manos para montar el ensayo experimental que tanto trabajo costó.

Mención especial y agradecimiento a Interma Nets SA por la cesión del geosintético utilizado en los experimentos llevados a cabo en este trabajo.

Finalmente, tengo que agradecer a las personas más importantes de mi vida, que me han ayudado directa e indirectamente a llegar hasta aquí y acabar el máster: mis amigos y mi familia.

Gracias a mis compañeros de clase durante estos 6 años, especialmente a mi gran amiga Karla, quien ha sido mi apoyo máximo dentro de la universidad y fuera también. Gracias a los compañeros que conocí en Inglaterra en ese año de Erasmus, donde Dani Casampera y Paula Sorolla se convirtieron en mis mejores amigos, y a la amistad que forjé en ese equipo de fútbol. Y, por supuesto, muchísimas gracias a mis amigos de toda la vida Iván, Lina, Isamar, Gonzalo, José Miguel, Guillem y a mi hermano Diego por su apoyo incondicional y por animarme constantemente, enseñándome a no rendirme y dándome la positividad que suele faltarme. Con vosotros tengo mis más grandes, fantásticos, alegres e increíbles recuerdos y cada uno de vosotros me ha salvado más de una vez. Estoy donde estoy gracias a vosotros.

Gracias a mi familia. Muchas gracias a mi familia. A mi padre Oliver, a mi madre Gladys y a mi hermano Uriel por darme todas y más de las ayudas que necesitaba, por enseñarme todo lo que sé y por apoyarme en toda decisión tomada. Gracias por haberme enseñado el camino a seguir en todo momento. Gracias también al resto de mi familia, a mis abuelos, a mis primos y a mis tíos los cuales han puesto su granito de arena pese a la distancia. Y muchas gracias a Yara, quien sin duda es la persona que más encima de mí ha estado durante estos dos años de máster cuidando cada detalle y siendo la primera en animarme y en otorgarme ayuda en todo momento. Os recordaré a todos por siempre. Soy lo que soy gracias a vosotros.

# Índice

Resumen .....	2
Abstract.....	3
Resum .....	4
Agradecimientos .....	5
Lista de Figuras .....	9
Lista de Tablas.....	14
1 Introducción .....	15
1.1 Objetivos de la investigación .....	15
1.2 Alcance del trabajo .....	17
1.3 Procedimiento y organización.....	17
2 Estado del arte .....	20
2.1 Introducción .....	20
2.2 Análisis experimental.....	22
2.2.1 Variables involucradas .....	22
2.2.2 Tipos de suelos .....	23
2.2.3 Tipos de recipientes .....	24
2.2.4 Resultados de laboratorio .....	26
2.2.5 Resultados de campo .....	33
2.2.6 Análisis de imagen mediante radar.....	34
2.3 Análisis teórico .....	36
2.3.1 Formulación base.....	36
2.3.2 Interpretación probabilista .....	38
2.3.3 Interpretación determinista .....	39
2.4 Análisis numérico .....	41
2.4.1 Criterios y método de elementos finitos .....	41
2.4.2 Code_Bright .....	44

3	Una necesidad medioambiental.....	50
3.1	Introducción .....	50
3.2	Calentamiento global .....	51
3.2.1	Cambios de temperatura .....	51
3.2.2	Cambios en las precipitaciones .....	53
3.3	Efectos en el terreno.....	54
3.4	Problemas ingenieriles .....	55
3.4.1	Daños estructurales.....	55
3.4.2	Inestabilidad .....	57
3.4.3	Infiltraciones .....	58
4	Propiedades del suelo y el geosintético.....	60
4.1	Introducción .....	60
4.2	Suelo investigado .....	60
4.2.1	Localización geográfica.....	60
4.2.2	Orígenes.....	61
4.2.3	Composición.....	62
4.2.4	Caracterización geotécnica .....	65
4.3	Geosintético .....	69
5	Estudio experimental mediante cámara ambiental.....	72
5.1	Introducción .....	72
5.2	Material de laboratorio.....	73
5.2.1	Cuerpo de la cámara ambiental .....	73
5.2.2	Bandejas .....	75
5.2.3	Sensores.....	76
5.2.4	Deshumificador .....	80
5.2.5	Mezcladora .....	80
5.2.6	Control informático .....	81

5.2.7	Higrómetro .....	83
5.3	Procedimiento experimental .....	84
5.3.1	Curva de retención.....	84
5.3.2	Bandejas rectangulares .....	85
5.3.3	Bandeja circular de diámetro 80 cm.....	87
5.4	Resultados.....	92
5.4.1	Curva de retención.....	92
5.4.2	Bandejas rectangulares .....	95
5.4.3	Bandeja circular de diámetro 80 cm.....	99
6	Análisis numérico mediante Code_Bright .....	113
6.1	Introducción .....	113
6.2	Procedimiento .....	113
6.3	Análisis de convergencia y sensibilidad .....	119
6.3.1	Análisis de convergencia .....	119
6.3.2	Análisis de sensibilidad .....	120
6.4	Resultados.....	130
7	Discusión.....	136
8	Conclusiones .....	139
8.1	Ensayos experimentales .....	139
8.2	Modelo numérico .....	139
8.3	Futura investigación.....	140
9	Referencias.....	141
	Anejo A. Script de MATLAB para el cálculo de la masa perdida y la velocidad de evaporación.....	148



## Lista de Figuras

Figura 2.1. Fotografía de la probeta tipo utilizado en el estudio, (Lakshmikantha et al., 2012).....	25
Figura 2.2. Evolución temporal de la humedad relativa del suelo y ambiental y de la temperatura de la cámara sobre una muestra circular de 40x10 cm, (Lakshmikantha et al., 2018).....	27
Figura 2.3. Evolución temporal de la succión de una muestra circular de 40x10 cm, (Lakshmikantha et al., 2018).....	27
Figura 2.4. Relación entre el contenido de humedad y la resistencia a tracción de muestras con distinta densidad específica, (Lakshmikantha, 2009).....	29
Figura 2.5. Evolución del contenido de agua y precipitación durante el ensayo de campo, (Cordero, 2019).....	33
Figura 2.6. Evolución del perfil de la muestra para los días 1, 8, 15, 22 y 29 del ensayo, (Levatti, 2015).....	35
Figura 2.7. Patrones de agrietamiento posibles en una superficie plana, (Corte y Higashi, 1960).....	39
Figura 2.8. Mecanismo propuesto de propagación: a) Antes de propagar la grieta; b) después de propagar la grieta, (Lee y Lo, 1988).....	42
Figura 3.1. Mapas de localización de las estaciones GHCN de temperatura media: (a) todas las estaciones GHCN de temperatura media; (b) estaciones de temperatura media con fecha en 1900, (Peterson y Vose, 1997).....	51
Figura 3.2. Anomalías de temperatura en la superficie del mar, (Quayle et al., 1999).....	52
Figura 3.3. Anomalía de las temperaturas de la tierra y el agua en comparación con las temperaturas medias del período 1981-2010, (NOAA, 2017).....	53
Figura 3.4. Anomalía de las precipitaciones globales en comparación con las temperaturas medias del período 1961-1990, (NOAA, 2017).....	54
Figura 3.5. Caída del muro de protección del arroyo Don Juan en Colombia, (Narváez, 2018).....	56
Figura 3.6. Vista de los daños del derrumbamiento por deslizamiento de tierras en La Paz, (La Vanguardia, 2019).....	57
Figura 3.7. Esquema de las capas de un vertedero, (Howard y Draudt, 2008).....	58
Figura 4.1. Ubicación de Parc UPC - Agrópolis en el Delta del Llobregat, (Google Maps, 2020a).....	60

Figura 4.2. Ubicación de los puntos de extracción del terreno original (A) y del lugar de investigación de campo previo (B), (Google Maps, 2020b).....	61
Figura 4.3. Mapa geológico de la provincia de Barcelona, (Almera, 1891). ....	61
Figura 4.4. Perfil geotécnico a lo largo del recorrido del Río Llobregat, (Sierra, 1933). .....	62
Figura 4.5. Curva granulométrica tras tamizado, (Cordero, 2019).....	66
Figura 4.6. Índice de plasticidad del suelo utilizado con y sin herbicidas, (Cordero, 2019).....	67
Figura 4.7. Curva de retención del suelo investigado, (Cordero, 2019).....	68
Figura 4.8. Geosintético (izquierda) y capa interna de malla de PEAD (derecha), Intermas (2019a y 2019b).....	69
Figura 4.9. Curva de retención estimada para el geosintético INTERDRAIN GMG 412. .....	70
Figura 5.1. Esquema de la cámara ambiental, Lakshmikantha (2009).....	74
Figura 5.2. Bandeja rectangular tipo utilizada en el ensayo de desecación a pequeña escala. ....	75
Figura 5.3. Bandeja circular utilizada en el ensayo de desecación a media escala. ....	75
Figura 5.4. Disposición de los sensores en la bandeja circular. ....	76
Figura 5.5. Tensiómetros tipo UMS-T5© (Meter Group, 2018).....	77
Figura 5.6. Sensor Vaisala HMP-230 que se coloca en los orificios laterales de la bandeja circular. ....	78
Figura 5.7. Sensor Vaisala HMD/W70 que se coloca en la cámara para tomar datos ambientales. ....	79
Figura 5.8. Cámara digital para toma de imágenes durante el ensayo, (Olympus, 2002). .....	79
Figura 5.9. Deshumificador del laboratorio clase RECUSORB DR-010B, (Seibu Geiken DST, 2019). ....	80
Figura 5.10. Mezcladora UMACON Supermix, (Umacon, 2019). ....	81
Figura 5.11. Panel del programa informático de control del ensayo de desecación.....	82
Figura 5.12. Higrómetro tipo WP4-T© utilizado para mediciones de succión (Decagon Devices Inc., 2007).....	83
Figura 5.13. Estructura para el tamizado del suelo investigado. ....	84
Figura 5.14. Profundidad en la que se encuentra el geosintético para los ensayos a pequeña escala. ....	86

Figura 5.15. Aspecto de la superficie tras aplanarla.....	86
Figura 5.16. Procedimiento de preparación de una de las tandas de la mezcla de suelo.	88
Figura 5.17. Mezcladora en funcionamiento durante la preparación del suelo.....	88
Figura 5.18. Ensayo de cuchara de Casagrande para el control del límite líquido durante la preparación. ....	89
Figura 5.19. Profundidad a la que se encuentra el geosintético en el ensayo a media escala. ....	90
Figura 5.20. Proceso de aplanamiento de la superficie durante el vertido de la mezcla en la bandeja.....	90
Figura 5.21. Aspecto final de la muestra circular del ensayo a media escala. ....	91
Figura 5.22. Aspecto final tras acabar todo el proceso de preparación: inicio del ensayo. ....	92
Figura 5.23. Curvas de retención experimental y numérica de la muestra con un contenido de agua de 18.16%. ....	93
Figura 5.24. Curvas de retención experimental y numérica de la probeta con humedad del 32.26%. ....	94
Figura 5.25. Condiciones ambientales durante el proceso de desecación de las muestras rectangulares.....	96
Figura 5.26. Variación del contenido de agua durante la desecación de las muestras rectangulares.....	97
Figura 5.27. Aspecto final tras desecación de la Bandeja 1 (centro), 2 (derecha) y 3 (izquierda).....	97
Figura 5.28. Condiciones ambientales durante el proceso de desecación de la probeta circular.....	100
Figura 5.29. Variación del contenido de agua de la probeta circular en función del tiempo.....	100
Figura 5.30. Variación de la succión en función del tiempo. ....	102
Figura 5.31. Variación de la succión en función del tiempo en escala logarítmica. ....	102
Figura 5.32. Variación de la succión en función del contenido de agua general en escala logarítmica.....	102
Figura 5.33. Variación de la succión en función de la profundidad.....	104
Figura 5.34. Variación de la succión en función de la profundidad en escala logarítmica. ....	104
Figura 5.35. Humedad relativa obtenida por los sensores Vaisala.....	104

Figura 5.36. Temperatura obtenida por los sensores Vaisala.....	105
Figura 5.37. Variación de la succión total en función del tiempo en escala logarítmica. .....	105
Figura 5.38. Variación de la succión total en función del contenido de agua en escala logarítmica.....	106
Figura 5.39. Evolución del patrón de fisuración superficial de la muestra circular bajo condiciones de cámara ambiental, tiempo (t) en días.....	108
Figura 5.40. Ubicación de los sensores (izquierda) y patrón final de fisuras superficiales (derecha). ....	109
Figura 5.41. Asiento de la capa superior tras finalización del ensayo.....	110
Figura 5.42. Profundidad de las fisuras en la capa superior. ....	110
Figura 5.43. Tamaño de las celdas finales tras la fisuración de la capa superior. ....	111
Figura 5.44. Patrón de agrietamiento de la capa superior visto desde abajo.....	111
Figura 5.45. Patrón de fisuración de la capa inferior visto desde arriba (izquierda) y desde abajo (derecha). ....	112
Figura 6.1. Geometría del modelo en Code_Bright. ....	114
Figura 6.2. Malla estructurada de elementos cuadrangulares de cuatro nodos. ....	118
Figura 6.3. Gráfica de convergencia en términos de humedad relativa. ....	119
Figura 6.4. Gráfica de convergencia en términos de temperatura. ....	120
Figura 6.5. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro de transferencia de vapor.....	121
Figura 6.6. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro de transferencia de vapor.....	121
Figura 6.7. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro de transferencia de calor.....	122
Figura 6.8. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro de transferencia de calor.....	123
Figura 6.9. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro P0 del suelo. ....	123
Figura 6.10. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro P0 del suelo. ....	124
Figura 6.11. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro $\lambda$ del suelo.....	125

Figura 6.12. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro $\lambda$ del suelo.....	125
Figura 6.13. Variación de la velocidad de evaporación para valores del parámetro $P_0$ del geosintético.....	126
Figura 6.14. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro $P_0$ del geosintético.....	126
Figura 6.15. Variación de la velocidad de evaporación para valores del parámetro $\lambda$ del geosintético.....	127
Figura 6.16. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro $\lambda$ del geosintético.....	127
Figura 6.17. Variación de la velocidad de evaporación para valores de permeabilidad intrínseca del suelo.....	128
Figura 6.18. Variación de la masa perdida para diferentes valores de permeabilidad intrínseca del suelo.....	128
Figura 6.19. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores de permeabilidad intrínseca del geosintético.....	129
Figura 6.20. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores de permeabilidad intrínseca del geosintético.....	129
Figura 6.21. Comparación de la velocidad de evaporación del modelo numérico con la del modelo experimental.....	130
Figura 6.22. Comparación de la masa perdida del modelo numérico con la del modelo experimental.....	131
Figura 6.23. Comparación de la variación de la humedad relativa en función del tiempo.....	132
Figura 6.24. Comparación de la variación de la temperatura en función del tiempo...	132
Figura 6.25. Comparación de la variación de la succión total en función del tiempo..	133
Figura 6.26. Variación de la humedad relativa en función de la profundidad señalando la ubicación del geosintético con una línea negra.....	134
Figura 6.27. Variación de la temperatura en función de la profundidad señalando el geosintético.....	135
Figura 6.28. Variación de la succión total en función de la profundidad señalando el geosintético.....	135

## Lista de Tablas

Tabla 3.1. Temperaturas por encima de la media de los meses siguientes, (Villalonga, 2016).....	53
Tabla 4.1. Contenidos de mineral del suelo proveniente del Delta del Llobregat, (Cordero, 2019). ....	63
Tabla 4.2. Límites de Atterberg, (Cordero, 2019).....	68
Tabla 4.3. Características técnicas del geotextil de polipropileno, Intermas (2019a)....	70
Tabla 4.4. Características técnicas de la malla de PEAD INTERDRAIN M4, Intermas (2019b). ....	70
Tabla 4.5. Características técnicas del geosintético completo INTERDRAIN GMG 412, Intermas (2019a).....	71
Tabla 4.6. Parámetros del modelo de Van Genuchten para el geosintético INTERDRAIN GMG 412. ....	71
Tabla 5.1. Lista de componentes de la cámara ambiental. ....	74
Tabla 5.2. Características técnicas de la mezcladora UMACON Supermix, (Umacon, 2019).....	81
Tabla 5.3. Características de cada tanda de preparación. ....	88
Tabla 5.4. Condiciones iniciales de la probeta con humedad del 18.16%. ....	93
Tabla 5.5. Valores de los parámetros del modelo de Van Genuchten para la probeta con humedad del 18.16%. ....	94
Tabla 5.6. Condiciones iniciales de la muestra con contenido de agua de 32.26%. ....	95
Tabla 5.7. Valores de los parámetros del modelo de Van Genuchten de la probeta con humedad del 32.26%. ....	95
Tabla 5.8. Condiciones iniciales de las muestras rectangulares.....	96
Tabla 5.9. Contenidos de agua de ambas caras de cada muestra rectangular.....	99
Tabla 5.10. Condiciones iniciales de la probeta circular. ....	100
Tabla 5.11. Contenidos de agua a diferentes profundidades de la muestra.....	106
Tabla 5.12. Ancho final de las fisuras superficiales. ....	109
Tabla 6.1. Coordenadas de posición de los puntos del modelo en Code_Bright. ....	114
Tabla 6.2. Parámetros hidráulicos y térmicos del material “suelo”.....	116
Tabla 6.3. Parámetros hidráulicos y térmicos del material “geosintético”.....	116
Tabla 6.4. Permeabilidad intrínseca según tipo de suelo (COAAT, 2007). ....	116

# **1 Introducción**

## **1.1 Objetivos de la investigación**

El fenómeno de fisuración superficial en suelos está normalmente relacionado con los fenómenos meteorológicos que provocan su desecación, ya sea por la acción del calor o del viento, y con acciones mecánicas, como la rotura por tracción o corte. El proceso depende de muchas variables ambientales, de contorno, materiales e iniciales en términos de contenido de agua del terreno. Por tanto, pueden llevarse a cabo numerosos ensayos, todos ellos completamente distintos, que podrían proporcionar datos que explicasen el fenómeno de la fisuración de suelos en diferentes escenarios. Además, pueden estudiarse las muestras bajo ciclos que también incluyan los periodos de humectación simulando las épocas lluviosas de la vida real, las cuales influyen en el patrón de agrietamiento y el comportamiento del suelo frente a este fenómeno.

Es un tema relativamente nuevo y de interés creciente debido al actual incremento de los fenómenos de desecación en regiones donde dichos fenómenos eran escasos o no existían. Por tanto, existen escasos estudios dedicados a la investigación de la fisuración de suelos para aplicaciones ingenieriles. Además, se destaca la gran importancia del tipo de suelo a la hora de realizar dichas investigaciones, ya que los suelos arcillosos, por ejemplo, se retraen y se expanden según las condiciones ambientales presentes (Harris, 2004). Por ello, se ha de elegir bien qué es lo que se va investigar y bajo qué condiciones se expondrá.

VARIABLES medioambientales como la velocidad del viento, la humedad relativa ambiental, la radiación solar o la temperatura influyen de manera directa sobre el proceso de evaporación e infiltración del agua en la estructura del suelo, definiendo la evolución de los patrones de fisuración junto con las condiciones geométricas de la muestra y sus condiciones iniciales en cuanto a composición y contenido de agua (Shokri et al., 2015). Por este motivo la comparación directa entre estudios es complicada, debido a que se necesitarían dos ensayos con pocas diferencias entre sí para concluir que el cambio de cierta característica influye de una u otra manera en el proceso de agrietamiento (Ledezma, 2016).

Conocer el fenómeno de fisuración de cada tipo suelo bajo cada tipo de exposición ambiental podría ayudarnos a prevenir desastres relacionados con la pérdida de resistencia que sufre el terreno tras su agrietamiento y describir los eventos hidrológicos

en él. Adicionalmente, puede identificarse un suelo en términos de composición a partir de los patrones de agrietamiento que presenta según Chertkov y Ravina (2004) y Arnold et al. (2005). Otros estudios, como los realizados por El Maarry et al. (2012), utilizan estos patrones de agrietamiento para concluir con la existencia de agua en Marte en el algún momento de la vida del planeta.

En este estudio, se analizará experimental y numéricamente el comportamiento de una muestra de suelo limo-arcilloso de geometría circular con 80 cm de radio y 20 cm de espesor y un contenido inicial de agua del 30% sin compactar, procedente del Delta del Llobregat bajo condiciones de cámara ambiental a una humedad relativa del 30% y una temperatura ambiente de 20°C. Dicha muestra tendrá un geosintético a 5 cm de profundidad para evitar la precoz fisuración del suelo bajo estas condiciones ambientales.

Otras investigaciones como las llevadas a cabo por Lakshmikantha (2009), Levatti (2015) o Cordero (2019) realizaron ensayos experimentales de desecación de suelos utilizando la misma cámara ambiental con suelos y condiciones similares. La comparación directa de este trabajo con similares realizados anteriormente permitirán estudiar los beneficios y los inconvenientes del geosintético en la muestra de suelo ya que, actualmente, no existen ensayos realizados con dicho material para prevenir la fisuración. Por tanto, es un campo de investigación con mucho terreno por cubrir y del que pueden sacarse conclusiones y soluciones interesantes ante tal fenómeno.

El objetivo principal del trabajo es justificar el uso de geosintéticos para evitar o controlar la fisuración en suelos susceptibles a sufrir este fenómeno, especialmente, en regiones áridas bajo la hipótesis de que dichos geosintéticos serán eficaces al cumplir este funcionamiento. De esta manera, se podrían llevar a cabo ensayos de campo a gran escala con geosintéticos bajo ciclos de desecación y humectación propias del clima natural. La investigación incluye tanto experimentos de laboratorio como un análisis numérico utilizando el programa de elementos finitos Code\_Bright resumidos en la siguiente lista:

- Análisis experimental de muestras a pequeña escala bajo cámara ambiental en presencia de geosintéticos secos, saturados y sin geosintéticos.
- Análisis experimental de una muestra a media escala bajo cámara ambiental aplicando un solo ciclo de desecación bajo una humedad relativa ambiental del



30% y una temperatura de 25°C sobre una muestra de suelo limo-arcilloso con geosintéticos para encontrar patrones de fisuración.

- Análisis fotográfico de los ensayos experimentales llevados a cabo.
- Diseño de un modelo numérico que explique el evento observado en el ensayo experimental teniendo en cuenta el geosintético.

## **1.2 Alcance del trabajo**

El alcance de la investigación abarca una descripción del suelo y el geosintético utilizados a partir de los análisis de Cordero (2019) sobre el terreno del Delta del Llobregat y de la hoja técnica del geosintético. Además, se ha realizado el análisis experimental de la curva de retención del suelo, en contenidos de agua del 18% y 30%, y del geosintético, inicialmente saturado.

El trabajo se centra en el análisis experimental de tres muestras rectangulares a pequeña escala y una muestra circular a media escala bajo condiciones controladas por cámara ambiental con una humedad relativa del 30% y una temperatura de 25°C. Los datos obtenidos en términos de succión y peso en función del tiempo se analizarán junto con las fotografías realizadas del proceso de desecación. Estos resultados se compararán con investigaciones anteriores de características similares como la llevada a cabo por Lakshmikantha (2009). Adicionalmente, se realizará un modelo numérico del ensayo experimental para un estudio más profundo del comportamiento de este tipo de casos.

El conjunto de estos análisis permitirá un mejor entendimiento del proceso de desecación en suelos limo-arcillosos bajo condiciones controladas y con presencia de geosintéticos. De esta manera, también se podrá evaluar su efecto en el proceso de fisuración para su aplicación en aspectos relacionados con la construcción y la ingeniería civil.

## **1.3 Procedimiento y organización**

Este trabajo se ha organizado a partir de nueve apartados con diferentes subapartados, tratando cada uno de los puntos más importantes en la investigación del proceso de desecación de un suelo. El Apartado 1 es la presente introducción donde se justifica la necesidad de investigar el proceso de fisuración del suelo bajo condiciones

atmosféricas, reflejando la motivación y el alcance del estudio, así como los objetivos y la organización.

En el Apartado 2 se presenta el estado del arte describiendo las investigaciones anteriores sobre el tema desde diferentes puntos de vista: experimental, teórico y numérico. Experimentalmente se describen los principales factores que influyen en el proceso de desecación, los tipos de suelos estudiados, las condiciones ambientales bajo las cuales se ha llevado a cabo la investigación, la geometría de la muestra y los resultados obtenidos en cada caso. Desde el punto de vista teórico, se describen las formulaciones básicas de las principales teorías (teoría elástica, Mecánica de Fractura Elástica [MFLE] y resistencia al corte) e interpretaciones (probabilista y determinista). Y, numéricamente, se comentan los criterios utilizados por otros autores y se describe el programa numérico que se utiliza en este trabajo, el programa Code\_Bright, así como los resultados obtenidos anteriormente mediante este software.

En el Apartado 3 se expone la necesidad de investigar en este tema con una breve investigación de las causas que provocan este fenómeno y su evolución en los últimos años. Además, se puntualiza los desperfectos de carácter ingenieril que pueden existir debido a la fisuración de un terreno con ejemplos reales.

El Apartado 4 entra más directamente en el objetivo principal de este trabajo describiendo las propiedades del suelo en términos de origen, localización, composición y caracterización geotécnica. Además, también se describen las características principales del geosintético utilizado en este trabajo desde un punto de vista mecánico e hidráulico.

En el Apartado 5 se presenta el análisis experimental que abarca dos ensayos: uno a pequeña escala y otra media escala. En este capítulo se describen los instrumentos de laboratorio que se utilizan durante la investigación, así como el procedimiento a seguir para la puesta a punto de los ensayos experimentales paso por paso. Por último, se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo y un pequeño apartado de conclusiones y observaciones de esta parte del trabajo.

El análisis numérico se realiza en el Apartado 6 siguiendo una distribución similar al anterior capítulo. Se describe el proceso a seguir en la modelización numérica y se presentan los resultados obtenidos.

En el Apartado 7 se realiza una discusión de todos los resultados obtenidos en ambos análisis comparándolo con los resultados obtenidos por otras investigaciones desde los dos puntos de vista. De esta manera puede evaluarse la presencia del geosintético en el suelo para justificar o no su uso en investigaciones posteriores o en casos reales para mitigar los riesgos ocasionados por el agrietamiento del terreno. Por último, el Apartado 8 expone las conclusiones y observaciones finales del trabajo y el Apartado 9 presenta un listado de las referencias bibliográficas utilizadas.

## **2 Estado del arte**

### **2.1 Introducción**

De acuerdo con Levatti (2015), puede describirse el fenómeno de desecación y agrietamiento de suelos como la pérdida de humedad de la masa de suelo debido a condiciones externas que provocan un cambio de estado en la matriz de este. Como consecuencia, las propiedades del suelo cambian siendo más permeable y menos resistente ante fuerzas externas que conllevan a problemas hidráulicos, geotécnicos y estructurales dentro de la ingeniería civil.

La desecación del suelo se ha estudiado durante años mediante el uso de tres tipos de análisis ya sea de manera individual o en combinación de estos: análisis experimental, análisis teórico y análisis numérico. Cada uno de ellos abarca distintas formas de actuación para conocer con mayor exactitud cómo se comporta un suelo en proceso de desecación, en términos de agrietamiento y retracción, bajo diferentes condiciones de contorno.

La metodología experimental analiza a gran, media y pequeña escala diferentes muestras de suelo bajo distintas condiciones de contorno y con distintas geometrías y características fisicoquímicas. Por lo general, los ensayos a gran escala se llevan a cabo mediante experimentos de campo y los ensayos a pequeña y media escala mediante ensayos de laboratorio. Este tipo de metodología muestra lo más realísticamente posible el comportamiento del suelo ante la desecación del mismo, y permite controlar las distintas variables que afectan al suelo durante dicho proceso, obteniendo diferentes resultados desde distintos puntos de vista. Cabe destacar que los ensayos de campo suelen ser más realistas que los de laboratorio al ser estos a gran escala y simular con mayor precisión la realidad debido a su exposición al medio natural.

Se ha demostrado que la forma del recipiente que contiene y da forma a la muestra de suelo influye directamente sobre su comportamiento frente a ciclos de desecación y humectación, y que incluso el espesor de dicha muestra puede llegar a ser crucial para el ensayo. Investigadores como Nahlawi y Kodikara (2006), Peron et al. (2007), Lakshmikantha (2009) o Costa et al. (2013), entre otros, obtuvieron distintos resultados trabajando con distintas formas, dimensiones y espesores. Por otro lado, Rodríguez (2002) halló que características como la resistencia a tracción del suelo también

dependen de las condiciones iniciales en términos de porcentaje de humedad y grado de saturación de la muestra.

La metodología teórica se basa en la interpretación del comportamiento del suelo mediante el uso de diferentes ecuaciones que, generalmente, se presentan en derivadas parciales. Esta metodología intenta explicar lo que el ojo observa en el papel dándole un significado y un valor a cada variable considerada para llegar a una serie de resultados. Investigadores como Lachenbruch (1961), Morris et al. (1992) y Abu-Hejleh y Znidarcic (1995) han utilizado teorías como la teoría de la elastoplasticidad, la mecánica de la fractura lineal elástica [MFLE] y la resistencia al corte para llevar a cabo sus investigaciones.

Por último, la metodología numérica, casi siempre ligada con la metodología teórica, presenta los recursos que pueden ser utilizados para la resolución de las ecuaciones de la manera más rápida y precisa posible. Por ejemplo, el método de los elementos finitos [MEF] es un método numérico capaz de resolver sistemas de un gran número de ecuaciones con un gran número de variables como ocurre con el estudio de los suelos de manera muy aproximada. Actualmente, el análisis numérico ha mejorado exponencialmente permitiendo utilizar nuevos métodos de captura y desarrollo de información como el uso de georadares (GPR) que captan imágenes del desarrollo de las grietas en una muestra para su postproceso mediante el MEF. Por ejemplo, Prat et al. (2002, 2013), Aruna y Kodikara (2011), Trabelsi et al. (2012) y Levatti et al. (2017), entre otros, son ejemplos del uso de nuevos métodos de análisis numérico donde los dos últimos basan dicho análisis en un estudio fotográfico de la muestra.

Los siguientes apartados muestran el estado del arte de cada metodología definida con un análisis y una comparación de las investigaciones llevadas a cabo por distintos autores, además de los ya nombrados. La primera parte, correspondiente a la parte experimental, presenta las variables involucradas, los tipos de suelos y los tipos de recipientes que se utilizan tanto en los ensayos de campo como de laboratorio. Se describirán los diferentes resultados obtenidos por otros investigadores observando con qué suelo, qué recipiente y qué condiciones de contorno han utilizado para obtenerlos. Dentro de los resultados que se observarán están los correspondientes a retracción, agrietamiento, resistencia a tracción, influencia de las condiciones de contorno y del espesor de la muestra, e influencia de los geosintéticos. La parte teórica mostrará la formulación base mediante la teoría de la elastoplasticidad, la MFLE y la resistencia al

corte. Además, se estudiarán las interpretaciones probabilista y determinista del problema para la previsión de patrones de agrietamiento en la muestra. Y, por último, la parte numérica mostrará los criterios y el método de los elementos finitos en las que se basará esta investigación para obtener resultados mediante el uso del programa Code\_Bright.

## **2.2 Análisis experimental**

Desde las primeras investigaciones relacionadas con la fisuración del suelo que datan de principios del siglo XX, se han ido ejecutando diferentes ensayos experimentales para el estudio de este fenómeno utilizando distintos tipos de suelo, distintos recipientes, distintas condiciones de contorno, etc. Con todo esto se ha intentado encontrar relaciones cualitativas y cuantitativas entre las variables que intervienen en el agrietamiento del suelo para encontrar una manera de anticipar y prevenir el proceso.

A continuación, se describen los distintos puntos a tener en cuenta a la hora de realizar un ensayo experimental de este tipo y cómo estos afectan a los resultados obtenidos.

### **2.2.1 Variables involucradas**

Se han identificado numerosas variables que influyen tanto en el agrietamiento como en la retracción de los suelos estudiados y las cuales se definen como condiciones ambientales, geométricas, químicas y físicas. Más concretamente, la temperatura, la humedad relativa ambiental, el contenido de agua de la muestra, la geometría de la muestra, su espesor, el tipo de suelo y su composición, el nivel freático, la radiación solar, el viento, el grado de compactación y la historia del suelo son los principales factores que afectan a su comportamiento frente a desecación y que explican dicho fenómeno.

Los experimentos llevados a cabo por Corte y Higashi (1960) estudiaron el efecto de los espesores de las muestras, la densidad inicial, el material del recipiente contenedor y la velocidad de secado sobre el suelo. De hecho, los autores diferencian las variables como extrínsecas, factores externos como el nivel freático o los factores ambientales, e intrínsecas, factores propios de la muestra de suelo como su geometría o su contenido de agua, para explicar el fenómeno.

Por otro lado, Nahlawi y Kodikara (2002, 2006) y Peron et al. (2009) también estudiaron el efecto que tiene el material del recipiente contenedor sobre la muestra analizando el fenómeno del arqueado (“curling”) en suelos arcillosos muy plásticos. Realizaron una comparación de los resultados obtenidos utilizando diferentes materiales en los recipientes para evaluar el efecto de la adherencia reducida sobre muestras con espesores similares.

En cuanto a la forma del recipiente y las condiciones ambientales, Ávila (2004), Lakshmikantha (2009) y Cordero (2019) usaron diversos tipos de recipientes en cuanto a su forma y su espesor, y utilizaron una cámara ambiental para poder establecer las condiciones bajo las cuales se secará el suelo y poder relacionarlo con los resultados. Con ellos se cuantifican parámetros y propiedades de fractura y se cuantifica la relación entre resistencia a tracción y succión.

### **2.2.2 Tipos de suelos**

La naturaleza del suelo determina su fisuración y deformación frente a desecación, fenómeno que es más presente en suelos arcillosos y limo-arcillosos y no en suelos arenosos, los cuales no presentan agrietamiento, generalmente. Los tipos de suelos analizados son variados y todos ellos son propensos a agrietarse ante cambios en su contenido de agua.

Corte y Higashi (1960) trabajaron con un suelo arcilloso (Bloomington Till) de Illinois (EUA). Lau (1987) analizó suelos arcillosos en Canadá (Regina Clay y Indian Head Till, este último proveniente de un sedimento glacial). Peron et al. (2009) estudiaron el comportamiento de suelos arcillosos y limo-arcillosos de Suiza (La Frasse Clay, Biolet Silt y Sion Silt).

Por otro lado, también se ensayaron suelos de relave como el estudiado por Rodríguez et al. (2007), el cual pertenece a los residuos industriales de una antigua mina y contiene metales pesados que hacen que su densidad sea bastante más alta que la de los suelos convencionales. La investigación presenta un análisis experimental y numérico de este tipo de suelos descentrando el problema de los suelos naturales.

La arcilla expansiva del noreste de Melbourne (Merri Creek clay), un suelo muy denso y pegajoso de colores oscuros, fue analizada por Chan et al. (2007) y Costa et al. (2013) bajo distintas condiciones de contorno, geometrías y espesores. Las arcillas reactivas del oeste de Melbourne (Werribee clay), las cuales presentan un gran potencial de

retracción y expansión, fueron estudiadas por Kodikara et al. (2004), Nahlawi et al. (2004) y Nahlawi y Kodikara (2006) en recipientes contenedores cuadrados y circulares con espesores de 10, 20 y 30 mm.

De hecho, el contenido de arcilla en una muestra de suelo ha sido utilizado para analizar el comportamiento de la muestra con contenidos de arcilla distintos. En este caso, se han utilizado distintos contenidos de caolinita en Cordero et al. (2017) para analizar las muestras en términos de deformación – tensión vertical, contenido de agua y succión demostrando su efecto sobre estas características.

Por último, suelos arcillosos españoles procedentes de la ciudad de Barcelona (Barcelona Silty clay) analizada por Barrera (2002), también han sido estudiados bajo la acción de lámparas de calor y dentro de cámara ambiental por Lakshmikantha (2009) en recipientes rectangulares y circulares de diferentes espesores. Este tipo de suelo también fue utilizado por Levatti (2015), Cuadrado (2018) y Cordero (2019) donde en este último también se analizó la arcilla proveniente del delta del río Llobregat en Cataluña (Agropolis silty clay).

### **2.2.3 Tipos de recipientes**

Los recipientes que contienen las muestras de suelo varían en geometría, espesor y tipo de material según la propiedad que quiera investigarse más a fondo. Existen contenedores de geometrías rectangulares y circulares obteniendo muestra prismáticas y cilíndricas, respectivamente, con diferentes espesores. Estos contenedores pueden ser pequeños y utilizarse en laboratorio o pueden ser lo suficientemente grandes como para utilizarse en ensayos de campo expuestos al clima natural. Por otro lado, los materiales, que pueden ser vidrio, madera o un tipo de plástico como el PVC, así como la rugosidad de la base también son un dato relevante.

De hecho, las bandejas más pequeñas han sido las más utilizadas debido a la facilidad de preparación y transporte y a la necesidad de hornos y cámaras ambientales de menor tamaño. Corte y Higashi (1960) utilizaron bandejas rectangulares de 60×84×7 cm y 87×122×15 cm, mientras que Lau (1987) usó un solo tipo de bandeja cuadrada de 61×61×7.6 cm para los dos tipos de suelos analizados. Lakshmikantha (2009) utilizó bandejas rectangulares de diferentes tamaños (A0 hasta A4) y, además, también utilizó bandejas circulares de diámetro-espesor de 80×20 cm, 80×10 cm, 40×10 cm y 20×5 cm bajo condiciones ambientales de laboratorio, cámara ambiental y lámparas de calor.



Levatti (2015) también utilizó bandejas rectangulares de tamaños A0 hasta A4 con un espesor de 1 cm y bandejas circulares de PVC de un tamaño diámetro-espesor de 40×10 cm bajo lámparas de calor. Cuadrado (2018) reprodujo un modelo numérico para una muestra circular de 40×10 cm y Cordero (2019) utilizó una bandeja circular de 80×10 cm para sus ensayos de laboratorio y una bandeja cuadrada de 3×3×0.5 m para su ensayo de campo.

Sin embargo, también se han utilizado recipientes menos convencionales como los utilizados por Ávila (2004) y Ávila et al. (2013) los cuales tienen forma prismática de doble T y donde es posible identificar fisuras primarias, secundarias y terciarias e identificar los mecanismos de tensión que producen dichas grietas. Lakshmikantha (2009) y Lakshmikantha et al. (2012) estudiaron una muestra en forma de reloj de arena, como la mostrada en la Figura 2.1, observando las fisuras en la parte más estrecha de la probeta.

En otros casos, se intenta simplificar el análisis de la fisuración del suelo mediante el uso de bandejas rectangulares con una relación largo-ancho grande, 1:10 aproximadamente, para forzar la aparición de grietas en una sola dirección. Es el caso de las investigaciones realizadas por Nahlawi y Kodikara (2006) y Peron et al. (2009).

En cuanto al material utilizado en el recipiente contenedor, se intentan evitar las restricciones que causarían los materiales de alta adherencia ya que influirían en el proceso de agrietamiento del suelo. Corte y Higashi (1960) utilizaron bandejas con base de madera y de vidrio, Nahlawi y Kodikara (2006) utilizaron plexiglás y otros autores como Lakshmikantha (2009), Levatti (2015) o Cordero (2019) optaron por bandejas de PVC.

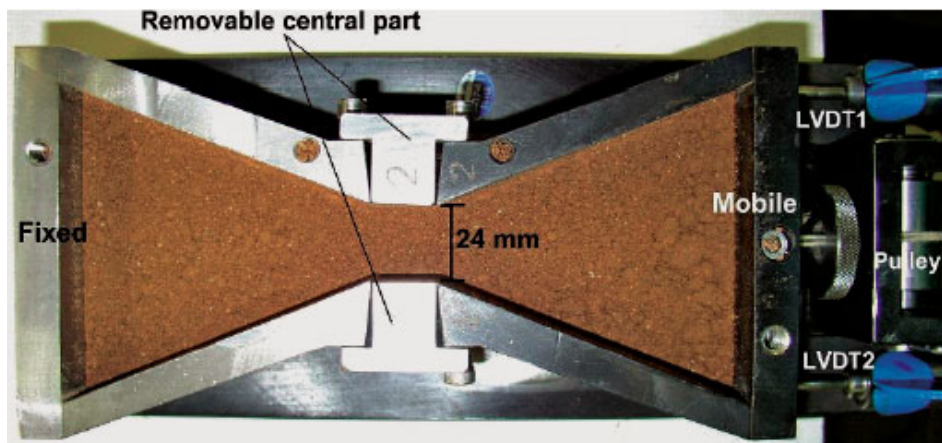


Figura 2.1. Fotografía de la probeta tipo utilizado en el estudio, (Lakshmikantha et al., 2012).

Existe una mayor presencia de geometrías sencillas como las rectangulares y las circulares, así como dimensiones más o menos equilibradas. Los espesores varían en mayor y menor medida, mientras que los materiales utilizados en general son materiales plásticos con poco coeficiente de rozamiento como el PVC, aunque se utilizan componentes antiadherentes en algunos casos, como por ejemplo en Nahlawi y Kodikara (2006), para disminuir dicho coeficiente y evitar su influencia sobre los resultados.

## **2.2.4 Resultados de laboratorio**

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en diferentes ensayos relacionados con la fisuración del suelo en términos de retracción y agrietamiento, influencia de la compactación, resistencia a tracción de las muestras e influencia en los resultados de lo expuesto anteriormente como las condiciones iniciales y de contorno, el espesor y la presencia de geosintéticos.

### **2.2.4.1 Contenido de agua**

Los fenómenos de retracción y agrietamiento están directamente relacionados con el contenido de agua del suelo. Durante el proceso de secado, el terreno pierde agua debido a las condiciones ambientales, pero este proceso puede ser distinto dependiendo de diversos factores.

Levatti (2015) utilizó una bandeja circular de 40×10 cm obteniendo resultados en términos de succión y contenido de agua en la muestra. En cuanto a la succión, esta aumenta con el paso del tiempo a medida que la muestra se va secando a una humedad relativa ambiente del 30%, disminuye su tendencia ascendente al humedecerse y bajando a valores negativos cuando se inunda. Por otro lado, en cuanto al contenido de agua, durante el proceso de secado cada célula de carga llega a perder 4 kg de agua, disminuyendo así el contenido de agua de la muestra y favoreciendo la fisuración.

El mismo tipo de ensayo fue ejecutado por Lakshmikantha et al. (2018) utilizando la misma bandeja, misma cámara ambiental y mismo tipo de suelo. Sin embargo, el procedimiento consistió en un solo ciclo de secado al 40% de humedad relativa obteniendo los resultados de pérdida en contenido de agua y succión de las Figuras 2.2 y 2.3, respectivamente. Pueden observarse las condiciones ambientales durante el ensayo en la misma Figura 2.2.

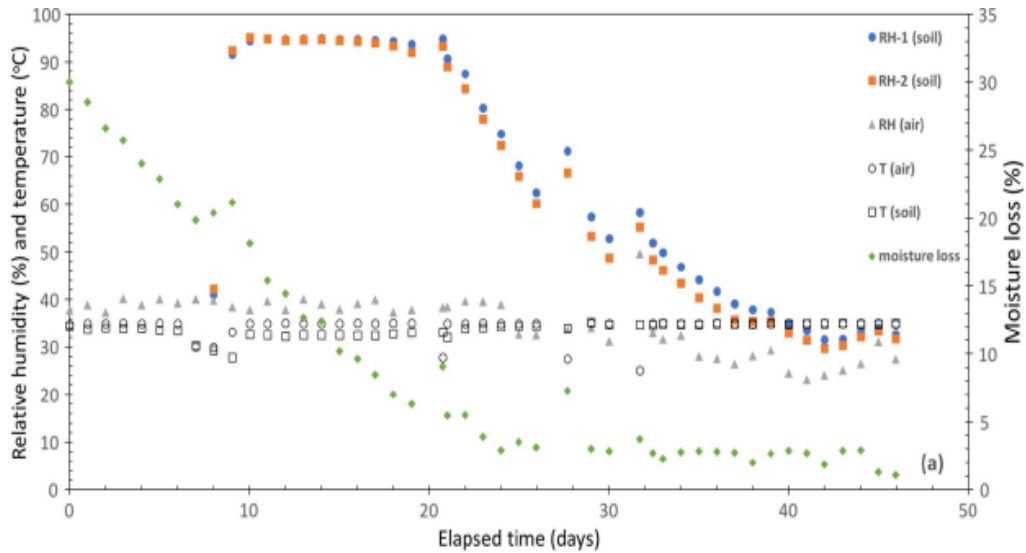


Figura 2.2. Evolución temporal de la humedad relativa del suelo y ambiental y de la temperatura de la cámara sobre una muestra circular de 40x10 cm, (Lakshmikantha et al., 2018).

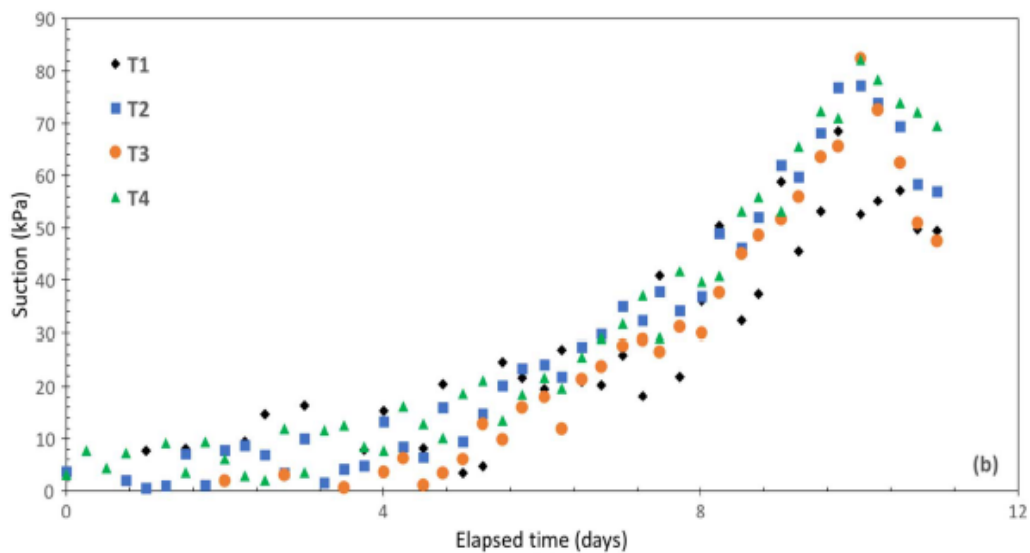


Figura 2.3. Evolución temporal de la succión de una muestra circular de 40x10 cm, (Lakshmikantha et al., 2018).

Ambos ensayos llegan a una diferencia en sus resultados relacionada con el tiempo transcurrido hasta alcanzar una pérdida de humedad o de peso estable en la muestra, el cual varía debido a que las condiciones ambientales y los ciclos de secado y humectación son distintos. Todo esto pese a que el resto de características son iguales, demostrando la sensibilidad de las muestras ante cualquier diferencia en su entorno. Sin embargo, en términos de succión parecen comportarse de manera similar en la etapa del primer secado, durante las primeras dos semanas de ensayo.

Por tanto, el contenido inicial de humedad del suelo es uno de los factores principales a tener en cuenta y el cual variará de una manera o de otra según las condiciones de investigación. La disminución de este y el aumento de la succión favorecen la aparición de fisuras en el suelo.

#### **2.2.4.2 Compactación**

El grado de compactación afecta a los resultados obtenidos en términos de humedad del suelo y succión, así como al tiempo a transcurrir para la aparición de la primera fisura.

En los ensayos de Corte y Higashi (1960) se observó por primera vez este fenómeno al estudiar una muestra compactada y una muestra suelta del mismo tipo de suelo demostrando que la curva de la variación en el contenido de humedad del suelo varía de forma distinta en cada caso, siendo parabólica para el caso de suelo compactado y lineal para el caso de suelo suelto. Además, Corte y Higashi (1960) también demuestra que el tiempo transcurrido para la aparición de la primera fisura varía linealmente con el espesor cuando el suelo está compactado y asintóticamente cuando el suelo no lo está.

Por otro lado, en Demagistri et al. (2018) se exponen de forma directa los efectos del tipo de compactación en la fisuración de suelos arcillosos obteniendo que la aparición de fisuras en muestras con un distinto contenido de agua inicial (12%) habiéndose compactado en la rama seca favorece la aparición de fisuras a temprana edad. De hecho, la misma muestra con un contenido de humedad inicial del 21%, compactada en la rama húmeda, no muestra prácticamente fisuras a excepción del contorno de la bandeja. Además, los mismos autores observan que la velocidad de secado es siempre más alta para un contenido de humedad inicial más elevado y concluyen que el contenido de humedad inicial en la muestra es de suma importancia, así como la forma de compactar el suelo ya que, según se compacte en la rama seca o en la rama húmeda, presenta un comportamiento distinto en el tiempo a transcurrir para la aparición de fisuras.

#### **2.2.4.3 Resistencia a tracción**

La resistencia a tracción es muy importante para explicar el fenómeno de fisuración y, de hecho, es una de las características más analizadas por autores como Baker (1981), Morris et al. (1992), Abu-Heijleh y Znidarcic (1995), Ayad et al. (1997), Tang y Graham (2000), Ávila (2004), Lakshmikantha (2009), Lakshmikantha et al. (2018) o Cordero (2019).

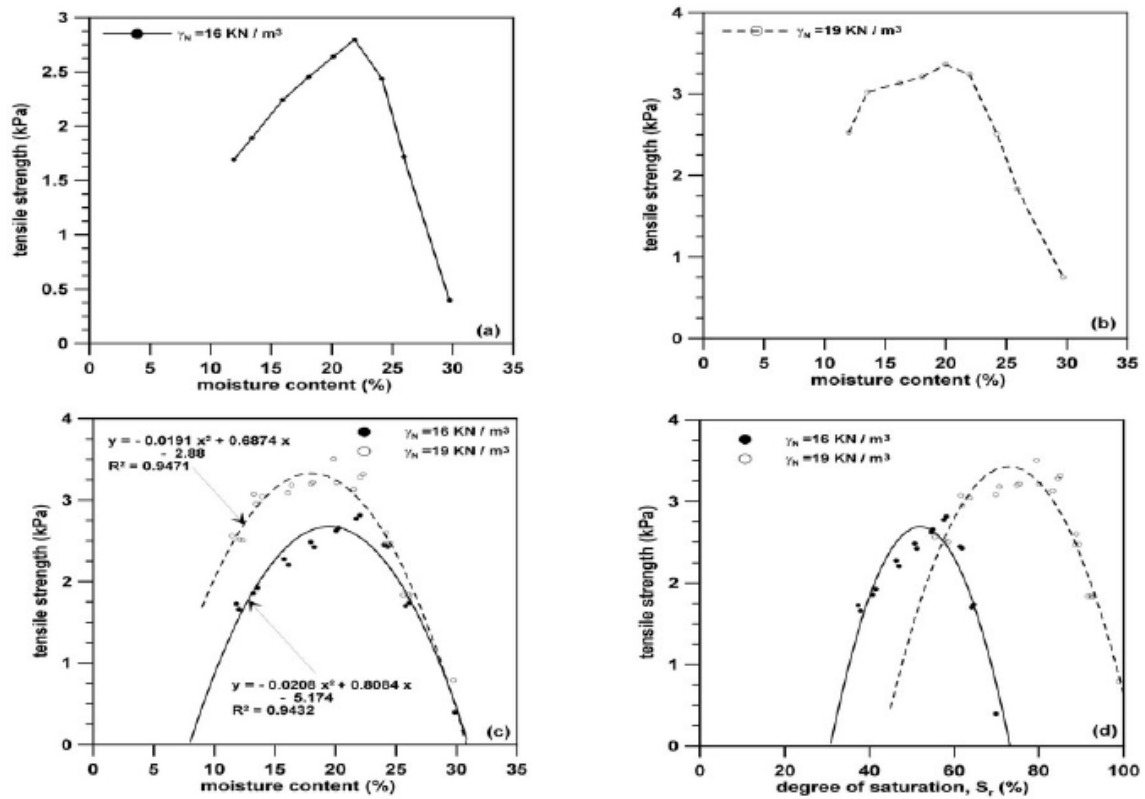


Figura 2.4. Relación entre el contenido de humedad y la resistencia a tracción de muestras con distinta densidad específica, (Lakshmikantha, 2009).

Describiendo algunos de ellos, se destaca a Ávila (2004) por sus ensayos de compresión unidimensional en cámara triaxial para reproducir trayectorias de tensiones previas a la rotura por tracción. De esta manera, se obtienen resultados de resistencia a compresión y a tracción para el estudio del agrietamiento.

Por otro lado, Lakshmikantha (2009) llevó a cabo ensayos directos, que consisten en someter una probeta a tracción aplicando dos fuerzas en la misma dirección y sentido opuesto, e indirectos, que consisten en someter una probeta a compresión o flexotracción dando lugar a tracciones en una de sus caras, para determinar la resistencia a tracción de las muestras de suelo y ensayos de tenacidad a fractura teniendo en cuenta la influencia de la variación del contenido de agua del suelo durante la desecación. En la Figura 2.4 puede observarse que existe una relación parabólica entre el contenido de agua y la resistencia a tracción donde dicha resistencia varía en función de la succión y la presión de poros en la muestra y donde existe un pico de máxima resistencia distinto para cada densidad específica.

#### ***2.2.4.4 Influencia de las condiciones iniciales y de contorno***

Como se ha presentado anteriormente, las condiciones geométricas de la muestra, ya sea en forma, tamaño o espesor, y las condiciones iniciales, como el contenido de agua inicial, influyen directamente en los resultados obtenidos tanto en términos de contenido de agua como de succión y deformación. Se comentan a continuación varios resultados obtenidos en estos términos para apreciar el efecto de la geometría y el resto de condiciones.

Lakshmikantha et al. (2012) obtuvieron diferentes resultados, en términos de deformación, según el contenido de agua inicial, la longitud de la fisura inicial y el tamaño, para tamaños medios y grandes. Sus resultados muestran deformaciones y cargas más pequeñas para longitudes de fisura iniciales más grandes y la deformación elástica es mayor con un mayor contenido de agua inicial. Sin embargo, con un contenido inicial de agua del 19%, que se aproxima al óptimo, se observa un comportamiento tensional similar para longitudes de fisura inicial de 10 y 15 mm. En cuanto a probetas de gran tamaño, existe una afección en la deformación elástica, siendo esta menor en comparación con muestras de tamaño medio, y en la deformación plástica donde, según el tamaño de la fractura y el contenido de agua inicial, puede existir más o menos deformación de este tipo. Así pues, el tamaño de la muestra define el comportamiento del suelo en las gráficas carga-deformación en términos de carga máxima aplicable, deformación elástica, deformación plástica y punto de rotura.

En estudios con formas más comunes también se encuentran diferencias de resultados relacionadas con el tamaño y el espesor de las muestras. Lakshmikantha et al. (2018) obtuvieron resultados de la variación del contenido de agua en función del tiempo en muestras de suelos de diferente tamaño y espesor. Las muestras tenían dimensiones DIN-A0, A1, A2, A3 y A4 con espesores de 10 y 20 mm para cada caso. En sus ensayos se observó que el contenido de humedad disminuye a diferentes ritmos según el caso observándose como tamaños más grandes (A0) con menor espesor se secan más rápido debido al mayor área de evaporación y su menor dimensión vertical. De hecho, las muestras de 10 mm de espesor se secan más rápido casi independientemente de su tamaño.

Lakshmikantha (2009) también obtuvo un patrón de fisuración que cambia según dichas variables existiendo más fisuración en las muestras de menor espesor, resultados que

coinciden con los obtenidos por Lakshmikantha et al. (2018) para muestras circulares de espesores de 4, 8 y 16 mm. Las muestras de menor espesor presentan un mayor número de celdas al final del proceso de desecación, con lo cual el tamaño de las celdas es bastante menos que con muestras de mayor espesor. Por tanto, se encuentra una relación directamente proporcional entre el tamaño final de celda y el espesor, ya que mientras más gruesa sea la muestra, más grandes serán las celdas finales. Lo mismo ocurre en probetas circulares, de hecho, la diferencia es mucho más notable. Sin embargo, se observa que las muestras circulares muestran celdas más grandes que las muestras rectangulares comparando probetas del mismo espesor.

Además, este último estudio también encontró una relación entre el patrón de agrietamiento y la superficie inferior de la bandeja donde se observa más fisuración en superficies planas sin relieve mientras que una superficie rugosa cuadrículada muestra menos debido a que el coeficiente de rozamiento en cada caso es distinto e influyen sobre el suelo. En muestras rectangulares no se han realizado ensayos con bandejas que tengan una superficie inferior distinta para poder conocer qué efectos causa sobre este tipo de geometrías. Sin embargo, se espera que se aprecien diferencias notorias en el patrón de agrietamiento, aunque dicho patrón sea distinto que el observado en las bandejas circulares.

Más diferencias relacionadas con el patrón de agrietamiento pueden observarse en los ensayos de Nahlawi y Kodikara (2006) los cuales mostraron una tendencia en la orientación de la fisura cuando las muestras tenían una forma determinada: rectangulares con un costado varias veces mayor al otro. El espesor de las muestras también fue analizado en el estudio de Costa et al. (2013) donde también se confirmó una pérdida de humedad más rápida en muestras de poco grosor.

La succión también es una característica del suelo que se ve afectada por las condiciones de contorno e iniciales de la muestra. En Levatti et al. (2019) se analiza la succión en muestras circulares de distinto diámetro y espesor bajo condiciones de laboratorio y bajo cámara ambiental. Sus resultados muestran como la cámara ambiental permite un secado más rápido y, por tanto, un más rápido aumento de la succión. Por otro lado, el efecto del tamaño de las muestras es más notable en condiciones de laboratorio donde una probeta más grande sufre un aumento de succión mucho más lento. En la cámara ambiental, las diferencias no son tan notables, aunque las muestras más pequeñas vuelvan a tener succiones, esta vez, ligeramente más elevadas.

#### **2.2.4.5 Geosintéticos**

Actualmente, no existen ensayos ni pruebas realizadas en muestras de suelos con geosintéticos con el fin de controlar su fisuración. Sin embargo, el uso de geosintéticos es conocido y está presente en la prevención de la fisuración del asfalto, para la estabilización de taludes o para aumentar la resistencia del suelo en otros aspectos.

TexDelta (2019) explica las ventajas de los geotextiles en su aplicación en el pavimento vial mejorando la filtración, el refuerzo, el drenaje y la erosión de las vías vehiculares. También se muestra su función en otros tipos de obra, siendo los caminos, los terraplenes y los depósitos de líquidos o desechos los que más hacen uso de geosintéticos para mejorar su funcionamiento. De hecho, tal y como se comentará en el Apartado 3, el uso de geosintéticos en el terreno estaría pensado, principalmente, para evitar la fisuración, el fallo de los terraplenes y el mal funcionamiento de los vertederos.

Por otro lado, existen diferentes tipos de geosintéticos, según Interempresas (2010), de manera que pueden usarse según se necesite:

- Geotextiles: fabricados de fibras sintéticas como el poliéster o polipropileno. Estos materiales son flexibles y permeables a los fluidos y capaces de retener partículas de suelo mayores que el tamaño de sus poros.
- Geomallas: se trata de estructuras tridimensionales, pero con la característica de ser mono- o bi-orientadas. Están fabricadas en polietileno de alta densidad, utilizando un proceso de extrusión, y presentan una mayor adherencia al terreno y una mayor durabilidad en el medio que los geotextiles. Se pueden emplear en muros de contención o terraplenes.
- Geomembranas: las geomembranas son láminas poliméricas impermeables fabricadas en cloruro de polivinilo (PVC) o polietileno de alta o baja densidad (PEAD/PEBD). Se trata de recubrimientos sintéticos impermeables a fluidos y partículas cuya función es la de revestir canales, lagunas, depósitos de agua, además de controlar la erosión. Estas geomembranas se instalan en depósitos de hormigón o acero de cualquier dimensión para confinamiento de químicos, residuos sólidos o químicos e industriales y prolongar la duración de los tanques.
- Geocompuesto: este tipo de geosintético está especialmente diseñado para la estabilización de suelos donde se requiere tanto refuerzo como separación de una base granular y un subsuelo muy fino.



- Geoceldas: son sistemas tridimensionales de confinamiento celular fabricadas en paneles de polietileno o polipropileno. Resistentes para el confinamiento de cargas, se emplean para aumentar la capacidad de carga del suelo, sin generar problemas de contaminación y beneficiando al entorno ecológico. Pueden emplearse para la protección de taludes y de suelos áridos.

### 2.2.5 Resultados de campo

Un ejemplo de ensayo de campo es el llevado a cabo por Cordero et al. (2018) y Cordero (2019) donde se utilizó una bandeja de 3×3×0.5 m, cuyo volumen era de 4.5 m<sup>3</sup>. Los ensayos a esta escala representan más exactamente el comportamiento real de un suelo al acercarse más al escenario real y al estar bajo condiciones climáticas totalmente naturales.

Se registraron las lluvias y el viento mediante una estación climática y se obtuvieron resultados sobre el contenido de agua de la muestra durante un año. Cordero (2019) obtuvo los resultados mostrados en la Figura 2.5 donde puede observarse un descenso continuado en el contenido de humedad del suelo a medida que pasa el tiempo y donde dicha humedad ascendía conforme se registraban precipitaciones, especialmente, entre los días 250 y 280 donde las lluvias fueron muy intensas y produjeron un aumento del contenido de agua bastante grande. Los ciclos de secado y humectación no son tan homogéneos como en los ensayos de laboratorio donde estos se controlan en intensidad y tiempo.

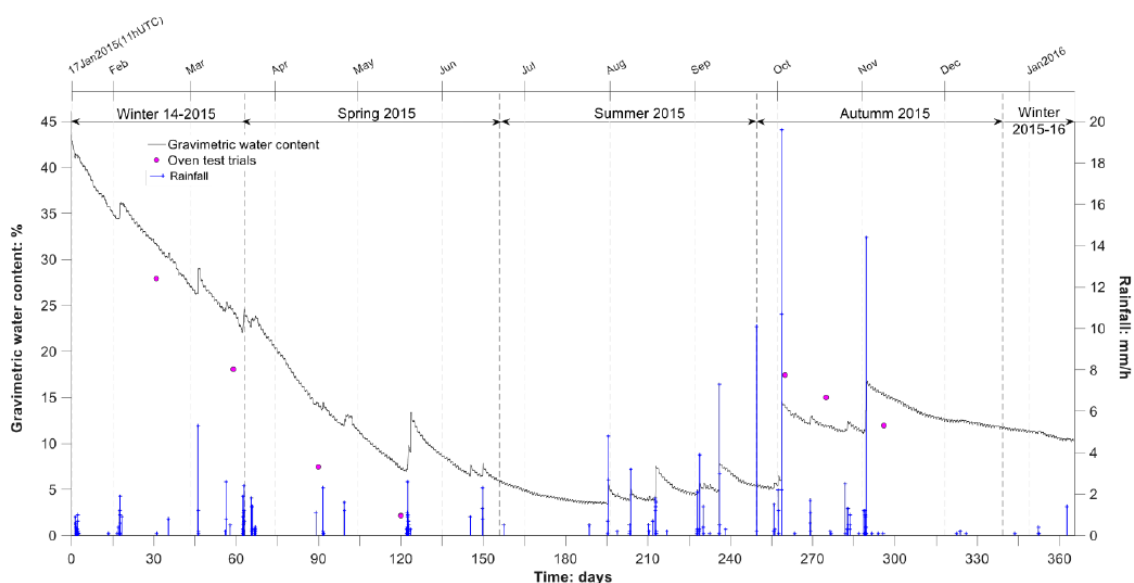


Figura 2.5. Evolución del contenido de agua y precipitación durante el ensayo de campo, (Cordero, 2019).

Más concretamente, durante los primeros 10 días de experimento se observaron cambios tanto en el contenido de agua como en la succión de la muestra. Cordero et al. (2018) observaron una curva de tendencia similar a las obtenidas en cámaras ambientales y bajo condiciones de laboratorio en suelos de características similares como la arcilla de Barcelona. El estudio se centra en el primer ciclo de secado, antes de la primera precipitación, donde se observa una pérdida de agua más notable a 25 cm de profundidad, aunque la succión sea bastante estable independientemente de la profundidad.

En términos de succión, su variación a lo largo del tiempo también depende directamente de los eventos de lluvia que hayan ocurrido. Existe una variación de la succión en función del tiempo a lo largo del año de ensayo con un aumento de la succión conforme se secaba la muestra, una disminución de esta con la profundidad y que, dicha succión, también disminuía en eventos de mucha precipitación que afectaban sobre todo a los sensores de succión que se encontraban a menor profundidad, así pues, los sensores situados a 15 y 25 cm de profundidad muestran varios puntos de disminución de la succión. Sin embargo, los cambios en la succión durante los ciclos de humectación ocurren más rápido que en los ciclos de secado.

### **2.2.6 Análisis de imagen mediante radar**

Otro tipo de análisis experimental es el de imágenes, que no está basado en los datos numéricos recogidos por diferentes sensores, sino que se basa en la toma de imágenes por medio de un radar de penetración terrestre a lo largo del tiempo para un estudio visual de la muestra y que, además, puede llegar a hacer uso de diferentes softwares de radar para detectar la forma y profundidad de la fisura que se observa tanto superficial como profundamente. Un ejemplo es el georadar [GPR], utilizado por Prat et al. (2013), Levatti (2015) y Levatti et al. (2017), el cual es una técnica no invasiva de auscultación que utiliza pulsos electromagnéticos para detectar superficies reflectantes en el interior del suelo permitiendo detectar objetos enterrados, estratigrafía y otras características a poca profundidad proporcionando perfiles continuos en tiempo real del interior del terreno.

El equipo consiste en un sistema informático de control conectado a las antenas que escanean la masa en estudio para producir un perfil continuo del subsuelo. Dichas antenas se complementan, una emite el pulso electromagnético y la otra lo recibe tras

rebotar este sobre los objetos o discontinuidades del terreno. Con ello se obtienen el perfil de las fisuras de una muestra de suelo a poca profundidad, permitiendo el estudio de esa fisura sin necesidad de romper la muestra tras su secado de esta. La onda reflejada es distinta a la emitida debido a las variaciones en contenido de agua, densidad y discontinuidades estratigráficas. La profundidad y la resolución del método son magnitudes inversamente proporcionales, es decir, un aumento de la frecuencia en la antena para obtener mayor resolución disminuiría la profundidad de penetración de la onda. El funcionamiento del georadar se basa en las ecuaciones de Maxwell y en las ecuaciones constitutivas (Gómez-Esteban, 2012).

Se ha demostrado mediante estudios llevados a cabo por Knoll y Knight (1994) que, para frecuencias usuales de GPR, la permitividad eléctrica y la conductividad eléctrica de un suelo aumentan con el grado de saturación y se ven afectadas por el tamaño de las partículas y la porosidad.

Los resultados obtenidos por Levatti (2015) han sido procesados por dos softwares de post-proceso distintos: el software online StructureScan Viewer y el software RADAN 6.6. Un ejemplo tipo del análisis por medio del primer software se muestra en la Figura 2.6 donde se observa la evolución de un perfil de la muestra para los días 1, 8, 15, 22 y 29 del ensayo. De hecho, en estos dos últimos días se puede observar la aparición de un patrón que marca la existencia de grietas.

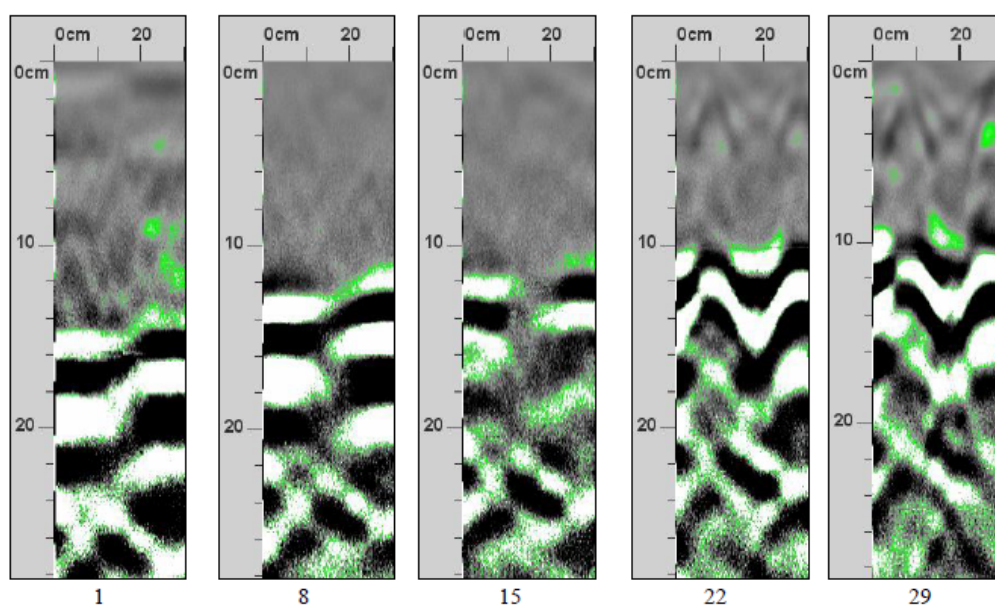


Figura 2.6. Evolución del perfil de la muestra para los días 1, 8, 15, 22 y 29 del ensayo, (Levatti, 2015).

Por otro lado, el software RADAN 6.6 permite la visualización en tres dimensiones de todas las trayectorias realizadas por el sistema. La zona de estudio corresponde a un prisma rectangular de 30x30x10 cm durante el inicio del ensayo y se visualizan en él dos perfiles y el post-proceso de una sección horizontal de manera simultánea para lograr así una visión 3D. Levatti (2015) explica los pasos a seguir para navegar a través del software RADAN 6.6 para una mejor observación de los resultados obtenidos tras el post-proceso. Las herramientas de este software son similares a los programas de Autodesk® por lo que resulta fácil su manejo.

## **2.3 Análisis teórico**

Se presenta un análisis de varios autores que han estudiado el problema de fisuración del suelo desde un punto de vista teórico. Principalmente, los estudios de Lachenbruch (1961), Morris et al. (1992) y Konrad y Ayad (1997) explican las principales teorías basándose en soluciones analíticas de elasticidad y fractura, y en el estudio del flujo en medio poroso y la MFLE. También se distinguen en este apartado los diferentes enfoques con los que se estudia el fenómeno de agrietamiento en suelos arcillosos: enfoque probabilista y enfoque determinista.

### **2.3.1 Formulación base**

En el estudio de Morris et al (1992) se utilizan tres métodos para la derivación de las expresiones de tensión horizontal que actúan en un modelo de fracturación: la teoría de la elastoplasticidad, la mecánica de fractura lineal elástica [MFLE] y el análisis de rotura basado en la resistencia al corte. La profundidad de agrietamiento se deduce con la resistencia a tracción del suelo considerando a éste como parcialmente saturado y teniendo en cuenta las formulaciones de Fredlund y Morgenstern (1977) y Fredlund (1979).

#### ***2.3.1.1 Teoría de la elasticidad***

Según Morris et al. (1992) existen tres expresiones para obtener la profundidad de la grieta según las consideraciones tomadas al respecto:

- Tomando la succión y la resistencia a tracción como constantes, se puede obtener la profundidad de la grieta mediante la Ecuación 2.1:

$$z_c = \frac{1 - 2\nu}{\nu\gamma} s_o + \frac{1 - \nu}{\nu\gamma} t \quad (2.1)$$

donde  $z_c$  = profundidad calculada de la grieta;  $t$  = resistencia a tracción;  $s_o$  = valor constante de succión;  $\nu$  = coeficiente de Poisson; y  $\gamma$  = peso específico del suelo.

- Tomando la succión como lineal reduciéndose con la profundidad y la resistencia a tracción como constante, se puede obtener la profundidad de la grieta mediante la Ecuación 2.2:

$$z_c = \frac{s_o + \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} t}{\frac{s_o}{W} + \frac{\nu\gamma}{1 - 2\nu}} \quad (2.2)$$

donde  $W$  = profundidad del nivel freático desde la superficie.

- Tomando la succión y la resistencia a la tracción como variables en función de la succión matricial en la punta de la grieta, se obtiene la profundidad de la grieta mediante la Ecuación 2.3:

$$z_c = \frac{s_o}{\frac{s_o}{W} + \frac{1 - 2\nu - 0.5(1 - \nu) \tan(\phi^b) \tan(\phi') \cot(\phi')}{\nu\gamma}} \quad (2.3)$$

donde  $\phi^b$  y  $\phi'$  = ángulos de la envolvente de rotura en condiciones no saturadas.

La succión depende del nivel freático y se compara la resistencia a tracción del suelo con la tensión horizontal actuante, la cual es función del módulo de elasticidad y del módulo de elasticidad debido a succión.

### 2.3.1.2 Mecánica de fractura lineal elástica

Esta vez, Morris et al. (1992) comparan el factor de intensidad de tensiones del modo I de rotura y el factor de intensidad de tensiones crítico. El primero se calcula a partir de la tensión horizontal actuante, la cual varía con la profundidad, y el segundo es una propiedad material que se calcula a partir de la energía de superficie.

El factor de intensidad de tensiones para el modo I se obtiene a partir de la expresión para la tensión horizontal en la dirección perpendicular a la grieta obteniendo la Ecuación 2.4:

$$K_I = \frac{\sigma_x}{(2\pi r)^{0.5} \left[ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \right]} \quad (2.4)$$

donde  $K_I$  = factor de intensidad de tensiones para el modo I;  $\sigma_x$  = tensión horizontal en la dirección perpendicular a la grieta;  $r$  = distancia desde la punta de la grieta; y  $\theta$  = inclinación respecto del eje de la grieta.

Por otro lado, el factor de intensidad de tensiones crítico se obtiene directamente de la Ecuación 2.5 a partir de los datos materiales del suelo:

$$K_{IC} = \frac{-2\xi E}{1 - \nu^2} \quad (2.5)$$

donde  $K_{IC}$  = factor de intensidad de tensiones crítico;  $E$  = módulo de Young; y  $\xi$  = constante con un valor entre 0.1 y 1.0 J/m<sup>2</sup> según Lee e Ingles (1968).

### **2.3.1.3 Resistencia al corte**

Para este caso, Morris et al. (1992) presentan tres análisis distintos basados en distintos planteamientos de mecanismos de agrietamiento:

- El primero se basa en los planteamientos de Bagge (1985), quien considera que el agrietamiento es un mecanismo que se produce entre un fallo a tracción y un fallo en corte confirmando la existencia de un punto de transición donde el fallo pasa de ser de tracción a corte.
- El segundo considera que la resistencia a tracción no es constante y es una función de la succión obteniendo la profundidad de la grieta.
- El tercer y último caso se basa en un análisis tipo Rankine donde la rotura ocurre cuando la tensión principal menor tiende a cero.

### **2.3.2 Interpretación probabilista**

La interpretación probabilista en el estudio de fenómenos de agrietamiento se basa en el análisis geométrico de las fisuras para la obtención de patrones de fisuración. Los estudios de Corte y Higashi (1960) y de Nahlawi y Kodikara (2006) obtuvieron resultados que permitían cierta predicción en el patrón de agrietamiento tras un estudio estadístico.

Corte y Higashi (1960) dedujeron que el área media de las celdas producidas por agrietamiento depende únicamente de la longitud de las grietas por unidad de área y que estas son totalmente independientes de las condiciones externas. También demostraron que la geometría hexagonal define un patrón de agrietamiento con celdas de igual área y con el menor perímetro. El mismo estudio diferenció patrones básicos para las grietas

primarias, como los triángulos, los cuadrados y los hexágonos, mostrados en la Figura 2.7, y para las grietas secundarias, en polígonos menores surgidos a partir de las celdas primarias. Sin embargo, las geometrías más abundantes en las celdas de fisuración constan de 5 y de 4 lados. Las grietas secundarias aparecen tras la formación de las celdas primarias dividiendo estas desde y hasta las mitades de los lados del polígono primario. La probabilidad de que se produzcan unos u otros patrones es diferente para cada caso y de ella dependerá el patrón final de fisuración

Por otro lado, Nahlawi y Kodikara (2006), en su estudio de la arcilla de Werribee, concluyeron, tras sus análisis de laboratorio, que tanto la separación entre grietas como el área de las celdas tras fisuración pueden modelarse mediante una distribución probabilística tipo log-normal.

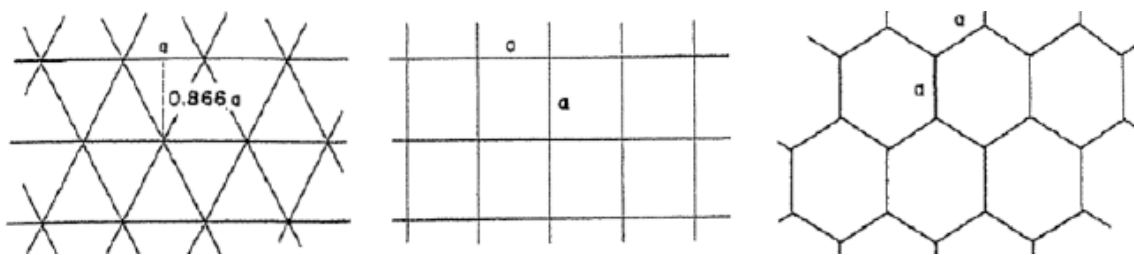


Figura 2.7. Patrones de agrietamiento posibles en una superficie plana, (Corte y Higashi, 1960).

### 2.3.3 Interpretación determinista

Los patrones de agrietamiento también han sido analizados desde un punto de vista determinista pese a la aleatoriedad que presentan, buscando las razones de orden geomecánico en el inicio del agrietamiento y en su propagación. Tanto Corte y Higashi (1960) como Nahlawi y Kodikara (2006) analizaron, también, con un enfoque determinista este fenómeno.

Por parte de Corte y Higashi (1960), se concluye que la fisuración de un suelo no puede considerarse frágil como en el caso de sólidos como el vidrio ya que la velocidad de propagación de las fisuras es muy diferente en cada caso, llegando a velocidades sónicas en el caso comentado del vidrio. Además, establecen, como se ha podido observar en el Apartado 2.2.4.4, que la concentración de tensiones se produce debido a las restricciones de contorno y que la tensión de rotura varía con el espesor de la muestra y

con su humedad inicial. De hecho, la variación de humedad es distinta según estos factores, afectando a la deformación virtual que se postula igual a la diferencia entre la deformación real del suelo y la que tendría sin restricciones tal y como muestra la Ecuación 2.6 de manera simplificada:

$$\delta_V = \delta_R - \delta_{SN} \quad (2.6)$$

donde  $\delta_V$  = deformación virtual;  $\delta_R$  = deformación real en laboratorio; y  $\delta_{SN}$  = deformación que habría sin restricciones de contorno.

Sin embargo, cuando las muestras son delgadas, puede suponerse que el proceso de desecación es isótropo y que la relación tensión-deformación viene dada según lo expuesto por Fredlund y Morgenstern (1977) y Kodikara et al. (2000) en la Ecuación 2.7:

$$d\varepsilon_{ii} = \frac{d\psi}{H(\psi)} \quad (2.7)$$

donde  $d\varepsilon_{ii}$  = incremento de deformación volumétrica;  $d\psi$  = incremento de succión matricial; y  $H(\psi)$  = módulo de deformación del suelo debido a cambios en la succión.

Precisamente, la Ecuación 2.7 explica el efecto arqueado o “curling” en Nahlawi y Kodikara (2006). Al principio, la velocidad de pérdida de agua es mayor en la superficie superior de la muestra produciendo mayores valores de succión en esa zona. Sin embargo, el módulo  $H(\psi)$  es muy pequeño y la retracción es lineal. A medida que pasa el tiempo, la desecación avanza y la muestra tiende a un pequeño arqueado levantando los bordes extremos. Luego, la velocidad de secado aumenta en la cara inferior de la muestra propiciando el arqueado de la zona media de la muestra hacia arriba debido a que la rigidez en la cara superior es más alta al haberse secado con anterioridad.

Por otro lado, Nahlawi y Kodikara (2006) definen una velocidad de desecación y un coeficiente de desecación, para muestras delgadas, que se rige por la Ecuación 2.8:

$$(w - w_r) = (w_i - w_r)e^{-kt}$$

$$\frac{dw}{dt} = -k(w - w_r) \quad (2.8)$$

donde  $w_i$  = contenido de agua inicial;  $t$  = tiempo del proceso de desecación;  $w$  = contenido de agua en el tiempo  $t$ ;  $w_r$  = contenido de agua residual al final del proceso;  $dw / dt$  = velocidad de desecación; y  $k$  = coeficiente de desecación.



En dicho estudio se observa una dependencia entre el contenido de agua en el momento del agrietamiento y la velocidad de desecación. El bajo contenido de humedad es necesario para iniciar el proceso de fisuración en la muestra. Además, comparando sus resultados obtenidos con la arcilla de Werribee con los estudios de otros autores como Corte y Higashi (1960) y Lau (1987), se ha observado, también, una relación entre el espesor de las muestras y el área de las celdas tras fisuración completa después de corregir las diferencias geométricas e iniciales existentes entre las diferentes investigaciones.

## **2.4 Análisis numérico**

Este tipo de análisis es el más actual debido al gran avance tecnológico ocurrido en los últimos años. De esta manera pueden tratarse sistemas de múltiples ecuaciones con múltiples variables de manera rápida y precisa a partir de programas informáticos que utilicen el método de elementos finitos [MEF]. Las simulaciones basadas en el MEF se han realizado en los análisis de Kodikara et al. (2004), Rodríguez et al. (2007), Cuadrado (2018) o Trabelsi et al. (2012), entre otros. Estos artículos representan bien el estado del arte en el análisis numérico de los problemas de desecación y agrietamiento.

Más específicamente, se analizarán los trabajos realizados con el programa Code\_Bright de autores como Cuadrado (2018) o Levatti et al. (2019), entre otros. Este software es uno de los más utilizados actualmente y permite el análisis numérico a diferentes niveles para el estudio del comportamiento del fenómeno de fisuración en el suelo incluso con presencia de geosintéticos y bajo diferentes condiciones de contorno.

### **2.4.1 Criterios y método de elementos finitos**

Uno de los primeros modelos basados en los elementos finitos fue el utilizado por Lee y Lo (1988) para simular la propagación de fisuras causadas por tracción. Este modelo tiene como características principales, en términos de fractura, el desdoblamiento de un nodo en dos nodos nuevos, tal y como se observa en la Figura 2.8, durante el avance de la grieta usando el criterio del MEF para tener en cuenta la concentración de tensiones en la punta de la grieta y evaluar si esta puede propagarse. El parámetro material empleado, tasa crítica de propagación, se determina experimentalmente y se muestra razonablemente constante para una determinada gama de longitudes de fisuras. Por ello, puede utilizarse este parámetro como una constante de grietas por tracción en suelos.

Se definen a continuación los criterios tomados para la predecir la iniciación y la propagación de las fisuras en el suelo, así como el modelo basado en el MEF utilizado por Lee y Lo (1988) en su estudio.

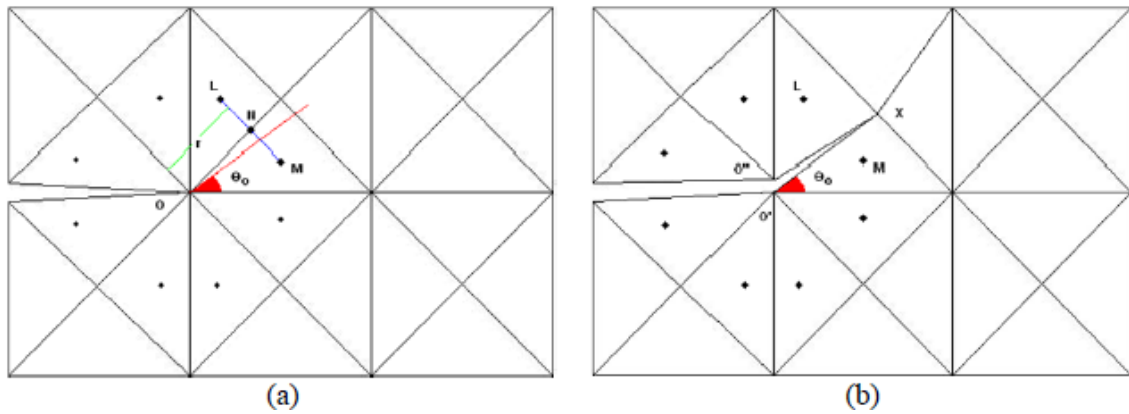


Figura 2.8. Mecanismo propuesto de propagación: a) Antes de propagar la grieta; b) después de propagar la grieta, (Lee y Lo, 1988).

#### 2.4.1.1 Criterio de propagación de grietas

El modelo consiste en la determinación del campo de tensiones existente en las proximidades de la punta de la fisura. Utiliza la expresión matricial del campo de tensiones cercano a la punta de la grieta en coordenadas polares para el problema bilineal en un continuo lineal elástico infinito según Erdogan y Sih (1963) e Ingrassia (1978).

Este criterio, según Erdogan y Sih (1963), corresponde al criterio de la máxima tensión circunferencial, en el cual la grieta se expande desde la punta en dirección normal hasta alcanzar la máxima tensión circunferencial. De este modo, puede calcularse el factor de tenacidad de fractura a partir de la tensión de propagación de la grieta. A partir de ahí, puede obtenerse la tasa crítica de liberación de energía descrita por Griffith (1924) para tensión plana y para deformación plana.

Por tanto, una vez establecidas las características materiales del suelo en términos de módulo de Young, coeficiente de Poisson y tasa de liberación de energía, puede obtenerse el factor de tenacidad de fractura y puede usarse el criterio de propagación de grietas.

### **2.4.1.2 Criterio de iniciación de grietas**

En el apartado anterior se explica el caso de propagación de la grieta, la cual puede usarse solo para estos casos. Sin embargo, cuando la fisura aún es inexistente, el material se estudia como un medio continuo en el cual no existe concentración de tensiones.

Para este caso, se utiliza el criterio de la resistencia a tracción, el cual consiste en comparar la resistencia a tracción principal del suelo con la resistencia a tracción obtenida en el laboratorio de manera experimental prediciendo el inicio de la fisuración, (Levatti, 2015).

### **2.4.1.3 Modelo basado en el método de elementos finitos**

Para los modelos basados en los elementos finitos, se pueden elegir diferentes geometrías de elementos con diferentes tamaños y número de nodos por elemento formando mallas más o menos densas según se requiera. Mallas más densas dan resultados más aproximados, pero requieren de más capacidad por parte del ordenador para procesar los datos llegando a necesitar mucho más tiempo para llegar al resultado final. La geometría del elemento finito depende del tipo de problema que se necesite abordar requiriéndose de análisis de convergencia de las diferentes mallas utilizadas para asegurar que los resultados se obtienen mediante la mejor opción posible. Zienkiewicz y Taylor (1994) y Oñate (2016) explican los diferentes tipos de mallas de elementos finitos y las ventajas e inconvenientes que presenta cada una. Además, Zienkiewicz y Taylor (1995) presenta las diferentes aplicaciones de este método.

Levatti (2015) propone mallas de elementos finitos triangulares de deformación constante como los utilizados por Lee y Lo (1988) en la Figura 2.8. Este tipo de elementos permite una fácil implementación del mecanismo de apertura propuesto por el modelo, independientemente del lugar en donde se haya iniciado la fisuración y de la etapa de carga, pero no modelan correctamente la singularidad de las tensiones existente en el extremo de las grietas.

De estos elementos se conocen las componentes cartesianas de tensiones en su centro de gravedad pudiendo calcular los promedios de tensiones en los puntos L y M de la Figura 2.8 y considerarlos como el estado de tensiones en un punto N. La ubicación de este último punto se calcula promediando la ubicación de los centros de gravedad de los elementos triangulares adyacentes.

Basando el análisis en lo explicado por Zienkiewicz y Taylor (1994), Levatti (2015) y Oñate (2016), un problema de contorno resuelto por elementos finitos triangulares, los cuales tienen funciones de forma lineales, tendrá deformaciones y tensiones constantes dentro del elemento. Por tanto, teniendo el valor de las tensiones cartesianas en los puntos L y M, pueden obtenerse las tensiones circunferenciales correspondientes a los radios que unen la punta de la fisura con los puntos L y M. Esos tres puntos permitirán trazar un gráfico de tensiones circunferenciales respecto la coordenada  $\theta$  e interpolar mediante ecuaciones cúbicas. Por último, se obtendrá el máximo derivando esta ecuación e igualándola a cero para encontrar el valor  $\theta_0$  que haga la tensión circunferencial máxima. La fractura se propagará en la dirección  $\theta_0$  dividiendo el nodo O en dos nuevos nodos O' y O'', cambiando la ubicación de la punta de la grieta a un nuevo punto en el espacio y repitiendo el proceso.

## 2.4.2 Code\_Bright

El programa Code\_Bright (Olivella et al., 1996) resuelve problemas como el flujo en medio poroso deformable, entre otros, mediante el método de los elementos finitos. En su versión general, permite resolver problemas termo-hidro-mecánicos en suelos.

Se explicarán las ecuaciones básicas de este programa, que son las ecuaciones de balance y las ecuaciones constitutivas, y se presentaran algunos resultados obtenidos anteriormente por autores como Cuadrado (2018) o Levatti et al. (2019).

### 2.4.2.1 Ecuación de balance

El programa Code\_Bright se basa en las ecuaciones de balance de los sólidos y en las ecuaciones de balance de la masa de agua representadas en las Ecuaciones 2.9 y 2.10, respectivamente. La porosidad, variable principal asociada a la Ecuación 2.9, y sus variaciones pueden calcularse también con la Ecuación 2.10:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_s(1 - \varphi)] + \nabla(\mathbf{j}_s) = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\theta_l^w S_l \varphi + \theta_g^w S_g \varphi] + \nabla(\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \quad (2.10)$$

donde  $w$  = agua;  $g$  = vapor;  $l$  = estado líquido del agua;  $s$  = sólido;  $\rho$  = masa del sólido por unidad de volumen;  $\varphi$  = porosidad;  $\theta$  = masa por unidad de volumen del agua en el estado correspondiente;  $S$  = grado de saturación del agua en el estado correspondiente;  $\mathbf{j}$  = vector de flujo de masa;  $t$  = tiempo; y  $f^w$  = suministro externo de agua.

Finalmente, la Ecuación 2.11 muestra el balance del momento del medio poroso, la cual se reduce a la ecuación de equilibrio de tensiones totales siguiente:

$$\Delta\sigma + \mathbf{b} = 0 \quad (2.11)$$

donde  $\sigma$  = tensor de tensiones; y  $\mathbf{b}$  = vector de fuerzas másicas.

Utilizando una ecuación constitutiva adecuada, la ecuación de equilibrio pasa a estar en función de los desplazamientos y de las presiones de poro, suponiendo pequeñas deformaciones y los desplazamientos como la principal variable.

#### 2.4.2.2 Ecuaciones constitutivas

Un modelo constitutivo mecánico sencillo es el utilizado por Rodríguez et al. (2007) en base al concepto de superficies de estado trabajado por Matyas y Radhakrishna (1968) y Lloret y Alonso (1985), mediante las Ecuaciones 2.12 y 2.13:

$$\Delta e = a_1 \Delta \ln(p' + a_4) + a_2 \Delta \ln\left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}\right) + a_3 \Delta \left[ \ln(p' + a_4) \ln\left(\frac{s + p_{ref}}{p_{ref}}\right) \right] \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (2.13)$$

donde  $p'$  = tensión media neta;  $s$  = succión;  $e$  = relación de poros;  $p_{ref}$  = presión de referencia para evitar condiciones saturadas; y  $\varepsilon_v$  = deformación volumétrica.

Para el cálculo de la fase líquida se utiliza la ley generalizada de Darcy explicada por Espinoza (2006) y representada en las Ecuaciones 2.14 y 2.15:

$$\mathbf{q}_l = -\mathbf{K}(\nabla P_l - \rho_l \mathbf{g}) \quad (2.14)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{k} \frac{k_{ri}}{\mu_l} \quad (2.15)$$

donde  $\mathbf{q}_l$  = vector de flujo de la fase líquida;  $\rho_l$  = densidad del líquido;  $\mathbf{g}$  = vector de la gravedad;  $P_l$  = presión del líquido;  $\mathbf{K}$  = tensor de permeabilidad del líquido;  $k_{ri}$  = permeabilidad relativa;  $\mu_l$  = viscosidad dinámica del líquido; y  $\mathbf{k}$  = tensor de permeabilidad intrínseco que depende de la porosidad.

Por otro lado, la permeabilidad relativa presente en la ley de Darcy puede evaluarse según lo dictaminado por Fredlund y Rahardjo (1993) adoptando una expresión potencial como la mostrada en la Ecuación 2.16:

$$k_{ri} = (S_l)^r \quad (2.16)$$

donde  $S_l$  = grado de saturación del agua en estado líquido.

Finalmente, se presenta la expresión aproximada de la curva de retención en la Ecuación 2.17, la cual es la ecuación constitutiva que relaciona el grado de saturación con la succión, y la expresión de la función de influencia de la porosidad en la Ecuación 2.18 según Van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left[ 1 + \left( \frac{s}{P_o f_n} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right]^{-\lambda} \quad (2.17)$$

$$f_n = \frac{\sigma}{\sigma_o} \quad (2.18)$$

donde  $S_e$  = grado de saturación;  $S_{rl}$  = saturación residual;  $S_{ls}$  = saturación máxima;  $\lambda$  = función de forma;  $P_o$  = presión medida a cierta temperatura;  $\sigma$  = tensión; y  $\sigma_o$  = tensión superficial a una determinada temperatura.

En caso de la permeabilidad intrínseca, la influencia de la porosidad se tiene en cuenta mediante el modelo de Kozeny mostrado en la Ecuación 2.19:

$$k = k_o \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2} \frac{(1 - \varphi_o)^2}{\varphi_o^3} \quad (2.19)$$

donde  $k_o$  = permeabilidad inicial;  $\varphi$  = porosidad; y  $\varphi_o$  = porosidad inicial.

#### 2.4.2.3 Resultados de los análisis numéricos

En esta sección se presentan brevemente algunos resultados obtenidos del análisis numérico en suelos arcillosos de Barcelona. Dichos resultados se comparan con un análisis experimental previo sobre el mismo suelo bajo las condiciones deseadas.

La investigación de Cuadrado (2018) se centra en simular la desecación e identificar los procesos físicos que intervienen y en simular el efecto de las grietas en la desecación mediante modelos numéricos termo-hidráulicos [TH] y termo-hidro-mecánicos [THM] en ensayos de desecación de suelos en 2D.

Se realizaron cuatro modelos TH nombrados Estándar 1, Estándar 2, Estándar 3 y Estándar 4, y cuyos resultados numéricos en términos de contenido de humedad de la muestra, succión y humedad relativa son los descritos a continuación:

- Estándar 1. Se realiza esta simulación con las condiciones explicadas por el autor obteniendo resultados que muestran una tasa de evaporación mayor al del ensayo experimental durante las primeras 400 h además de no ser constante ni tener un comportamiento lineal, estando por debajo de la curva experimental

casi en todo momento y observándose un aumento en dicha tasa en las últimas 120 h debido a coeficientes de transferencia muy elevados. En términos de succión, se observa un crecimiento casi vertical durante los primeros días y un secado rápido. Existe un comportamiento similar en la curva de la humedad relativa siendo similar a la del ensayo experimental, pero con valores más elevados.

- Estándar 2. Se repite la simulación cambiando la permeabilidad intrínseca respecto a la simulación realizada en el Estándar 1, siendo un orden de magnitud menor. La curva del contenido de humedad tiene también un comportamiento no lineal, pero con valores distintos los cuales son menores a los del ensayo en los primeros 300 h, pero mayores después de este punto. En términos de succión, la diferencia entre los dos puntos es mayor que en la simulación anterior. Además, la humedad relativa se aleja más del comportamiento observado en el ensayo.
- Estándar 3. En este caso, se reducen drásticamente los coeficientes de transferencia que eran tan elevados en el Estándar 1. De esta manera, se consigue simular casi perfectamente las primeras 225 h de ensayo con una pérdida lineal cercana a la curva experimental concluyendo que el viento juega un papel muy importante en este fenómeno. Sin embargo, la pendiente de la succión es inferior en comparación a otros modelos, aunque aún es lineal y creciente con el tiempo, sin conseguir que se parezca a la gráfica experimental. Por último, la humedad relativa mostrada es la menos representativa en comparación con los otros modelos numéricos.
- Estándar 4. Esta vez, se opta por añadir la condición de contorno lateral a partir de las 225 h del inicio del ensayo para simular el efecto de la grieta perimetral que aparece en ese punto del experimento. Se consigue una curva del contenido de humedad muy parecida a la experimental, con un comportamiento lineal hasta la aparición de la fisura perimetral donde el comportamiento deja de serlo. En términos de succión no se consigue un gran cambio con esta aportación en la simulación obteniéndose valores similares a los del Estándar 3. Sin embargo, la curva de la humedad relativa se representa con mucha precisión siendo la que mejor representa el comportamiento real de todos los modelos.

En un segundo bloque de investigación, Cuadrado (2018) realizó más análisis TH presentando tres modelos nombrados como Variable 1, Variable 2 y Variable 3. En ellos

se establecen condiciones de contorno variables con el tiempo junto con otros cambios como la introducción de un modelo de tortuosidad que depende del grado de saturación líquida, respecto a los cuatro modelos estándares presentados anteriormente. Se observaron los siguientes resultados:

- Variable 1. Desde el principio, la curva del contenido de agua mostrada por el análisis numérico muestra similitud de comportamiento frente a la curva obtenida experimentalmente. En términos de succión, la variación es lineal creciente, pero sigue estando alejado de los valores obtenidos en el ensayo por medio de los tensiómetros. Por último, la curva de la humedad relativa muestra una geometría parecida a la obtenida experimentalmente, pero con valores bastante más bajos. Además, se observa que suponer el mismo coeficiente de transferencia que en la superficie implica que la desecación cerca de la grieta es muy superior a la real.
- Variable 2. En este caso se cambia el coeficiente de transferencia lateral en un 33% con respecto al coeficiente de transferencia superficial. Con ello se consigue una curva de contenido de agua más ajustada a la real y una curva de humedad relativa más parecida, pero aún sin ser igual a la obtenida experimentalmente. Sin embargo, la succión modelada no cambia en prácticamente nada, ni de forma ni de valores.
- Variable 3. Para este último caso, se utilizan unas condiciones de contorno distintas consiguiendo pérdidas de agua menores, alejándose de la realidad en términos de contenido de agua y humedad relativa en comparación con las Variables 1 y 2. Así mismo, en términos de succión, tampoco se aprecia ningún cambio.

Por último, Cuadrado (2018) también realizó ensayos THM para ajustar aún más los resultados obtenidos mediante modelización numérica. Dichos ensayos se nombraron como Final 1, Final 2 y Final 3, y su diferencia respecto a los otros bloques de análisis fue la inclusión de un modelo constitutivo mecánico y la liberación de la restricción de movimiento vertical y horizontal del contorno lateral. Los resultados en términos de contenido de agua, succión y humedad relativa, son los siguientes en cada caso:

- Final 1. La curva del contenido de humedad muestra valores superiores a los obtenidos experimentalmente, con un comportamiento lineal de unas pocas



horas y el cual no es representativo. En términos de succión es donde se observan más diferencias en comparación con los otros dos bloques de análisis numérico, mostrando una variación creciente pero no lineal con valores cercanos a los obtenidos por los tensiómetros del ensayo. Por último, debido a la poca pérdida de humedad mostrada, la curva de humedad relativa muestra valores superiores a los reales.

- Final 2. Aplicando una condición lateral igual a la superficial, se obtiene una variación del contenido de agua con un comportamiento lineal más ajustado, pero mostrando una pérdida de humedad superior a la real. En términos de succión, se pierde la similitud conseguida en el Final 1 en cuanto a valores numéricos. La curva de la humedad relativa sufre un cambio igual a la de la curva de contenido de agua, mostrando valores bastante más bajos a los obtenidos experimentalmente.
- Final 3. En este caso, se obtiene una curva de contenido de agua muy parecida a la obtenida experimentalmente con un comportamiento inicial un poco distinto. En términos de succión, es el modelo que mejor representa el ensayo experimental efectuado. Así mismo, en humedad relativa también muestra un mejor comportamiento que las demás simulaciones.

Otros resultados obtenidos por medio de simulaciones numéricas son las presentadas por Levatti et al. (2019). Se llevo a cabo un análisis en términos de presión de poros, tensiones y deformaciones en una muestra de suelo circular de 40 cm de radio y de 20 cm de altura. Dicho estudio muestra estos resultados y observándose una reducción en la presión interna de poros conforme pasan los días y un aumento tensional en la muestra en todos sus puntos, pero especialmente en los puntos cercanos a los bordes. Puede observarse también la deformación debida al desprendimiento del borde de la muestra con el recipiente que lo contiene, así como un punto de concentración de tensiones en la parte inferior del contorno.

## **3 Una necesidad medioambiental**

### **3.1 Introducción**

Durante los últimos años, el aumento de la industria y de la demografía global ha supuesto un incremento de la huella medioambiental que genera el ser humano. Desde hace ya un tiempo, este impacto climático ha sido un problema grave que se ha intentado lidiar mediante diferentes vías, como la última propuesta del Ayuntamiento de Barcelona en prohibir la circulación de determinados vehículos en los sectores denominados como Zonas de Bajas Emisiones, tal y como se explica en Baraza (2020).

Actualmente, el cambio climático es un hecho innegable que atenta contra la salud de personas y animales, así como contra el ciclo natural del agua o del aire lo que puede llegar a agravar las consecuencias provocadas por los cambios de temperatura. Hoy en día se registran tormentas tropicales y huracanes en Europa, eventos que se consideraban imposibles años atrás ya que no se presentaban las condiciones climatológicas idóneas para estos sucesos, y que pueden intensificarse con el aumento de la temperatura del Atlántico tal y como apunta Del Campo (2018). De hecho, el aumento de las instalaciones encargadas de registrar los datos medioambientales ha crecido exponencialmente desde el año 1900 debido al incremento en la importancia de este tema según Peterson y Vose (1997). La Figura 3.1 muestra el incremento en número de dichas instalaciones alrededor del mundo para las estaciones de temperaturas medias y las estaciones de mínimos y máximos.

Todas estas consecuencias afectan también al suelo, provocando que este se agriete y cambie sus características haciéndolo menos resistente. Este hecho se registra de forma natural tras el cambio de estaciones, pero se ha intensificado debido a inviernos más fríos y veranos más calurosos.

El escaso estudio de este efecto de agrietamiento del suelo provocado por fenómenos meteorológicos hace difícil la previsión de dichos sucesos y la valoración de los daños que puedan provocar. Por tanto, crece el interés en conocer el comportamiento de los suelos frente a los cambios de temperatura extremos debido a la situación actual del cambio climático que empieza a catalogarse de grave e irreversible por algunos expertos como Crowther et al. (2016).

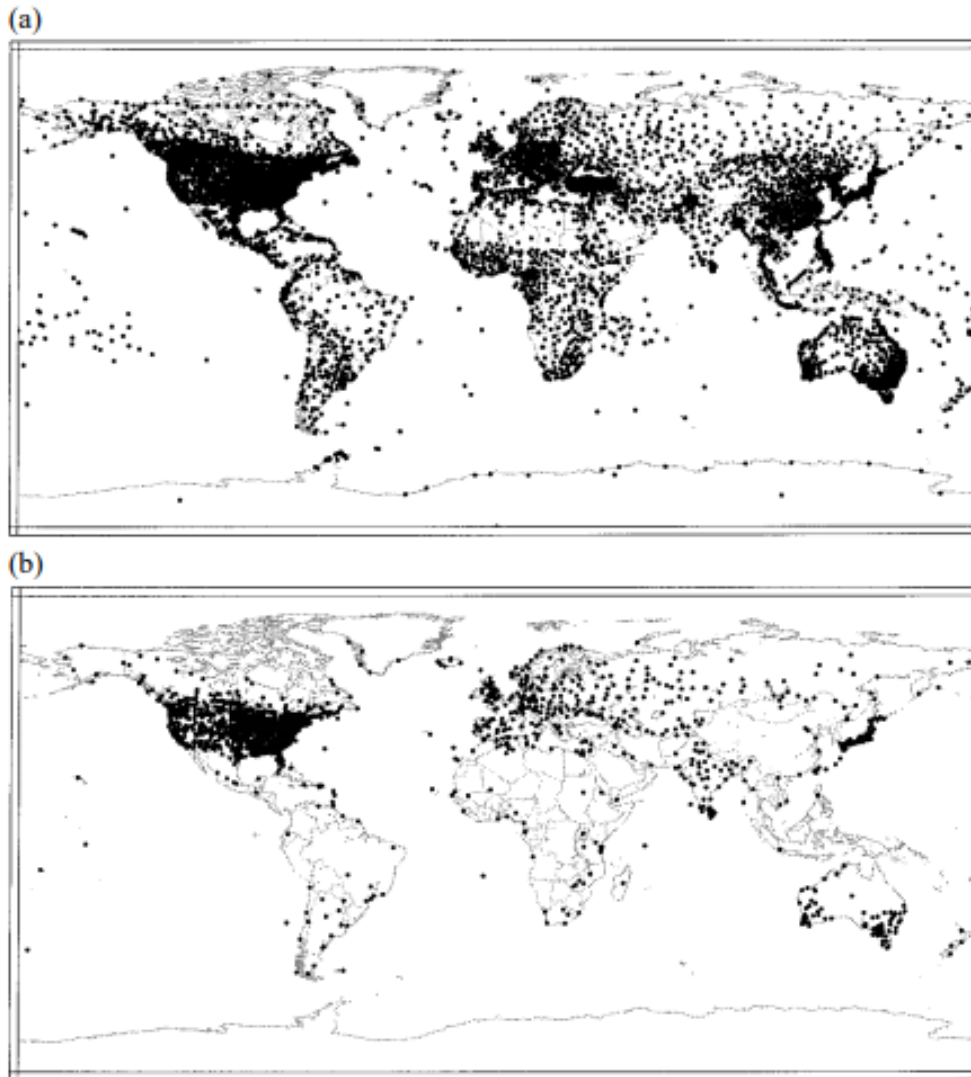


Figura 3.1. Mapas de localización de las estaciones GHCN de temperatura media: (a) todas las estaciones GHCN de temperatura media; (b) estaciones de temperatura media con fecha en 1900, (Peterson y Vose, 1997).

## 3.2 Calentamiento global

El cambio climático afecta al suelo de distintas formas, pero las causas que provocan su agrietamiento por desecación son aquellos relacionados, principalmente, con la temperatura, temperaturas extremadamente altas, y con el agua, ambientes muy secos.

### 3.2.1 Cambios de temperatura

La principal consecuencia del impacto medioambiental del ser humano es el aumento de las temperaturas que afecta tanto a regiones cálidas como frías. De hecho, es el principal responsable de la desaparición del hielo polar y de la presencia de huracanes en Europa debido al calentamiento de mares y océanos.

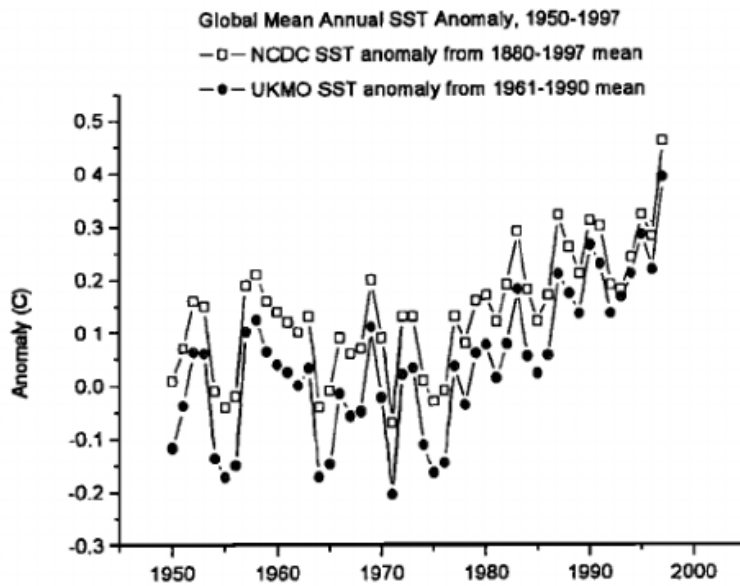


Figura 3.2. Anomalías de temperatura en la superficie del mar, (Quayle et al., 1999).

Quayle et al. (1999) estudió las anomalías de temperatura medias registradas entre los años 1950 y 1997. Se define como anomalía de temperatura a la diferencia entre la temperatura media medida en un periodo de un año y la temperatura media registrada durante un periodo de tiempo mayor. La Figura 3.2 muestra dichas anomalías durante ese periodo de tiempo en comparación con las temperaturas medias de los años 1880-1997 y 1961-1990, observándose una tendencia creciente de las temperaturas medias anuales.

Más actualmente, la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos [NASA] presentó en 2016 un registro de las temperaturas medias anuales medidas desde 1880 en comparación con la temperatura media del período temporal 1951-1980 batiendo récords de registro en los años 2015 y 2016 tal y como indica la Tabla 3.1. Villalonga (2016) puntualiza que la NASA registró aumentos de hasta 4°C por encima de la media en regiones de Europa del Este, América del Norte, Australia y África del Norte agravando el efecto que existe sobre el terreno de dichas regiones.

Además, la Administración Norteamericana de la Atmósfera y los Océanos [NOAA] coincide con la NASA y muestra un mapa global de las variaciones de temperatura en su reporte anual NOAA (2017). En la Figura 3.3 se observa la anomalía registrada entre la temperatura media del 2017 y la temperatura media del periodo temporal 1981-2010.

Tabla 3.1. Temperaturas por encima de la media de los meses siguientes, (Villalonga, 2016).

Meses	Temperatura (°C)
Noviembre 2015	+1.01
Octubre 2015	+1.07
Diciembre 2015	+1.10
Enero 2016	+1.11
Febrero 2016	+1.33
Marzo 2016	+1.29

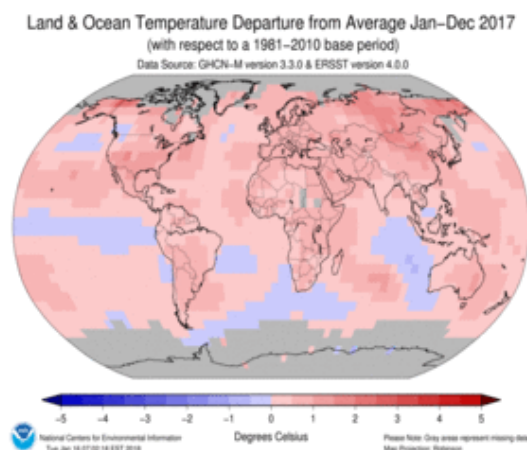


Figura 3.3. Anomalía de las temperaturas de la tierra y el agua en comparación con las temperaturas medias del período 1981-2010, (NOAA, 2017).

### 3.2.2 Cambios en las precipitaciones

Otro de los puntos importantes en el agrietamiento del suelo está relacionado con la humedad ambiente y con las precipitaciones ya que un clima seco y con pocas lluvias impediría al terreno aumentar su contenido de agua favoreciendo su desecación y provocando fisuras.

NOAA (2017) también muestra cambios en las precipitaciones registradas globalmente observándose mayores precipitaciones en regiones de América del Norte y América del sur y menos precipitaciones en Europa y el Este asiático tal y como muestra la Figura 3.4. Estos datos comparan las precipitaciones medias del 2017 con las medias registradas en el periodo temporal de 1961-1990.

La actuación combinada de un aumento de temperatura y una disminución de la precipitación como ocurre en Portugal, según las Figuras 3.3 y 3.4, llevan al terreno a una desecación extrema que influiría de manera directa sobre las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos.

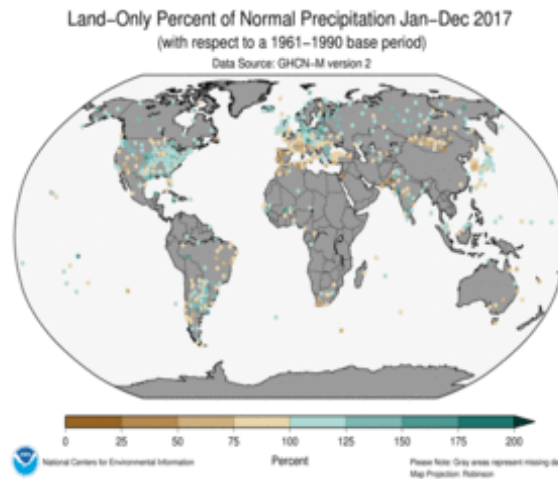


Figura 3.4. Anomalía de las precipitaciones globales en comparación con las temperaturas medias del período 1961-1990, (NOAA, 2017).

### 3.3 Efectos en el terreno

Dados los problemas expuestos, se han detectado diferentes problemas en el suelo relacionados con dichos cambios climáticos. La Agencia Europea de Medio Ambiente [EEA] señala además que la materia orgánica contenedora de carbono en suelos de ciertas zonas no puede descomponerse debido a los bajos niveles de oxígeno del agua que, al secarse, podría provocar la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera aumentando aún más la contaminación atmosférica (EEA, 2015). De esta manera, no solo se debilitan las propiedades mecánicas del suelo debido a la fisuración de este frente a la desecación, sino que se le convierte también en un contribuyente al cambio climático al liberar CO<sub>2</sub>.

La capacidad de cultivo de los suelos también se ve afectada por el cambio climático y agravada por el sobreuso de estos en trabajos de agricultura. La fertilidad del suelo decrece a medida que pierde componentes orgánicos y minerales (Cerdà, 1998).

En cuanto a la fisuración, ya descrita anteriormente, se añade que, en épocas de heladas, dichas fisuras pueden expandirse y aumentar su volumen al congelarse el agua que pueda infiltrarse a través de las grietas. Dicho fenómeno ocurre también en la roca y en el hormigón causando daños importantes (Hummel, 1966).

Por tanto, los principales efectos que el problema medioambiental actual ejerce sobre el suelo pueden listarse a continuación.:

- Fisuración.
- Emisiones de gases de efecto invernadero.
- Disminución de la fertilidad.
- Cambios en la química del terreno.
- Pérdidas de las características geomecánicas (cohesión, ángulo de rozamiento interno, etc.)
- Cambios en su permeabilidad

### **3.4 Problemas ingenieriles**

De la fisuración, se derivan diversos problemas de carácter ingenieril relacionados con los campos estructurales, geotécnicos e hidráulicos. De hecho, un suelo en mal estado puede causar daños estructurales severos en cimentaciones, tanto profundas como superficiales, problemas de inestabilidad en taludes, cuya coronación puede tener un uso importante, o problemas de infiltración, que pueden llegar a afectar también a las estructuras, pero que son importantes en zonas de contención de residuos enterrados y protección de acuíferos subterráneos.

#### **3.4.1 Daños estructurales**

Las cimentaciones estructurales, como los pilotes o las pantallas, o los elementos de contención, como los muros o los estribos, han de cumplir unas condiciones que dependen directamente de las características del suelo en donde se encuentran ubicadas. Ministerio de Fomento (2009) y el Código Técnico de Edificación [CTE] (2019) muestran como calcular dichas resistencias para cada tipo de suelo y cómo establecer si las condiciones de estabilidad son las adecuadas a partir de diferentes ensayos sobre el terreno.

Primeramente, en el CTE (2019) se establece que el número de ensayos a realizar en un terreno ya fisurado es mayor que el de un terreno en buen estado, encareciendo la obra a realizar sobre dicho suelo. Además, en términos de cálculo, se establecen unos métodos mucho más conservadores que derivan en estructuras de mayor dimensión y de mayor coste.

Sin embargo, de cara a estructuras ya realizadas sobre terreno que anteriormente se encontraba en buen estado, la aparición de fisuras a lo largo del tiempo cambiaría

totalmente el método a utilizar para el dimensionamiento de las estructuras. Un ejemplo directo sería el empuje del agua a tener en cuenta en elementos de contención cuando existen fisuras rellenas de agua tal y como señala el CTE (2019).

Durante la vida útil de una estructura tipo de contención de hormigón armado que, normalmente, es de 50 años según el EHE (2008), pueden generarse fisuras en el suelo que conlleven acumulación de agua en ellas y que cuyo efecto no se tuvo en cuenta en un primer momento. Por tanto, su estabilidad e integridad podrían verse comprometidas generando fallos por deslizamiento, vuelco, fisuración del hormigón o flexión, entre otros, resultando en grandes gastos económicos o, incluso, peligro para las personas según la función que tuviese la estructura en cuestión. Las consecuencias que conllevan el fallo de un muro se describen en Narváez (2018) (ver Figura 3.5).

En cuanto a las cimentaciones estructurales, el peligro de fallo es el mismo pudiendo originarse socavaciones y hundimientos resultando en pilotes descubiertos y columnas fisuradas debido al movimiento de tierras, respectivamente. Nótese que, aunque este tipo de fallos sucedan principalmente por la acción del agua, un suelo fisurado permite una mayor influencia del agua sobre él.



Figura 3.5. Caída del muro de protección del arroyo Don Juan en Colombia, (Narváez, 2018).



### 3.4.2 Inestabilidad

Debido a la pérdida de resistencia que sufre un suelo al ser afectado por la fisuración, puede generarse un problema de inestabilidad en taludes. La Red Nacional de Ferrocarriles Españoles [RENFE] (1980) y Escobar y Duque (2017) señalan a las fisuras como una de las posibles causas que puede provocar que un talud falle por inestabilidad provocando desprendimientos que podrían afectar a estructuras colindantes. Adicionalmente, también confirman que la acción del agua sobre dichas fisuras podría acelerar el proceso de fallo al incrementar el peso y expandir las grietas.

Este tipo de fallos también pueden ocurrir por otras causas y suponen un peligro importante tanto económica como personalmente al poder causar graves daños a estructuras importantes o, directamente, a personas. En la Figura 3.6 pueden observarse los destrozos que puede llegar a causar un desprendimiento de tierras en zonas pobladas como ocurrió en Bolivia (La Vanguardia, 2019).

Por otro lado, se han propuesto diversas ideas para combatir la inestabilidad por fisuración del terreno que consisten en la plantación de árboles y otra vegetación en la zona del talud para estabilizarlo. Este procedimiento, que pertenece a la rama de la biogeotecnia, es descrito por Li, Xu y Zhu (1993) y Durán y Rodríguez (2008) como un procedimiento innovador que basa su eficacia en las raíces de las plantas, las cuales actúan como una armadura, así como lo hace el acero en el hormigón. Un ejemplo del uso de plantas para estabilización de taludes lo describe Menéndez (2014).



Figura 3.6. Vista de los daños del derrumbamiento por deslizamiento de tierras en La Paz, (La Vanguardia, 2019).

### 3.4.3 Infiltraciones

Los vertederos existen alrededor de cualquier núcleo urbano para la deposición de los residuos generados por este a lo largo del tiempo. Estas deposiciones pueden suponer un riesgo medioambiental muy grave si no se ejecutan de forma correcta y siguiendo todas las pautas dictadas para su uso.

Howard y Draudt (2008) explican la manera correcta de ejecutar los vertederos para minimizar su impacto medioambiental. Se elige una zona alejada de acuíferos, zonas costeras, ríos, lagos o cualquier otro tipo de acumulación de agua y se realiza una excavación de las dimensiones necesarias para verter los residuos en capas de hasta 30 metros de espesor. La excavación se prepara mediante una capa de arcilla, una capa de un material impermeable de 60 cm de espesor y una capa de arena debajo de la cual se instala un sistema de drenaje para la evacuación del lixiviado. La Figura 3.7 esquematiza este procedimiento donde puede observarse que el nivel freático se encuentra a un mínimo de 1 m debajo la superficie inferior del vertedero. Por último, y tras haber comprimido los residuos vertidos, se cierra el vertedero con una capa de tierra compactada que luego puede utilizarse para la recuperación paisajística o la construcción de zonas recreativas.

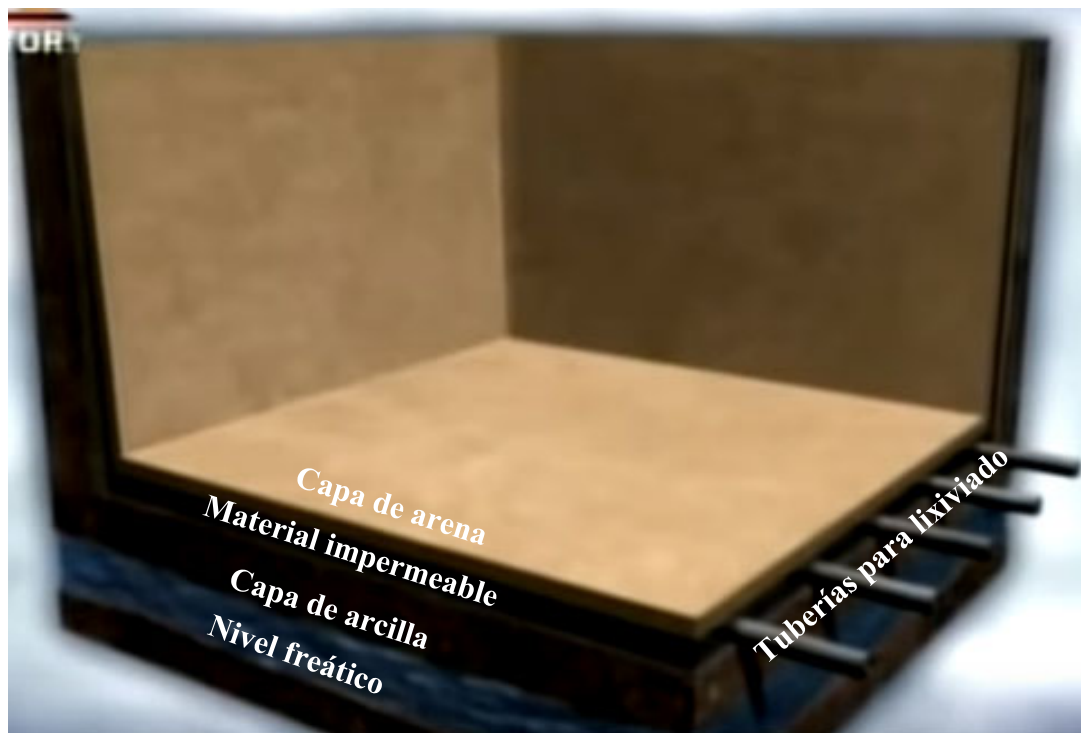


Figura 3.7. Esquema de las capas de un vertedero, (Howard y Draudt, 2008).

Durante los siguientes años, los residuos se descompondrán anaeróbicamente produciendo gran cantidad de líquidos y gases de efecto invernadero. El líquido resultante, llamado lixiviado, se recoge y se trata localmente para luego verterlo en el alcantarillado para su posterior tratamiento de aguas residuales en la central. Los gases de efecto invernadero como el metano se aprovechan para la obtención de energía mediante la instalación de tuberías en el vertedero un posterior tratamiento que lo separa de otros gases como el dióxido de carbono.

El papel de la fisuración en estos casos puede presentar dos tipos de problemas: filtraciones de agua al vertedero y exposición de los residuos al oxígeno. Las filtraciones pueden alterar el proceso de descomposición normal y provocar filtraciones en las capas inferiores que afectarían a las aguas subterráneas situadas debajo contaminando suelos y acuíferos. La exposición al oxígeno aceleraría el proceso de descomposición y generarían más gases de efecto invernadero que no podrían captarse, provocando contaminación atmosférica y olores que afectarían a la población cercana.

## 4 Propiedades del suelo y el geosintético

### 4.1 Introducción

El suelo utilizado en este trabajo ha sido investigado previamente mediante un ensayo de campo a gran escala realizado por Cordero (2019) con el objetivo de estudiar la interacción suelo-atmósfera y su implicación en la formación de fisuras en el terreno. Esta sección describe las características del suelo utilizado en términos de localización, origen, composición y caracterización geotécnica de su comportamiento mecánico e hidráulico y del geosintético en términos mecánicos e hidráulicos.

### 4.2 Suelo investigado

#### 4.2.1 Localización geográfica

El material proviene de las instalaciones de Agrópolis, una unidad científica de la Universidad Politécnica de Cataluña [UPC] dedicada a la investigación agrícola, medioambiental y civil que se ubica en la zona municipal de Viladecans, en las cercanías del Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona – El Prat, tal y como se muestra en la Figura 4.1, en la zona del delta del río Llobregat, situado en la Provincia de Barcelona. Dentro de Agrópolis, el suelo se extrajo originalmente del punto A de la Figura 4.2 donde fue tamizado y tratado para la realización del estudio llevado a cabo por Cordero (2019) en el recuadro B para su posterior uso en esta investigación.

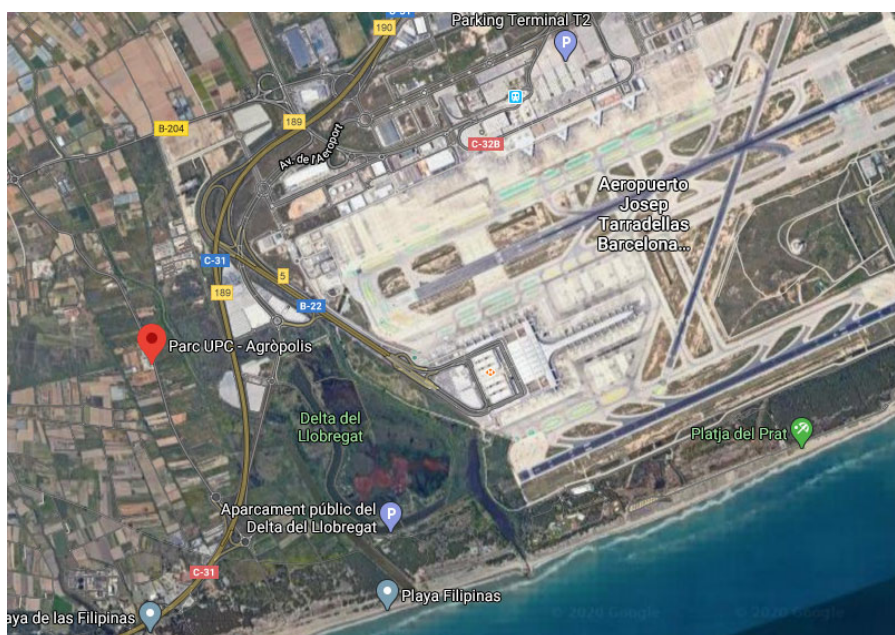


Figura 4.1. Ubicación de Parc UPC - Agrópolis en el Delta del Llobregat, (Google Maps, 2020a).



Figura 4.2. Ubicación de los puntos de extracción del terreno original (A) y del lugar de investigación de campo previo (B), (Google Maps, 2020b).

#### 4.2.2 Orígenes

De acuerdo con Almera (1891), el suelo ubicado en el Delta del Llobregat es principalmente de la época del Holoceno, la última y actual época del período Cuaternario, con abundancia de gravas, limos y arcillas del curso superior tal y como se indica en la Figura 4.3 la cual muestra los depósitos que pueden encontrarse en todo el Área Metropolitana de Barcelona.

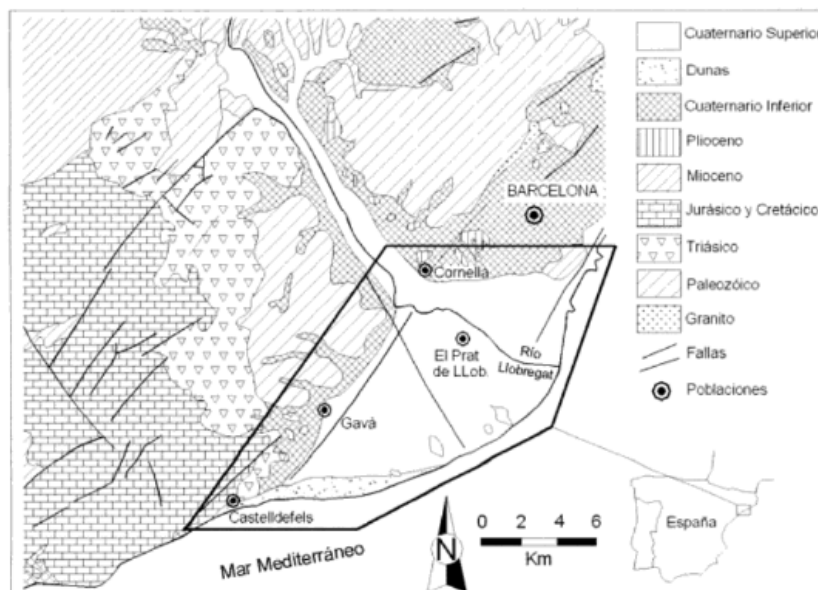


Figura 4.3. Mapa geológico de la provincia de Barcelona, (Almera, 1891).

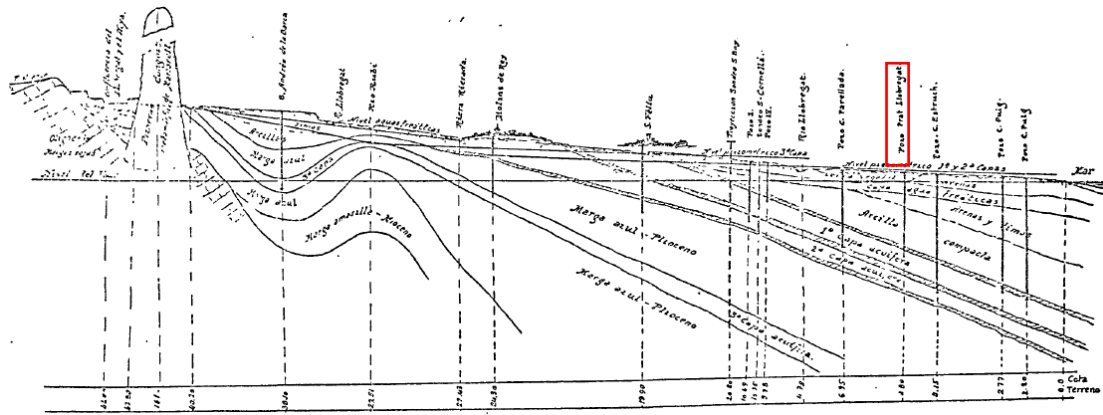


Figura 4.4. Perfil geotécnico a lo largo del recorrido del Río Llobregat, (Sierra, 1933).

El perfil geotécnico a lo largo del recorrido del río Llobregat se muestra en la Figura 4.4. Sierra (1933) llevó a cabo un estudio de las capas de material en diferentes puntos del curso inferior del río Llobregat, destacándose en la figura la zona del Prat de Llobregat al ser la más cercana al punto de extracción del suelo estudiado. Puede observarse como en dicho punto predominan las capas de arenas, limos y arcillas en la parte más superficial, mientras que en las más profundas se acumulan las capas acuíferas y las margas azules del Plioceno.

### 4.2.3 Composición

La composición del material estudiado se ha realizado mediante distintas técnicas de análisis como la difracción de rayos-X, el uso del microscopio electrónico de barrido, la intrusión de mercurio para porosimetría o el análisis del contenido de materia orgánica, entre otros (Cordero, 2019).

#### 4.2.3.1 Difracción por rayos-X

La técnica de difracción de rayos-X permite identificar cualitativamente la composición mineralógica de una muestra cristalina. El método consiste en la emisión de radiación electromagnética de alta energía y baja longitud de onda a través de la muestra mostrando la posición y la intensidad de los rayos-X tras su difracción.

El fenómeno es captado por el difractómetro de rayos-X (X-Ray Diffractometry [XRD]) pudiendo identificar la estructura cristalina del suelo, aunque no su composición química. Se destaca que la señal captada por el difractómetro es una característica del mineral estudiado y, por tanto, un diagrama de difracción nos permite identificar la composición mineralógica completa del material.

Tabla 4.1. Contenidos de mineral del suelo proveniente del Delta del Llobregat, (Cordero, 2019).

<b>Mineral</b>	<b>Contenido (%)</b>
Cuarzo	35
Moscovita o Illita	28
Albita	14
Calcita	11
Microclina de sodio	5
Dolomita	4
Clorita ferrosa	3

Los resultados obtenidos por Cordero (2019) muestran que en la fracción más fina (< 2µm) se identifican minerales como cuarzo, moscovita, plagioclasa, albita, calcita, dolomita y clorita en los porcentajes mostrados en la Tabla 4.1 tras la cuantificación realizada usando el método Reference Intensity Ratio [RIR] descrito por Chung (1974a, 1974b).

Por tanto, se identifican minerales arcillosos con presencia de moscovita y clorita ferrosa y la presencia de carbonatos al identificar calcita y dolomita, así como la existencia de un componente inerte, el cuarzo.

#### **4.2.3.2 Microscopio electrónico de barrido**

El microscopio electrónico de barrido, conocido como Scanning Electron Microscope [SEM], permite identificar los agregados del material, así como complementar los resultados obtenidos por el XRD. Este procedimiento escanea la superficie de la muestra mediante electrones los cuales son captados tras rebotar en ella.

El SEM, permite medir la cantidad y la intensidad de los electrones rebotados obteniendo imágenes 3D de alta resolución, entre 4 y 20 nm. Por tanto, se obtienen resultados en forma de diagrama, mostrando la composición química de la muestra, y en forma de imagen.

Cordero (2019) obtuvo imágenes 3D de las partículas de la muestra con un tamaño inferior a los 150 µm mientras que el área media de una partícula de arcilla es de, aproximadamente, 18×68 µm. Por otro lado, se verifican los resultados obtenidos anteriormente en el XRD al identificar elementos de calcio, hierro, sílice y aluminio en las partículas de la muestra.

### 4.2.3.3 Intrusión de mercurio para porosimetría

El método de la intrusión de mercurio para el análisis de la porosidad, conocido como Mercury Intrusion Porosimetry [MIP], sirve para obtener la distribución del tamaño de poro medio en una muestra de suelo. Este método se describe detalladamente en la normativa ASTM D4404-84 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2004a).

La importancia en este aspecto del material se debe a que la porosidad del suelo determina muchas de sus propiedades mecánicas e hidráulicas afectando a la conductividad del agua, el aire, el calor, la absorción del agua y la deformación volumétrica.

El equipo de laboratorio utilizado en Cordero (2019) para el análisis de la porosidad del material procedente de Agrópolis corresponde al Micromeritics Auto Pore IV 9500 Porosimeter. Este porosímetro mide directamente el volumen de mercurio que entra en los poros por cada aumento de la presión aplicada obteniendo una relación entre volumen y presión que caracteriza la estructura de cada poro del suelo analizado. La técnica se basa en la ecuación de Washburn (Griffiths y Joshi, 1989) para obtener el diámetro del poro según la Ecuación 4.1:

$$D = - \left( \frac{1}{P} \right) 4 \gamma_{Hg} \cos \varphi \quad (4.1)$$

donde  $D$  = diámetro del poro;  $P$  = presión absoluta aplicada;  $\gamma_{Hg}$  = tensión superficial del mercurio y  $\varphi$  = ángulo de contacto entre el mercurio y la muestra.

De la curva de intrusión se deduce un índice de poros  $\Delta e \approx 0.01$ . Aunque los resultados son parecidos al índice de poros estimado, las diferencias observadas pueden deberse a la presencia de poros no interconectados o de poros cuyo tamaño es demasiado grande para la presión mínima aplicada. Por tanto, se concluye una porosidad libre de  $n_{free} = 0.1$  y una porosidad atrapada de  $n_{entrapped} = 0.21$  suponiendo un 1% de poros no intrusionados.

Respecto a la curva de extrusión, ésta muestra que los poros de la curva tienen un tamaño de, aproximadamente, 300 nm, que puede tomarse como el tamaño límite entre poros intra-agregados e inter-agregados (Romero et al., 1999).



Por último, la distribución de los macroporos, aquellos que superan el tamaño de 300 nm, muestran un tamaño medio de 700 nm en el rango de la macroporosidad. También se observa un pico de 8000 nm que no es importante, pero que puede ser debido al cambio de presiones efectuado en el ensayo.

#### **4.2.3.4 Contenido de materia orgánica**

Debido a que el contenido en materia orgánica de un suelo influye en sus propiedades, es importante conocer el porcentaje de este en una muestra para asegurar que su valor es aceptable y, por tanto, no altera en gran medida dichas propiedades.

El procedimiento consiste en exponer una muestra del suelo a utilizar a temperaturas muy altas de, aproximadamente, 440°C para provocar la ignición de la materia orgánica. El método se describe en la normativa ASTM D2974-14 (ASTM, 2014), midiendo el contenido en materia orgánica a partir de la Ecuación 4.2:

$$MO = \frac{M_{p+d} - M_{p+b}}{M_{p+b} - M_p} 100 \quad (4.2)$$

donde  $MO$  = contenido en materia orgánica;  $M_{p+d}$  = masa del recipiente más masa del suelo totalmente seco;  $M_{p+b}$  = masa del recipiente más masa del suelo tras incineración; y  $M_p$  = masa del recipiente.

Los resultados obtenidos en Cordero (2019) muestran un contenido de materia orgánica muy bajo, de alrededor del 2.44%, el cual es aceptable.

#### **4.2.4 Caracterización geotécnica**

La caracterización geotécnica del terreno se ha llevado a cabo mediante análisis granulométrico, de límites de consistencia, curvas de compactación y curvas de retención. Con ello, pueden determinarse las propiedades principales del suelo a utilizar que influirán sobre los resultados obtenidos en las siguientes secciones.

##### **4.2.4.1 Granulometría**

El test de laboratorio se ha llevado a cabo con un suelo cuyas partículas no superan los 2 mm tras su tamizado con un tamiz #10 según ASTM E11-17 (ASTM, 2017a). Sin embargo, Cordero (2019) realizó el estudio granulométrico del material original del campo, sin haber sido tamizado, y del mismo material tras haber pasado por los tamices de 40 mm y 20 mm, aparte del correspondiente al material a utilizar en el ensayo. Se

denominan en la Figura 4.5 como “original”, “large sieving” y “field specimen” a cada uno de ellos, respectivamente.

El análisis de la granulometría se ha llevado a cabo mediante la normativa ASTM D422-63 (ASTM, 2007), la cual indica el procedimiento a seguir para obtener la curva granulométrica mostrada en la Figura 4.5 de la cual se obtienen los valores del contenido de arenas, limos y arcillas que son de un 48.3%, 42.1% y 9.6%, respectivamente.

Se destaca que, para la obtención de los resultados, se han utilizados dos métodos: un método mecánico para la distribución de las partículas más grandes que 0.075 mm (tamiz ASTM #200), y una técnica de sedimentación mediante hidrómetro para la distribución de las partículas más pequeñas que 0.075 mm.

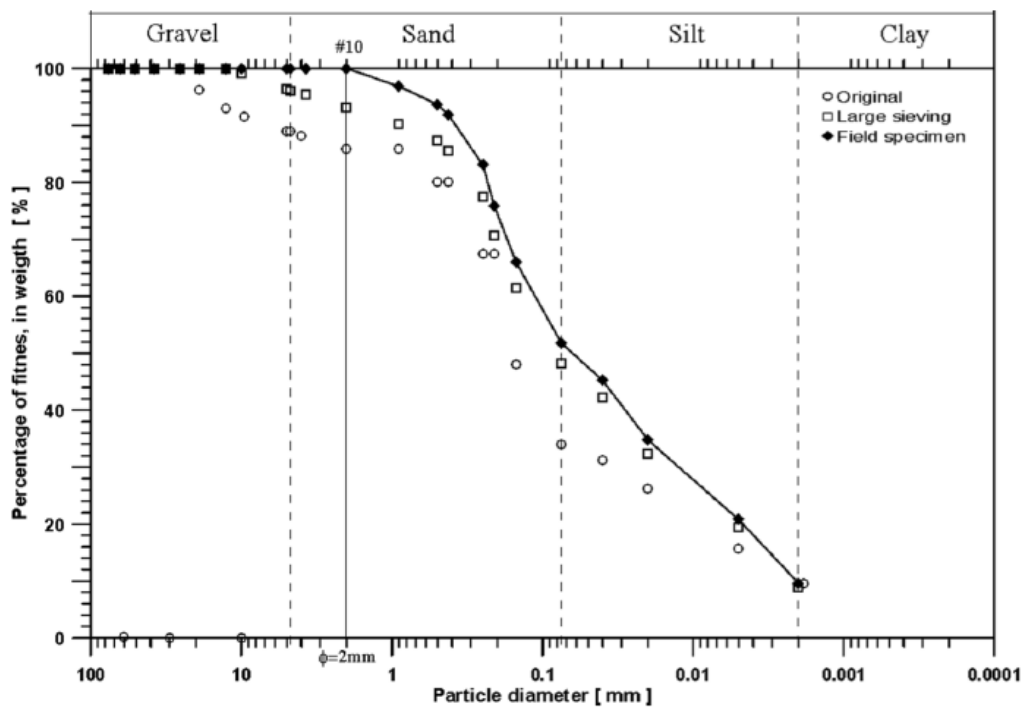


Figura 4.5. Curva granulométrica tras tamizado, (Cordero, 2019).

#### 4.2.4.2 Límites de consistencia

Para caracterizar la consistencia del suelo, se usan los límites de Atterberg los cuales describen cualitativamente la consistencia del suelo. Se diferencian tres límites distintos: el límite líquido, que representa la humedad frontera entre consistencia líquida y plástica; el límite plástico, que representa la humedad frontera entre consistencia

plástica y semisólida; y el límite de retracción, que representa la humedad frontera entre consistencia semisólida y sólida.

El límite líquido y el límite plástico se obtienen mediante la normativa ASTM D4318-17e1 (ASTM, 2017b) y el límite de retracción mediante la normativa ASTM D427-04 (ASTM, 2004b) obteniendo los resultados de la Tabla 4.2.

Dada la necesidad de utilizar herbicidas durante el ensayo para evitar el crecimiento de plantas debido a la presencia de materia orgánica, Cordero (2019) realiza un estudio de los límites de Atterberg tras la aplicación de los herbicidas GOAL Supreme®, basado en el compuesto químico oxifluorfen utilizado para prevenir el desarrollo de las plantas, y LOGRADO®, basado en el compuesto químico glifosato utilizado para eliminar las plantas que puedan crecer tras la puesta en marcha del ensayo.

La Figura 4.6 muestra como ninguno de los dos herbicidas afecta a los límites de consistencia que caracterizan el suelo a utilizar en esta investigación.

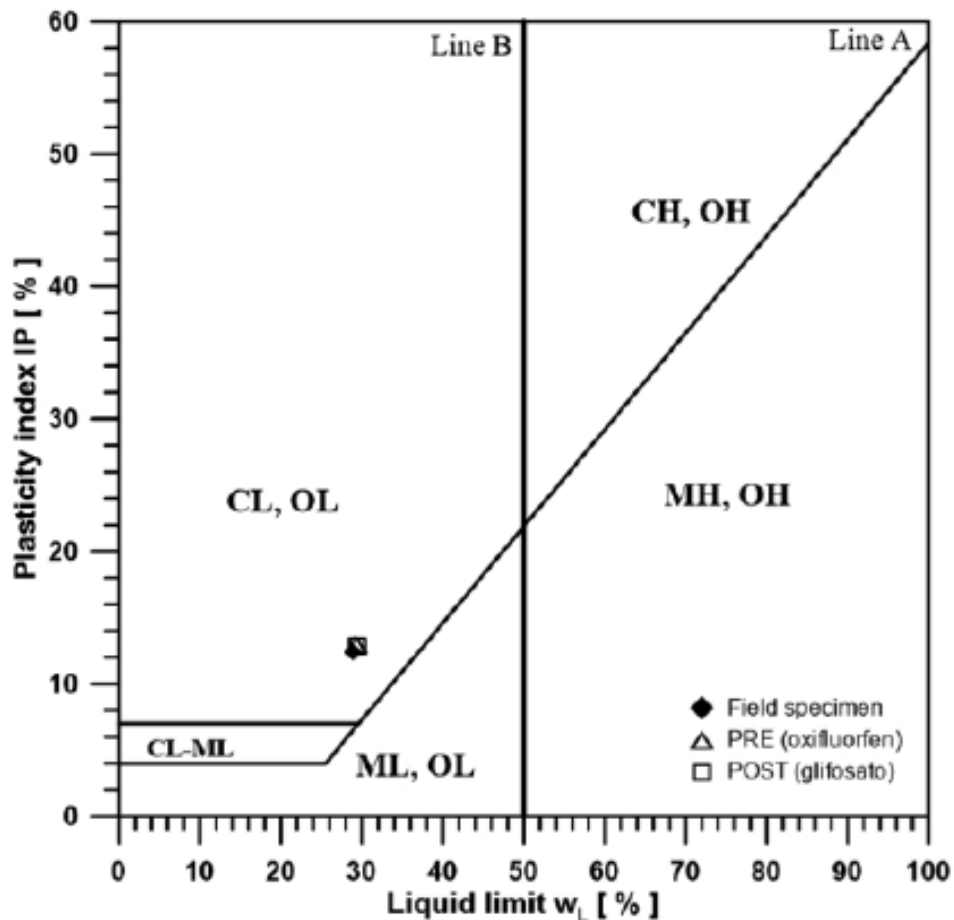


Figura 4.6. Índice de plasticidad del suelo utilizado con y sin herbicidas, (Cordero, 2019).

Tabla 4.2. Límites de Atterberg, (Cordero, 2019).

Parámetro	Valor
Límite líquido, $w_L$ (%)	28.9
Límite plástico, $w_P$ (%)	16.5
Límite de retracción, $w_R$ (%)	13.8
Índice plástico, $IP$ (%)	12.4

#### 4.2.4.3 Curva de retención

La curva de retención de un suelo relaciona el contenido de agua de la muestra con la energía requerida para moverla. Normalmente, se representa dicha curva en escala logarítmica relacionando la succión con la humedad o la succión con el grado de saturación. Esta relación es característica de cada suelo y depende de su densidad seca, mineralogía, estructura, geometría de poro y cantidad de finos presentes en la muestra.

Para el mismo material, Cordero (2019) obtuvo las curvas de retención mostradas en la Figura 4.7 para las cuales se utilizaron tres métodos distintos: WP4C PotentiaMeter®, descrito en el Apartado 5 del documento, que mide la succión de una muestra de suelo obteniéndose la curva mediante la variación de su peso; T5x®, que mide la succión de manera más precisa en la rama seca de la curva desde el inicio de la saturación hasta valores de 100 kPa (curva de secado); y MIP, que estima la curva de retención mediante los resultados obtenidos del MIP en el Apartado 4.2.3.3.

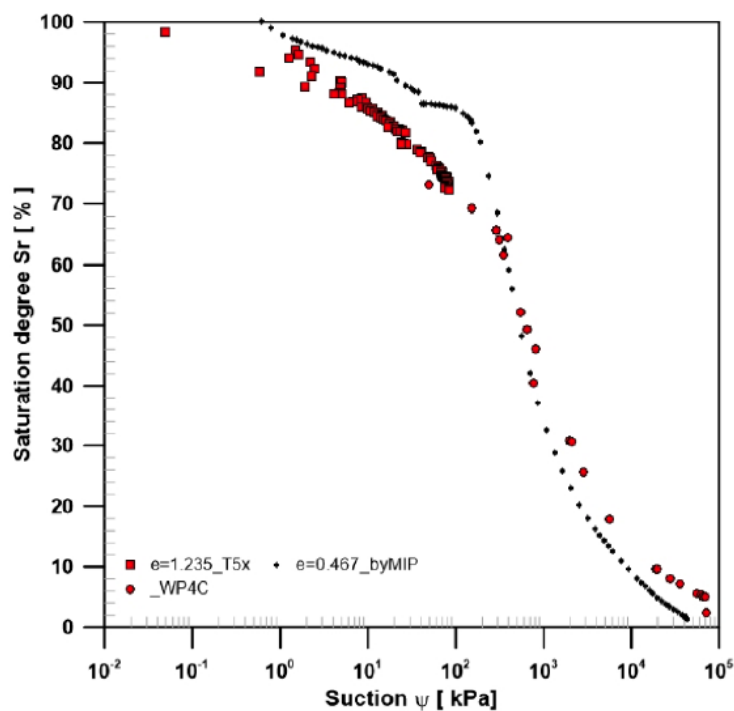


Figura 4.7. Curva de retención del suelo investigado, (Cordero, 2019).

Se ha llevado a cabo un estudio propio de las curvas de retención del suelo mediante el WP4C PotentiaMeter® para una muestra con distintos contenidos de humedad en el Apartado 5 del estudio donde posteriormente se comparan con los resultados obtenido por Cordero (2019) para este mismo suelo.

### 4.3 Geosintético

El geosintético utilizado es el INTERDRAIN GMG 412 de Intermas® el cual se compone de dos capas externas de geotextil de polipropileno [PP] termofijadas a una malla interna de polietileno de alta densidad [PEAD] denominada INTERDRAIN M 4 ubicada a modo de esqueleto que otorga rigidez al geosintético permitiendo que se vea menos afectado por las retracciones que pueda sufrir el suelo debido al secado. Este geosintético es utilizado en funciones de drenaje, filtración, anticontaminación de finos y protección en sellados de vertederos, drenaje horizontal de terraplenes y plataformas, muros de contención, estribos de puentes, falsos túneles, sótanos, canales, jardines y campos deportivos. La Figura 4.8 muestra el aspecto real de este material, así como el elemento de PEAD individualmente.

Las características de cada material en su conjunto y por separado se muestran en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 para el geotextil de PP, la malla de PEAD y su combinación formando el geosintético, respectivamente. La ficha técnica abarca los parámetros de densidad, resistencia a tracción, permeabilidad, punzonamiento, capacidad drenante, entre otros, según Intermas (2019a, 2019b), siguiendo las normativas de la ASTM y de la “International Organization for Standardization” [ISO].



Figura 4.8. Geosintético (izquierda) y capa interna de malla de PEAD (derecha), Intermas (2019a y 2019b).

Tabla 4.3. Características técnicas del geotextil de polipropileno, Intermas (2019a).

Característica	Valor	Unidad	Normativa (Referencia)
Masa por unidad de superficie	120	g/m <sup>2</sup>	ISO 9864, (ISO, 2005)
Punzonamiento dinámico (Cono)	30	mm	ISO 13433, (ISO, 2006a)
Punzonamiento estático (CBR)	1.3	kN	ISO 12236, (ISO, 2006b)
Permeabilidad normal al plano	90	l/m <sup>2</sup> s	ISO 11058, (ISO 2019a)
Apertura de poro O <sub>90</sub>	100	µm	ISO 12956, (ISO, 2019b)

Tabla 4.4. Características técnicas de la malla de PEAD INTERDRAIN M4, Intermas (2019b).

Característica	Valor	u.	Normativa (Referencia)
Negro de carbón	2-3	%	ASTM D4218, (ASTM, 2020)
Densidad	>0.94	g/cm <sup>5</sup>	ASTM D1505, (ASTM, 2018)
Espesor a 2 kPa/200 kPa	4.2/3.8	mm	ISO 9863-1, (ISO, 2016)
Masa por unidad de superficie	535	g/m <sup>2</sup>	ISO 9864, (ISO, 2005)
Resistencia a tracción, MD/CD	6/2	kN/m	ISO 10319, (ISO, 2015)
Elongación de rotura, MD/CD	20/90	%	ISO 10319, (ISO, 2015)
CBR	0.4	kN	ISO 12236, (ISO, 2006b)
Capacidad drenante en plano	10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup> /s	ISO 12958, (ISO, 2010)

Por otro lado, en términos de curva de retención, el geosintético presenta un comportamiento similar a una arena, con los parámetros del modelo de Van Genuchten (Ecuaciones 2.17 y 2.18) que se muestran en la Tabla 4.6. La Figura 4.9 muestra la curva de retención succión-grado de saturación correspondiente al geosintético compuesto emulando una arena fina con los parámetros indicados, según Shokri et al. (2008 y 2010).

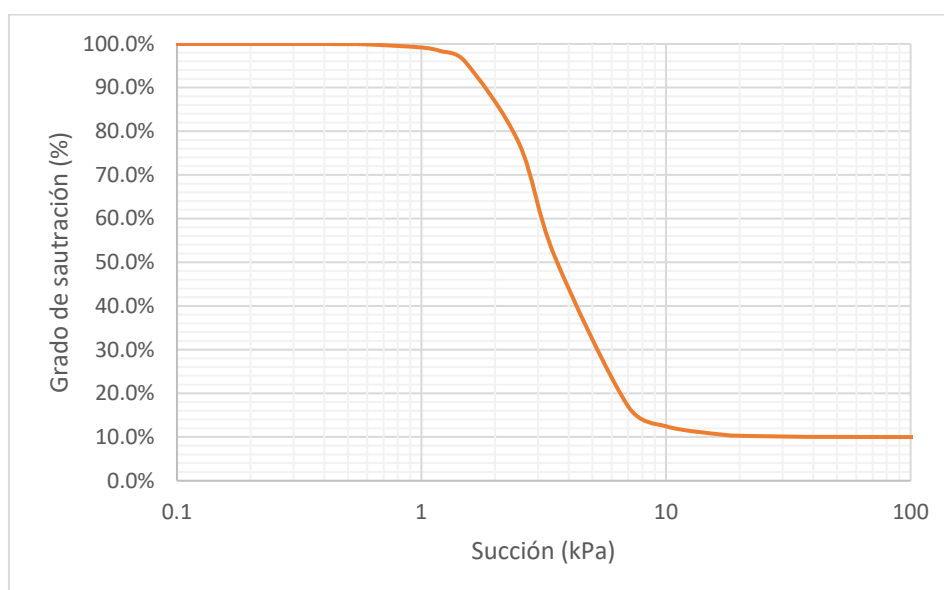


Figura 4.9. Curva de retención estimada para el geosintético INTERDRAIN GMG 412.

Tabla 4.5. Características técnicas del geosintético completo INTERDRAIN GMG 412, Intermas (2019a).

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Normativa (Referencia)</b>
Espesor a 2 kPa / 200 kPa	4.8/4.2	mm	ISO 9863-1, (ISO, 2016)
Masa por unidad de superficie	775	g/m <sup>2</sup>	ISO 9864, (ISO, 2005)
Resistencia a tracción, MD/CD	19/17	kN/m	ISO 10319, (ISO, 2015)
Elongación de rotura, MD/CD	40/50	%	ISO 10319, (ISO, 2015)
Capacidad drenante en el plano, MD	10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup> /s	ISO 12958, (ISO, 2010)

Tabla 4.6. Parámetros del modelo de Van Genuchten para el geosintético INTERDRAIN GMG 412.

<b>Parámetro</b>	<b>Simbología</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Presión	$P_o$	3	kPa
Tensión superficial	$\sigma_o$	0.072	N/m
Función de forma	$\lambda$	0.75	-
Saturación máxima	$S_{ls}$	1.00	-
Saturación residual	$S_{rl}$	0.10	-

## **5 Estudio experimental mediante cámara ambiental**

### **5.1 Introducción**

Los experimentos a pequeña y mediana escala se han ejecutado en la cámara ambiental del Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Politécnica de Cataluña. Dicha cámara se compone de diversos elementos y sensores que permiten su correcto funcionamiento y la medida de los datos de interés, en términos de peso, succión, humedad relativa y temperatura, procedentes de los procesos de desecación y/o humidificación del suelo y los cuales se describirán a lo largo de este capítulo.

El objetivo principal del análisis experimental es valorar el funcionamiento del geosintético ubicado en las bandejas comparando los resultados obtenidos con resultados de experimentos anteriores realizados en esta cámara sin presencia del geosintético como los estudios llevados a cabo por Lakshmikantha (2009) y Cordero (2019).

El ensayo a pequeña escala consta de tres bandejas rectangulares de dimensiones 30×20 cm y 5 cm de profundidad. La Bandeja 1 contiene un suelo a 32.5% de humedad con el geosintético seco a 3.2 cm de profundidad, la Bandeja 2 contiene únicamente el suelo con un 31.6% de contenido de agua y la Bandeja 3 contiene el suelo con un 32.4% de humedad, pero con el geosintético totalmente saturado a la misma profundidad que la primera.

El experimento a mediana escala se ha realizado en una bandeja circular de 80 cm de diámetro y 20 cm de profundidad con una capacidad de, aproximadamente, 100 litros, emulando el ensayo realizado por Lakshmikantha (2009) aunque con algunas diferencias como la no utilización de lámparas, la adición de un geosintético o una diferente humedad relativa ambiental, entre otras. En ella se ha colocado dicho geosintético a 5 cm de profundidad para realizar el estudio de desecación del suelo con un 30.39% de humedad.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis en la cámara ambiental para cada experimento, así como la curva de retención (modelo de Van Genuchten) del suelo y del geosintético.



## **5.2 Material de laboratorio**

En este apartado se describen los materiales utilizados para los ensayos de laboratorio, incluyendo las diferentes partes que componen la cámara ambiental junto con todos los elementos que actúan durante su funcionamiento, tal como se describe en Lakshmikantha, Ledesma y Prat (2008). La cámara ambiental ha sido utilizada para otros análisis experimentales como los realizados por Lakshmikantha (2009), Lakshmikantha et al. (2013, 2018), Cordero et al. (2014, 2016, 2017), Levatti (2015), Levatti et al. (2017), Cuadrado (2018) y Cordero (2019).

Se describe el cuerpo de la cámara, así como los elementos que están en contacto directo con el suelo a estudiar como las bandejas, las células de carga y algunos sensores. También se explica el funcionamiento y las características de otros aparatos para el control de las condiciones ambientales dentro de la cámara y para la recepción de datos.

### **5.2.1 Cuerpo de la cámara ambiental**

La estructura de la cámara ambiental se compone de paredes transparentes de metacrilato, con unas dimensiones de 1×1×1.5 m, apoyada sobre una base de PVC. Dicha estructura puede elevarse mediante un sistema de poleas situado encima para permitir el acceso al interior de la cámara. Las paredes de metacrilato contienen seis agujeros, de los cuales cuatro sirven para la inserción de tubos de plástico de 10 cm de diámetro, formando un circuito cerrado con dos entradas de aire y dos salidas para la extracción de la humedad, y los otros dos sirven para acceder desde el exterior y poder actuar en menor medida sin necesidad de hacer uso del sistema de poleas para levantar toda la cámara ambiental.

La Figura 5.1 muestra un esquema de la cámara ambiental donde se señalan y se describen, en la Tabla 5.1, las diferentes partes que la componen, así como los orificios y otros elementos que se explicarán posteriormente.

Nótese que los tensiómetros ubicados en el lateral de la bandeja, en la Figura 5.1, no estarán presentes en este trabajo debido a lo poco fiables que resultan sus lecturas al ser propensos a cavitación debido a que su influencia causa fisuras en su posición.

Tabla 5.1. Lista de componentes de la cámara ambiental.

Número de identificación (Figura 5.1)	Nombre componente
01	Cámara digital
02	Pared de metacrilato transparente
03	Entrada de aire
04	Salida de aire
05	Sensor de temperatura y humedad relativa
06	Soporte sobre las células de carga
07	Aislantes de las células de carga
08	Células de carga
09	Base de la cámara ambiental
10	Soportes de plástico
11	Uniones
12	Orificio para la entrada de sensores
13	Sensores Vaisala
14	Tensiómetros
15	Anillo metálico para distribución de carga
16	Bandeja

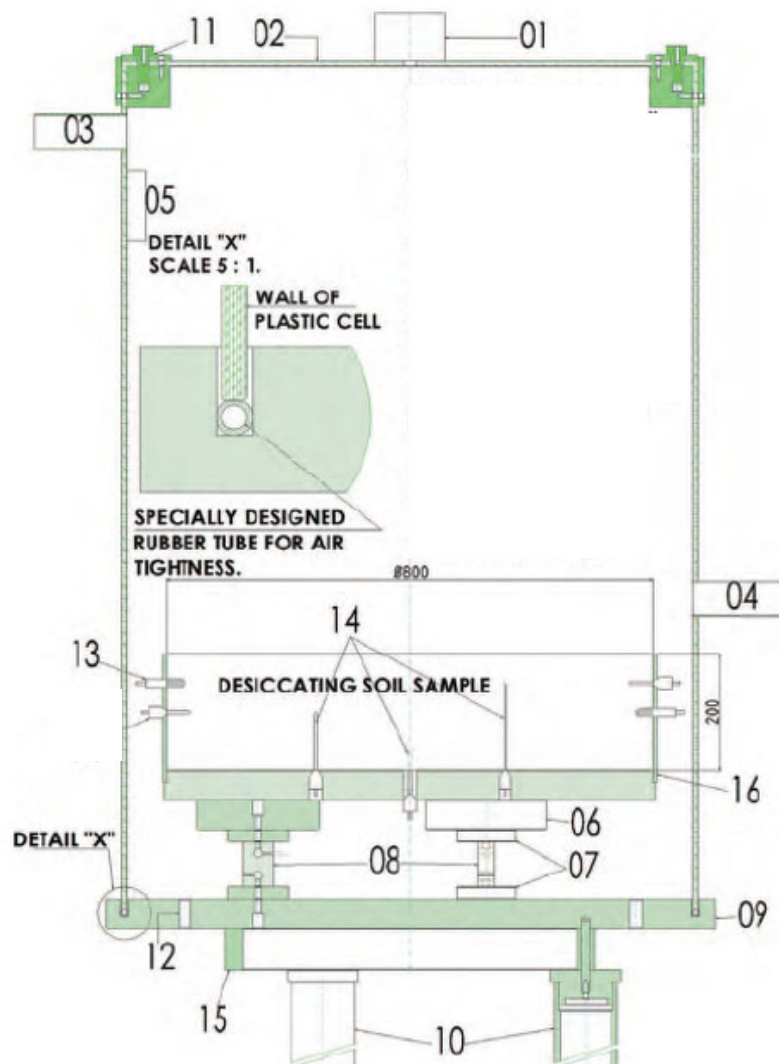


Figura 5.1. Esquema de la cámara ambiental, Lakshmikantha (2009).

### 5.2.2 Bandejas

Para el primer experimento, realizado a pequeña escala, se han utilizado tres bandejas rectangulares de PVC con unas dimensiones de 30×20×5 cm. Estas bandejas no permiten el uso de ningún tipo de sensor en su interior al ser bandejas simples sin ningún orificio, tal y como puede observarse en la Figura 5.2.



Figura 5.2. Bandeja rectangular tipo utilizada en el ensayo de desecación a pequeña escala.



Figura 5.3. Bandeja circular utilizada en el ensayo de desecación a media escala.

El experimento a mediana escala se ha realizado utilizando una bandeja circular de 80 cm de diámetro y 20 cm de alto, también de PVC. Este recipiente sí dispone de orificios estratégicamente situados para ubicar los sensores que se consideren necesarios. Las Figuras 5.3 y 5.4 muestran la bandeja diferenciándose cada uno de dichos orificios.

### 5.2.3 Sensores

La cámara ambiental dispone de un amplio tipo de sensores ya sea para medir el peso, la temperatura, la humedad relativa o, incluso, captar imágenes. La Figura 5.4 muestra la disposición de algunos de esos sensores utilizados en el ensayo: los tensiómetros (T) en la base y los sensores Vaisala (V) en las paredes.

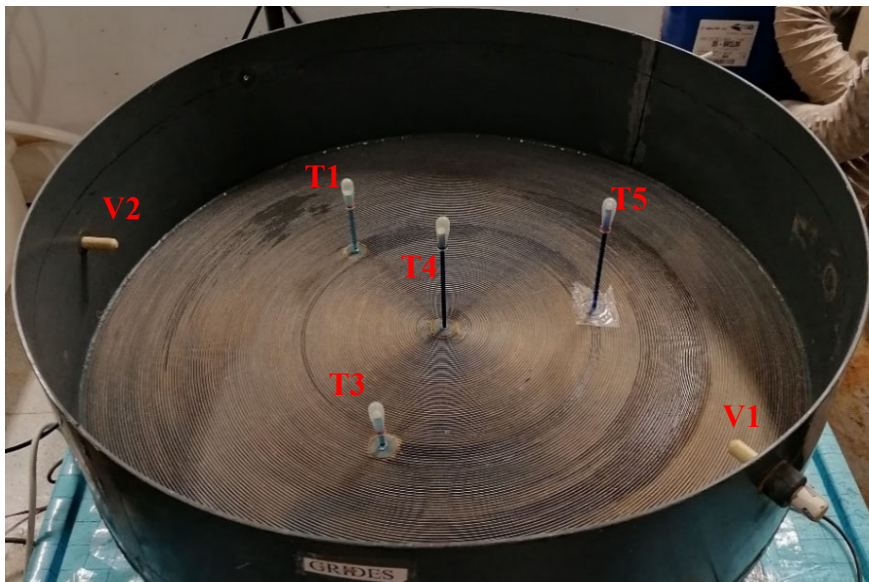


Figura 5.4. Disposición de los sensores en la bandeja circular.

#### 5.2.3.1 Células de carga

Las células de carga INTERFACE© de la serie SSM, indicadas con el número 08 de la Figura 5.1, se disponen de manera centrada en la cámara formando un triángulo equilátero donde cada una medirá el peso que recibe de manera individual. Se encuentran entre los aislantes indicados con el número 07 que los protegen y distribuyen el peso.

Su función es la de captar la variación del peso de la probeta situada sobre ellas que equivaldrá al peso de agua perdido o ganado por la probeta según el ciclo de estudio en el que se encuentre.

### 5.2.3.2 Tensiómetros

La información más importante en el estudio de las fisuras del suelo provocadas por secado viene dada por los cambios en la succión del suelo durante dicho proceso, ya que está directamente relacionado con el grado de saturación. Estos datos se obtienen a partir de unos sensores llamados tensiómetros, indicados con el número 14 de la Figura 5.1, los cuales vienen completamente saturados de agua. La existencia de burbujas en su interior, por muy pequeñas que sean, proporcionarían datos erróneos del test llevado a cabo.

Los tensiómetros escogidos para la recogida de datos son los UMS-T5© con distintas longitudes, de 5, 10 y 15 cm, para poder realizar las mediciones tanto por encima como por debajo del geosintético. Estos sensores miden la presión de agua en el suelo obteniendo, por tanto, la succión, la cual puede medirse en un rango de 100 a -85 kPa.

Para el estudio, se dispusieron cuatro tensiómetros en el interior de la bandeja circular, uno de 5 cm (T3), uno de 10 cm (T1) y dos de 15 cm (T4 y T5), llegando a diferentes profundidades, visibles en la Figura 5.4. No se dispusieron tensiómetros en los laterales de la bandeja como sí hicieron otros estudios como Lakshmikantha (2009) o Levatti (2015) porque el geosintético hace difícil su instalación al estar los orificios situados muy cerca del nivel del geosintético, y los resultados obtenidos por estos tensiómetros anteriormente no demostraron ser del todo precisos. Sin embargo, fue posible la obtención de datos en los dos niveles: por encima y por debajo del geosintético. La Figura 5.5 muestra su apariencia, mientras que las características técnicas vienen dadas por el fabricante (Meter Group, 2018).



Figura 5.5. Tensiómetros tipo UMS-T5© (Meter Group, 2018).

### 5.2.3.3 *Sensores de temperatura y humedad relativa*

Se han utilizado dos tipos de sensores para medir la temperatura y la humedad relativa tanto del suelo como del ambiente. En la bandeja se colocan los sensores Vaisala© HMP-230, localizado en el número 13 de la Figura 5.1, cada uno a diferente profundidad: 5 cm y 10 cm. Estos sensores son extremadamente sensibles y no pueden tenerse en cuenta en el inicio del experimento, ya que el suelo tiene un gran contenido de humedad provocando que dichos sensores tomen una mala lectura de ambos parámetros del suelo. El sensor se muestra en la Figura 5.6 y sus características técnicas y su descripción son las expuestas por Vaisala (2002).

Por otro lado, se sitúa un sensor Vaisala© HMD/W70 a cierta altura de la cámara ambiental, obteniendo los datos de humedad relativa y temperatura ambiental. De hecho, este es el sensor que determina si el deshumificador debe seguir en funcionamiento o no, ya que se le asigna al ordenador la humedad relativa ambiente a la que debe encontrarse la muestra, cuyo valor viene dado por dicho sensor. El número 05 de la Figura 5.1 muestra su posición exacta y su apariencia se muestra en la Figura 5.7. Sus características técnicas y su descripción son las expuestas por Vaisala (2006).



Figura 5.6. Sensor Vaisala HMP-230 que se coloca en los orificios laterales de la bandeja circular.



Figura 5.7. Sensor Vaisala HMD/W70 que se coloca en la cámara para tomar datos ambientales.

#### ***5.2.3.4 Cámara digital***

Para el análisis fotográfico se utiliza una cámara tipo Olympus© C-5050Z cuyas características técnicas vienen dadas por Olympus (2002), mostrada en la Figura 5.8 e indicada con el número 01 de la Figura 5.1.

La cámara digital está controlada totalmente por ordenador y toma una instantánea cenital cada lapso de tiempo determinado por el usuario. Las fotos muestran una imagen en planta de las bandejas pudiendo observar la evolución de las fisuras y permitiendo un posterior análisis basado en imágenes.

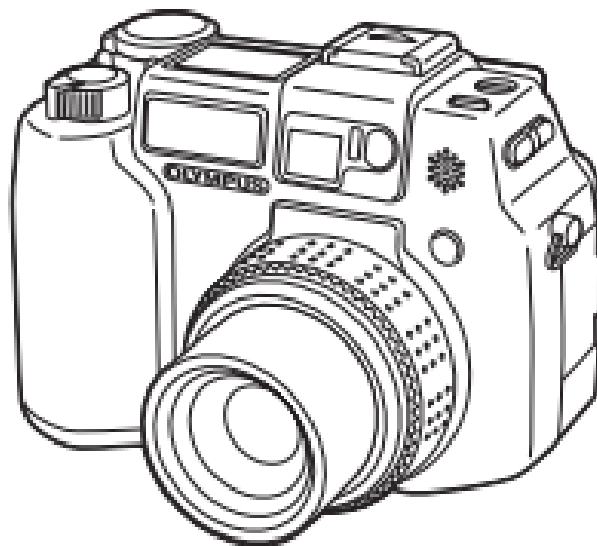


Figura 5.8. Cámara digital para toma de imágenes durante el ensayo, (Olympus, 2002).

### 5.2.4 Deshumificador

La humedad en el interior de la cámara ambiental es extraída mediante el uso de un deshumificador de la clase RECUSORB DR-010B y marca DST-Seibu Giken© (Figura 5.9). A este aparato se le conectan unos tubos que entran en la cámara por los números 03 y 04 de la Figura 5.1 formando un circuito cerrado de aire que permite evacuar la humedad ambiental hasta el porcentaje deseado por el usuario mediante un control informático.

Nótese que el aire entrante y el aire saliente se encuentran, aproximadamente, a la misma temperatura. Por ello, se ha de controlar la temperatura ambiente del laboratorio para no causar cambios bruscos de temperatura en el interior de la cámara ambiental debidos al circuito de aire. Las características técnicas del deshumificador pueden consultarse en Seibu Giken DST (2019).



Figura 5.9. Deshumificador del laboratorio clase RECUSORB DR-010B, (Seibu Geiken DST, 2019).

### 5.2.5 Mezcladora

Para la preparación previa al comienzo del ensayo a media escala, se utiliza una mezcladora tipo hormigonera eléctrica modelo Supermix marca UMACON. Este tipo de mezcladores permiten obtener una mezcla homogénea de suelo y agua sin formar grumos y evitando la formación de burbujas de aire internas que podrían alterar los resultados obtenidos al final del ensayo.



Sus características técnicas principales, mostradas en la Tabla 5.2, y un video del proceso de utilización de la máquina se encuentran en Umacon (2012). De esta hormigonera se destaca su bajo peso propio, su gran relación capacidad/tamaño y el hecho de ser eléctrica, lo cual le permite ser utilizada en el laboratorio. Además, se destaca el hecho de ser inoxidable, su buena maniobrabilidad y el número de palas dentro de la mezcladora. La Figura 5.10 muestra la hormigonera modelo Supermix.

Tabla 5.2. Características técnicas de la mezcladora UMACON Supermix, (Umacon, 2019).

Característica	Valor	Unidad
Capacidad de cuba	136	l
Número de palas	3	-
Motor gasolina	5500	rpm
Peso máquina	50	kg
Potencia de motor eléctrico	0.50	CV
Potencia de motor de gasolina	2.30	CV
Rendimiento horario	1.60	m <sup>3</sup> /h
Tensión de motor eléctrico	110/220	V
Volumen	1.04	m <sup>3</sup>



Figura 5.10. Mezcladora UMACON Supermix, (Umacon, 2019).

### 5.2.6 Control informático

Todos los ensayos se controlan de manera directa e informática utilizando el lenguaje de programación Visual Basic© para la captura de datos. Lakshmikantha (2009) describe al detalle este sistema informático y los diferentes softwares implicados.

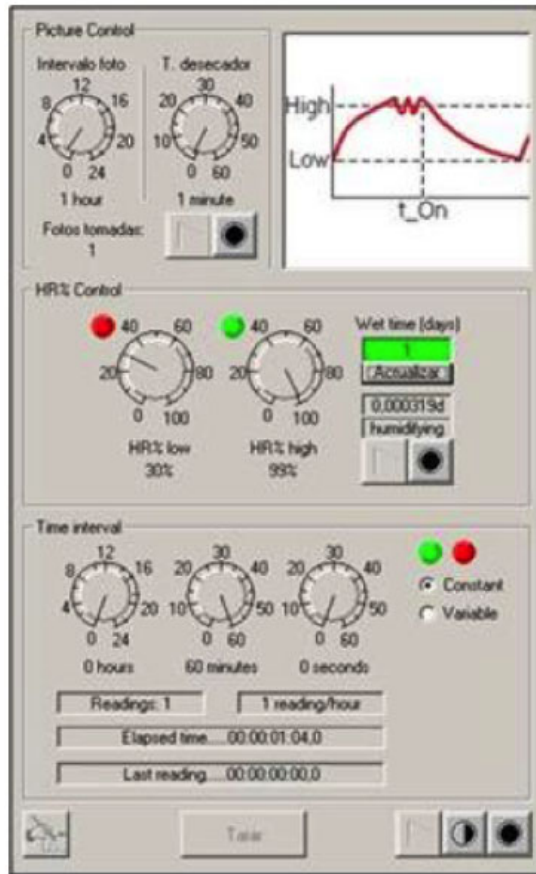


Figura 5.11. Panel del programa informático de control del ensayo de desecación.

Dicho sistema puede calibrar las condiciones ambientales de la cámara ambiental en términos de humedad relativa y temperatura adquiriendo datos de los diferentes sensores para su postproceso mediante programas informáticos sencillos como Microsoft Excel©.

La Figura 5.11 muestra el panel de control del programa y los distintos parámetros que el usuario puede controlar. En la pestaña de “Picture Control” puede establecerse el intervalo de tiempo entre cada fotografía a tomar, en un rango de 1 a 24 horas, y puede añadirse un tiempo de secado antes de tomar dicha foto de 1 a 60 minutos. Este tiempo de secado permite extraer la humedad ambiental en los ciclos de humectación antes de tomar una instantánea de la muestra de manera que dicha humedad no tape la lente y se obtengan fotografías borrosas o totalmente en blanco.

La pestaña de “HR% Control” sirve para controlar la humedad relativa ambiental poniendo cotas inferiores (“HR% low”) y superiores (“HR% high”). Por lo tanto, puede establecerse la humedad relativa ambiental mínima admisible durante el periodo de

deseccación mediante la cota inferior, y la humedad relativa ambiental máxima durante el periodo de humectación. De esta manera, durante el periodo de desecación, cuando la humedad relativa es menor a la cota inferior, el sistema pasa a humedecerse hasta alcanzar el valor marcado por la cota superior y viceversa. Para este trabajo, se mantendrán ambas cotas al 30% para estar cerca de ese valor en ambos procesos. El número a colocar en el “Wet Time” corresponde al número de días en el cual el sistema tiene que humedecerse para volver a estar entre los valores de la cota inferior y superior. Se recomienda que este valor sea de un orden de magnitud de 1 minuto para no dejar que la muestra se humedezca demasiado y vuelva a secarse cuando está demasiado alejado de la cota marcada.

Por último, en la pestaña “Time Interval” se puede controlar el intervalo de tiempo que ha de transcurrir entre cada toma de datos pudiendo variar dicho tiempo desde 1 segundo hasta más de 1 día. Dichos datos corresponden a los tomados por los sensores en términos de succión, temperatura y humedad relativa, tanto del suelo como del ambiente.

### **5.2.7 Higrómetro**

Para la obtención de las curvas de retención de las distintas muestras y del geosintético se utiliza un higrómetro tipo WP4-T© cuya ficha técnica es accesible en Decagon Devices Inc. (2007). La Figura 5.12 muestra el modelo de higrómetro utilizado.

Este aparato obtiene los valores de succión de la muestra de los cuales se puede obtener la curva de retención controlando el peso de estas y conociendo su contenido de agua inicial. Como se ha mencionado anteriormente, el contenido de agua inicial de las dos muestras de suelo analizadas en el higrómetro es de 32.2% y 18.6%.



Figura 5.12. Higrómetro tipo WP4-T© utilizado para mediciones de succión (Decagon Devices Inc., 2007).

### 5.3 Procedimiento experimental

Antes de empezar los ensayos en laboratorio, fue necesaria la obtención del suelo de estudio en las instalaciones de Agrópolis (UPC) situado en el Delta del Llobregat. Es el mismo material que se utilizó en Cordero et al. (2016) y Cordero (2019) ya que se obtuvo directamente de la bandeja que sirvió de ensayo en estos estudios.

Debido al mal estado del terreno, muy seco o muy húmedo según el nivel de la capa, se llevó a cabo un proceso de tamizado secando previamente las partes más húmedas. Se utilizaron tamices de 2 mm y se eliminó la materia orgánica que había crecido en dicho suelo.

La Figura 5.13 muestra la estructura utilizada para el tamizado del suelo donde puede observarse el tamiz, los caballetes y el saco donde se almacenaron hasta 250 kg de material. Una vez acabado este proceso, se transportó el material al laboratorio para el inicio de los ensayos en la cámara ambiental.



Figura 5.13. Estructura para el tamizado del suelo investigado.

#### 5.3.1 Curva de retención

La obtención experimental de la curva de retención se llevó a cabo mediante el uso del higrómetro descrito en el Apartado 5.2.7 anterior siguiendo los pasos que se indican a continuación para dos tipos de muestras: suelo con un contenido de agua del 18.16% (cerca del óptimo) y suelo con un contenido de agua del 32.26% (cerca del valor del ensayo). Por tanto:

- Se pesan los tres recipientes que se utilizarán para cada muestra de forma individual.
- Se prepara la primera muestra calculando el contenido de agua óptimo para el tipo de suelo a analizar y se le añade agua hasta obtener tal porcentaje. Se lo comprime debidamente hasta conformar un grosor de 4.5 mm.
- Se prepara la segunda muestra añadiéndole agua hasta alcanzar un contenido de agua similar el del estudio, de un 30%.
- A partir de este punto, la metodología a seguir es exactamente la misma para cada muestra. Se pesa cada muestra y se mide su succión por medio del higrómetro apuntando los valores de cada variable.
- Se repite el paso anterior hasta que las muestras no muestren prácticamente una variación en su peso, lo que significará que han perdido casi toda su agua.
- Se recomienda que las lecturas no se tomen con periodos de tiempo muy diferentes. Para el secado, una lectura cada 2-3 horas, y para el humedecimiento, una lectura cada 24 horas.

### **5.3.2 Bandejas rectangulares**

Para la preparación del experimento a pequeña escala, se siguen los siguientes pasos, diferenciando la Bandeja 1 (suelo sin geosintético), la Bandeja 2 (suelo con geosintético saturado) y Bandeja 3 (suelo con geosintético seco):

- Se pesan y se miden las tres bandejas a utilizar en el ensayo.
- Se toman muestras del suelo procedente de Agrópolis y se determina su humedad mediante horno.
- Se calcula una relación en peso de suelo y agua para obtener muestras con un contenido de agua de, aproximadamente, 30%.
- Se realizan tres mezclas a mano, una para cada bandeja, y se vierte cada mezcla en la bandeja correspondiente.
- Se cogen muestras del suelo húmedo de las bandejas para averiguar su contenido de agua exacto en cada caso.
- Para las bandejas con una capa de geosintético en el interior de la probeta, aquél se coloca a 3 cm de profundidad (ver Figura 5.14). Para la Bandeja 3, el geosintético se sumerge previamente en agua para saturarlo.

- Se pule la superficie de la muestra para hacerla plana a medida que se coloca el material tal y como se muestra en la Figura 5.15. Este paso es importante si se realizan fotografías para la correcta realización del análisis por imágenes, ya que el programa podría interpretar las posibles imperfecciones iniciales de la superficie como fisuras.
- Se coloca cada bandeja sobre una célula de carga distinta y se coloca un sensor de humedad a la altura de las bandejas para medir la humedad relativa en la superficie de las muestras dando lugar al inicio del ensayo.
- Al acabar, se retiran las bandejas y se rompen las muestras para ver cómo se han comportado las fisuras bajo la superficie.

Este ensayo es simplemente comparativo debido a que su función es determinar si la profundidad del geosintético y su contenido de humedad son adecuados para el otro experimento ya que el geosintético puede colocarse, 'a priori', a cualquier profundidad ya sea en estado seco o totalmente húmedo.

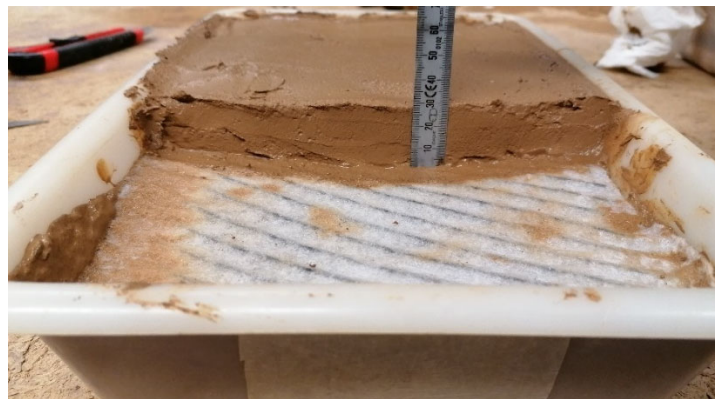


Figura 5.14. Profundidad en la que se encuentra el geosintético para los ensayos a pequeña escala.



Figura 5.15. Aspecto de la superficie tras aplanarla.

### 5.3.3 Bandeja circular de diámetro 80 cm

La preparación del ensayo de mayor dimensión es similar al explicado anteriormente, pero teniendo en cuenta los detalles que corresponden a la preparación de los sensores a utilizar. Partiendo del material previamente tamizado y listo para utilizar, se siguen los siguientes pasos de preparación del experimento:

- Se preparan los cuatro tensiómetros a utilizar de manera que estén completamente saturados, es decir, sin burbujas en su interior. Este proceso puede llevar días y es de máxima importancia ya que la burbuja más pequeña en su interior provocaría errores en la lectura de datos.
- Los sensores de temperatura y humedad Vaisala© han de ser revisados para confirmar su correcto funcionamiento.
- Se calibran las células de carga de manera que estén completamente niveladas y taradas antes de colocar el recipiente encima.
- Se comprueba que el software funciona correctamente y que activa y desactiva el deshumificador y la cámara en las condiciones programadas.
- Se coloca la bandeja circular totalmente centrada en el triángulo equilátero formado por las tres células de carga para repartir lo más exactamente posible el peso en ellas.
- Los tensiómetros se colocan en los agujeros que existen en la parte inferior de la bandeja siguiendo el patrón presentado en el Apartado 5.2.3. Además, se colocan unos tapones en los agujeros laterales de la bandeja donde se alojarán los sensores Vaisala que se instalarán más tarde.
- Los tensiómetros han de protegerse frente a la cavitación colocándose una protección de plástico que contiene agua destilada en su interior para mantenerlos húmedos en todo momento.
- Se mide el peso de la bandeja vacía con todos los sensores ya instalados.
- Se toman muestras del suelo de Agrópolis para determinar su humedad mediante horno. La humedad inicial del suelo es de 4.12%.
- Se realiza un cálculo previo para conocer el agua restante necesaria en cada tanda de preparación para llegar al contenido de agua inicial objetivo del ensayo del 30%.

Tabla 5.3. Características de cada tanda de preparación.

<b>Tanda</b>	<b>Peso del suelo (kg)</b>	<b>Peso agua (kg)</b>	<b>Contenido de agua (%)</b>
Primera tanda	32.388	8.420	31.74
Segunda tanda	56.026	14.567	31.77
Tercera tanda	62.982	16.372	31.65
Cuarta tanda	10.454	2.718	31.91



Figura 5.16. Procedimiento de preparación de una de las tandas de la mezcla de suelo.



Figura 5.17. Mezcladora en funcionamiento durante la preparación del suelo.



- Se prepara la mezcla utilizando la hormigonera descrita en el Apartado 5.2.5 mediante cuatro tandas de preparación. Cada tanda contiene un peso de suelo y agua distinto, pero manteniendo el contenido de agua inicial de 30%. La Tabla 5.3 muestra los detalles de preparación de cada tanda de mezcla y las Figuras 5.16 y 5.17 muestran el procedimiento de mezcla mediante hormigonera.
- Tras la realización de cada tanda, se vierte sobre la bandeja con especial cuidado de no estropear los sensores ya instalados y esparciéndola para evitar el aire en el interior de la mezcla.
- Durante la preparación de la muestra es recomendable revisar el límite líquido de la mezcla mediante un ensayo de cuchara de Casagrande tal y como se muestra en la Figura 5.18. Así, de manera orientativa, se puede asegurar la correcta realización de dicha mezcla.
- Al alcanzar la altura de 15 cm, a 5 cm de la superficie (ver Figura 5.19), desde la base de la bandeja, se coloca el geosintético totalmente saturado tras sumergirlo en agua durante unos minutos.
- Se ha de tener especial cuidado con los dos tensiómetros situados por encima del nivel del geosintético. Para ello se han de realizar dos agujeros al geosintético para permitir el paso de dichos tensiómetros a través de él.
- Se continua con el vertido de la mezcla encima del geosintético. Se ha de aplanar la superficie a medida que se añade suelo en la bandeja para evitar burbujas de aire internas dentro de la muestra (ver Figura 5.20).



Figura 5.18. Ensayo de cuchara de Casagrande para el control del límite líquido durante la preparación.



Figura 5.19. Profundidad a la que se encuentra el geosintético en el ensayo a media escala.

- Una vez vertidas las cuatro tandas de la mezcla, se aplanan la superficie para facilitar el análisis fotográfico del proceso y se tapa para evitar la pérdida de humedad durante el reposo de la muestra.
- Se deja reposar la mezcla durante 48 horas envolviendo la muestra en papel transparente para que no exista pérdida de humedad previa al inicio del ensayo consiguiendo el aspecto mostrado en la Figura 5.21.



Figura 5.20. Proceso de aplanamiento de la superficie durante el vertido de la mezcla en la bandeja.



Figura 5.21. Aspecto final de la muestra circular del ensayo a media escala.

- Se retiran los tapones para colocar los sensores de Vaisala en su lugar.
- Se baja la cubierta de la cámara ambiental y se coloca en su sitio.
- Se coloca la cámara digital en posición asegurando que las imágenes obtenidas permitan visualizar toda la superficie de la muestra.
- Se activa el programa informático para la lectura de datos y la toma de fotografías a partir de este momento.
- Se programa el apagado y el encendido del deshumificador para mantener una humedad relativa ambiental del 30%.
- Se programa la toma de datos y de fotografías cada hora las primeras dos semanas del ensayo. Para el resto del ensayo, se programa la toma de datos y de fotografías cada 4 h.
- Se recomienda un control diario de los sistemas de apagado y encendido de los diferentes aparatos y extraer las fotos y datos de manera periódica para evitar el llenado de memoria.

El aspecto final de todo el proceso es el mostrado en la Figura 5.22, cuando da comienzo el inicio del ensayo.

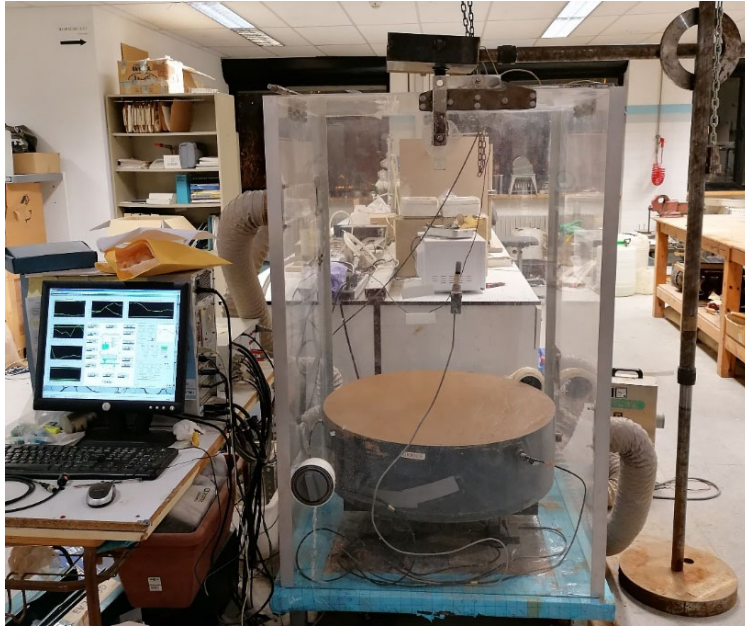


Figura 5.22. Aspecto final tras acabar todo el proceso de preparación: inicio del ensayo.

## 5.4 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la curva de retención del suelo y del geosintético, de los ensayos a pequeña escala en bandejas rectangulares y del ensayo a media escala en bandeja circular mediante cámara ambiental en ambos casos.

### 5.4.1 Curva de retención

Mediante el uso del higrómetro presentado en el Apartado 5.2.7, se realizan diversas lecturas sobre dos muestras de suelo con un distinto contenido de agua. La primera muestra tiene un contenido de humedad del 18.16%, un valor cercano al óptimo establecido en un 16% según Cordero (2019), y la segunda muestra del 32.26%, cercano al valor de humedad correspondiente al ensayo en cámara ambiental.

Para el primer caso, se pesó el recipiente vacío y lleno con la muestra ya preparada para la obtención de los datos iniciales del peso de manera que pudiese obtenerse el porcentaje de contenido de agua en función del tiempo utilizando la Ecuación 5.1. De hecho, el procedimiento consiste en la lectura del peso de la muestra y de su succión mediante el uso de una báscula y un higrómetro, respectivamente, cada cierto período de tiempo hasta que la muestra se seque. Las características iniciales para este caso se encuentran en la Tabla 5.4.

$$w = w_o - \frac{M_{t+s+a} - M_{t+s}}{M_{t+s} - M_t} 100 \quad (5.1)$$

donde  $w$  = humedad relativa actual de la muestra (%);  $M_{t+s+a}$  = masa del recipiente más masa del suelo más masa del agua en el inicio del ensayo;  $M_{t+s}$  = masa del recipiente más masa del suelo más masa actual del agua;  $M_t$  = masa del recipiente;  $w_o$  = humedad relativa inicial de la muestra (%).

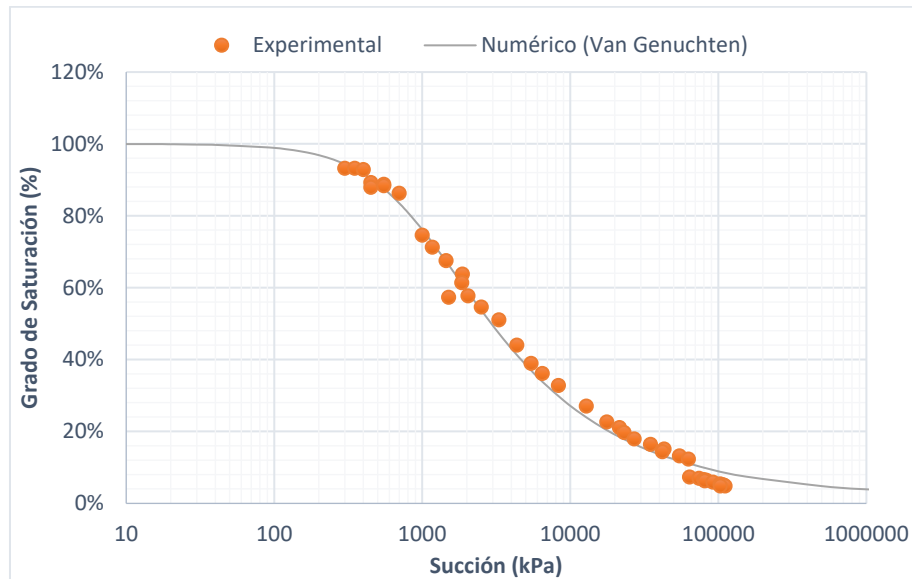


Figura 5.23. Curvas de retención experimental y numérica de la muestra con un contenido de agua de 18.16%.

Tras la obtención del contenido de agua de la muestra, se puede obtener la curva de retención del suelo a partir de la succión medida directamente y el grado de saturación obtenido de las fórmulas del modelo de Van Genuchten (Ecuaciones 2.17 y 2.18). El valor de los diferentes parámetros de las ecuaciones se obtiene de manera iterativa para cada valor de succión hasta cuadrar esta solución numérica con lo obtenido experimentalmente. Los valores de dichos parámetros se muestran en la Tabla 5.5 y las curvas de retención comparando los resultados numéricos y experimentales se muestran en la Figura 5.23 donde se observa que son muy similares dando por válido el resultado numérico.

Tabla 5.4. Condiciones iniciales de la probeta con humedad del 18.16%.

Geometría	Dimensión (mm)	HR inicial (%)	Peso vacío (g)	Peso total (g)
Circular	39×4.5	18.16	1.6718	12.9590

Tabla 5.5. Valores de los parámetros del modelo de Van Genuchten para la probeta con humedad del 18.16%.

Parámetro	Simbología	Valor	Unidad
Presión	$P_o$	900	kPa
Tensión superficial	$\sigma_o$	0.072	N/m
Función de forma	$\lambda$	0.36	-
Saturación máxima	$S_{ls}$	1.00	-
Saturación residual	$S_{rl}$	0.02	-

Para el segundo caso, se realiza exactamente el mismo procedimiento experimental, pero otorgando a la probeta un valor mayor de su contenido de agua hasta acercarse al valor real de la humedad inicial de las probetas a ensayar en la cámara ambiental. Los datos iniciales son los mostrados en la Tabla 5.6.

Aplicando nuevamente la Ecuación 5.1 para obtener el contenido de agua a partir de las medidas de peso y a partir de las Ecuaciones 2.17 y 2.18 para obtener el grado de saturación a partir de la humedad y de la succión, se obtiene la curva de retención succión-grado de saturación de la Figura 5.24. En ella puede observarse una curva numérica que se adapta de forma correcta a la curva formada por los datos experimentales. La Tabla 5.7 muestra los parámetros obtenidos tras la resolución iterativa a partir del modelo de Van Genuchten.

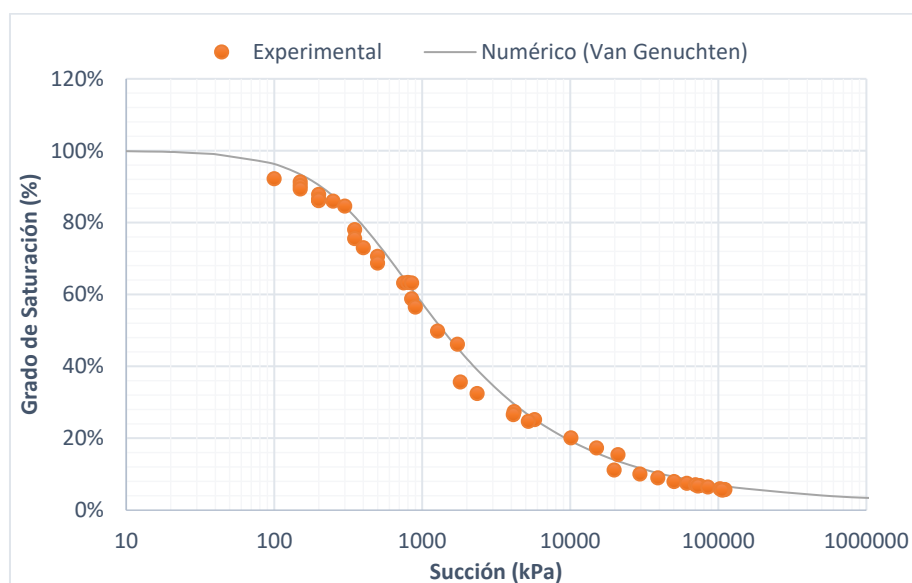


Figura 5.24. Curvas de retención experimental y numérica de la probeta con humedad del 32.26%.

Tabla 5.6. Condiciones iniciales de la muestra con contenido de agua de 32.26%.

Geometría	Dimensión (mm)	HR inicial (%)	Peso vacío (g)	Peso total (g)
Circular	39×4.5	32.26	1.6568	9.9101

Tabla 5.7. Valores de los parámetros del modelo de Van Genuchten de la probeta con humedad del 32.26%.

Parámetro	Simbología	Valor	Unidad
Presión	$P_o$	400	kPa
Tensión superficial	$\sigma_o$	0.072	N/m
Función de forma	$\lambda$	0.35	-
Saturación máxima	$S_{ls}$	1.00	-
Saturación residual	$S_{rl}$	0.02	-

Se destaca la importancia del valor de los parámetros de las Tablas 5.5 y 5.7 para llevar a cabo la simulación numérica del Apartado 6, ya que la curva de retención es una característica del suelo necesaria para su análisis numérico.

#### 5.4.2 Bandejas rectangulares

Este pequeño ensayo se llevó a cabo con el objetivo de obtener un resultado preliminar del comportamiento del geosintético en el proceso de secado de una muestra de suelo. Se prepararon tres muestras rectangulares en bandejas de plástico, una sin geosintético, otra con el geosintético totalmente saturado y la tercera con el geosintético seco. Las características iniciales de cada una de ellas se presentan en la Tabla 5.8.

Las tres bandejas se colocaron en la cámara ambiental, cada una sobre una de las células de carga, con las condiciones ambientales fijadas en un 30% de humedad relativa ambiental y 25°C de temperatura. La Figura 5.25 muestra la evolución ambiental de la humedad relativa y la temperatura dentro de la cámara. Puede observarse como durante los primeros ocho días de ensayo la humedad relativa se mantiene en el 30% y la temperatura en los 25°C. Sin embargo, debido a un fallo técnico en ese preciso día, el deshumificador se desactivó dejando que la humedad creciera hasta valores de, aproximadamente, 90%. Ante ese problema se decidió someter a las muestras a un secado continuo hasta el final del ensayo llegando a humedades ambientales del 22%. Se destaca también la elevada humedad ambiental durante el primer día de ensayo, correspondiente al día de preparación de las muestras cuando el deshumificador empezaba a funcionar.

Tabla 5.8. Condiciones iniciales de las muestras rectangulares.

Núm. de bandeja	Descripción	Dimensión (cm)	Profundidad geosintético (cm)	HR inicial (%)	Peso vacío (kg)	Peso total (kg)
1	Sin geosintético	30×20×5	-	31.6	0.270	6.197
2	Geosintético saturado	30×20×5	3.0	32.4	0.297	6.726
3	Geosintético seco	30×20×5	3.0	32.5	0.351	6.104

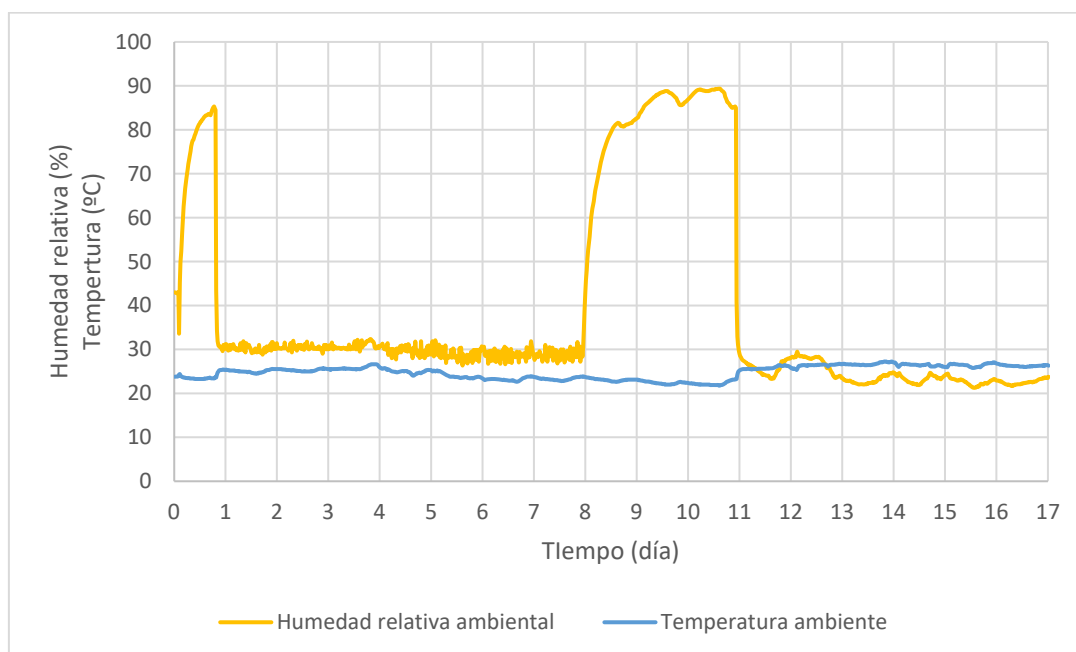


Figura 5.25. Condiciones ambientales durante el proceso de desecación de las muestras rectangulares.

Los datos obtenidos de la cámara ambiental corresponden al peso de cada una de las probetas en función del tiempo. Dichos datos son tomados a intervalos de 20 min. Para la obtención del contenido de agua de cada muestra en cada instante de tiempo, se utiliza la Ecuación 5.1 la cual permite obtener dicha humedad a partir de los pesos ya conocidos.

Aplicando esta fórmula con los datos de peso obtenidos de las células de carga se han obtenido los valores de humedad mostrados en la Figura 5.26. El ritmo inicial de pérdida de agua de la muestra sin geosintético es la más rápida, aunque, llegado a un punto, el ritmo de pérdida de humedad de las otras dos muestras se acelera, especialmente aquella que cuenta con el geosintético saturado. El efecto del fallo en el sistema de apagado y encendido del deshumificador se observa en la gran duración que



tienen algunos escalones, llegando a alcanzar los 5 días en la zona en donde no hubo secado por este problema. Sin embargo, dicha humedad varía en valor e intervalo de tiempo en el que se mantiene constante según la naturaleza de la muestra. Finalmente, los valores en contenido de agua de cada una de las muestras al final del ensayo son de 6.23%, 2.53% y 6.46% para la muestra sin geosintético, con geosintético saturado y con geosintético seco, respectivamente.

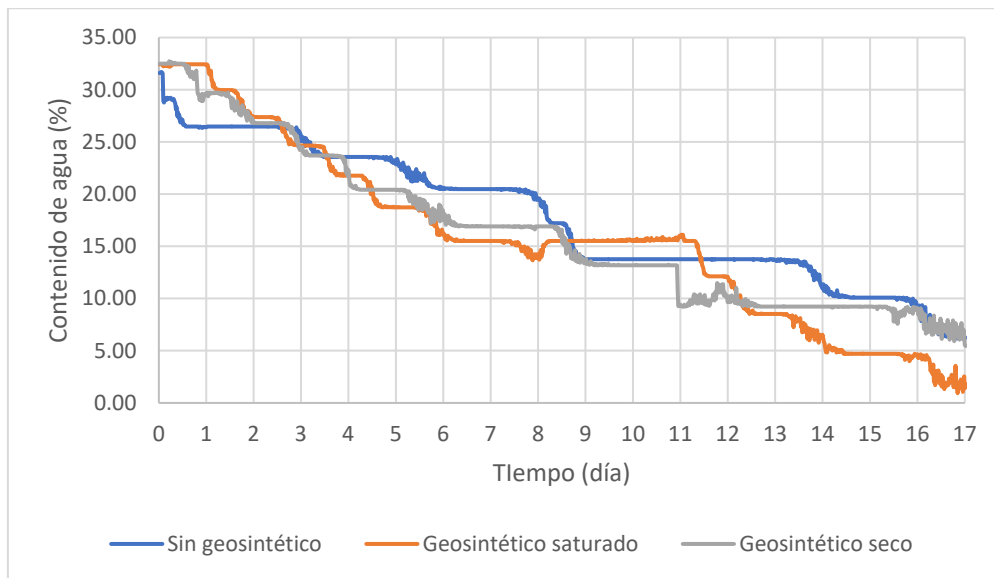


Figura 5.26. Variación del contenido de agua durante la desecación de las muestras rectangulares.



Figura 5.27. Aspecto final tras desecación de la Bandeja 1 (centro), 2 (derecha) y 3 (izquierda).

Los resultados claramente muestran que el geosintético influye en el proceso de desecación del suelo. Sin embargo, no parece que evite la pérdida de humedad de este, sobre todo cuando su estado inicial es el saturado. De hecho, en la Figura 5.27 puede observarse como las únicas dos probetas que presentan fisuración en el interior, además de en el borde, son precisamente la que contienen el geosintético, con un mayor número de fisuras en la muestra con geosintético seco.

Posteriormente al ensayo en cámara ambiental, se ha realizado un estudio del contenido de agua final de las probetas por medio de un horno tomando muestras de la superficie superior e inferior de cada una. La Tabla 5.9 muestra los datos y los resultados obtenidos en cada caso tras la aplicación de la Ecuación 5.1. Esto respalda los resultados obtenidos por medio de la cámara ambiental situando a la probeta con el geosintético saturado como la que más humedad pierde. Sin embargo, y pese a que los resultados medios de las otras dos probetas coinciden con los que se muestran en la Figura 5.26, los resultados con el geosintético saturado difieren en un valor del 3.4%, aproximadamente. Por otro lado, las probetas con geosintético tienen valores muy distintos en el contenido de agua que existe en sus dos caras con diferencias de hasta un 6.5%. Esta diferencia, en el caso de la probeta sin geosintético, es más pequeña, pero se entiende su existencia ya que el nivel de exposición de cada cara es muy distinto.

La hipótesis se basaba en la menor pérdida de humedad y, por tanto, en la menor fisuración de suelos con geosintéticos. Sin embargo, los resultados obtenidos en este ensayo preliminar muestran lo contrario, una fisuración menor en suelos sin su presencia. Esto se explica teniendo en cuenta que la cámara ambiental, al obtener el contenido de agua de la muestra por medio del peso de esta, también mide la pérdida de agua que sufre el geosintético al estar este saturado y quedar expuesto tras la fisuración del suelo. Por ello, en las pruebas de medición de humedad realizadas posteriormente mediante horno se obtienen valores mayores, ya que se mide un trozo de suelo únicamente y no toda la muestra, como en la cámara ambiental, evitando tener en cuenta la humedad perdida por el geosintético. Esto también explicaría que la muestra con un geosintético seco muestre valores más elevados de humedad final ya que el geosintético no tiene agua que perder tras quedar expuesto por la fisuración de la superficie. Por otro lado, el hecho de estar seco crea un efecto barrera entre el suelo que se encuentra por debajo del geosintético y el suelo que se encuentra por encima, dificultando su evaporación y obteniendo valores más elevados de contenido de agua en la cara inferior.

Tabla 5.9. Contenidos de agua de ambas caras de cada muestra rectangular.

Parámetro	Sin geosintético		Geosintético saturado		Geosintético seco	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
$M_t$ (g)	28.00	28.50	26.10	24.70	28.80	25.00
$M_{t+s}$ (g)	107.65	96.39	144.10	152.17	175.20	122.45
$M_{t+s+a}$ (g)	111.90	101.00	148.00	163.00	179.80	131.80
$w$ (%)	5.3	6.8	3.3	8.5	3.1	9.6
$w_{media}$ (%)	6.1		5.9		6.4	

Adicionalmente, este efecto barrera provoca que las muestras con geosintético sufran de una separación que distingue la parte de suelo por encima del geosintético y la parte de suelo por debajo de él siendo dos capas de suelo totalmente independientes. Estas dos partes, totalmente separadas, actúan individualmente como dos suelos de distinto espesor favoreciendo la fisuración de la parte superior al tener muy poco espesor. Por ello, también se explica que se obtengan valores tan bajos del contenido de agua en la cara superior en comparación con la muestra sin geosintético favoreciendo su fisuración, aunque proteja la cara inferior reduciendo el ritmo de evaporación en ella.

Por tanto, se concluye que el hecho de añadir un geosintético en una muestra de suelo favorece la evaporación de la superficie de esta muestra por encima del geosintético, pero protege de manera muy efectiva el suelo bajo el geosintético disminuyendo la evaporación de manera notoria. El hecho de colocar un geosintético totalmente saturado resulta ser menos efectivo en comparación con el geosintético seco en cuanto a la protección de la capa de suelo inferior. Sin embargo, la capa de suelo superior sufre el efecto contrario y, de hecho, el número de fisuras es menor cuando el geosintético se encuentra inicialmente saturado.

### 5.4.3 Bandeja circular de diámetro 80 cm

El ensayo principal se llevó a cabo para justificar el uso de geosintéticos en el proceso de secado de una muestra de suelo para evitar fisuración. Se preparó una probeta circular en un contenedor de PVC de 80 cm de diámetro y 20 cm de altura, colocando el geosintético a una profundidad de 5 cm, es decir, a 15 cm de la cara inferior del contenedor. Las características iniciales del suelo utilizado se presentan en la Tabla 5.10. El experimento fue realizado sin compactar y bajo las mismas condiciones de contorno en la cámara ambiental que las especificadas anteriormente: 30% de humedad relativa y 25°C de temperatura. La Figura 5.12 muestra la evolución de estos parámetros de la cámara durante el ensayo.

Tabla 5.10. Condiciones iniciales de la probeta circular.

Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro	80	cm
Altura	20	cm
Profundidad de ubicación del geosintético	5	cm
Contenido de agua inicial	30.39	%
Peso de la bandeja vacía	35.09	kg
Peso inicial total	224.10	kg

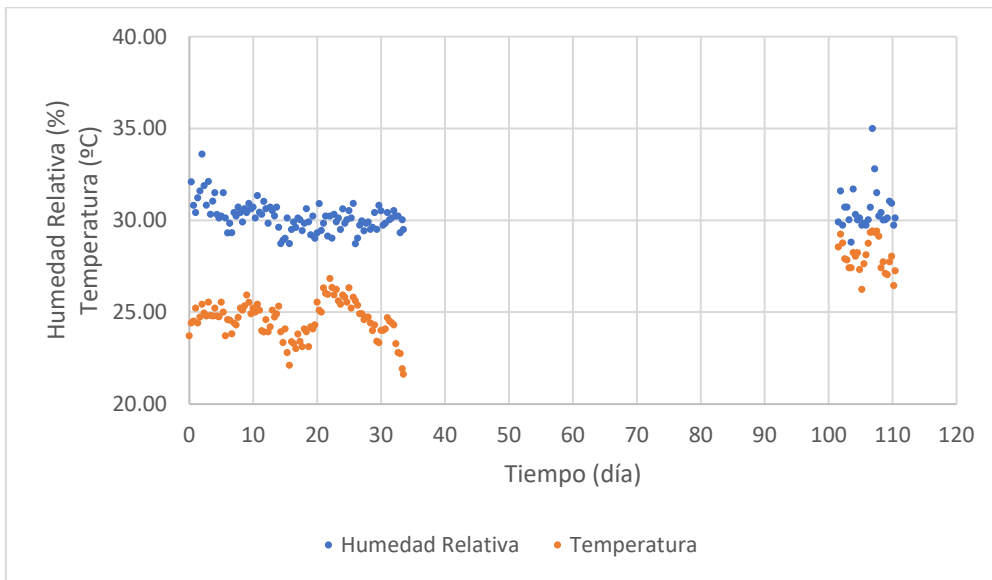


Figura 5.28. Condiciones ambientales durante el proceso de desecación de la probeta circular.

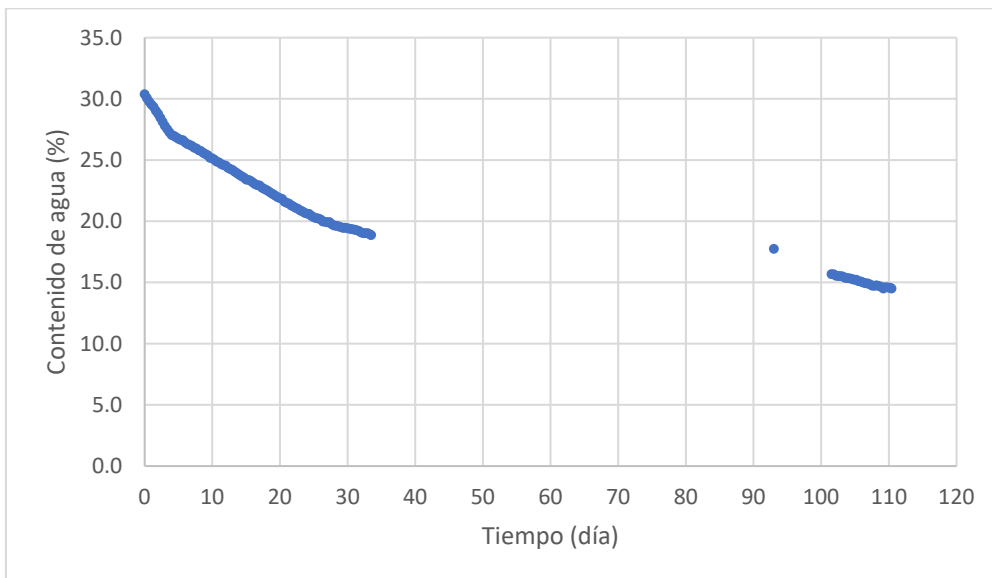


Figura 5.29. Variación del contenido de agua de la probeta circular en función del tiempo.

Los datos mostrados en este apartado se concentran en lo ocurrido durante los primeros 34 días y los últimos 10 días del ensayo debido a un error en la toma de datos, que no pudo subsanarse al no poder acceder al laboratorio durante el estado de alarma decretado a consecuencia de la pandemia de Covid-19. De hecho, entre los días 34 y 93 del ensayo las condiciones ambientales cambiaron a una temperatura de 30°C y una humedad relativa ambiental del 94% debido al error ocurrido en el laboratorio. Este error no se pudo corregir hasta que fue posible el acceso al laboratorio al entrar en fase 1 de desescalada del confinamiento provocado por la Covid-19. Sin embargo, los datos disponibles muestran de manera suficiente el efecto del geosintético haciendo posible sacar conclusiones sólidas.

La Figura 5.29 muestra la evolución del contenido de agua de la muestra en función del tiempo. La pérdida de agua ocurre de manera lineal y es más rápida durante la primera semana del ensayo, perdiendo velocidad de evaporación a partir de ese punto de manera asintótica hasta estabilizar su valor a partir del día 40, aproximadamente. Se destaca que el agua perdida entre los días 34 y 92 supone una disminución de 2 kg en el peso de la probeta, lo que indica un ritmo de evaporación muy bajo, pero no nulo, que permite hacerse una idea del valor del contenido de agua durante esos días.

El efecto barrera comentado en el ensayo con bandejas rectangulares se observa, precisamente, en ese punto de cambio de pendiente durante la primera semana de ensayo. La pendiente de la gráfica cambia drásticamente, indicando que hasta entonces la evaporación se concentraba en la capa superior de la muestra. Esto explica el tan elevado ritmo de secado durante los primeros días. A partir de ahí, el agua de la capa inferior empieza a fluir y a evaporarse a través de las grietas ya formadas en la parte superior con un ritmo mucho más lento debido a la presencia del geosintético.

En términos de succión, se presentan los resultados en las Figuras 5.30 y 5.31 para los tensiómetros T1, T3, T4 y T5 situados a 10, 15, 5 y 5 cm de profundidad, respectivamente, donde los últimos están por encima del geosintético (Figura 5.4). Se observa un rápido aumento de la succión obtenida por los tensiómetros T4 y T5 al estar estos a menor profundidad y pertenecer a la capa superior de la probeta, la cual sufre un proceso de secado mucho más rápido, demostrando que esta se ve afectada negativamente por la presencia del geosintético. Estos dos tensiómetros cavitan entre los días 14 y 16, señalando que el secado de dicha capa ya ha finalizado y que las fisuras son presentes y muy visibles.

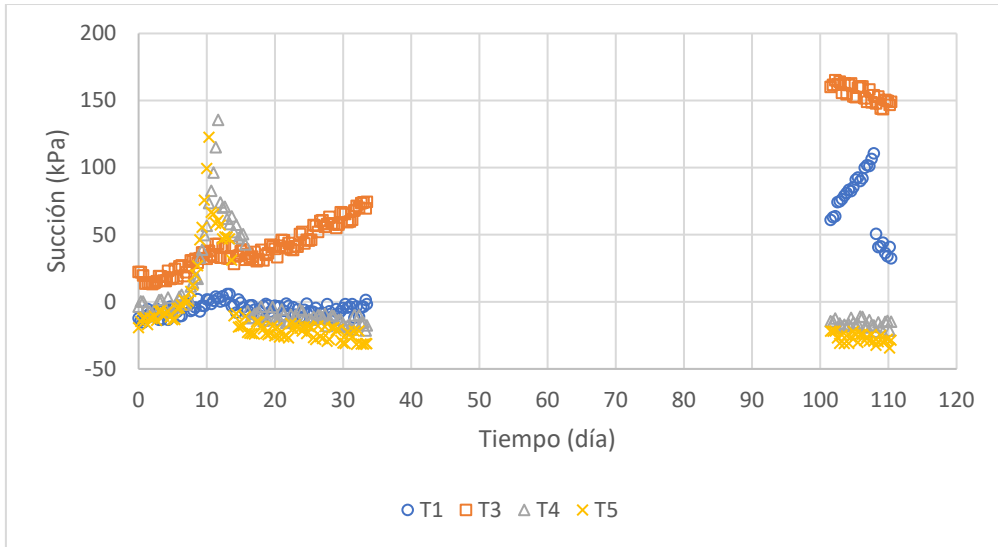


Figura 5.30. Variación de la succión en función del tiempo.

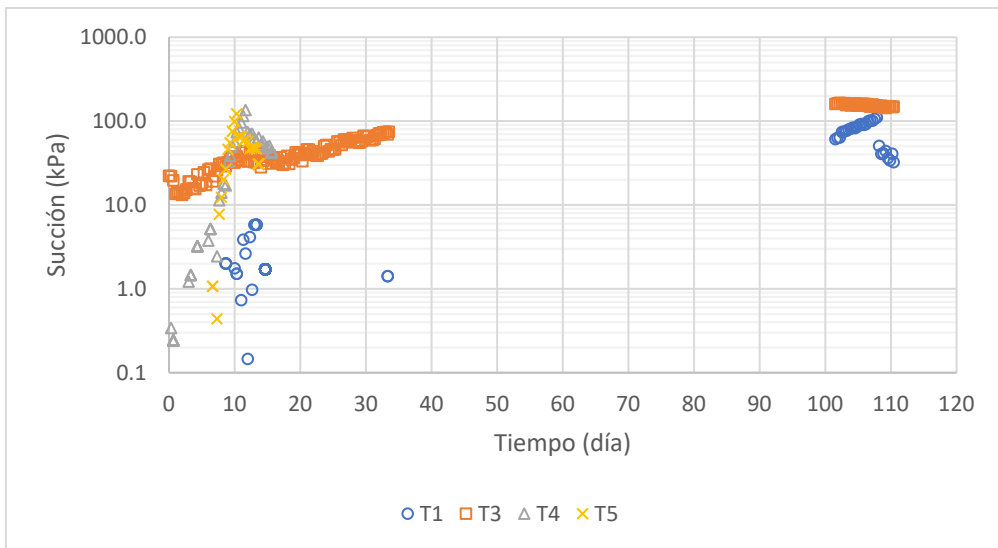


Figura 5.31. Variación de la succión en función del tiempo en escala logarítmica.

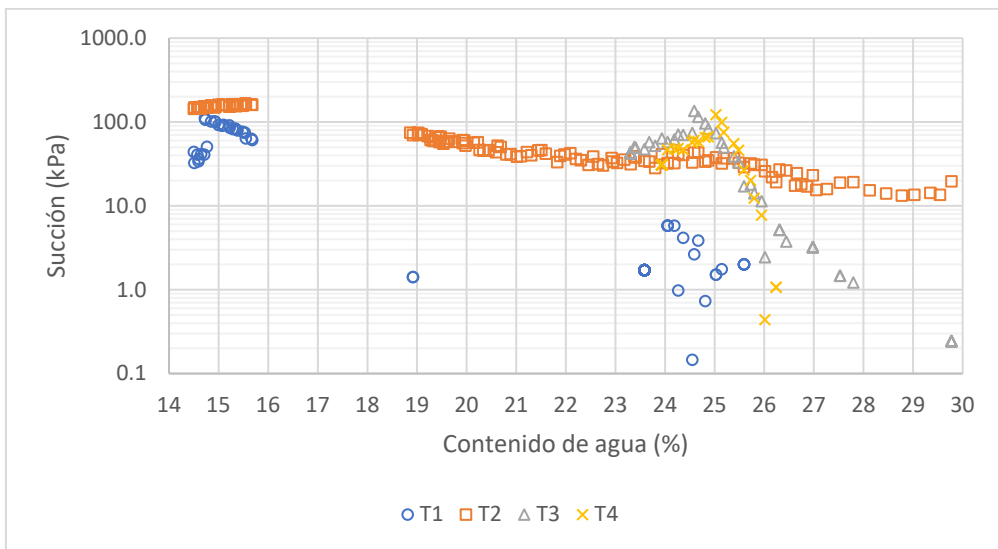


Figura 5.32. Variación de la succión en función del contenido de agua general en escala logarítmica.

Por otro lado, la succión medida por los tensiómetros situados a mayor profundidad, en la capa inferior, aumenta de forma mucho más lenta hasta el punto de no producirse cavitación, como es el caso del tensiómetro T3. En este caso, el geosintético favorece a la capa inferior ralentizando el proceso de desecación y evitando su secado durante los 111 días de duración del ensayo. Sin embargo, se observan malas lecturas en el tensiómetro T1 durante los primeros 34 días, con lo cual los resultados obtenidos de este tensiómetro en esta etapa no son representativos debido, posiblemente, a una mala instalación del sensor durante el proceso de preparación del ensayo. Aun así, durante la fase final del ensayo parece dar resultados coherentes al llegar a valores de succión iguales a los tensiómetros T4 y T5 en el momento de cavitación con unos valores de, aproximadamente, 120 kPa en el día 108.

Por último, la succión puede representarse en función del contenido de agua de la probeta tal y como se observa en la Figura 5.32. El valor de contenido de agua del suelo en el momento de cavitación de los tensiómetros T4 y T5 es de un 23%, para el T1 es del 15% y para el T3 no se observa cavitación ni llegando al 14% de contenido de agua.

Analizando la succión en función de la profundidad se obtienen las Figuras 5.33 y 5.34 correspondientes a los días más representativos del ensayo: días 7, 10, 12, 14, 16, 20, 25 y 110. Se aprecia una disminución de la succión con la profundidad durante los primeros días hasta la cavitación de los tensiómetros situados en la capa superior de la muestra. También se aprecia más claramente como el tensiómetro T1 muestra resultados incoherentes durante el primer mes, apoyando la idea de una posible mala instalación. El comportamiento en los días posteriores a la cavitación de los tensiómetros más superficiales es contrario, la succión aumenta con la profundidad de la muestra.

Las Figuras 5.35 y 5.36 muestran los valores obtenidos por los sensores Vaisala, en términos de humedad relativa y temperatura, respectivamente. La ubicación del sensor V1 se encuentra a 5 cm de profundidad, mientras que el sensor V2 se encuentra a 10 cm, es decir, uno por encima del geotextil y otro por debajo, en el lateral de la bandeja. En la Figura 5.35 puede observarse como el sensor V2 se encuentra en estado de saturación durante todo el ensayo mientras que el sensor V1 muestra el inicio de la desaturación de la capa superior de la muestra en el día 12. Por otro lado, la Figura 5.36 muestra un comportamiento similar entre ambos sensores.

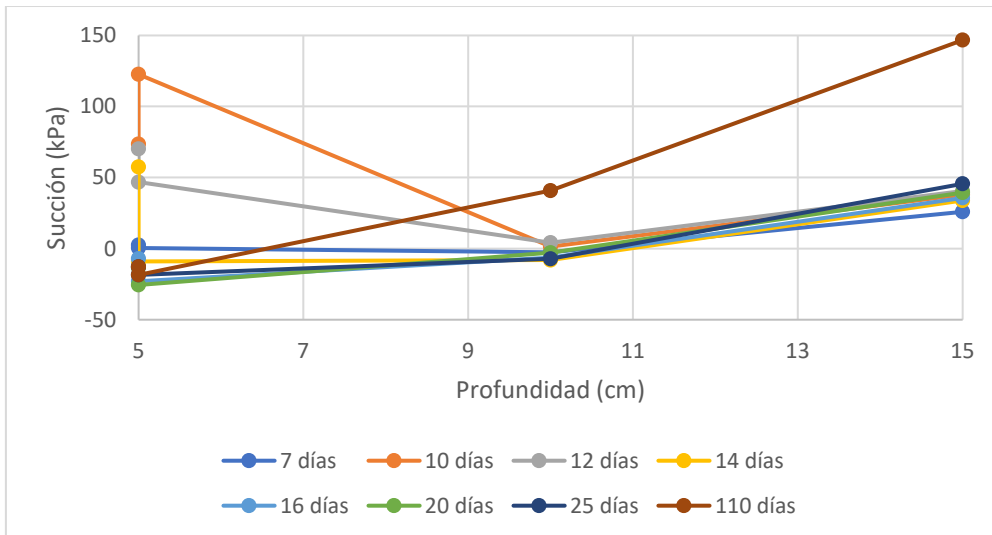


Figura 5.33. Variación de la succión en función de la profundidad.

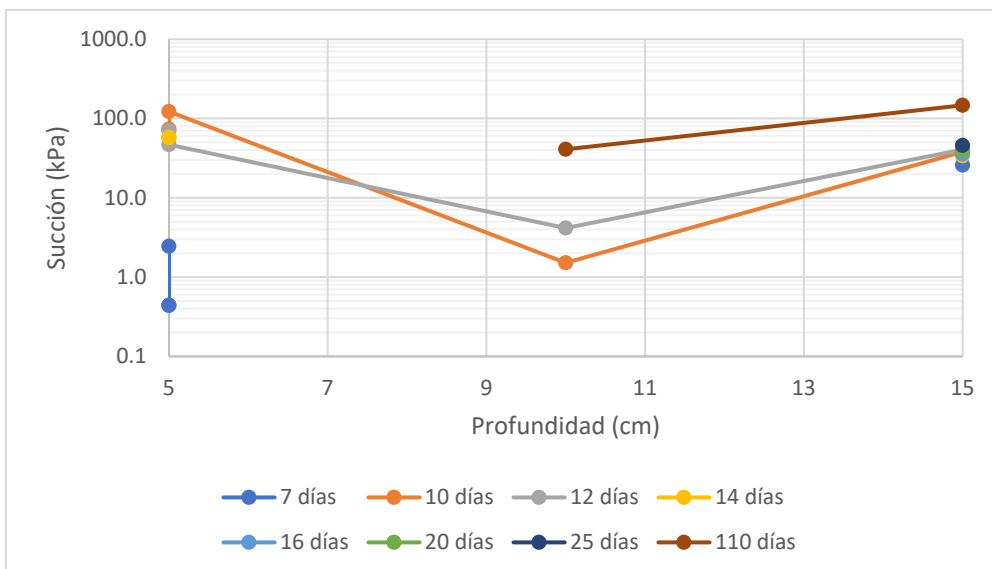


Figura 5.34. Variación de la succión en función de la profundidad en escala logarítmica.

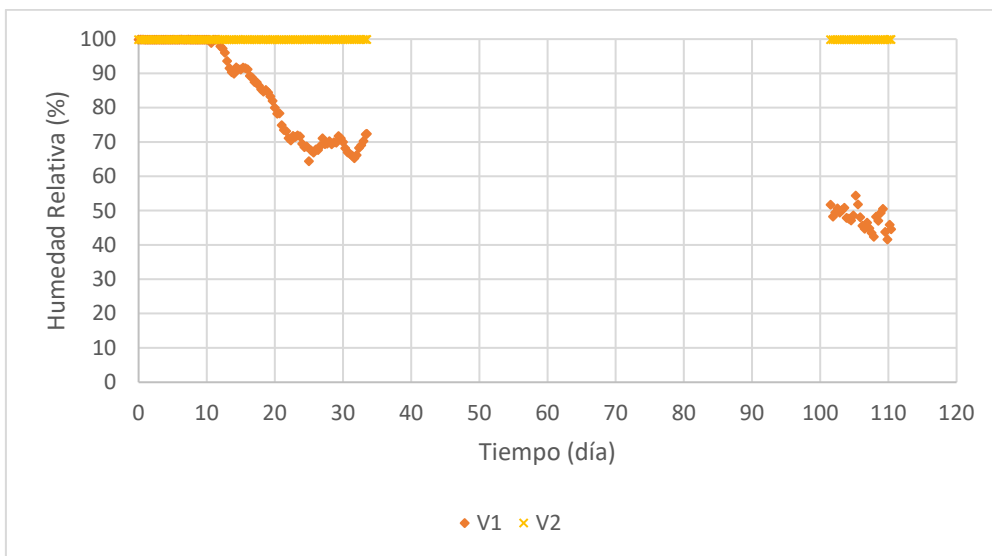


Figura 5.35. Humedad relativa obtenida por los sensores Vaisala.



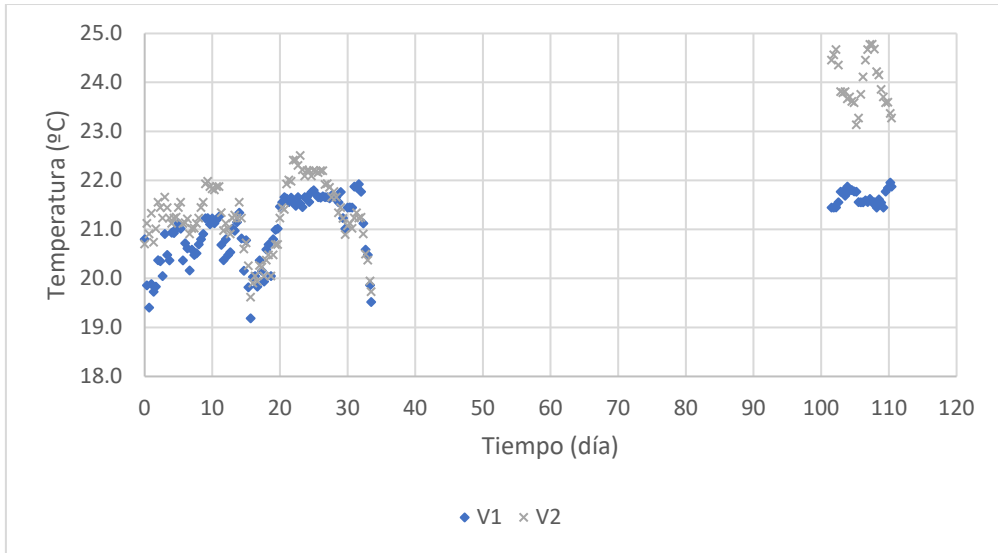


Figura 5.36. Temperatura obtenida por los sensores Vaisala.

A partir de los resultados mostrados en las Figuras 5.35 y 5.36 obtenidos por los sensores Vaisala, se obtienen los valores de succión total del ensayo, mostrados en las Figuras 5.37 y 5.38, a partir de la ley psicrométrica (Cordero, 2019):

$$\psi_{total} = -\frac{RT\rho_w}{M_w} \ln(RH) \quad (5.2)$$

donde  $\psi_{total}$  = succión total;  $R$  = constante de los gases ideales =  $8.3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ;  $T$  = temperatura (K);  $\rho_w$  = densidad del agua;  $M_w$  = masa molecular del vapor de agua; y  $RH$  = humedad relativa.

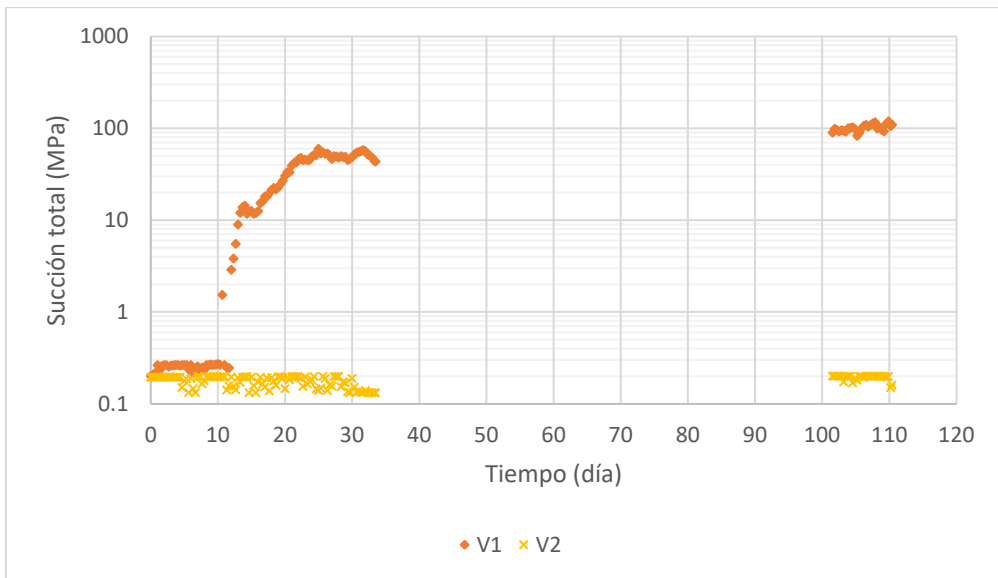


Figura 5.37. Variación de la succión total en función del tiempo en escala logarítmica.

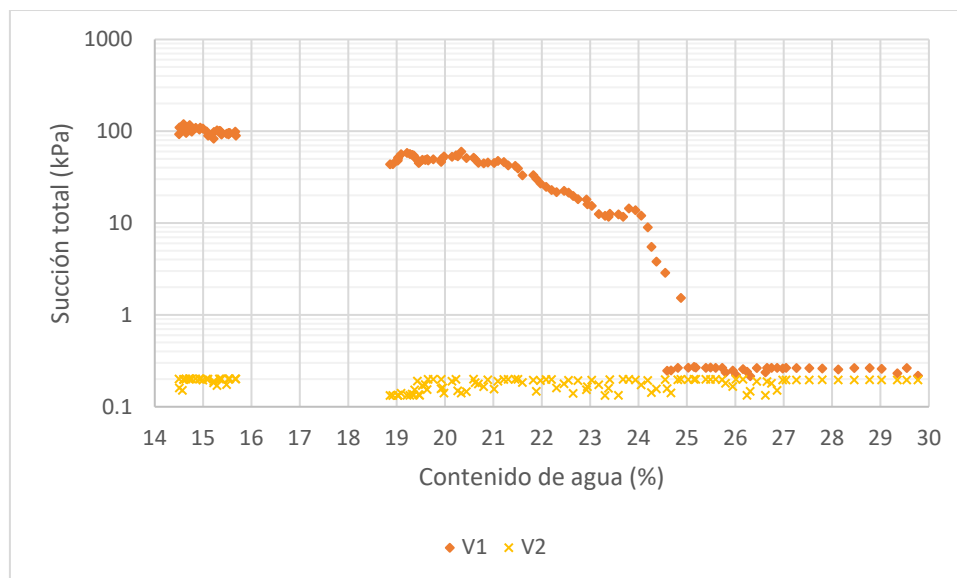


Figura 5.38. Variación de la succión total en función del contenido de agua en escala logarítmica.

De ambas figuras puede observarse como el efecto barrera creado por el geosintético beneficia a la capa inferior y perjudica a la capa superior de la muestra. De hecho, la parte inferior se mantiene saturada durante todo el ensayo, mientras la otra inicia un proceso de desaturación en el día 11, cuando el contenido de humedad general de la muestra es de un 25%, aproximadamente. Esto coincide con los valores obtenidos por los tensiómetros, ya que la cavitación de los tensiómetros situados en la capa superior ocurre exactamente en el mismo día y con el mismo contenido de agua.

Posteriormente a la finalización del ensayo, se realiza un análisis del contenido de agua según la profundidad y ubicación de la muestra mediante la toma de muestras y su secado por horno tal y como se hizo en el ensayo del Apartado 5.4.2. De esta manera puede saberse el contenido de agua real en cada punto a partir de la Ecuación 5.1. La Tabla 5.11 expone los resultados de este análisis a partir de la ubicación y la profundidad.

Tabla 5.11. Contenidos de agua a diferentes profundidades de la muestra.

<b>Parámetro</b>	<b>Borde 1 0 cm</b>	<b>Borde 2 0 cm</b>	<b>Centro 0 cm</b>	<b>Borde 6 cm</b>	<b>Centro 6 cm</b>	<b>Borde 20 cm</b>	<b>Centro 20 cm</b>
$M_t$ (g)	28.05	19.68	24.71	28.71	24.67	21.11	24.29
$M_{t+s}$ (g)	134.22	43.03	91.87	61.77	88.63	46.53	60.57
$M_{t+s+a}$ (g)	137.20	43.90	95.94	66.93	100.57	50.82	67.42
<b>%w (%)</b>	<b>2.8</b>	<b>3.7</b>	<b>6.1</b>	<b>15.6</b>	<b>18.7</b>	<b>16.9</b>	<b>18.9</b>

Se observa, de nuevo, el efecto barrera que provoca el geosintético haciendo que ambas capas se comporten de manera muy distinta frente a desecación. Como en el anterior ensayo, la capa inferior se ve muy beneficiada por la presencia del geosintético, teniendo valores mínimos del 15.6% en contenido de humedad, mientras que la capa superior muestra un secado casi completo con valores del 2.8%. Esto explica la rápida cavitación de los tensiómetros situados en la capa superior y la desaturación del sensor Vaisala V1.

También se observan diferencias en función de la ubicación para una misma profundidad: las muestras tomadas del centro presentan un mayor contenido de humedad que aquellas tomadas del borde. Esto se debe a la presencia de un contorno distinto en el borde compuesto por el material de la bandeja que permite la pérdida de temperatura de manera más rápida. De hecho, la diferencia entre los tensiómetros T4 y T5 viene marcada por la mayor proximidad de este último al borde, ya que el T4 se sitúa exactamente en el centro. Por ello, el T4 cavita un par de días después de cavitarse el T5.

Por tanto, se concluye de nuevo que el geosintético mantiene la humedad de la parte inferior del suelo reduciendo su pérdida de agua por evaporación a la vez que permitiría, en caso de lluvia, la entrada de agua por filtración debido a la fisuración de la parte superior del suelo y a la capacidad del geosintético de dejar fluir el agua a través de él. Sin embargo, se destaca la rápida fisuración de la capa superior y sus bajos niveles de contenido de agua, que podrían suponer un problema en sus aplicaciones prácticas.

En términos de fisuración, la Figura 5.39 muestra el proceso de agrietamiento, mediante el uso del procesador de imágenes ImageJ (Ferreira y Rasband, 2012), mostrando los días en los cuales aparece una nueva grieta. Puede observarse como se crean celdas grandes con fisuras de gran tamaño y gran ancho. La primera imagen corresponde al inicio del ensayo. Rápidamente se observa una pequeña fisura a las 7 horas del inicio, demostrando el rápido secado que sufre la capa superior de la muestra. Seguidamente, al cabo de 8 horas, aparece una nueva fisura. Estas dos fisuras evolucionan y crecen durante los siguientes 5 días con la aparición de una nueva grieta. Por último, aparecen las dos últimas fisuras a los 7.46 y 8.96 días, respectivamente. Se destaca que el ancho de las fisuras nunca deja de crecer durante el ensayo y que, a partir de ellas, puede aproximarse la edad de dichas grietas ya que cuanto más anchas, más antiguas son. Del día 30 al final del ensayo (día 110.58), no se observan grandes cambios.

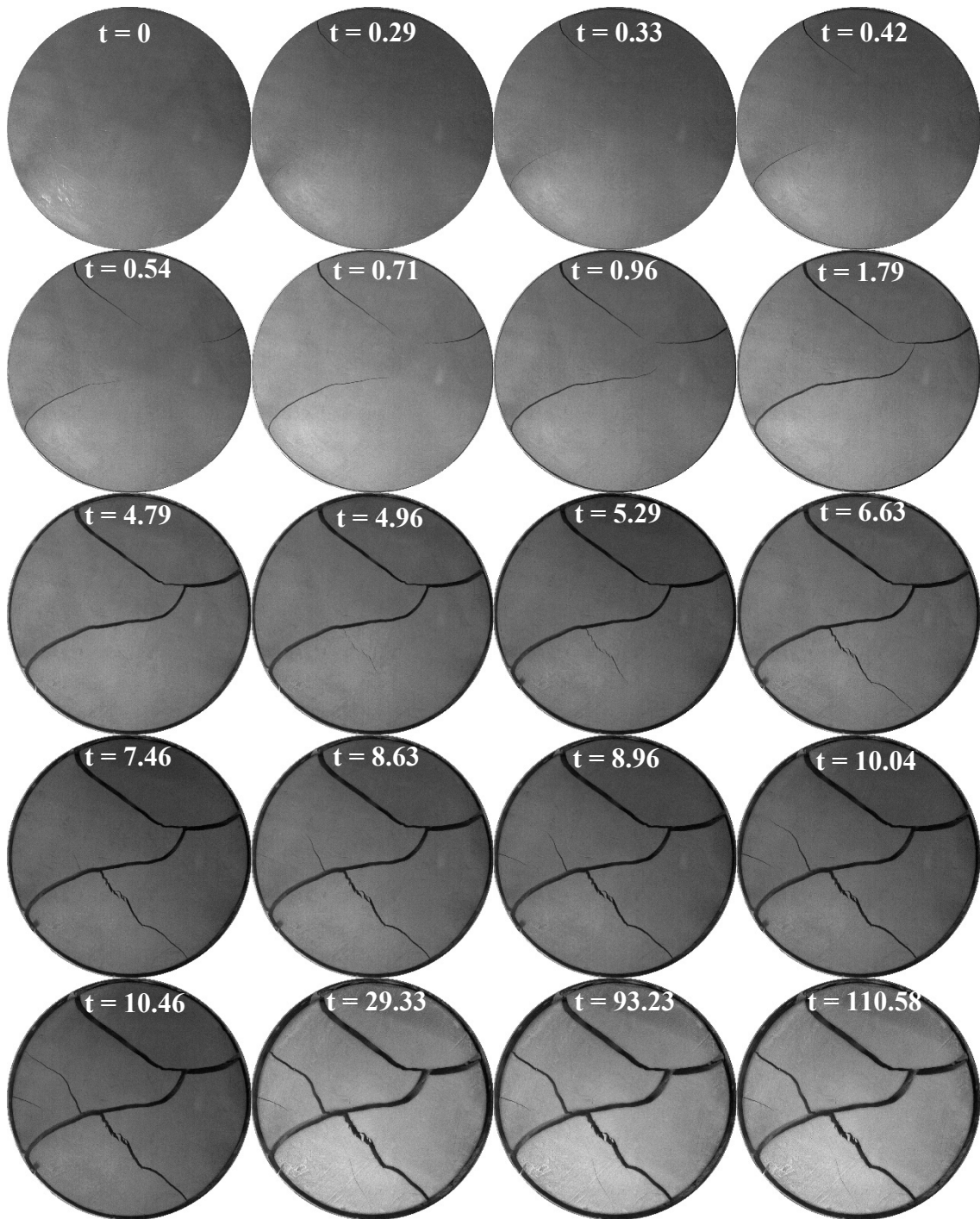


Figura 5.39. Evolución del patrón de fisuración superficial de la muestra circular bajo condiciones de cámara ambiental, tiempo (t) en días.

Los sensores situados en la parte superior de la probeta son los tensiómetros T4 y T5 y el sensor Vaisala V1. La Figura 5.40 muestra la ubicación en planta de estos sensores, cuya ubicación favorece la aparición de las fisuras. Por ejemplo, el sensor V1 facilita la aparición de la primera grieta detectada, la cual nace en ese preciso punto y se propaga a

lo largo del tiempo. La segunda grieta también se abre paso a través del tensiómetro T5 propagándose hasta alcanzar el T4, ubicado en el centro de la bandeja, para proseguir hasta la pared opuesta. Por esta razón, los tensiómetros cavitan pasados los 10 días, cuando su exposición al ambiente es total y se han secado por completo.

Por otro lado, el ancho de fisuras final de la muestra se mueve entre los 0.2 y 2.3 cm. La Tabla 5.11 muestra el ancho medio de cada fisura mostrada en la figura 5.40 al final del ensayo, numerando cada grieta según su orden temporal de aparición. De esta manera, se puede concluir que la presencia de los sensores favorece la aparición de grietas en su ubicación.

Tabla 5.12. Ancho final de las fisuras superficiales.

Número de fisura	Ancho	Unidad
F1	2.3	cm
F2	2.1	cm
F3	1.3	cm
F4	0.8	cm
F5	0.2	cm

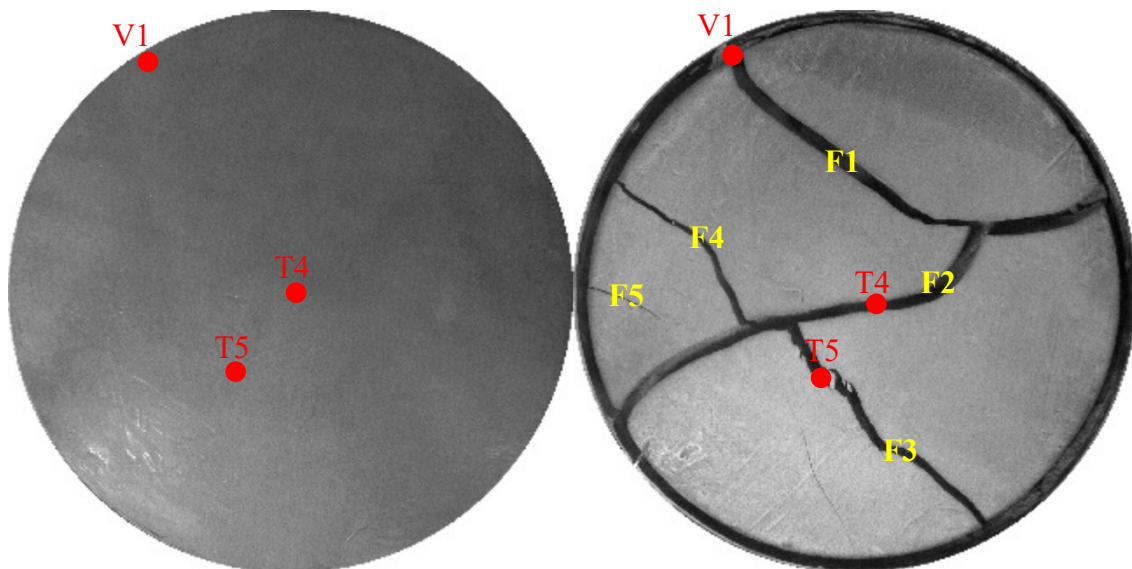


Figura 5.40. Ubicación de los sensores (izquierda) y patrón final de fisuras superficiales (derecha).

En términos de deformación, se observa un acortamiento de la muestra en ambas capas (superior e inferior) debido a la pérdida de agua. La capa inferior presenta un acortamiento medio de 36.88 mm con respecto a su nivel inicial, mientras que el de la capa superior es de 17.45 mm. El acortamiento depende del grosor de la capa, de manera que es mayor en la capa inferior pese a haber perdido menos agua, ya que esta es tres veces más gruesa que la superior. En la Figura 5.41 se observa el desplazamiento vertical de la superficie de la probeta tras el final del ensayo observándose como hay ciertas diferencias de asiento entre celdas.

La capa superior (por encima del geosintético) presenta además fisuras que la atraviesan por completo en dirección vertical, llegando al nivel en donde se encuentra el geosintético y provocando celdas de gran tamaño, tal y como se observa en las Figuras 5.42 y 5.43, respectivamente. El patrón de agrietamiento de dicha capa, visto desde su parte inferior, se muestra en la Figura 5.44.



Figura 5.41. Asiento de la capa superior tras finalización del ensayo.



Figura 5.42. Profundidad de las fisuras en la capa superior.

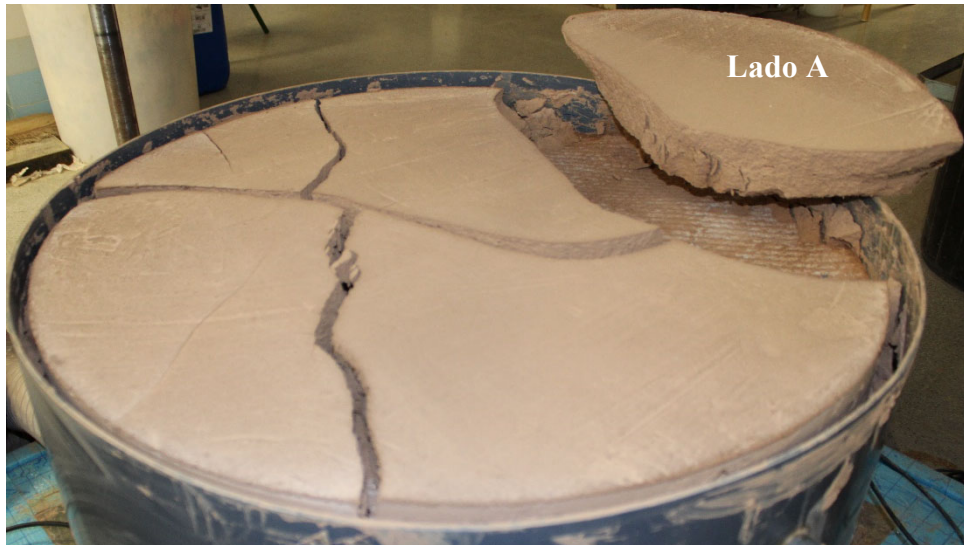


Figura 5.43. Tamaño de las celdas finales tras la fisuración de la capa superior.

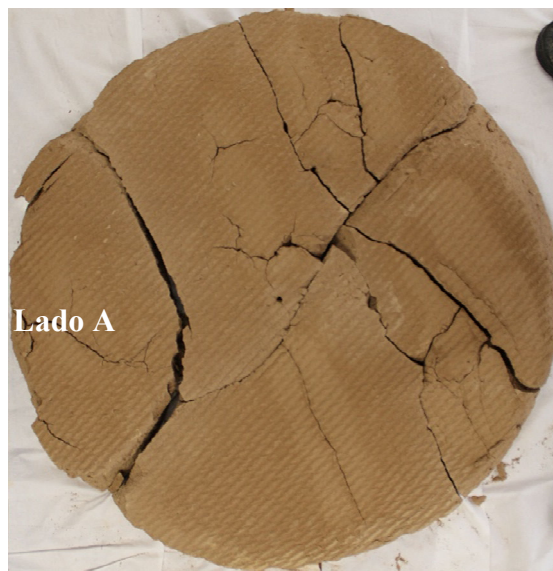


Figura 5.44. Patrón de agrietamiento de la capa superior visto desde abajo.

En cuanto a la capa inferior (por debajo del geosintético), también se observa un patrón de fisuración cuyas grietas atraviesan la totalidad del grosor de la capa. Este patrón muestra una mayor cantidad de celdas y de fisuras, aunque de menor tamaño y apertura, respectivamente. La Figura 5.45 muestra dicho patrón visto desde arriba y desde abajo. Por tanto, se concluye que la filtración de agua a través de la muestra es posible y sencilla debido a la fisuración presentada por ambas capas y que el patrón de fisuración y el asiento medio son totalmente distintos en cada caso.

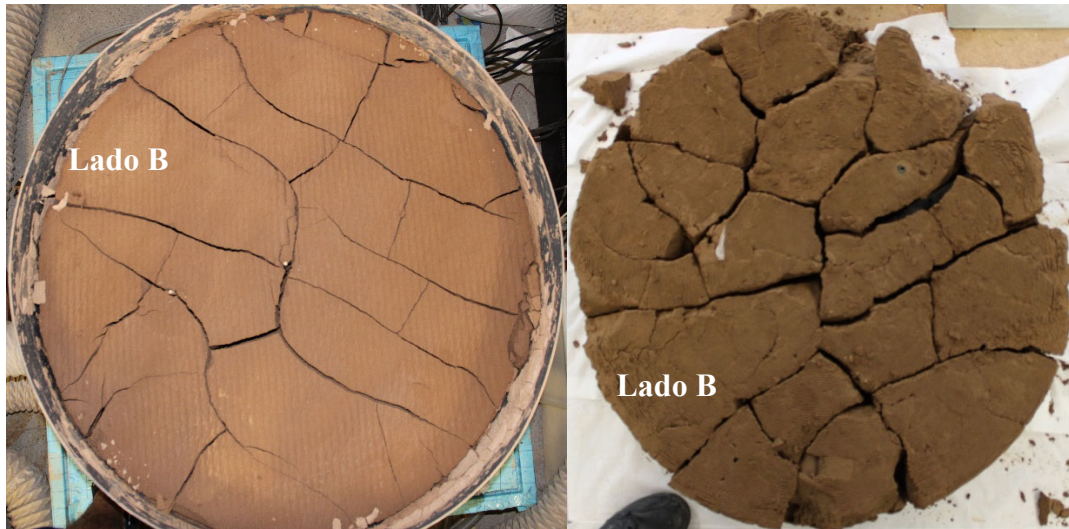


Figura 5.45. Patrón de fisuración de la capa inferior visto desde arriba (izquierda) y desde abajo (derecha).



## **6 Análisis numérico mediante Code\_Bright**

### **6.1 Introducción**

Adicionalmente a los ensayos experimentales realizados y descritos en el apartado anterior, se plantea un modelo numérico del problema principal que involucra la muestra circular con el geosintético saturado a 5 cm de profundidad con respecto a la superficie. A continuación, se describen los pasos seguidos para la realización de la simulación numérica describiendo los datos incluidos en el programa Code\_Bright. Además, se comentan los resultados obtenidos, en términos de contenido de agua, temperatura y succión, y se realiza un análisis de convergencia de la simulación numérica para corroborar la validez de dichos resultados.

En la parte de procedimiento se adjuntan imágenes de los datos incluidos en el programa, así como del aspecto de la geometría considerada y de la malla final. Los resultados se muestran en forma de gráficas en función del tiempo de la zona central de la probeta. Por último, el análisis de convergencia se lleva a cabo como se explica en Oñate (2016), analizando todos los tipos de malla disponibles mediante la reducción del tamaño del elemento hasta obtener una malla que muestre que los resultados convergen, ya que dicha convergencia demostraría la validez de los resultados.

### **6.2 Procedimiento**

La geometría representativa del ensayo consiste en una sección rectangular intermedia de la probeta de 0.2 m de altura y 0.4 m de ancho diferenciando las tres capas que lo conforman (ver Figura 6.1). La capa superior e inferior son el suelo de estudio y la capa intermedia es el geosintético utilizado. Las coordenadas de cada punto del modelo se muestran en la Tabla 6.1, teniendo en cuenta que se trabaja bajo una condición de simetría axial en el eje 'y' permitiendo simplificar el problema a la mitad sin alterar los resultados disminuyendo así el tiempo de cálculo necesario por parte del programa.

Tras definir el problema en términos geométricos se procede a asignar los materiales para cada capa presente en el modelo. Hay dos tipos de material, "Suelo" y "Geosintético", cuyos parámetros vienen definidos por las Tablas 6.2 y 6.3, respectivamente.

Tabla 6.1. Coordenadas de posición de los puntos del modelo en Code\_Bright.

Número de punto	Coordenada 'x'	Coordenada 'y'
1	0.0000	0.0000
2	0.4000	0.0000
3	0.4000	0.1455
4	0.0000	0.1455
5	0.4000	0.1500
6	0.0000	0.1500
7	0.4000	0.2000
8	0.0000	0.2000

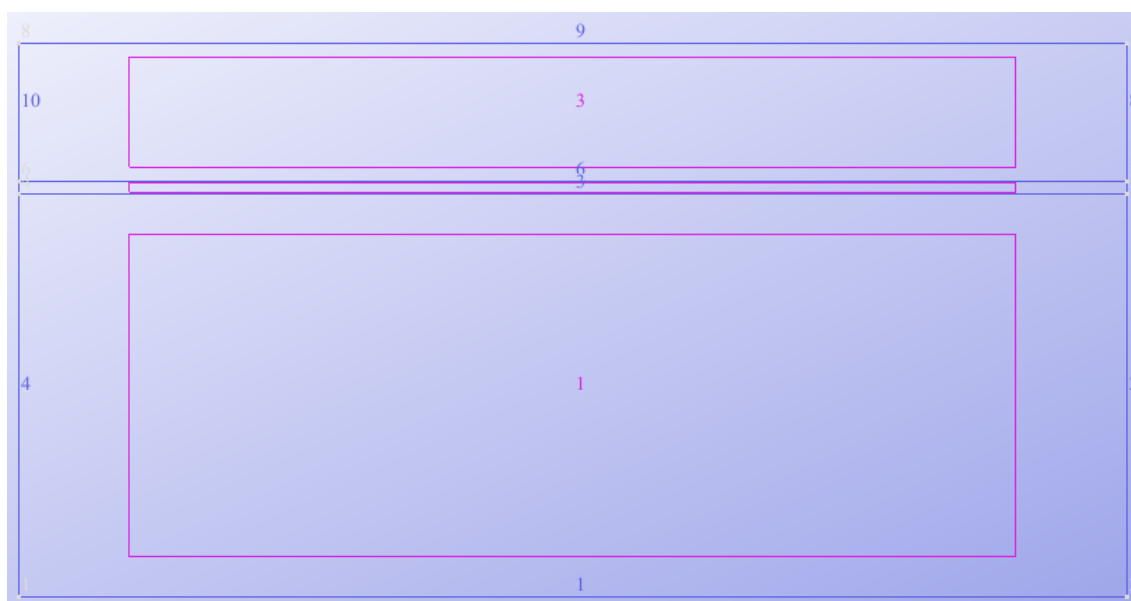


Figura 6.1. Geometría del modelo en Code\_Bright.

Los datos de la curva de retención del suelo y del geosintético, según el modelo de Van Genuchten (Ecuaciones 2.16 y 2.17), se han obtenido del Apartado 5.4.1 y de lo expuesto por Shokri et al. (2008, 2010) para una arena fina, respectivamente. En cuanto a la permeabilidad intrínseca, se han utilizado los valores propios de una arcilla y una arena para el suelo y el geosintético, respectivamente, dados por el Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos [COAAT] en la Tabla 6.4, siguiendo el modelo de Kozeny (Ecuación 2.19) y la ley de Darcy (Ecuaciones 2.14 y 2.15).

La permeabilidad relativa de la fase líquida y gaseosa viene dada por las Ecuaciones 6.1 y 6.2, respectivamente, según Olivella et al. (2020). Ambas ecuaciones se presentan en modo de potencia generalizada:

$$k_{rl} = AS_e^\lambda \quad (6.1)$$

$$k_{rg} = AS_{eg}^\lambda \quad (6.2)$$

donde  $k_{rl}$  y  $k_{rg}$  son las permeabilidades relativas líquida y gaseosa, respectivamente;  $A$  y  $\lambda$  son parámetros materiales; y  $S_e$  y  $S_{eg}$  son el grado de saturación y el grado de saturación en fase gaseosa, respectivamente.

El flujo difusivo de vapor obedece la ley de Fick (Ecuación 6.3) con un coeficiente de difusión descrito por la Ecuación 6.4 (Olivella et al., 2020):

$$\mathbf{i}_\alpha^i = -(\tau\varphi\rho_\alpha S_\alpha D_\alpha^i \mathbf{I}) \nabla w_\alpha^i \quad (6.3)$$

$$D_\alpha^i = D \left( \frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right) \quad (6.4)$$

donde  $i$  indica la especie y  $\alpha$  la fase (líquida o gaseosa) y  $\mathbf{i}_\alpha^i$  = difusión molecular;  $\tau$  = tortuosidad;  $\varphi$  = porosidad;  $\rho_\alpha$  = densidad;  $S_\alpha$  = grado de saturación;  $\mathbf{I}$  = vector de flujo;  $w_\alpha^i$  = fracción másica;  $D_\alpha^i$  = coeficiente de difusión;  $T$  = temperatura;  $P_g$  = presión del gas;  $D$  y  $n$  son parámetros.

Por último, el flujo conductivo de calor depende de la porosidad y de la temperatura y se obtiene mediante la ley de Fourier (Ecuación 6.5) y las Ecuaciones 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9 (Olivella et al., 2020):

$$\lambda_{solid} = \lambda_{solid_0} + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad (6.5)$$

$$\lambda_{dry} = \lambda_{solid}^{1-\varphi} \lambda_{gas}^\varphi \quad (6.6)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_{solid}^{1-\varphi} \lambda_{liq}^\varphi \quad (6.7)$$

$$\lambda = \lambda_{sat} \sqrt{S_e} + \lambda_{dry} (1 - \sqrt{S_e}) \quad (6.8)$$

$$\mathbf{i}_c = -\lambda \nabla T \quad (6.9)$$

donde  $\lambda_{solid}$  = conductividad térmica de la fase sólida;  $\lambda_{liq}$  = conductividad térmica de la fase líquida;  $\lambda_{dry}$  = conductividad térmica del medio poroso seco;  $\lambda_{sat}$  = conductividad térmica del medio poroso saturado;  $T$  = temperatura;  $\varphi$  = porosidad;  $S_e$  = grado de saturación;  $\lambda$  = conductividad térmica; y  $\mathbf{i}_c$  = flujo conductivo de calor.

Por otro lado, las condiciones del problema se definen en términos de porosidad, condiciones de contorno y condiciones iniciales. La porosidad se define sobre las áreas donde previamente se definió su material, con el valor del parámetro correspondiente para cada caso: 0.45 para el suelo y 0.32 para el geosintético.

Tabla 6.2. Parámetros hidráulicos y térmicos del material “suelo”.

Curva de Retención 1		Curva de Retención 2		Permeabilidad Intrínseca		Permeabilidad Relativa Fase Líquida	
ITYCL	1	ITYCL	0	ITYCL	1	ITYCL	6
P1: $P_o$ (MPa)	0.4			P1: $k_{11}$ (m <sup>2</sup> )	$10^{-17}$	P2: A	1
P2: $\sigma_o$ (MPa)	0.072			P2: $k_{22}$ (m <sup>2</sup> )	$10^{-17}$	P3: $\lambda$	3
P3: $\lambda$	0.35			P3: $k_{33}$ (m <sup>2</sup> )	$10^{-17}$		
P4: $S_{rl}$	0.02			P4: $\varphi_o$	0.45		
P5: $S_{ls}$	1			P5: $\varphi_{min}$	0		
Permeabilidad Relativa Fase Gaseosa		Flujo Difusivo de Vapor		Flujo Conductivo de Calor 1		Flujo Conductivo de Calor 2	
ITYCL	6	ITYCL	1	ITYCL	1	ITYCL	1
P2: A	1			P1: $\lambda_{dry}$	0.5	P4	0.1
P3: $\lambda$	3			P2: $\lambda_{sat}$	1	P5	1

Tabla 6.3. Parámetros hidráulicos y térmicos del material “geosintético”.

Curva de Retención 1		Curva de Retención 2		Permeabilidad Intrínseca		Permeabilidad Relativa Fase Líquida	
ITYCL	1	ITYCL	0	ITYCL	1	ITYCL	6
P1: $P_o$ (MPa)	0.003			P1: $k_{11}$ (m <sup>2</sup> )	$1e-14$	P2: A	1
P2: $\sigma_o$ (MPa)	0.072			P2: $k_{22}$ (m <sup>2</sup> )	$1e-14$	P3: $\lambda$	3
P3: $\lambda$	0.75			P3: $k_{33}$ (m <sup>2</sup> )	$1e-14$		
P4: $S_{rl}$	0.10			P4: $\varphi_o$	0.32		
P5: $S_{ls}$	1			P5: $\varphi_{min}$	0		
Permeabilidad Relativa Fase Gaseosa		Flujo Difusivo de Vapor		Flujo Conductivo de Calor 1		Flujo Conductivo de Calor 2	
ITYCL	6	ITYCL	1	ITYCL	1	ITYCL	1
P2: A	1			P1: $\lambda_{dry}$	0.5	P4	0.1
P3: $\lambda$	3			P2: $\lambda_{sat}$	1	P5	1

Tabla 6.4. Permeabilidad intrínseca según tipo de suelo (COAAT, 2007).

Permeabilidad intrínseca	Permeable				Semi-Permeable				Impermeable				
	Grava		Arena mixta		Turba		Estrato arcilloso		Roca sedimentaria		Granito		
Arena o grava no consolidada													
Arcilla no consolidada y materia orgánica													
Roca consolidada													
$k$ (m <sup>2</sup> ): $10^x$	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19

Las condiciones de contorno se definen sobre las líneas 1 y 9 de la Figura 6.1. En la línea 1 se impone un flujo de calor con una temperatura de 25°C y un coeficiente de transferencia de calor  $\gamma_h = 10$ . En la línea 9 se impone la misma condición de flujo de calor añadiendo: una condición de flujo de agua con una fracción másica de vapor  $w = 0.006$  (kg kg<sup>-1</sup>) para una humedad relativa ambiental del 30% y  $w = 0.018$  (kg kg<sup>-1</sup>) para una humedad relativa ambiental del 94%; un coeficiente de vapor de agua  $\beta_g = 0.0029$ ; y una densidad de vapor  $\rho_g = 1.2$  kg/m<sup>3</sup>. Los coeficientes de temperatura y de transferencia de calor se obtienen de manera iterativa, mientras que la densidad de vapor y la fracción másica de vapor dependen de las condiciones ambientales y se obtienen a partir de las Ecuaciones 6.10, 6.11 y 6.12:

$$P_g = 136075e^{-\frac{5239.7}{273+T}} \quad (6.10)$$

$$\rho_g = \frac{P_g M}{R(273 + T)} \quad (6.11)$$

$$w = \rho_g(RH) \quad (6.12)$$

donde  $P_g$  = presión del vapor de agua;  $T$  = temperatura ambiental;  $\rho_g$  = densidad del vapor de agua;  $M$  = masa molar;  $R$  = constante de los gases ideales;  $w$  = fracción másica; y  $RH$  = humedad relativa ambiental.

Las condiciones iniciales se definen sobre cada área prescribiendo la temperatura y la presión del agua en su forma líquida y gaseosa. La presión del gas se toma como constante, con un valor de 0.1 MPa, es decir, no se resuelve la ecuación de flujo de gas, y la presión del agua líquida variando linealmente con la profundidad, con un valor de 0.1 MPa en la superficie ( $y = 0.2$ ) y de 0.102 MPa en el fondo de la probeta ( $y = 0$ ). La temperatura se toma también constante con un valor de 25°C.

A continuación, se seleccionan los datos temporales para determinar la duración del ensayo que será de 2880 horas con un intervalo de cálculo de 1 hora. Se crean tres intervalos de tiempo: el primero desde la hora 0 a la 816 con las condiciones de contorno correspondientes a una humedad relativa ambiental del 30%, el segundo desde la hora 816 a la 2256 con una humedad relativa ambiental del 94% y el tercero desde la hora 2256 a la 2880 con las mismas características del primero. Todo a una temperatura ambiental constante de 25°C en los tres intervalos. De esta manera se tiene en cuenta el tiempo en el cual el deshumificador dejó de funcionar debido a problemas relacionados con el ordenador que no pudieron atenderse por el confinamiento.

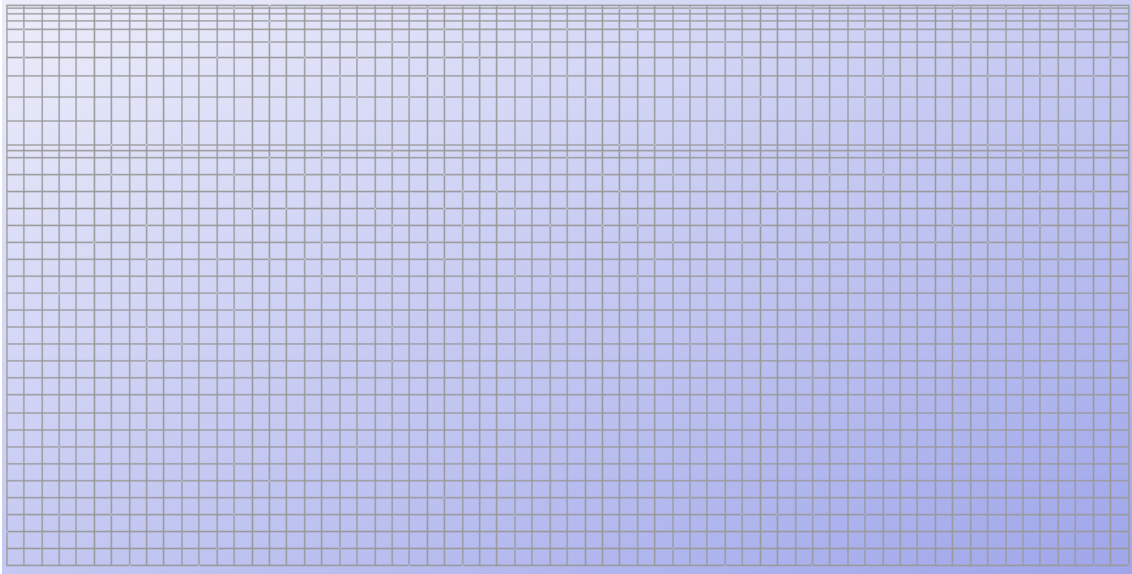


Figura 6.2. Malla estructurada de elementos cuadrangulares de cuatro nodos.

Por último, se establece la malla de cálculo mediante elementos cuadrangulares de cuatro nodos. Dicha malla es de naturaleza estructurada, refinándose en la zona del geosintético y de la superficie para obtener resultados más aproximados. La Figura 6.2 muestra la apariencia de la malla utilizada.

Tras la creación del modelo y sus parámetros, se procede a la ejecución con un tiempo medio de cálculo de 25 minutos. El tiempo de cálculo o coste computacional depende del número de nodos de la malla y de su geometría; por tanto, una malla más densa podría presentar tiempos de 2 o 3 horas para la realización del cálculo, aunque proporcionaría resultados más precisos.

Los resultados obtenidos de Code\_Bright se procesan mediante el script del Anejo A en Matlab utilizado por Cuadrado (2018) y Encalada (2018). Con ello se obtiene el flujo de agua a partir de los resultados de humedad relativa, temperatura y presión obtenidos de Code\_Bright. De esta manera pueden calcularse la masa perdida de agua y la velocidad de evaporación en función del tiempo, parámetros que nos permitirán saber si el modelo creado se ajusta a lo observado experimentalmente tal y como se muestra en el Apartado 6.4.

### 6.3 Análisis de convergencia y sensibilidad

Previamente a la obtención de los resultados del modelo, se realiza un análisis de convergencia y un análisis de sensibilidad para confirmar la calidad de la malla y para establecer los valores de los parámetros  $\beta_g$ ,  $\gamma_h$ ,  $P_0$ ,  $\lambda$  y  $k_{ii}$ , entre otros, y su influencia en el modelo numérico.

#### 6.3.1 Análisis de convergencia

Se ha llevado a cabo un análisis de convergencia de la geometría de malla utilizada de elementos cuadrangulares de cuatro nodos mostrada en la Figura 6.2.

Las Figuras 6.3 y 6.4 presentan las gráficas de convergencia de resultados en términos de humedad relativa y temperatura, respectivamente, en el punto central más superficial del modelo. Puede observarse que los resultados convergen con el número de nodos presentando errores relativos cada vez más pequeños. Esto demuestra una buena calidad de los resultados cuanto mayor número de nodos presente, aunque también signifique un costo computacional más alto.

Por tanto, se concluye que los resultados son fiables y de buena calidad para mallas estructuradas y cuadriculadas con un número de nodos mayor a 2000. En este caso, la malla dispone de un número de nodos igual a 2405 y presenta un coste computacional aceptable.

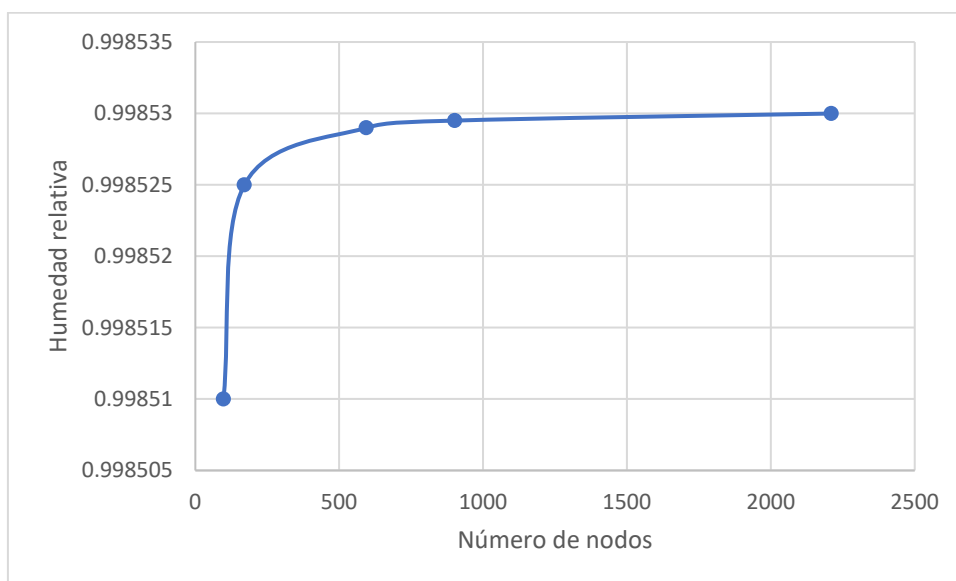


Figura 6.3. Gráfica de convergencia en términos de humedad relativa.

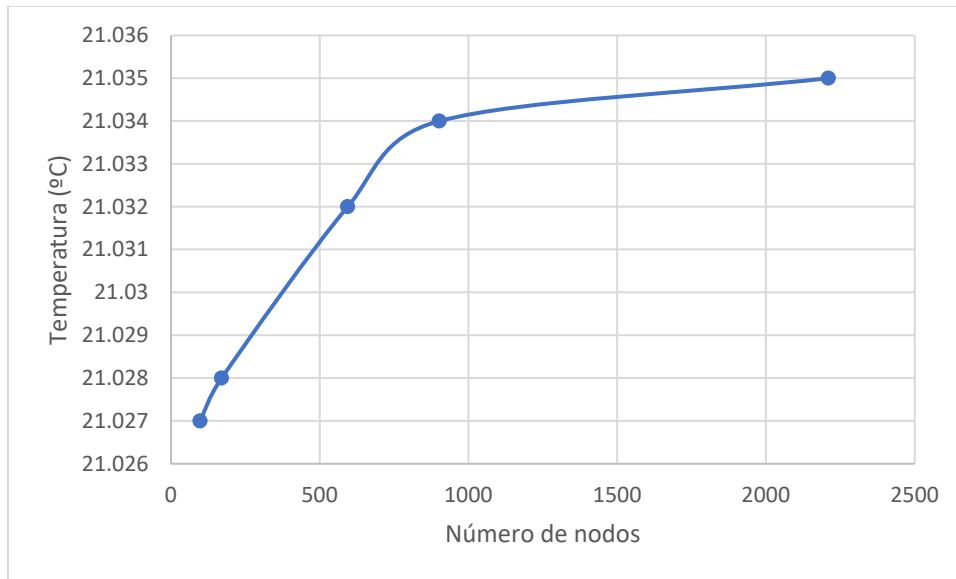


Figura 6.4. Gráfica de convergencia en términos de temperatura.

### 6.3.2 Análisis de sensibilidad

Se ha realizado un análisis de sensibilidad para conocer el alcance de la importancia de cada parámetro, es decir, cuánto y de qué manera afectan al modelo según su valor numérico. De esta manera puede determinarse qué cambios se observarían en caso de haber unos valores distintos en los parámetros del suelo o del geosintético comparando gráficas de masa perdida vs tiempo y velocidad de evaporación vs tiempo.

#### 6.3.2.1 Coeficiente de transferencia de vapor ( $\beta_g$ )

El coeficiente de transferencia de vapor de agua se ha variado entre los valores de  $2 \cdot 10^{-3}$  y  $3.4 \cdot 10^{-3}$  m/s. Este coeficiente define la condición de contorno de superficie y marca el intercambio de vapor que se produce entre esta y la atmósfera. Las Figuras 6.5 y 6.6 muestran las gráficas para los distintos valores utilizados de dicho parámetro en términos de velocidad de evaporación y pérdida de masa de agua.

Puede observarse como este coeficiente tiene una gran influencia sobre la velocidad de evaporación en el primer intervalo, especialmente en los primeros 10 días, mostrando una gran diferencia en la gráfica. Sin embargo, presenta comportamientos similares en la totalidad del segundo intervalo, debido al bajo ritmo de secado en este intervalo, y del tercero, debido a que el secado se encuentra en un estado bastante avanzado.



En cuanto a la pérdida de masa de agua, se observan diferencias en todos los intervalos debido a la diferencia en la pendiente de la primera recta de los primeros 10 días correspondiente al secado de la capa superior. A partir de ese día, las gráficas muestran las mismas pendientes en todos sus intervalos de tiempo demostrando que no existen diferencias importantes a partir de la primera parte del secado.

Por tanto, este parámetro influye en gran medida sobre la evaporación durante la fase de secado de la capa superior al ser una condición de contorno superficial.

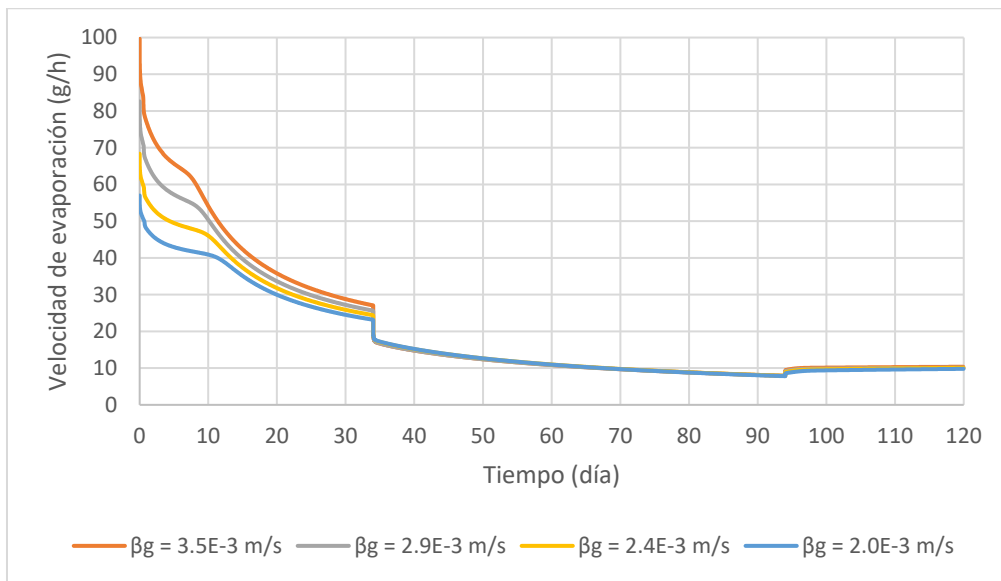


Figura 6.5. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro de transferencia de vapor.

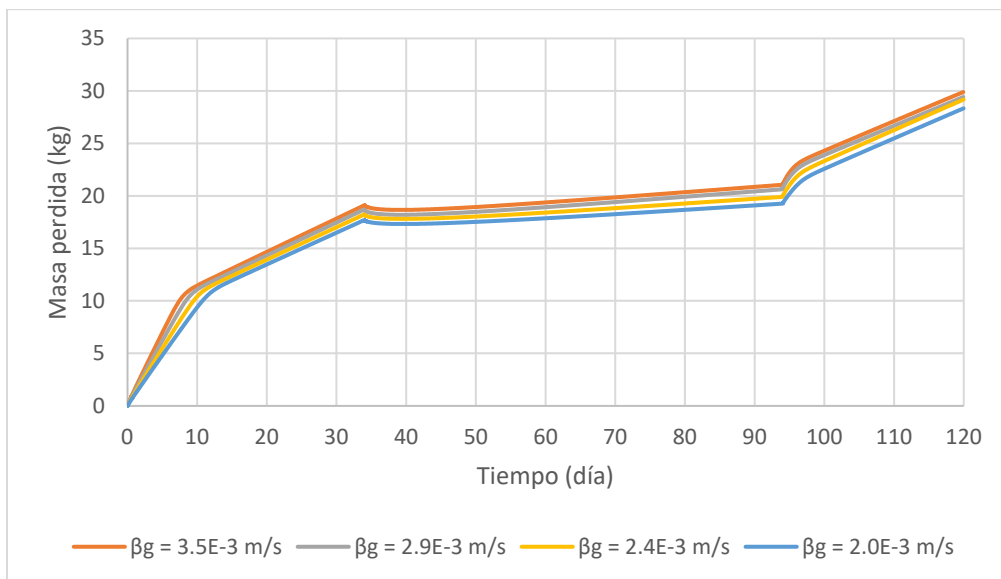


Figura 6.6. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro de transferencia de vapor.

### 6.3.2.2 Coeficiente de transferencia de calor ( $\gamma_h$ )

El coeficiente de transferencia de calor se ha variado entre los valores de 5 y 20  $\text{J}/\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C}$ . Este factor define también la condición de contorno superficial y muestra el intercambio de temperatura entre dicha superficie y la atmósfera. Análogamente al parámetro anterior, las Figuras 6.7 y 6.8 muestran las gráficas para los distintos valores utilizados del parámetro de transferencia de calor en términos de velocidad de evaporación y pérdida de masa de agua.

De nuevo, un parámetro de contorno superficial muestra más influencia en los primeros 10 días de modelado. De hecho, la variación de este parámetro produce cambios similares a los del parámetro anterior: la velocidad de evaporación se ve afectada en el primer intervalo y la pérdida de masa de agua muestra diferencias en la primera recta de la gráfica, la cual corresponde al secado de la capa superior antes de que el agua de la capa inferior empiece a fluir. Sin embargo, se observa que este parámetro da lugar a comportamientos más similares con valores más altos, ya que las diferencias entre las gráficas con valores de 15 y 20  $\text{J}/\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C}$  son menores a las diferencias existentes entre las gráficas con valores de 5 y 10  $\text{J}/\text{m}^2\text{s}^\circ\text{C}$ .

Por tanto, este parámetro también influye en gran medida sobre la evaporación del agua durante la fase de secado de la capa superior al ser una condición de contorno superficial.

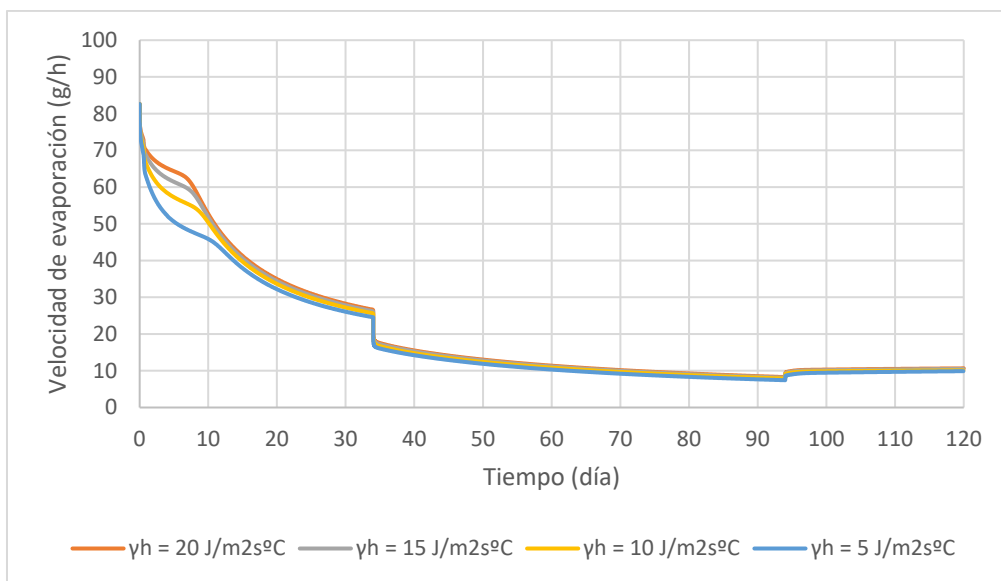


Figura 6.7. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro de transferencia de calor.

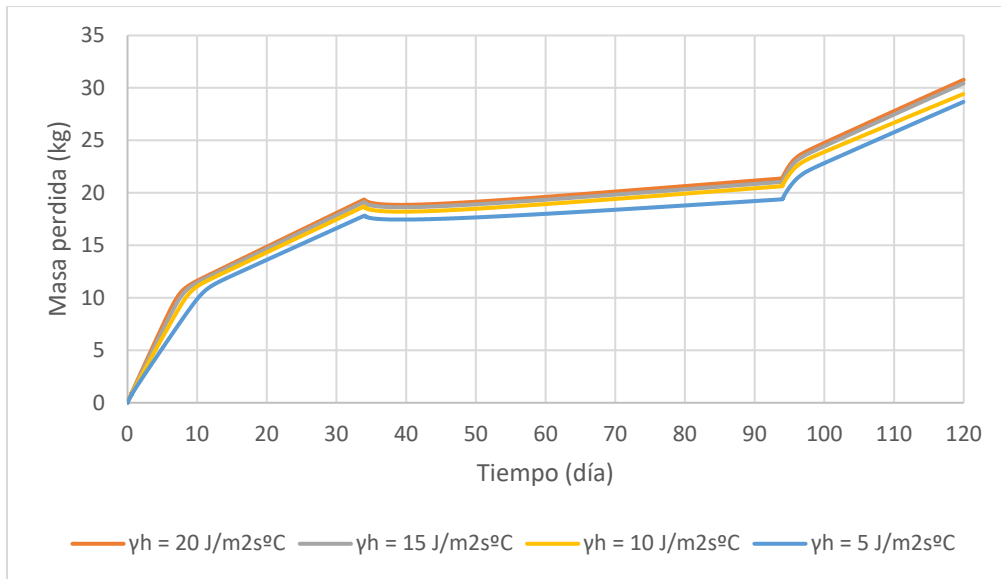


Figura 6.8. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro de transferencia de calor.

### 6.3.2.3 Curva de retención ( $P_0$ y $\lambda$ )

Se han variado los parámetros  $P_0$  y  $\lambda$  del modelo de Van Genuchten para el suelo y el geosintético. En el caso del suelo, se han tomado los valores 0.1 y 1.5 MPa para  $P_0$  y 0.15 y 0.75 para  $\lambda$ , mientras que en el caso del geosintético, estos mismos parámetros se variaron entre valores de 0.001 y 0.1 MPa y 0.3 y 0.9, respectivamente.

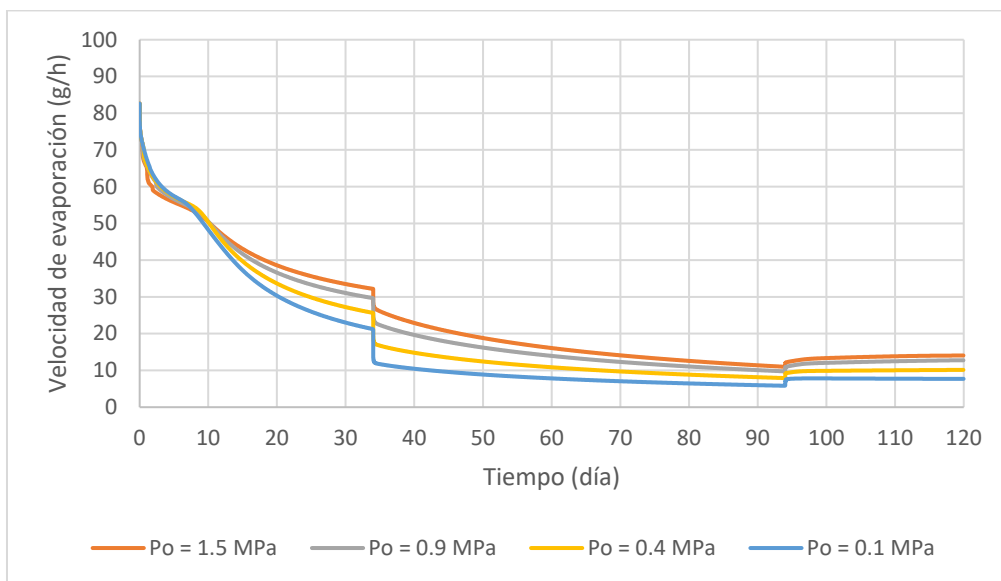


Figura 6.9. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro  $P_0$  del suelo.

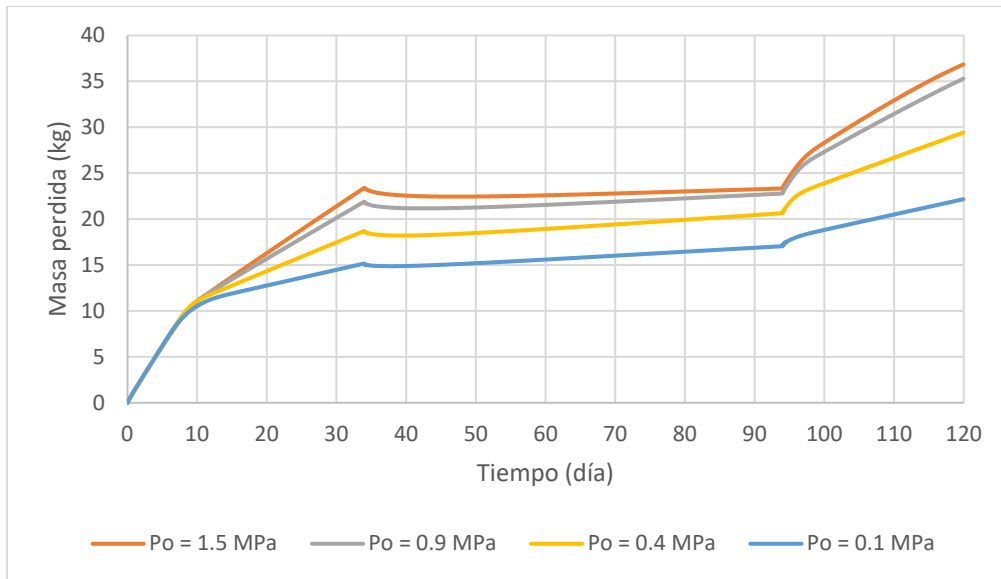


Figura 6.10. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro  $P_0$  del suelo.

Las Figuras 6.9 y 6.10 muestran el efecto del parámetro  $P_0$  del modelo de Van Genuchten del suelo en términos de velocidad de evaporación y masa perdida, respectivamente, y las Figuras 6.11 y 6.12 muestran lo propio para el parámetro  $\lambda$ . Se observa una gran influencia de estos parámetros sobre el modelo definiendo comportamientos muy distintos según sus valores numéricos.

De las Figuras 6.9 y 6.10, se observa que el primer parámetro no afecta al proceso de secado de la capa superior durante los primeros 10 días, como sí ocurría con los parámetros que definían la condición de contorno superficial, pero afecta al resto del proceso de manera importante. El hecho de ser un parámetro material del suelo explica que tienda a afectar más a esta parte del secado debido a que la capa inferior contiene tres veces más material que la superior. Estas diferencias se observan tanto a nivel de velocidad de evaporación como de masa perdida de agua.

De igual manera, se observan diferencias semejantes al variar el parámetro  $\lambda$  del modelo de Van Genuchten en las Figuras 6.11 y 6.12, al ser también un parámetro característico del material.

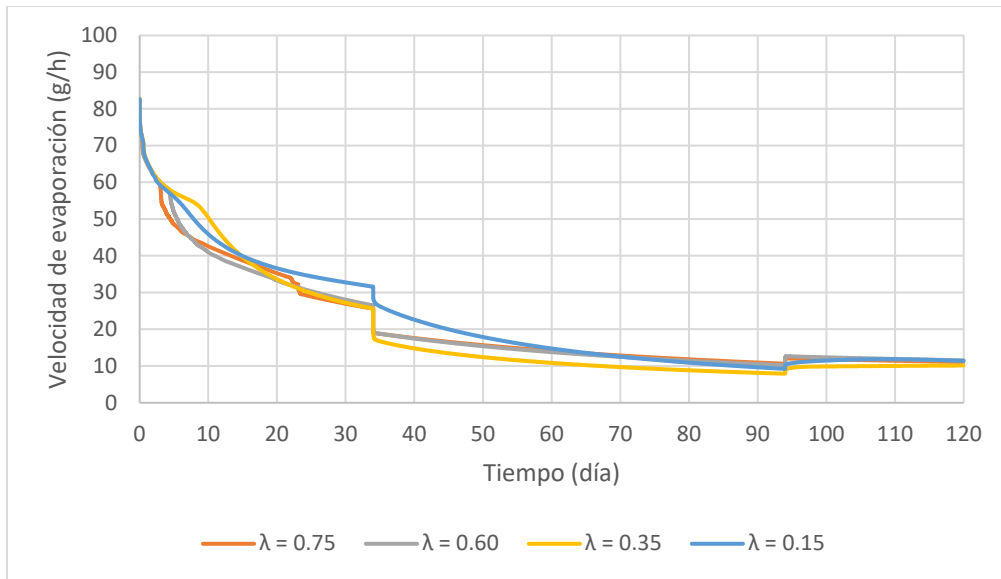


Figura 6.11. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores del parámetro  $\lambda$  del suelo.

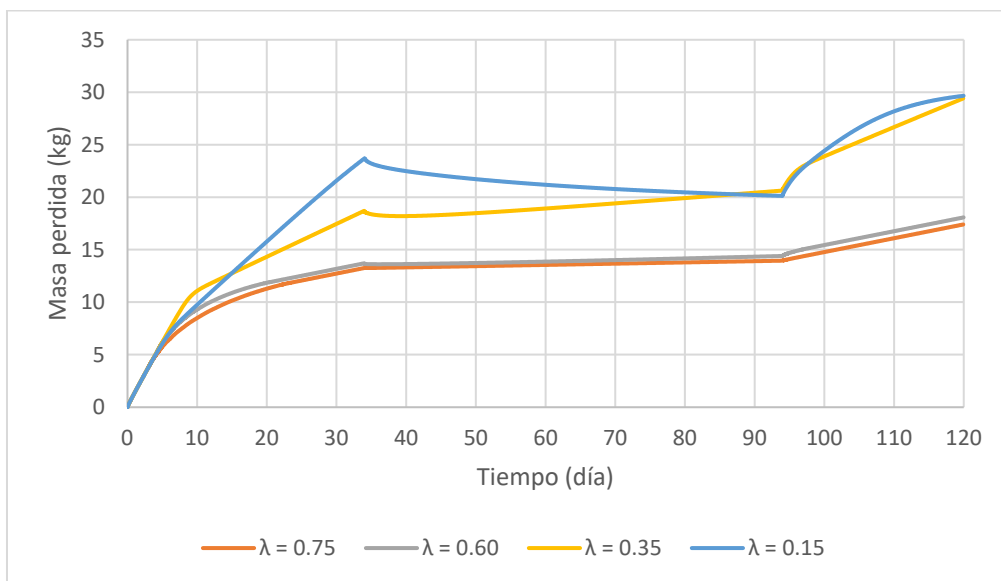


Figura 6.12. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro  $\lambda$  del suelo.

En cuanto a la influencia del geosintético, esta se presenta en las Figuras 6.13 y 6.14 para el parámetro  $P_0$  y en las Figuras 6.15 y 6.16 para el parámetro  $\lambda$  en términos de velocidad de evaporación y de pérdida de masa de agua, respectivamente. Puede observarse como su influencia es menor en comparación con los parámetros correspondientes al suelo debido a su menor presencia en el modelo. Sin embargo, se destaca que, para valores de  $P_0$  elevados y para valores de  $\lambda$  pequeños, el

comportamiento de las gráficas cambia drásticamente. Esto es debido a que estos valores se acercan a los del suelo, alejándose de los valores propios de las arenas finas y haciendo que todo el modelo estuviese compuesto del mismo material, evadiendo el posible efecto que tendría el geosintético.

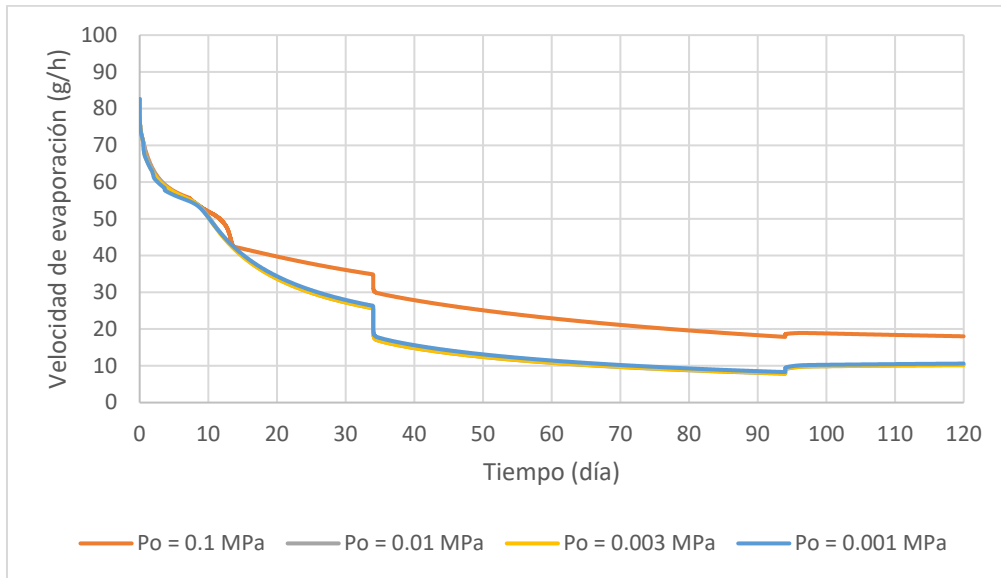


Figura 6.13. Variación de la velocidad de evaporación para valores del parámetro  $P_0$  del geosintético.

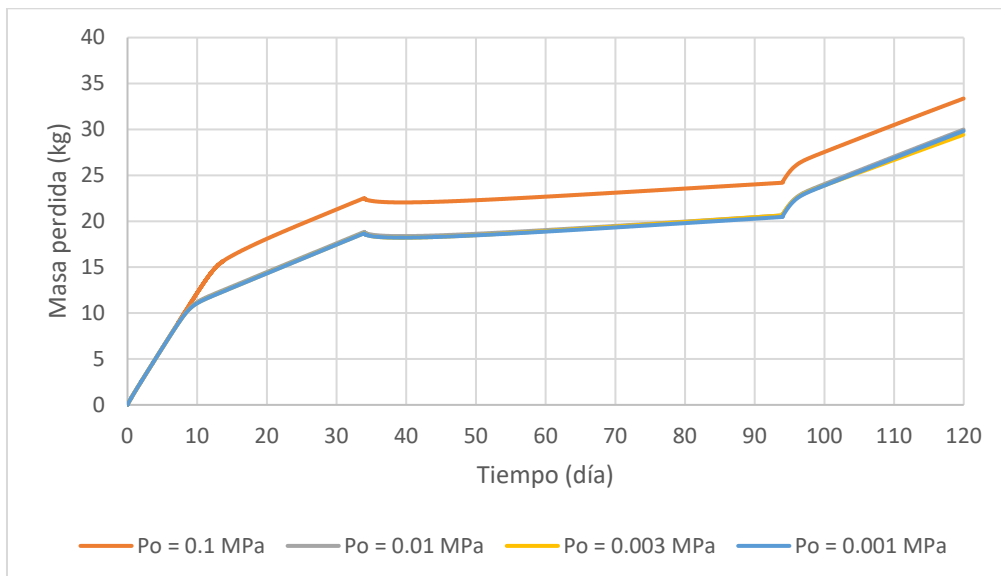


Figura 6.14. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro  $P_0$  del geosintético.

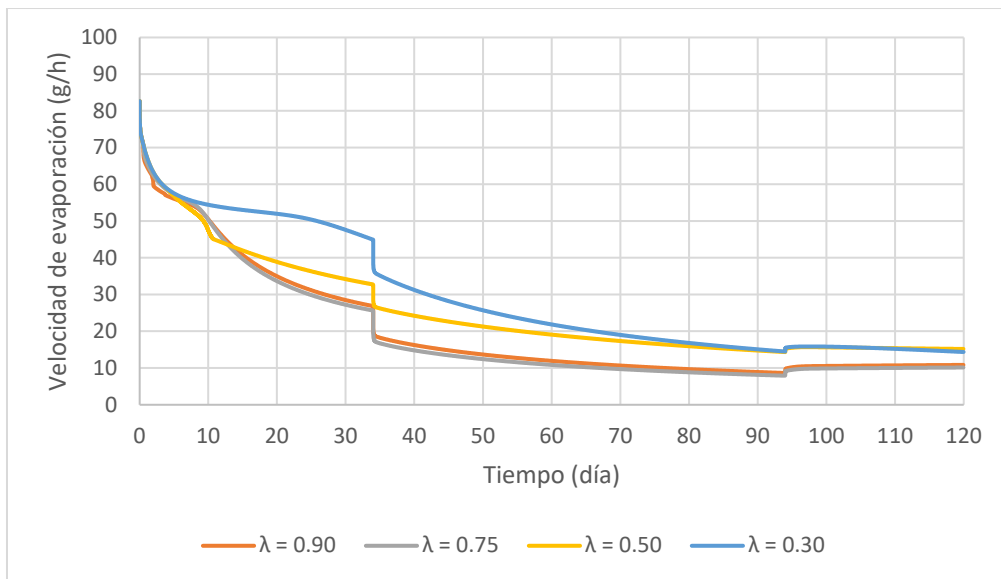


Figura 6.15. Variación de la velocidad de evaporación para valores del parámetro  $\lambda$  del geosintético.

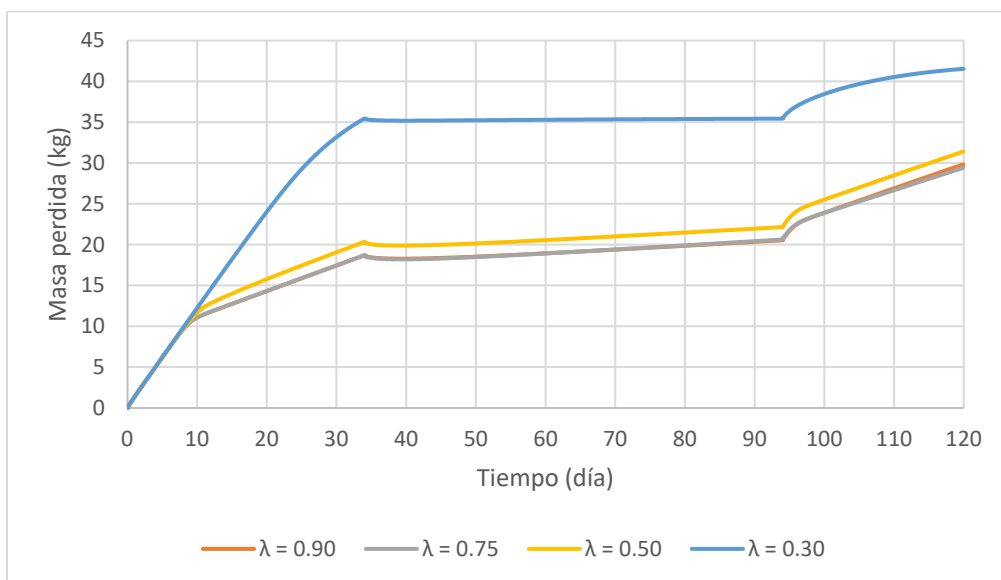


Figura 6.16. Variación de la pérdida de masa de agua para diferentes valores del parámetro  $\lambda$  del geosintético.

Por tanto, el efecto de la curva de retención sobre el modelo es más notable en el tipo de suelo a investigar, ya que de este depende el comportamiento general del proceso de desecación tras el secado de la capa superior, la cual no se ve prácticamente afectada por ninguno de los parámetros iterados. Sin embargo, aunque el geosintético no tenga un efecto notorio en términos de curva de retención, sus valores han de ser diferentes a los del suelo para poder observar su influencia sobre el modelo.

### 6.3.2.4 Permeabilidad intrínseca ( $k_{ij}$ )

La permeabilidad intrínseca también es un parámetro propio de cada material. Este se ha variado entre los valores propios de cada material presentados en la Tabla 6.4 para arcillas, en el caso del suelo, y para arenas finas, en el caso del geosintético.

Las Figuras 6.17 y 6.18 muestran el efecto de la permeabilidad intrínseca del suelo en términos de velocidad de evaporación y de pérdida de masa de agua. Se observa una gran diferencia entre los distintos casos debido, nuevamente, a la gran presencia de este material en el modelo. De hecho, la zona que define el secado de la capa superior desaparece según el valor de este parámetro.

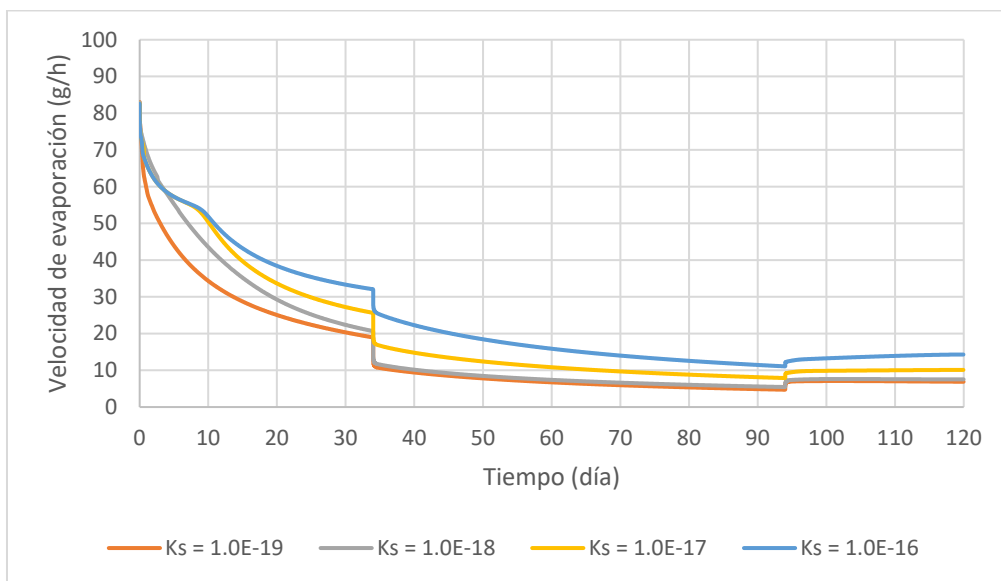


Figura 6.17. Variación de la velocidad de evaporación para valores de permeabilidad intrínseca del suelo.

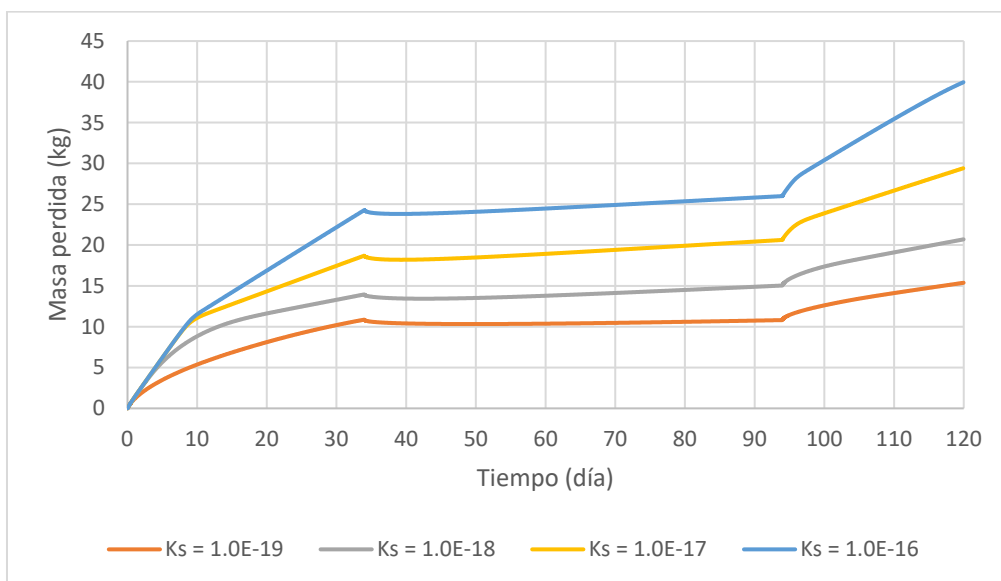


Figura 6.18. Variación de la masa perdida para diferentes valores de permeabilidad intrínseca del suelo.



Por otro lado, en el caso del geosintético apenas se observan diferencias en los casos de las Figuras 6.19 y 6.20 para la velocidad de evaporación y la masa perdida, respectivamente. El grosor de la capa de geosintético determinaría el grado de afección que tendría este parámetro sobre el modelo. Mayor el espesor, mayor la influencia de esta característica material.

Por tanto, se concluye que la permeabilidad intrínseca del suelo juega un papel importante en el proceso de desecación de la muestra, mientras que la del geosintético apenas afecta a los resultados finales.

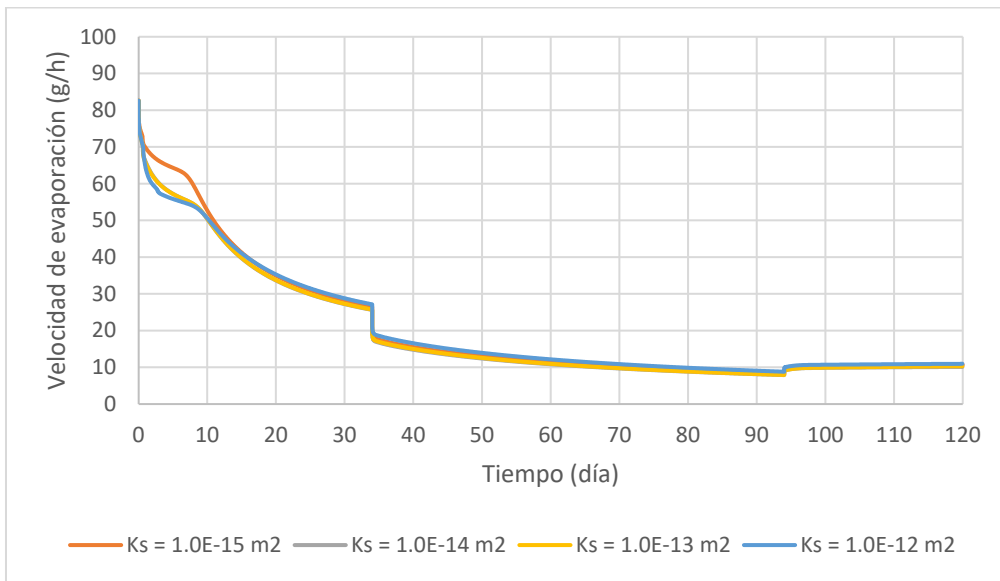


Figura 6.19. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores de permeabilidad intrínseca del geosintético.

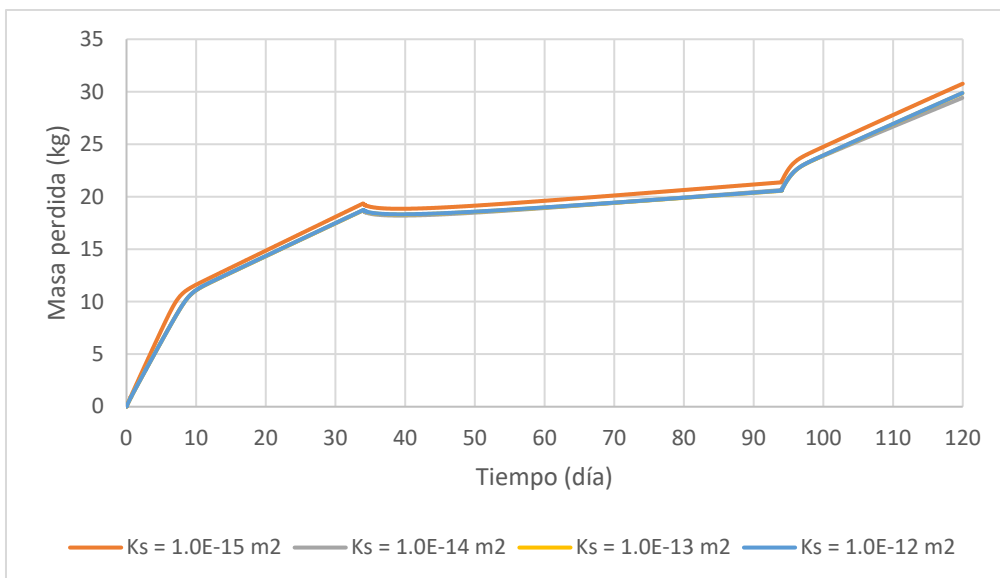


Figura 6.20. Variación de la velocidad de evaporación para diferentes valores de permeabilidad intrínseca del geosintético.

### 6.3.2.5 Otros parámetros

Existen más parámetros que influyen sobre el modelo numérico del ensayo como la porosidad, la conductividad térmica y el calor específico. Sin embargo, como concluye Encalada (2018), estos tienen muy poca influencia y casi no suponen un cambio en el comportamiento del modelo frente a desecación.

Por tanto, se concluye que los parámetros de condición de contorno superficial afectan al modelo en la fase inicial, mientras que los parámetros de la curva de retención del modelo de Van Genuchten y la permeabilidad intrínseca afectan en gran medida tras el secado de la capa superior, especialmente si estos parámetros son los pertinentes al suelo.

## 6.4 Resultados

Los resultados obtenidos del modelo numérico representan lo observado experimentalmente, tal y como muestran las Figuras 6.21 y 6.22 en términos de velocidad de evaporación y de pérdida de masa de agua. Esto prueba la veracidad de los resultados numéricos, pudiendo obtener datos de temperatura, humedad relativa, succión, entre otros, en función de la profundidad. Puede observarse como la modelización es buena, especialmente en los intervalos dos y tres del ensayo, pero con una pequeña diferencia en el primer intervalo, en la desecación de la capa superior.

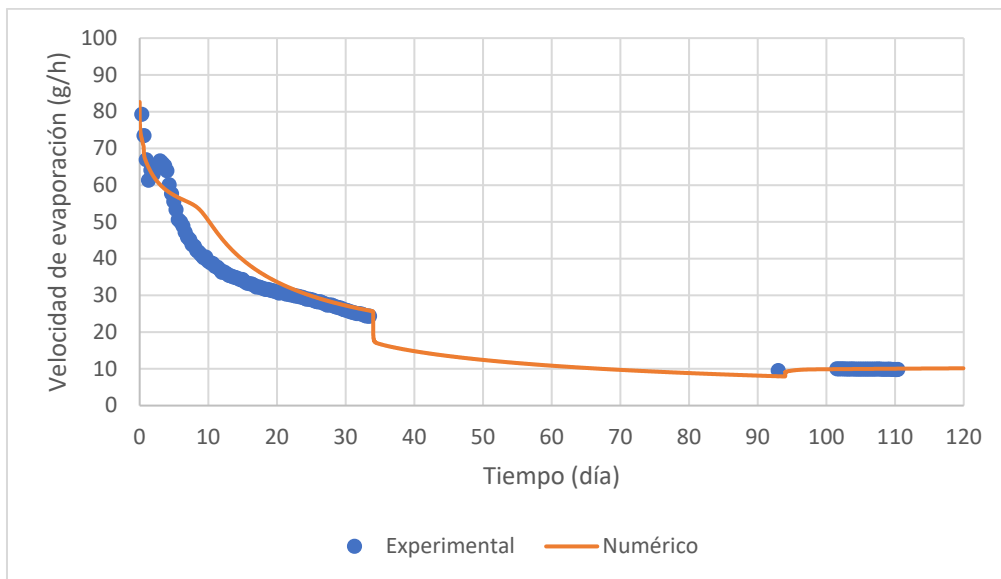


Figura 6.21. Comparación de la velocidad de evaporación del modelo numérico con la del modelo experimental.

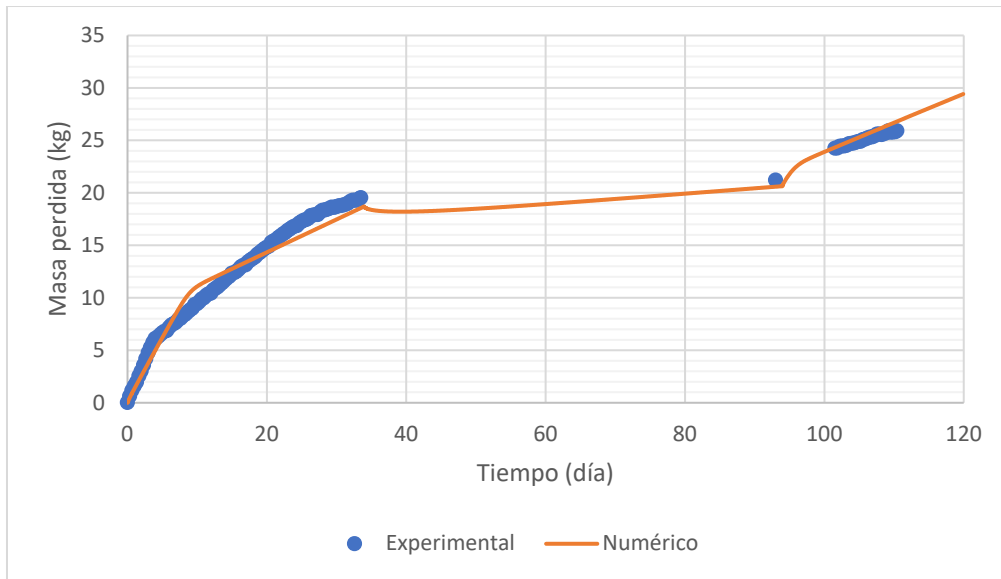


Figura 6.22. Comparación de la masa perdida del modelo numérico con la del modelo experimental.

De esta manera, pueden compararse los resultados, en términos de humedad relativa y temperatura, a partir de lo obtenido por los sensores Vaisala del ensayo experimental con los resultados obtenidos del modelo numérico mediante las Figuras 6.23 y 6.24, respectivamente.

La Figura 6.23 muestra que la simulación numérica llevada a cabo se adapta a lo observado experimentalmente, ya que la humedad relativa medida por el sensor V2 es idéntica a la calculada por el modelo numérico. Además, los resultados del sensor V1 también se expresan con suficiente precisión, aunque se observen diferencias en la primera parte del ensayo correspondientes a la pequeña imprecisión en la desecación de la capa superior observada en las figuras anteriores. Esto se debe a que los sensores de humedad relativa a veces no miden de forma fiable cuando aparece una grieta en su alrededor debido a que empiezan a obtener medidas que mezclan la humedad relativa ambiental y la propia del suelo dando resultados un poco alejados de la realidad y haciendo más difícil su interpretación

Sin embargo, en términos de temperatura, la Figura 6.24 muestra valores bastante distintos entre lo observado experimentalmente y lo calculado numéricamente. Aun así, el comportamiento y la variación de dichos valores es bastante similar en ambos casos, especialmente en el sensor V2. La diferencia máxima entre valores de temperatura es de, aproximadamente, 2°C.

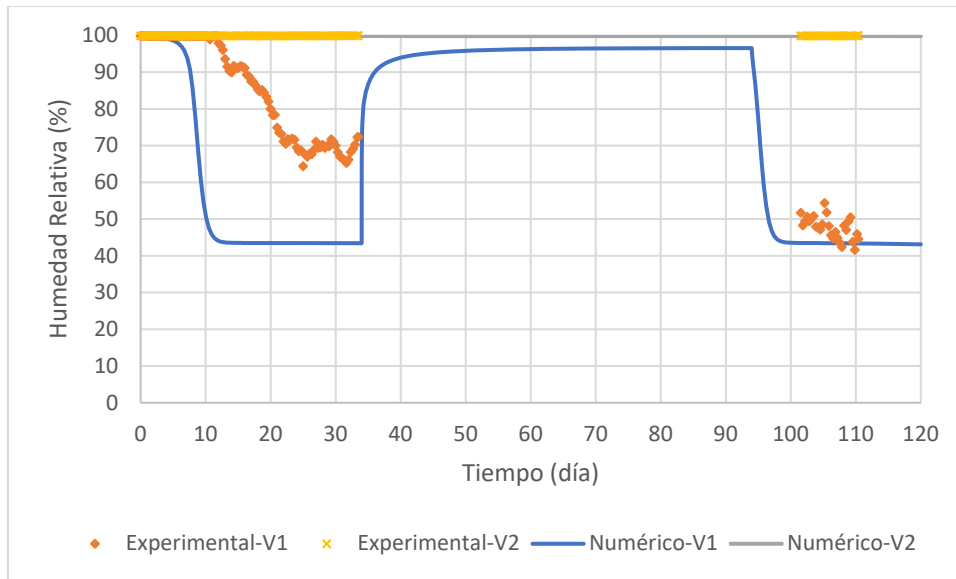


Figura 6.23. Comparación de la variación de la humedad relativa en función del tiempo.

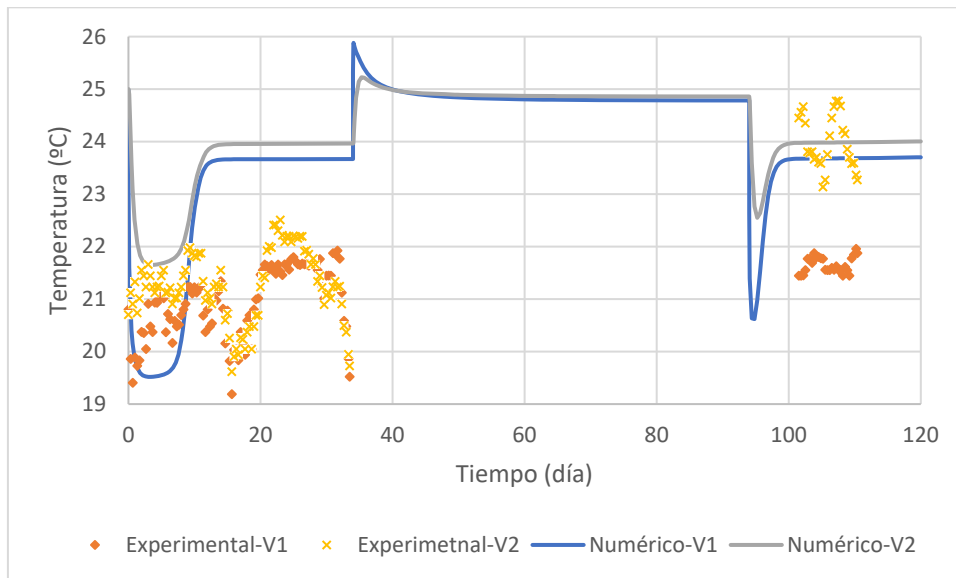


Figura 6.24. Comparación de la variación de la temperatura en función del tiempo.

Por tanto, en términos generales, puede concluirse que el modelo numérico representa lo obtenido mediante el ensayo experimental en cuanto a la variación de los parámetros de humedad relativa y temperatura, especialmente en el caso del sensor V2. Nótese que la condición de contorno en la zona inferior es la descrita en el Apartado 6.2.

A partir de los resultados de las Figuras 6.23 y 6.24, puede estimarse la succión total en función del tiempo mediante la Ecuación 5.2 utilizada en el Apartado 5.4. La Figura 6.25 muestra este parámetro en su versión numérica y experimental según el sensor V1 o V2 colocados en la capa superior e inferior, respectivamente.

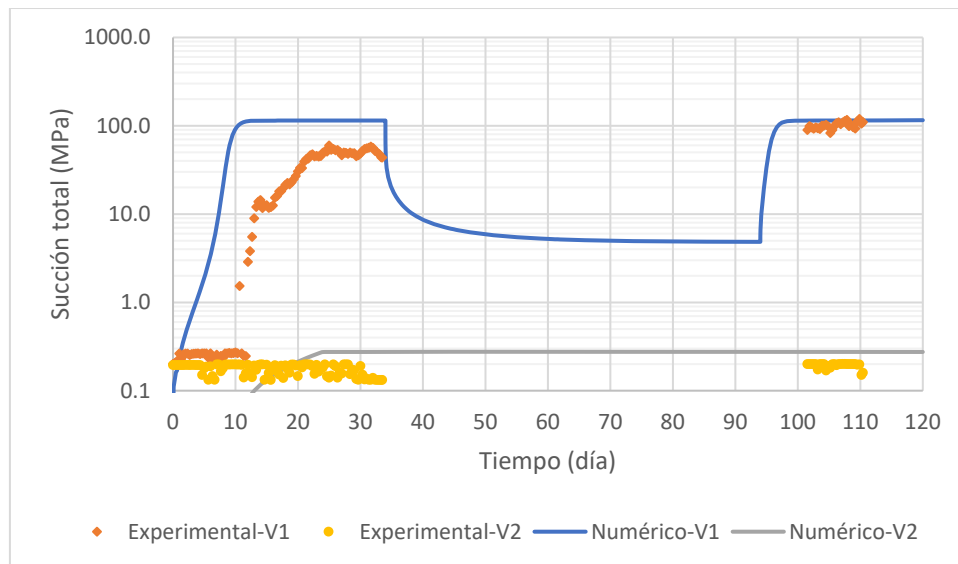


Figura 6.25. Comparación de la variación de la succión total en función del tiempo.

Puede observarse como, en el caso del sensor V2, el modelo numérico representa lo obtenido del ensayo experimental, una zona saturada en todo momento sin signos de empezar su desaturación. Por otro lado, del sensor V1 puede concluirse una aproximación bastante certera con diferencias en los primeros días debido a la menor aproximación que tiene el modelo en esta primera etapa. Sin embargo, la aproximación general es buena, especialmente en el intervalo 3 del modelado. Adicionalmente, puede obtenerse una idea de lo ocurrido durante el tiempo en el que no se recogieron datos: el intervalo 2 del modelado. En ella se observa una disminución de la succión total, lo que representa el inicio de una fase de saturación interrumpiendo la desaturación observada durante el intervalo 1. Esto es debido al aumento de la humedad relativa ambiental durante ese periodo al desactivarse el deshumificador, lo cual significó una absorción de humedad por parte de la muestra que se representa así en el modelo numérico de esta forma.

Por tanto, se concluye que el modelo numérico representa razonablemente lo ocurrido experimentalmente probando la existencia de una fase de saturación.

En cuanto a la variación de estos tres parámetros en función de la profundidad, se presentan las Figuras 6.26, 6.27 y 6.28 para la humedad relativa, la temperatura y la succión total, respectivamente, en los días 3, 7, 10, 21, 33, 93, 110 y 120, considerados los días más representativos del ensayo. Esto permite un análisis numérico en una dimensión, que es útil para estudios de la evolución del suelo durante desecación.

La humedad relativa representada en la Figura 6.26 muestra una disminución con la profundidad, la cual se hace más notoria con el paso del tiempo. Sin embargo, tras el intervalo 2 (día 93) del modelado, se observa que la diferencia observada en el final del intervalo 1 (día 33) disminuye hasta acercarse a valores propios de la primera etapa del secado (días 3 y 7). Esto corrobora la existencia de una absorción de humedad por parte de la capa superior del suelo cuando la humedad relativa ambiental aumenta hasta valores de, aproximadamente, 90%. La capa inferior muestra prácticamente los mismos valores de humedad relativa durante todo el ensayo.

En términos de temperatura, esta tiende a aumentar en función de la profundidad. El hecho de estar la capa superior en contacto directo con la atmosfera es lo que provoca que su temperatura no se mantenga tan bien como en la capa inferior. Se observa, también, un aumento en la temperatura general de la muestra tras la finalización del intervalo 2 del modelo debido nuevamente al aumento en la humedad relativa ambiental. Dicho aumento desaparece tras entrar de nuevo en fase de secado donde permanece estable.

Por último, a partir de los resultados de las Figuras 6.26 y 6.27 y la Ecuación 5.2, se obtienen los resultados de la succión total mostrados en la Figura 6.28. Se observa una disminución de la succión con la profundidad en todos los instantes estudiados debido a la desecación de la capa superior de la muestra y al mantenimiento la saturación de la inferior. De nuevo, se detecta una absorción de humedad en el día 93 debido a la disminución de la succión.

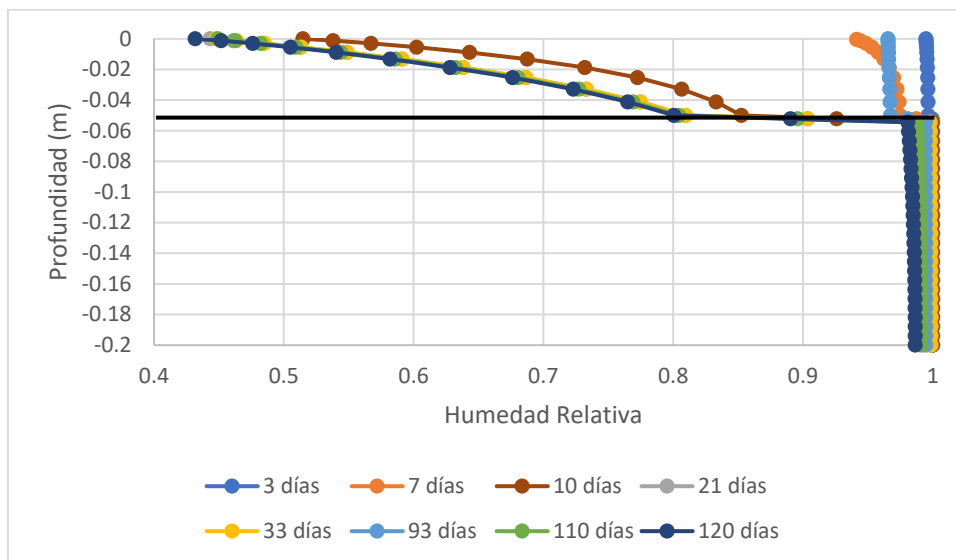


Figura 6.26. Variación de la humedad relativa en función de la profundidad señalando la ubicación del geosintético con una línea negra.

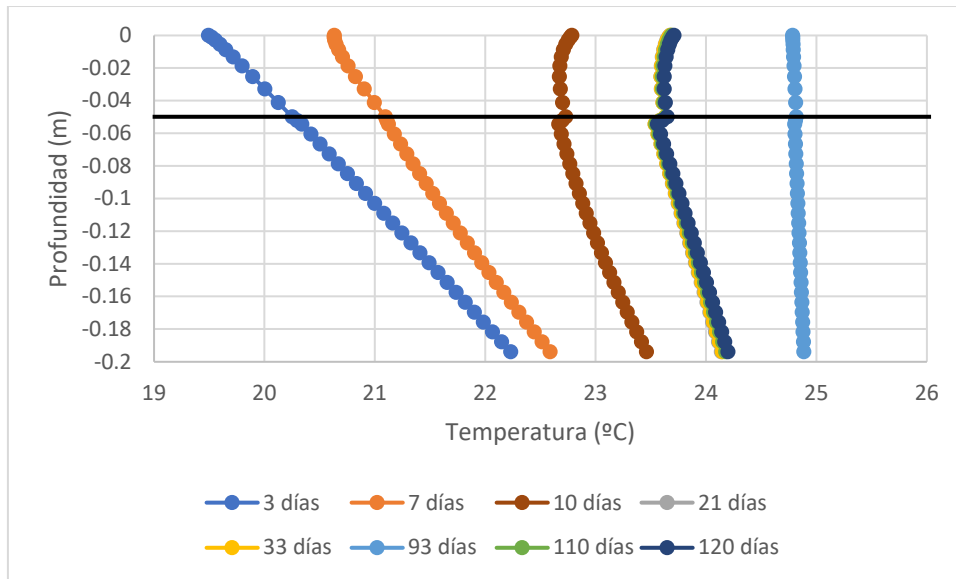


Figura 6.27. Variación de la temperatura en función de la profundidad señalando el geosintético.

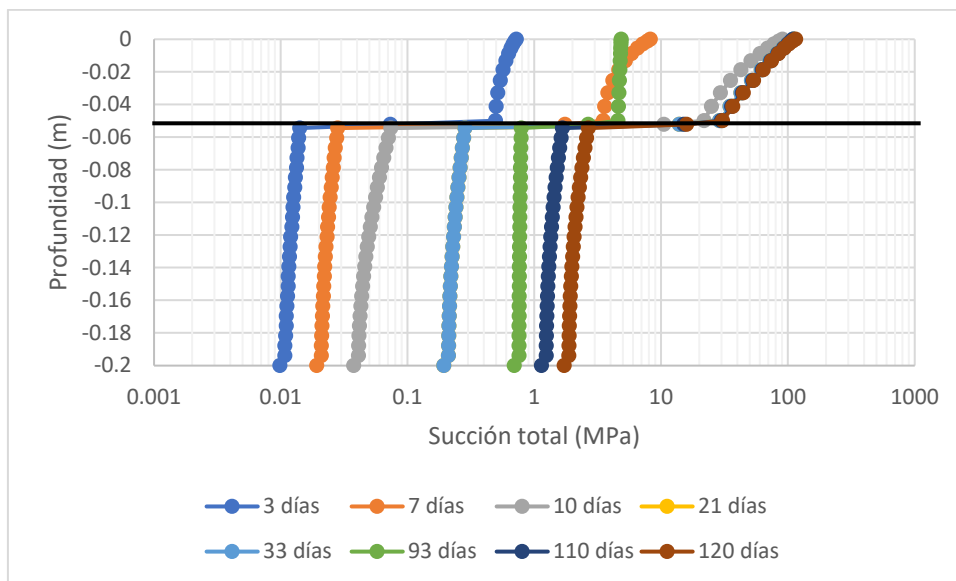


Figura 6.28. Variación de la succión total en función de la profundidad señalando el geosintético.

En conclusión, los parámetros estudiados varían de forma notable con la profundidad, especialmente con la presencia del geosintético que prueba su efecto barrera al observarse resultados muy distintos entre los obtenidos de la capa superior y la inferior. Por otro lado, también se prueba la existencia de una fase de absorción de humedad durante el intervalo 2 del modelo debido al aumento de humedad relativa y a la disminución de succión total en el día 93.

## 7 Discusión

En este apartado se comparan los resultados obtenidos en este estudio con los obtenidos por otros autores en ensayos similares. En este caso se comparará este trabajo con el de Lakshmikantha (2009) y Cordero (2019) al ser similares en términos de material, condiciones de contorno y geometría, excepto por la presencia del geosintético. Lakshmikantha (2009) estudió dos probetas circulares de 80 cm de diámetro, una de 20 cm de espesor bajo condiciones de laboratorio y otra de 10 cm de espesor bajo condiciones de cámara ambiental con una humedad relativa del 40%, una temperatura de 25°C y con la presencia de lámparas de calor, con un contenido de agua inicial del 30% ambas. Por otro lado, Cordero (2019) utilizó dos probetas de 80 cm de diámetro, pero de 10 cm de grosor, con contenidos de agua del 50% y del 45% bajo condiciones de cámara ambiental con una humedad relativa del 30% y una temperatura de 25°C.

En términos de contenido de agua en función del tiempo, Lakshmikantha (2009) obtuvo una pérdida de agua del suelo prácticamente lineal hasta llegar a un punto tan bajo en que dicha pérdida se estabiliza hasta dejar de perder agua. En comparación con el ensayo con geosintético, se observa este mismo comportamiento en el secado de la capa superior. Sin embargo, la gráfica deja de ser lineal y pasa a ser asintótica cuando empieza a fluir el agua presente en la capa inferior. Además, el secado es más rápido debido a que las condiciones de cámara ambiental son más agresivas que las condiciones de laboratorio. Aun así, el ritmo de pérdida de agua general es menor al obtenido por Lakshmikantha (2009) probando que el geosintético retrasa la desecación del suelo, especialmente, en su capa inferior. Cordero (2019) obtuvo que sus probetas necesitaban de 30 a 40 días para llegar al punto en donde la pérdida de agua disminuye y se estabiliza. En la Figura 5.29 puede observarse que la muestra estudiada en este trabajo necesita de más días para alcanzar ese punto. Pese a que se ha demostrado que un menor espesor provoca un secado más rápido, también hay que tener en cuenta que un contenido de agua inicial superior tiene el efecto contrario, con lo que también serviría para corroborar el papel del geosintético como favorable frente a fenómenos de desecación del suelo.

En cuanto a la succión, también existen diferencias en cuanto a los días transcurridos para la cavitación de los tensiómetros. Lakshmikantha (2009) obtuvo cavitación pasados



los 50 días de ensayo, independientemente de la profundidad. Cordero (2019) sí obtuvo diferencias en función de la profundidad, pero el tiempo a transcurrir para alcanzar los valores máximos de succión oscila entre los días 50 y 60. En el caso estudiado en el presente trabajo, existe una gran diferencia entre los tensiómetros situados en la capa superior, los cuales cavitan a los 10 días, y los tensiómetros situados en la capa inferior, de los cuales uno cavita en la etapa final del secado y el otro no muestra signos de cavitación durante todo el ensayo. De nuevo, la presencia del geosintético agrava la situación de la capa superior mientras protege a la inferior del efecto del secado. Comparando la succión frente al contenido de agua, se obtienen las mismas conclusiones, la succión en la capa superior del caso con geosintético alcanza su máximo frente con contenidos de agua más grandes, mientras que en la capa inferior necesita contenidos mucho más pequeños que aquellos obtenidos por Cordero (2019) para alcanzar la succión máxima en sus ensayos.

Los sensores Vaisala muestran diferencias tanto en términos de humedad relativa como de temperatura. Lakshmikantha (2009) obtuvo que el inicio de la desaturación de la parte superior de su probeta empezó en el día 40, mientras que la desaturación de la parte inferior comenzó en el día 70 bajo condiciones de laboratorio. Comparándolo con lo obtenido en este estudio, se concluye que la desaturación de la capa superior empieza antes (día 12) y que la desaturación de la capa inferior nunca se lleva a cabo pese a estar bajo condiciones de cámara ambiental. De hecho, en su ensayo en cámara ambiental, obtuvo el día 15 como el inicio de la desaturación para una muestra de 10 cm de espesor, lo cual coincide con lo obtenido en el Apartado 5.4 para la capa superior de 5 cm de grosor.

Por último, en términos de succión total, se observa lo mismo que lo explicado en el anterior párrafo. Lakshmikantha (2009) obtuvo que la desaturación empieza en los días 40 y 70 para los sensores V1 y V2, respectivamente, en el caso de secado en laboratorio, mientras que en el caso de secado en cámara ambiental obtuvo que la desaturación comienza en el día 15. Por otro lado, Cordero (2019) muestra resultados que marcan la desaturación de la muestra para contenidos de agua del 30%, mientras que en el Apartado 5.4 se observó el inicio de la desaturación de la capa superior para contenidos de agua del 24% y de la capa inferior para contenidos de agua inferiores al 15%, ya que en todo momento se encuentra saturada.

El patrón de agrietamiento superficial también muestra múltiples diferencias con el patrón obtenido por Lakshmikantha (2009). En su ensayo bajo condiciones de laboratorio, se forman pocas celdas de gran tamaño. El tiempo transcurrido para la aparición de la primera fisura es de 7 días, mientras que en este estudio se obtuvo un tiempo de apenas 8 horas para obtener esa primera fisura. En su ensayo bajo cámara ambiental, obtuvo un patrón muy similar al obtenido en esta investigación. De hecho, tanto el número de grietas como el tamaño de las celdas finales es el mismo pese a ser una muestra de 10 cm de espesor, el doble que la capa superior de la muestra de este estudio, la cual presenta el patrón de agrietamiento superficial.

Por parte de Cordero (2019), sus patrones muestran un mayor número de fisuras con celdas más pequeñas. Las diferencias en el contenido de agua inicial de sus muestras, en comparación con este trabajo, influye en el patrón de fisuración final. De todas maneras, el tiempo transcurrido para la obtención de la primera grieta es mayor debido a la mayor humedad inicial de sus muestras.

## **8 Conclusiones**

### **8.1 Ensayos experimentales**

El ensayo realizado a pequeña escala bajo condiciones de cámara ambiental con una humedad relativa del 30% y una temperatura de 25°C ha dado unos resultados que demuestran que la presencia del geosintético tiene un efecto notable en el comportamiento del suelo. De hecho, de este primer ensayo se concluye que el geosintético provoca un efecto barrera sobre el suelo que beneficia el comportamiento de la capa inferior frente a secado, mientras que perjudica a la capa superior debido, principalmente, a la disminución en espesor que este efecto provoca sobre esta última capa. Además, el geosintético no previene al suelo de sufrir fisuración, sino que el hecho de disminuir el espesor de la capa superior facilita el agrietamiento de este acelerando aún más el proceso de desecación.

El ensayo a media escala corroboró lo obtenido en el primer ensayo, observándose un comportamiento muy distinto entre las capas superior e inferior de la muestra en términos de contenido de agua, humedad relativa, temperatura y succión. También se concluye la existencia de ese efecto barrera en el proceso de secado del suelo y el beneficio que este efecto supone sobre el suelo situado debajo del geotextil. De nuevo, la fisuración de la capa superior es muy rápida, provocando que esta capa se seque casi por completo en pocos días y perjudicando su comportamiento frente a estos fenómenos.

Por tanto, se justifica la aplicación de geosintéticos en el suelo para hacer frente a procesos de desecación ya que evita la rápida evaporación del agua contenida en el terreno a la vez que permite la infiltración. Es decir, retarda el secado y permite el paso del agua de lluvia, manteniendo el suelo por debajo del geosintético siempre húmedo y teniendo aplicaciones prácticas en el campo de la agricultura.

### **8.2 Modelo numérico**

El modelo numérico simula lo observado experimentalmente y permite obtener resultados en 1D en términos de humedad relativa, temperatura y succión total. La realización de este tipo de modelos es importante para analizar en mayor profundidad lo que ocurra en la estructura del suelo durante el proceso de desecación.

En este caso, los resultados son muy fiables. Las condiciones de contorno impuestas son las adecuadas para el ensayo que se ha llevado a cabo. De hecho, podría simularse un ensayo en donde no hubiese ocurrido ningún error en la cámara ambiental pudiendo obtener los resultados de un ensayo de desecación sin interrupciones de manera numérica. Se concluye que el tipo de suelo y las condiciones de contorno son los parámetros más influyentes en los fenómenos de desecación y que, en el caso de que el geosintético contenga geotextiles permeables, es previsible que el comportamiento del conjunto suelo-geosintético sea similar al observado en estos experimentos.

Por tanto, el modelo numérico también justifica el uso de geosintéticos para mitigar los problemas relacionados con la fisuración por desecación del suelo y confirma una vez más la existencia del efecto barrera y su importancia en el proceso.

### **8.3 Futura investigación**

Al justificarse el uso de geosintéticos para estos casos, una investigación futura deberá idear un ensayo a gran escala con la presencia de este elemento para observar el comportamiento del suelo en un tamaño mucho más real. Repetir el ensayo de campo de Cordero (2019) colocando un geosintético sería una manera de progresar en la investigación de cómo reducir este fenómeno.

Más ensayos de laboratorio con distintos tipos de suelos y con distintas geometrías pueden ser también importantes para avanzar en este campo. De hecho, emular las investigaciones ya realizadas añadiendo el geosintético permitiría conocer el efecto de este por comparación directa. En cuanto al geosintético, no es demasiado importante su tipo, pero sí su ubicación en la muestra, es decir, a qué profundidad se coloca. Por tanto, la realización de ensayos colocando el geosintético a diferentes profundidades también es de gran interés para conocer la influencia real de esta condición en el secado.

Por último, la realización de ensayos con ciclos de desecación y humectación también serían de un gran interés para el estudio de la filtración de humedad en el suelo con la presencia del geosintético tanto a pequeña como a gran escala. Estos experimentos serían de muy larga duración debido a la lentitud con la que un suelo de gran tamaño seca, pero explicaría fenómenos que no son observables con un solo ciclo de desecación.

## 9 Referencias

- Abu-Hejleh, A. & Znidarcic, D. (1995). “Desiccation theory for soft cohesive soils.” *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(6), 493-502.
- Agencia Europea del Medio Ambiente [EEA], (2015). “El suelo y el cambio climático.” *Señales – Vivir en un clima cambiante*, EEA©, 40-47.
- Almera, J. (1891). *Mapa geológico-topo-gráfico de la provincia de Barcelona, Región I o de contornos de la capital. 1:40000*, 1ª ed., Diputación Provincial de Barcelona, Barcelona.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2004a). *ASTM D4404-84: Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by Mercury Intrusion Porosimetry*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2004b). *ASTM D427-04: Test method for shrinkage factors of soils by the mercury method*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2007). *ASTM D422-63: Standard test method for particle-size analysis of soils*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2014). *ASTM D2974-14: Standard test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2017a). *ASTM E11-17: Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2017b). *ASTM D4318-17e1: Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2018). *ASTM D1505-18: Standard test method for density of plastics by the density-gradient technique*, ASTM International, West Conshohocken.
- American Society for Testing and Materials [ASTM] (2020). *ASTM D4218-20: Standard test method for determination of carbon black content in polyethylene compounds by the muffle-furnace technique*, ASTM International, West Conshohocken.
- Arnold, J.G., Potter, K.N., King, K.W. & Allen, P.M. (2005). “Estimation of soil cracking and the effect on surface runoff in a Texas Blackland Prairie watershed.” *Hydrological Processes*, 19(3), 589-603.
- Aruna, A. & Kodikara, J. (2011). “Numerical modelling of desiccation cracking.” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35, 82-96.
- Ávila, G. (2004). “Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá,” Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Ávila, G., Ledesma, A. & Lloret, A. (2013). “One-dimensional cracking model in clayey soils.” *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Proceedings of the 18<sup>th</sup> ICSMGE*, Geotechnique Francophone, Paris, 1077-1080.
- Ayad, R., Konrad, J. & Soulié, M. (1997). “Desiccation of a sensitive clay: application of the model CRACK.” *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 943-951.

- Bagge, G. (1985). "Tension cracks in saturated clay cuttings." *Unsaturated soils – Advances in Geo-Engineering*, CRC Press, Durham, Vol. 2, 393-395.
- Baker, R. (1981). "Tensile strength, tension cracks and stability of slopes." *Soils and Foundations*, 21, 1-17.
- Baraza, M. (2020). "Así funciona la ZBE de Barcelona: todas las claves de la zona de bajas emisiones." *El Periódico*. Último acceso 22 de febrero de 2020 <https://www.elperiodico.com/es/barcelona/20200107/zbe-zona-bajas-emisiones-barcelona-7637869>
- Barrera, M. (2002). "Estudio experimental del comportamiento hidromecánico de suelos colapsables," Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Cerdà, A. (1998). "The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain." *Canadian Journal of Soil Science*, 78(2), 321-330.
- Chan, D., Kodikara, J.K., Gould, S., Ranjith, P.G., Choi, X.S.K. & Davis, P. (2007). "Data analysis and laboratory investigation of the behaviour of pipes buried in reactive clay." *Common Ground – Proceedings of the 10<sup>th</sup> Australia New Zealand Conference of Geomechanics*, Carillon Conference Management, Brisbane, Vol. 2, 206-211.
- Chertkov, V.Y. & Ravina, I. (2004). "Networks originating from the multiple cracking of different scales in rocks and swelling soils." *International Journal of Fracture*, 128(1), 263-270.
- Chung, F.H. (1974a). "Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis." *Journal of Applied Crystallography*, 7(6), 519-525.
- Chung, F.H. (1974b). "Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures II. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis." *Journal of Applied Crystallography*, 7(6), 526-531.
- Código Técnico de Edificación [CTE], (2019). *Documento Básico SE-C: Seguridad estructural, Cimientos*, Ministerio de Fomento, Madrid.
- Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos [COAAT], (2007). *Permeabilidad intrínseca*, Cáceres. Último acceso el 4 de mayo de 2020. [coaatcaceres.es/FTP/NORMATIVA/02%20NACIONAL/02%2002%20BÁSICA%20CONSTRUCTIVA/02%2002%2002%20CTE/02%2002%2002%2001%20DB-SE%20Seguridad%20Estructural/2007%20PERMEABILIDAD%20DE%20SUELOS.pdf](http://coaatcaceres.es/FTP/NORMATIVA/02%20NACIONAL/02%2002%20BÁSICA%20CONSTRUCTIVA/02%2002%2002%20CTE/02%2002%2002%2001%20DB-SE%20Seguridad%20Estructural/2007%20PERMEABILIDAD%20DE%20SUELOS.pdf)
- Cordero, J.A., Cuadrado, A., Ledesma, A. & Prat, P. (2014). "Patterns of cracking in soils due to drying and wetting cycles." *Unsaturated Soils: Research & Applications*, Taylor & Francis Group, Londres, 381-387.
- Cordero, J.A., Cuadrado, A., Prat, P. & Ledesma, A. (2016). "Description of a field test involving cracking in a drying soil." *E3S Web of Conferences*, 9, 1-6.
- Cordero, J.A., Useche, G., Prat, P., Ledesma, A. & Santamarina, J.C. (2017). "Soil desiccation cracks as a suction-contraction process." *Géotechnique Letters*, 7(3), 272-278.
- Cordero, J.A., Prat, P., Ledesma, A. & Cuadrado, A. (2018). "Large test to study the role of soil-air interaction in soil cracking." *Proceedings 7th International Conference on Unsaturated Soils*, Hong-Kong.
- Cordero, J.A. (2019). "Experimental analysis of soil cracking due to environmental conditions," Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Corte, A. & Higashi, A. (1960). *Experimental research on desiccation cracks in soils*, Vol. 66, U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Engineer Corps., Illinois.

- Costa, S., Kodikara, J. & Shannon, B. (2013). "Salient factors controlling desiccation cracking of clay in laboratory experiments." *Geotechnique*, 63(1), 18-29.
- Crowther, T.W. et al. (2016). "Quantifying global soil carbon losses in response to warming." *Nature*, 540, 104-108.
- Cuadrado, A. (2018). "Análisis THM de la interacción suelo-atmosférica en suelos arcillosos sometidos a desecación," Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Decagon Devices Inc. (2007). *Operator's manual. Dewpoint PotentiaMeter WP4*, 5<sup>a</sup> ed., Decagon Devices, Inc., Pullman.
- Del Campo, R. (2018). "Los huracanes amenazan a Europa." *ABC*. Último acceso el 22 de febrero de 2020. [https://www.abc.es/sociedad/abci-huracanes-amenazan-europa-201810160314\\_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://www.abc.es/sociedad/abci-huracanes-amenazan-europa-201810160314_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F)
- Demagistri, A., Ledesma, A., Cordero, J.A., Moreno, R., Prat, P. & Jacinto, A. (2018). "Effects of compaction on desiccation cracking of clayey soils." Proceedings 7th International Conference on Unsaturated Soils, Hong-Kong.
- Durán, V.H. y Rodríguez, C.R. (2008). "Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review." *Agronomy for Sustainable development*, 28(1), 65-86.
- EHE, (2008). *Instrucción del hormigón estructural*, Ministerio de Fomento, Madrid.
- El Maarry, M.R., Kodikara, J.K., Wijessoriya, S., Markiewicz, W.J. & Thomas, N. (2012). "Desiccation mechanism for formation of giant polygons on Earth and intermediate-sized polygons on Mars: Results from a pre-fracture model." *Earth and Planetary Science Letters*, 323-324, 19-26.
- Encalada, D. (2018). "Análisis numérico y experimental de la evaporación en la interfase suelo-atmosfera," Tesis de Máster, UPC-BarcelonaTech.
- Erdogan, F. & Sih, G.C. (1963). "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear." *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 519-527.
- Escobar, C.E. y Duque, G. (2017). *Geotecnia para el trópico andino*, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Espinoza, C. (2006). *Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento*, pp. 1-23, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Ferreira, T., & Rasband, W. (2012). ImageJ User Guide. National Institute of Health, Bethesda, Maryland, USA (<http://imagej.nih.gov>).
- Fredlund, D.G. (1979). "Appropriate concepts and technology for unsaturated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 16, 121-139
- Fredlund, D.G. & Morgenstern, N. (1977). "Stress state variables for unsaturated soils." *Geotechnical Engineering Division ASCE*, 103, 447-466.
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- Gómez-Esteban, P. (2012). *Las ecuaciones de Maxwell*, El Tamiz, Madrid.
- Google Maps. (2020a). [Google "map" del parque UPC Agrópolis]. Recuperado 12 de abril de 2020 de <https://www.google.com/maps/place/Parc+UPC+-+Agr%C3%B2polis/@41.291096,2.0489849,4711m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x12a49db8c0453971:0xf09c3abd88e93c4418m2!3d41.288456!4d2.045388>
- Google Maps. (2020b). [Google "map" de los puntos de extracción de tierra]. Recuperado 12 de abril 2020 de <https://www.google.com/maps/@41.2884583,2.0435841,78m/data=!3m1!1e3>
- Griffith, A.A. (1924). "The theory of rupture." *Proceedings of the first International Congress for Applied Mechanics*, J. Waltman Jr., Delft, 55-63.
- Griffiths, F.J. & Joshi, R.C. (1989). "Change in pore size distribution due to consolidation of clays." *Géotechnique*, 39(1), 159-167.

- Harris, R.C. (2004). *Giant desiccation cracks in Arizona*, Arizona Geological Survey, Tucson.
- Howard, A. (Escritor), & Draudt, T. (Director). (2008). Garbage [Episodio de Serie de Televisión]. En: J. Ward (Productor), *The Works*. Nueva York: The History Channel.
- Hummel, A. (1966). *Prontuario del hormigón*, 2ª ed., Técnicos Asociados SA, Barcelona.
- Ingraffea, A.R. (1978). "On discrete fracture propagation in rock loaded in compression." *Proceedings of the First International Conference on Numerical Methods in Fracture Mechanics*, University College of Swansea, Swansea, 235-248.
- Interempresas (2010). "Materiales geosintéticos." *Interempresas. Anales sectoriales*. Último acceso el 17 de marzo de 2020. <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/44164-Materiales-geosinteticos.html>
- Intermas (2019a). *INTERDRAIN GMG 412. Geocompuesto drenante*, Intermas Group, Barcelona.
- Intermas (2019b). *INTERDRAIN M 4. Geocompuesto drenante*, Intermas Group, Barcelona.
- International Organization for Standardization [ISO] (2005). *ISO 9864:2005: Geosynthetics — Test method for the determination of mass per unit area of geotextiles and geotextile-related products*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2006a). *ISO 13433:2006: Geosynthetics — Dynamic perforation test (cone drop test)*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2006b). *ISO 12236:2006: Geosynthetics — Static puncture test (CBR test)*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2010). *ISO 12958:2010: Geotextiles and geotextile-related products — Determination of water flow capacity in their plane*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2015). *ISO 10319:2015: Geosynthetics — Wide-width tensile test*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2016). *ISO 9863-1:2016: Geosynthetics — Determination of thickness at specified pressures — Part 1: Single layers*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2019a). *ISO 11058:2019: Geotextiles and geotextile-related products — Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load*, ISO International Standards, Ginebra.
- International Organization for Standardization [ISO] (2019b). *ISO 12956:2019: Geotextiles and geotextile-related products — Determination of the characteristic opening size*, ISO International Standards, Ginebra.
- Knoll, M.D. & Knight, R. (1994). "Relationships between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures.", *Waterloo Centre for Groundwater Research*, 45-61.
- Kodikara, J.K., Barbour, S. & Fredlund, D. (2000). "Desiccation cracking of soils layers." *Unsaturated soils for Asia: Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils*, A.A. Balkema, Rotterdam, 693-698.
- Kodikara, J.K., Nahlawi, H. & Bouazza, A. (2004). "Modelling of curling in desiccating clay." *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3), 560-566.
- Konrad, J. & Ayad, R. (1997). "An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation." *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 477-488.



- La Vanguardia (2019). “Un deslizamiento de tierra en La Paz deja 400 damnificados e impresionantes imágenes.” *La Vanguardia*. Último acceso el 12 de abril de 2020. <https://www.lavanguardia.com/internacional/20190501/461984931202/deslizamiento-tierra-la-paz-derrumbe-edificios.html>
- Lachenbruch, A.H. (1961). “Depth and spacing of tension cracks.” *Journal of Geophysical Research*, 66(12), 4273-4292.
- Lakshmikantha, M.R., Ledesma, A. & Prat, P. (2008). “A new laboratory set-up to investigate desiccation cracking in soils.” *International conference on Drought and Constructions*, Marne-la-Vallée, Paris, Vol. 1, 163-168.
- Lakshmikantha, M.R. (2009). “Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils,” Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Lakshmikantha, M.R., Prat, P. & Ledesma, A. (2012). “Experimental evidence of size effect in soil cracking.” *Canadian Geotechnical Journal*, 49(3), 264-284.
- Lakshmikantha, M.R., Reig, R., Prat, P. & Ledesma, A. (2013). “Origin and mechanism of cracks seen at the bottom of a desiccating soil specimen.” *Geo-Congress*, American Society of Civil Engineers, San Diego, Vol. 1, 790-799.
- Lakshmikantha, M.R., Prat, P. & Ledesma, A. (2018). “Boundary effects in the desiccation of soil layers with controlled environmental condition.” *Geotechnical Testing Journal*, 41(4), 675-697.
- Lau, J.T.K. (1987). “Desiccation cracking of clay soils,” Tesis de Máster, Universidad de Saskatchewan, Canadá.
- Ledesma, A. (2016). “Cracking in desiccating soils.” *Third European Conference on Unsaturated Soils – E-UNSAT 2016*, Paris, Vol. 9, 1-8.
- Lee, I.K. & Ingles, O. (1968). “Strength and deformation of soil and rocks.” *Soil mechanics: selected topics*, editado por I.K. Lee, Butterworths, Sidney, Vol. 4, 195-294.
- Lee, F. & Lo, S.L.K. (1988). “Tension crack development in soils.” *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(8), 915-929.
- Levatti, H.U. (2015). “Estudio experimental y análisis numérico de la desecación en suelos arcillosos,” Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Levatti, H.U., Prat, P., Ledesma, A., Cuadrado, A. & Cordero, J.A. (2017). “Experimental analysis of 3D cracking in drying soils using Ground Penetrating Radar.” *Geotechnical Testing Journal*, 40(2), 1-23.
- Levatti, H.U., Prat, P. & Ledesma, A. (2019). “Numerical and experimental study of initiation and propagation of desiccation cracks in clayey soils.” *Computers and Geotechnics*, 105, 155-167.
- Li, Y., Xu, X. y Zhu, X.M. (1993). “Effective model on the roots of Chinese pine plantation to improves the physical properties of soil in the Loess Plateau.” *Scientia Silvae Sinicae*, 29, 193-198.
- Lloret, A. & Alonso, E.E. (1985). “State surfaces for partially saturated soils.” *Proceedings of the eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, AA Balkema, Rotterdam, Vol. 2, 557-562.
- Matyas, E. & Radhakrishna, H. (1968). “Volume change characteristics of partially saturated soils.” *Géotechnique*, 18, 432-448.
- Menéndez, M. (2014). “Plantas para asegurar laderas.” *El Comercio*. Último acceso el 12 de abril de 2020. <https://www.elcomercio.es/asturias/201408/26/plantas-para-asegurar-laderas-20140826002256v.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>
- Meter Group (2018). *User manual. Pressure Transducer Tensiometer T5*, 8ª ed., METER Group AG München, Múnich.

- Ministerio de Fomento (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, Dirección General de Carreteras, Madrid.
- Morris, P., Graham, J. & Williams, D. (1992). "Cracking in drying soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 263-277.
- Nahlawi, H. & Kodikara, J.K. (2002). "Experimental observations on curling of desiccating clay." *International Conference of Unsaturated Soils*, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Vol. 2, 553-556.
- Nahlawi, H., Chakrabarti, S. & Kodikara, J. (2004). "A direct tensile strength testing method for unsaturated geomaterials." *Geotechnical Testing Journal*, 27(4), 1-6.
- Nahlawi, H. & Kodikara, J.K. (2006). "Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers." *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 1641-1664.
- Narváez, V. (2018). "Protección del 'Don Juan' se deteriora." *El Heraldo*. Último acceso el 12 de abril de 2020. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/proteccion-del-don-juan-se-deteriora-498024>
- National Centers for Environmental Information [NOAA]. (2017). *State of the climate: global climate report for 2017*. Recuperado de <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201713>
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. & Alonso, E.E. (1996). "Numerical formulation for simulator (CODE\_BRIGHT) for coupled analysis of saline media." *Engineering computations*, 13(7), 87-112.
- Olivella, S., Vaunant, J. & Rodríguez-Dono, A., (2020). *Code\_Bright 2020 User's Guide*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Olympus, (2002). *C-5050 Zoom. Manual Básico*, CAMEDIA, Japón.
- Oñate, E. (2016). *Cálculo de estructuras por el método de elementos finitos*, CIMNE, Barcelona.
- Peron, H., Hueckel, T. & Laloui, L. (2007). "An improved volume measurement for determining soil water retention curves." *Geotechnical Testing Journal*, 30(1), 1-8.
- Peron, H., Delenne, J., Laloui, L. & Hu, L. (2009). "Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification." *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 1177-1201.
- Peterson, T.C. & Vose, R.S. (1997). "An overview of the global historical climatology network database." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2837-2849.
- Prat, P., Ledesma, A. & Cabeza, L. (2002). "Drying and cracking soils: Numerical modelling." *Numerical Models in Geomechanics NUMOG III*, Elsevier, Londres, Vol. 3, 705-711.
- Prat, P., Ledesma, A., Cuadrado, A. & Levatti, H. (2013). "Ground penetrating radar system for detection of desiccation cracks in soils." *Third International Symposium on Computational Geomechanics*. Edited by S. Pietruszczak and G.N. Pande. Kraków, Poland. International Centre for Computational Engineering.
- Quayle, R.G., Peterson, T.C., Basist, A.N. & Godfrey, C.S. (1999). "An operational near-real-time global temperature index." *Geophysical Research Letters*, 26(3), 333-335.
- Red Nacional de Ferrocarriles Españoles [RENFE] (1980). *Obras de tierra. Estabilidad de taludes*, 1ª ed., RENFE: Área de inversiones, Madrid.
- Rodríguez, R.L. (2002). "Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): Influencia del comportamiento hidromecánico," Tesis Doctoral, UPC-BarcelonaTech.
- Rodríguez, R.L., Sánchez, M., Ledesma, A. & Lloret, A. (2007). "Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste." *Canadian Geotechnical Journal*, 44(6), 644-658.

- Romero, E., Gens, A. & Lloret, A. (1999). "Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted boom clay." *Engineering Geology*, 54, 117-127.
- Seibu Giken DST. (2019). "*Deshumificador RECUSORB DR-010B DST*." Seibu Giken DST. Último acceso el 13 de abril de 2020. <https://www.dst-sg.com/wpcontent/uploads/DR-010B-SP.pdf>
- Shokri, N., Lehmann, P. & Or, D. (2008). "Effects of hydrophobic layers on evaporation from porous media." *Geophysical Research Letters*, 35(19), 1-4.
- Shokri, N., Lehmann, P. & Or, D. (2009). "Critical evaluation of enhancement factors for vapor transport through unsaturated porous media." *Water Resources Research*, 45(10), 1-9.
- Shokri, N., Lehmann, P. & Or, D. (2010). "Evaporation from layered porous media." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(6), 1-12.
- Shokri, N., Zhou, P. & Keshmiri, A. (2015). "Pattern of desiccation cracks in saline bentonite layers." *Transport in Porous Media*, 110(2), 333-344.
- Sierra, A. (1933). "Tectónica e hidrología en la cuenca del río Llobregat, provincia de Barcelona." *Bol. Com. Mapa Geo. Esp.*, 31-52.
- Tang, G. & Graham, J. (2000). "A method for testing tensile strength in unsaturated soils." *Geotechnical Testing Journal*, 23(3), 377-382.
- TexDelta (2019). "Aplicación de los geosintéticos en el pavimento vial." *TexDelta*. Último acceso el 10 de abril de 2020. <https://texdelta.com/blog/aplicacion-de-los-geosinteticos-en-el-pavimento-vial/>
- Trabelsi, H., Jamei, M., Zenzri, H. & Olivella, S. (2012). "Crack patterns in clayey soils: Experiments and modelling." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36, 1410-1433.
- Umacon (2012). "Hormigoneras Supermix. Descripción-características técnicas". Último acceso el 3 de mayo de 2020. <http://www.umacon.com/producto.php/es/Hormigoneras-Supermix/16>
- Vaisala (2002). *HMP230 Series Transmitters. User's guide*, Vaisala Oyj, Helsinki.
- Vaisala (2006). *Calibration of series HMD/W60/70 and HMP140 Transmitters with Vaisal HUMICAP® indicator HMI41*, Vaisala Oyj, Helsinki.
- Van Genuchten, M. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Villalonga, C. (2016). "La NASA reitera el drama: la Tierra lleva siete meses consecutivos batiendo el récord de calor." *La Vanguardia*. Último acceso el 12 de abril de 2020. <https://www.lavanguardia.com/natural/20160516/401830514842/nasa-abril-calor.html>
- Zienkiewicz, O.C. & Taylor, R.L. (1994). *El método de los elementos finitos: Formulación básica y problemas lineales*, 4ª ed., McGraw Hill, Madrid.
- Zienkiewicz, O.C. & Taylor, R.L. (1995). *El método de los elementos finitos: Mecánica de sólidos y fluidos, dinámica y no linealidad*, 4ª ed., McGraw Hill, Madrid.

## Anejo A. Script de MATLAB para el cálculo de la masa perdida y la velocidad de evaporación

```
clc, clear all

% 1. Abrir archivos de lectura y de salida de resultados
%=====
file = 'ConGeosintetico_cont_flux.dat'; % nombre del archivo
file_out='resultados.dat'; % archivo de resultados que quiero
fid = fopen(file);
fid2 = fopen(file_out, 'w');

if fid==-1
    error('File not found or permission denied');
end

% 2. Inicio de la lectura del archivo y operaciones
%=====
while ~feof(fid)
    title = fgetl(fid);
    if strfind(title, 'node') > 0
        line = fgetl(fid);
        [A, ncols, errmsg, nxtindex] = sscanf(line, '%f');
        time = A(2);
        water=0;
        while isempty(errmsg) && ~isempty(line)
            water = water + A(5);
            line = fgetl(fid);
            [A, ncols, errmsg, nxtindex] = sscanf(line, '%f');
        end
        fprintf(fid2, '%e %e \n', time, water);
    end
end

fclose(fid);
fclose(fid2);
```