

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Estudio de la formación de grandes fisuras atribuibles al asentamiento en suelos finos debido a un montículo en la roca basal en experimentación con maquina centrífuga.**

**Yeny Katherine Jiménez Beltrán**

**Directora**

**Dra. Catalina Lozada López**

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

**Facultad de ingeniería**

**Departamento de ingeniería Civil**

**2023**

**Estudio de la formación de grandes fisuras atribuibles al asentamiento en suelos finos debido a un montículo en la roca basal en experimentación con maquina centrífuga.**

**TESIS DE GRADO**

**Realizado por:**

Yeny Katherine Jiménez Beltrán

**Para obtención del grado de:**

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN GEOTECNIA**

**Directora**

Ing. Catalina Lozada López, Ph.D.

**Jurados**

Ing. Lina Ximena Garzón Ávila, Ph.D.

Ing. Luis F. Vesga Martínez, Ph.D.

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito**

**Facultad de ingeniería**

**Departamento de ingeniería Civil**

**2023**

La tesis de maestría titulada “**Estudio de la formación de grandes fisuras atribuibles al asentamiento en suelos finos debido a un montículo en la roca basal en experimentación con maquina centrífuga.**”, presentada por Yeny Katherine Jiménez Beltrán, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.



---

Director de la tesis

Catalina Lozada López

---

Jurado

Lina Ximena Garzón Ávila

---

Jurado

Luis F. Vesga Martínez

Bogotá, D.C., día de mes de año (\_\_\_\_)

### ***Dedicatoria***

*Agradezco a mis padres y a mi hermano, quienes me han brindado todo su amor y apoyo en cada paso de mi vida. A mi pareja, que me ha animado, motivado y acompañado durante este proceso, y a la naturaleza, que a través de sus procesos geológicos y geotécnicos ha proporcionado la materia prima para mi investigación. Espero que esta tesis contribuya de alguna manera al conocimiento y desarrollo de la geotecnia y su aplicación en la construcción de infraestructuras.*

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a hacer posible la realización de esta tesis. En primer lugar, agradezco a mi asesora, la Doctora Catalina Lozada, por su apoyo incondicional, su orientación y su amplio conocimiento, los cuales han sido esenciales en todo el proceso de investigación. Sus comentarios, sugerencias y críticas constructivas han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Quiero expresar mi agradecimiento especial a mi familia y a mi pareja, quienes me brindaron su amor incondicional, su comprensión y paciencia en todo momento, y me dieron la motivación necesaria para seguir adelante en este proceso. También quiero agradecer a mis amigos y a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo y ánimo en cada etapa de esta investigación. Su confianza y respaldo fueron fundamentales para enfrentar y superar los retos que se presentaron en el camino.

Asimismo, quisiera expresar mi agradecimiento a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por proporcionarme los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la formación de profesionales de excelencia en el campo de la ingeniería civil ha sido fundamental para el desarrollo de mi carrera. De igual manera, quiero agradecer a los profesores de la facultad de geotecnia, quienes me brindaron sus valiosos conocimientos y su experiencia en este campo de la ingeniería. Su dedicación y enseñanza ha sido esencial en mi formación académica y en el éxito de este proyecto. Les agradezco por su tiempo, paciencia y orientación en todo momento.

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción: .....	12
2. Problema de investigación: .....	13
3. Objetivos: .....	15
3.1 Objetivo General: .....	15
3.2 Objetivos Específicos: .....	15
4. Marco teórico: .....	16
4.1 Fisuras en suelos finos: .....	16
4.1.1 Modos de propagación de fisuras: .....	17
4.1.2 Morfología de las grietas: .....	18
4.1.3 Clasificación de las fisuras: .....	19
4.1.3 Mecanismos de generación y propagación de las fisuras: .....	20
4.1.4 Evolución de las fisuras: .....	21
4.2 Mecanismos de formación de fisuras de gran longitud: .....	22
4.3 Resistencia a la tracción en suelos finos: .....	30
4.4 Efecto del contenido de humedad en la falla de muestras: .....	32
4.4.1 Aplicabilidad de la teoría de falla de Mohr Coulomb: .....	34
4.5 Modelación física en centrifuga geotécnica: .....	35
4.5.1 Leyes de escala: .....	35
4.5.2 Análisis de escala: .....	37
4.6 Uso de GEOPIV_RG (Particle Image Velocimetry) en geotecnia: .....	38
4.6.1 Funcionamiento de GEOPIV_RG: .....	38
4.6.2 Resultados gráficos del programa GeoPIV-RG: .....	40
4.7 Estudios de formación de fisuras realizados en centrifuga Geotécnica: .....	40
5. Metodología: .....	41
5.1 Etapa 1: Caracterización del suelo: .....	42
5.2 Etapa 2: Selección de las dimensiones y el material para la simulación física del montículo en la roca basal: .....	44
5.3 Etapa 3: Instrumentación del suelo: .....	44
5.4 Etapa 4: Definición de los equipos utilizados en la modelación física: .....	45
5.5 Etapa 5: Preparación física de los modelos: .....	46
5.5.1 Preparación del suelo fino: .....	46
5.5.2 Montaje del suelo en las cajas del modelo: .....	46

5.5.3	Consolidación del suelo:.....	46
5.5.4	Construcción de los modelos: .....	47
5.5.5	Montaje de la instrumentación en el suelo: .....	48
5.5.6	Vuelo en centrifuga geotécnica: .....	49
5.6	Etapa 6: Ensayos de prueba: .....	51
5.7	Etapa 7: Análisis de imágenes: .....	52
6.	Resultados y análisis de resultados experimentales:.....	53
6.1	Resultados de laboratorio:.....	53
6.1.1	Caracterización del suelo arcilloso:.....	53
6.2	Análisis del registro fotográfico:.....	60
6.2.1	Propagación de fisuras en superficie:.....	63
6.3	Control de asentamientos:.....	70
6.4	Vectores de desplazamiento:.....	73
6.5	Fuerzas y zonas de tensión y compresión: .....	77
6.6	Contenido de humedad: .....	78
6.7	Esfuerzos geostáticos:.....	81
6.8	Asentamiento por consolidación-Caso Unidimensional:.....	84
7.	Conclusiones:.....	90
8.	Recomendaciones:.....	92
9.	Bibliografía: .....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Árbol de problemas. Fuente Propia. ....	14
Figura 2. Ejemplos de grietas generadas por diferentes factores. ....	16
Figura 3. Los modos de fractura según el estado de esfuerzos que los produce. Adaptado de (Anderson, 1991). ....	17
Figura 4. Modos de formación de una fisura. Adaptado de (Azizi, 1999). ....	18
Figura 5. Partes de una grieta. Adaptado de (Barragán & Rodríguez, 2021).....	18
Figura 6. Erosión de una fisura. Adaptado de(Conway, 2016). ....	22
Figura 7. Generación de nuevas zonas de fallas. Referencia: <a href="https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/geo263-interactivo">https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/geo263-interactivo</a> . ....	22
Figura 8. Lugares susceptibles a la aparición de grietas. Adaptado de (Holzer, 1984). ....	23
Figura 9. Mecanismo de generación de grietas según (Jachens & Holzer, 1982). H es el espesor de suelo sin deformar sobre la protuberancia basal. ....	24
Figura 10. Mecanismo de generación de grietas sugerido (Jachens & Holzer, 1982). ....	24
Figura 11. Agrietamiento por fracturamiento hidráulico. Adaptado de (Galloway et al., 1999). ....	25
Figura 12. Agrietamiento asociado al asentamiento en zonas de transición abrupta. Adaptado de (Galloway et al., 1999). ....	25
Figura 13. El agrietamiento atribuible al asentamiento en zonas con anomalías estratigráficas. Adaptado de (Galloway et al., 1999). ....	26
Figura 14. Grietas atribuibles a la vegetación. Adaptado de (Galloway et al., 1999). ....	26
Figura 15. Grietas atribuibles al asentamiento en áreas con estructuras geológicas sepultadas. Adaptado de (Galloway et al., 1999). ....	26
Figura 16. Agrietamiento asociado al asentamiento. Adaptado de (Barragán & Rodríguez, 2021). ....	27
Figura 17. Montículo sepultado con un nivel freático al mismo nivel de la superficie. Adaptado de (Barragán & Rodríguez, 2021). ....	27
Figura 18 Esfuerzos de tensión a ambos lados del montículo en la roca basal. Adaptada de (Barragán & Rodríguez, 2021). ....	28
Figura 19. Formación de grandes fisuras en suelos finos. Adaptada de (Barragán & Rodríguez, 2021). ...	28
Figura 20. Fisura de tierra de aproximadamente un año de antigüedad. Ubicada en el centro-sur de Arizona, debido a la disminución del nivel freático (Conway, 2016). ....	29
Figura 21. Fisura de tierra en el centro-sur de Arizona. Parte de la fisura en primer plano probablemente sufrirá un colapso por erosión continua debido a los grandes episodios de lluvias (Conway, 2016). ....	29
Figura 22. Fisura ubicada en Villas de San Martín, una colonia en el municipio de Chalco, al oriente de la ciudad de México. Referencia: <a href="http://www.bbc.com/mundo/lg/america_latina/2009/08/090806_mexico_grietas_mf">www.bbc.com/mundo/lg/america_latina/2009/08/090806_mexico_grietas_mf</a> .....	29
Figura 23. Ejemplos de fisuras en el sector noroccidental de la ciudad de Bogotá (Vesga et al., 2003). ....	30
Figura 24. Notación para la definición del campo de esfuerzos y desplazamientos en el frente de una grieta (Anderson, 1991).....	30
Figura 25. Efecto del contenido de humedad en la propagación de fisuras en muestras de suelo fino. (Vallejo, 1988). ....	32
Figura 26. Propagación de grietas y modo de falla en muestras frágiles. (Vallejo, 1988). ....	33
Figura 27. Propagación de grietas y modo de falla en una muestra plástica. (Vallejo, 1988). ....	33
Figura 28. Tipos de falla en el plano de esfuerzos normales y cortantes. (Barragán & Rodríguez, 2021). ....	34
Figura 29. Esquema de giro de la centrífuga. Adaptado de (García & Melentijevic, 2015). ....	36
Figura 30. Esquema de la centrífuga con respecto al prototipo. tomado de: (Azizi, 1999). ....	36



Figura 31. Centrífuga de la ECI. Fuente propia.....	38
Figura 32. Esquema de funcionamiento de la técnica de inspección visual por puntos (VIP). Adaptado de (White et al. 2002).....	39
Figura 33. Diseño del modelo. Fuente propia.....	41
Figura 34. Metodología que se realizara. Fuente propia.....	41
Figura 35. Ensayo del límite líquido y plástico según la norma I.N.V.E.-125-13 y I.N.V.E.-126-13. Fuente propia.....	42
Figura 36. Ensayo de Gravedad específica de sólidos según norma I.N.V.E.-128. Fuente propia.....	43
Figura 37. a) Consolidometro electrónico b) Curva de consolidación. Fuente propia.....	43
Figura 38. Peso unitario según la norma ASTM D7263. Fuente propia.....	43
Figura 39. Resistencia al corte del suelo con veleta de campo. Fuente propia.....	44
Figura 40. a) Dimensiones de la caja a emplear en la simulación física b) Medidas de la roca basal c) conformación de la roca basal. Fuente propia.....	44
Figura 41. a) Instrumentos utilizados para controlar la deformación del suelo b) montaje de la instrumentación. Fuente propia.....	45
Figura 42. Maquina centrifuga empleada en la modelación física. Fuente propia.....	45
Figura 43. a) Modelación de la roca madre b) Suelo arcilloso. Fuente propia.....	46
Figura 44. Consolidometros neumáticos. Fuente propia.....	47
Figura 45. Curva de consolidación. Fuente propia.....	47
Figura 46. a) Se retiran las tapas de la caja b) Se ponen guías laterales y con una cequeta de hilo se corta el suelo c) Con ayuda de la espátula se retira el suelo restante d) se retiran las guías e) se marca una cuadrícula en el suelo para el control de imágenes f) se marca una cuadrícula en la cara superior g) se instalan las caras laterales y se sella la caja con papel vinipel h) se realiza un registro fotográfico. Fuente propia.....	48
Figura 47. Instalación de la instrumentación en el suelo. Fuente propia.....	48
Figura 48. Montaje en la maquina centrifuga geotécnica a) caja del modelo físico b) Contrapeso C) Falla del suelo. Fuente propia.....	49
Figura 49. a) Dimensiones del modelo b) Dimensiones del prototipo. Fuente propia.....	50
Figura 50. Control de la propagación de la fisura en tiempo real. Fuente propia.....	50
Figura 51. Ensayos prueba en la Construcción del montículo. Fuente propia.....	51
Figura 52. Fisuras adicionales al proceso de asentamiento diferencial. Fuente propia.....	52
Figura 53. Alturas variables (h1) en la construcción de los modelos a) h1=6.61 cm b) h1=7.23 cm. Fuente propia.....	52
Figura 54. Carta de plasticidad. Fuente propia.....	55
Figura 55. Resistencia al corte del suelo a) Ensayo en el laboratorio b) Tarjeta de instrucciones. Fuente propia.....	56
Figura 56. Asentamiento por consolidación a un esfuerzo total de 30 kPa. Fuente propia.....	57
Figura 57. Curva de compresibilidad del suelo fino. Fuente propia.....	60
Figura 58. Dimensiones del modelo. Fuente propia.....	61
Figura 59. Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 1. Fuente propia.....	61
Figura 60. Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 2. Fuente propia.....	62
Figura 61. Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 3. Fuente propia.....	62

Figura 62. Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 4. Fuente propia. ....	62
Figura 63. Ubicación del sensor de deformación LVDT. Fuente propia. ....	70
Figura 64. Tiempo contra asentamiento en el vuelo en la centrifuga geotécnica- Prototipo. Fuente propia. ....	71
Figura 65. Altura del montículo contra tiempo inicial de propagación de las fisuras. Fuente propia. ....	72
Figura 66. Altura del montículo contra tiempo final de propagación de las fisuras. Fuente propia. ....	72
Figura 67. Altura del montículo contra distancia de apertura en la fisura. Fuente propia. ....	73
Figura 68. Altura del montículo contra asentamiento del suelo. Fuente propia. ....	73
Figura 69. Procesamiento de fotografías del modelo M1 (Humedad 78.67%) a) Vectores de desplazamiento b) Desplazamiento horizontal c) Desplazamientos vertical. Fuente propia. ....	74
Figura 70. Procesamiento de fotografías del modelo M2 (Humedad 77.50%) a) Vectores de desplazamiento b) Desplazamiento horizontal c) Desplazamientos vertical. Fuente propia. ....	75
Figura 71. Procesamiento de fotografías del modelo M3 (Humedad 77.10%) a) Vectores de desplazamiento b) Desplazamiento horizontal c) Desplazamientos vertical. Fuente propia. ....	76
Figura 72. Procesamiento de fotografías del modelo M4 (Humedad 76.72%) a) Vectores de desplazamiento b) Desplazamiento horizontal c) Desplazamientos vertical. Fuente propia. ....	76
Figura 73. Zonas de tensión y compresión. Fuente propia. ....	77
Figura 74. Zona de tensión y zonas de compresión. Fuente propia. ....	77
Figura 75. Fuerzas en la propagación de la fisura. Fuente propia. ....	78
Figura 76. Zonas de análisis - Contenido de humedad. Fuente propia. ....	79
Figura 77. Contenido de humedad después de la propagación final de la fisura-Zona A. Fuente propia. ...	80
Figura 78. Contenido de humedad después de la propagación final de la fisura-Zona B. Fuente propia. ...	80
Figura 79. Contenido de humedad después de la propagación final de la fisura-Zona C. Fuente propia. ...	80
Figura 80. Profundidad de análisis de los esfuerzos geostáticos-Prototipo. Fuente propia. ....	81
Figura 81. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M1. Fuente propia. ....	82
Figura 82. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M2. Fuente propia. ....	82
Figura 83. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M3. Fuente propia. ....	83
Figura 84. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M4. Fuente propia. ....	83
Figura 85. Profundidad del esfuerzo final. Fuente propia. ....	84
Figura 86. Profundidad hasta donde se originó las fisuras (B). Fuente propia. ....	84
Figura 87. Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M1. Fuente propia. ....	86
Figura 88. Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M2. Fuente propia. ....	87
Figura 89. Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M3. Fuente propia. ....	87
Figura 90. Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M4. Fuente propia. ....	88
Figura 91. Altura del montículo contra esfuerzo efectivo en la propagación de la primera grieta. Fuente propia. ....	89

## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1. Clasificación de la fisura de acuerdo con el tamaño. Tomado de: (Vallejo, 2021). .....	19
Tabla 2. Clasificación de la geometría de las fisuras según la forma de su superficie. Tomado de: (Vallejo, 2021). .....	19
Tabla 3. Clasificación de las fisuras según su rugosidad. Tomado de: (Vallejo, 2021). .....	20
Tabla 4. Intensidad de las fisuras. Tomado de: (Vallejo, 2021). .....	20
Tabla 5. Relación de las variables en el prototipo y en el modelo. Tomado de: (Azizi, 1999). .....	37
Tabla 6. Especificaciones de la centrífuga de la ECI (Catalina Lozada et al., 2021). .....	37
Tabla 7. Incremento de carga y esfuerzo vertical. Fuente propia. ....	47
Tabla 8. Dimensión variable de los modelos. Fuente propia. ....	50
Tabla 9. Resultados obtenidos del Limite líquido. Fuente propia. ....	53
Tabla 10. Resultados obtenidos del Limite plástico. Fuente Propia. ....	54
Tabla 11. Calibración del picnómetro. Fuente propia. ....	55
Tabla 12. Gravedad específica del suelo. Fuente propia. ....	55
Tabla 13. Peso unitario en parafina. Fuente propia. ....	56
Tabla 14. Relación de vacíos inicial. Fuente propia. ....	59
Tabla 15. Dimensión variable de los modelos. Fuente propia. ....	61
Tabla 16. Contenido de Humedad. Fuente propia. ....	79
Tabla 17. Esfuerzos verticales iniciales. Fuente propia. ....	81
Tabla 18. Esfuerzos geostáticos – Modelo M1. Fuente propia. ....	85
Tabla 19. Esfuerzo geostáticos – Modelo M2. Fuente propia. ....	85
Tabla 20. Esfuerzo geostáticos – Modelo M3. Fuente propia. ....	85
Tabla 21. Esfuerzo geostáticos – Modelo M3. Fuente propia. ....	85
Tabla 22. Esfuerzo de tensión que generan la primera fisura. Fuente propia. ....	88

## 1. Introducción:

La propagación de fisuras de gran longitud en suelos ha sido objeto de investigación en el campo de la geotecnia. Esta investigación se lleva a cabo con el propósito de comprender y abordar un fenómeno de gran importancia, que afecta la estabilidad y seguridad de diversas estructuras, como viviendas, vías, presas, taludes, túneles, entre otros. Detectar y monitorear estas grietas es esencial para prevenir problemas potenciales y evaluar las causas, desarrollando estrategias para controlar o solucionar el problema. Para ello, se requiere de estudios de morfología y evolución de fisuras que se enfoquen en describir las características geométricas, como su longitud, profundidad, abertura, inclinación, entre otros patrones de agrietamiento observados en la superficie y en profundidad. Asimismo, se busca identificar y analizar la evolución de las grietas a lo largo del tiempo. En este contexto, cabe destacar investigaciones realizadas por Conway (2016) o Rodríguez (2021), que han contribuido significativamente al conocimiento y comprensión del origen y extensión de fisuras de gran longitud.

En relación con la propagación de fisuras de gran longitud, la presencia de montículos en el lecho rocoso puede ser un factor crítico que afecta el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo adyacente a la roca. Sin embargo, la interrelación de estos parámetros hace que el proceso de análisis sea complejo y a menudo, los estudios se centran en los efectos de las grietas sobre las propiedades del suelo, sin explorar las causas subyacentes. Es por ello por lo que es necesario realizar un análisis conjunto de las propiedades mecánicas y los factores in situ que generan estas fisuras. Esto implica estudiar las propiedades mecánicas del suelo y elementos propios del entorno. Con un análisis integral de estos factores, se podrá comprender mejor el comportamiento de suelos agrietados y proponer soluciones adecuadas para evitar o mitigar su aparición en futuros proyectos geotécnicos.

En el marco de esta tesis, se ha llevado a cabo un análisis experimental para investigar la propagación de fisuras de gran longitud en suelos finos, específicamente debido a la presencia de montículos en el lecho rocoso. Se ha investigado la relación entre la presencia de un montículo en la roca basal y la propagación de las fisuras, así como técnicas de modelado y análisis para predecir su comportamiento a través de la modelación en centrifuga geotécnica. Los resultados obtenidos proporcionan una mejor comprensión de uno de los mecanismos de propagación de fisuras de gran longitud, lo cual es de gran importancia en geotecnia, ya que contribuye al diseño y construcción de estructuras en estas condiciones.

## 2. Problema de investigación:

El fenómeno del agrietamiento en suelos blandos es un problema que actualmente no está completamente claro. Si bien en la literatura hay abundantes estudios al respecto, no se tiene con exactitud un único modelo que tenga una aprobación general y que esté apropiadamente contrastado experimentalmente. En consecuencia, no existe una única metodología con la cual sea posible predecir con precisión el lugar exacto donde se va a originar una grieta y la dirección de propagación (Ferrians, 1966).

Sin embargo, a lo largo de la historia se han registrado diferentes factores geológicos y/o ambientales que determinan la formación y la extensión de las fisuras asociadas a un problema local específico. A modo de ejemplo, se menciona el efecto de los árboles, los eventos sísmicos, los cambios de humedad, los cambios de temperatura, la explotación de pozos subterráneos, los flujos de viento, el asentamiento del suelo en áreas con lechos rocosos, entre otros (Barragán & Rodríguez, 2021).

La aparición de grandes fisuras en la superficie terrestre genera un gran riesgo para los habitantes de las zonas afectadas, debido a que una vez ocurrida la grieta, se inicia un proceso de meteorización y erosión provocado por factores naturales y/o antrópicos (Borchers & Carpenter, 2014). Esto desencadena una serie de consecuencias sociales y económicas, reflejadas en daños sociales y económicos tales como: desniveles en las zonas colindantes, daños en las estructuras vecinas, agrietamiento de vías, colapso de tuberías, oleoductos, gasoductos y colectores de drenaje, además del peligro de heridas o muerte al caer personas o vehículos en grietas de gran longitud (Michelle et al., 2011). Por tanto, es necesario saber de dónde proviene el origen de las grietas de gran longitud y por qué aparecen.

Ampliando el panorama de lo mencionado anteriormente, es importante destacar que las fisuras de gran longitud representan no solo un problema geotécnico, sino también social, económico y ambiental. Estas fisuras pueden provocar inestabilidad en las estructuras, lo que pone en riesgo la seguridad de las personas y comunidades cercanas. Además, pueden causar daños económicos significativos tanto en términos de costos de reparación como de reconstrucción. Por último, las fisuras también pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente, especialmente si causan contaminación o alteraciones en los ecosistemas locales (Quesada Balaguer, 2008).

En el presente trabajo el problema se enfoca en el análisis del origen y el proceso de formación de extensas fisuras derivadas del asentamiento en un suelo fino al existir en la zona de estudio un montículo en la roca basal. Este fenómeno ha sido estudiado por especialistas en mecánica de suelos durante mucho tiempo, ya que el crecimiento urbano en las últimas décadas se ha desarrollado en zonas con estas características, como en el centro-sur y sur de Arizona (Conway, 2016).

En la Figura 1 se puede observar las causas y consecuencias de las discontinuidades en suelos finos producidas por la formación de grandes fisuras.

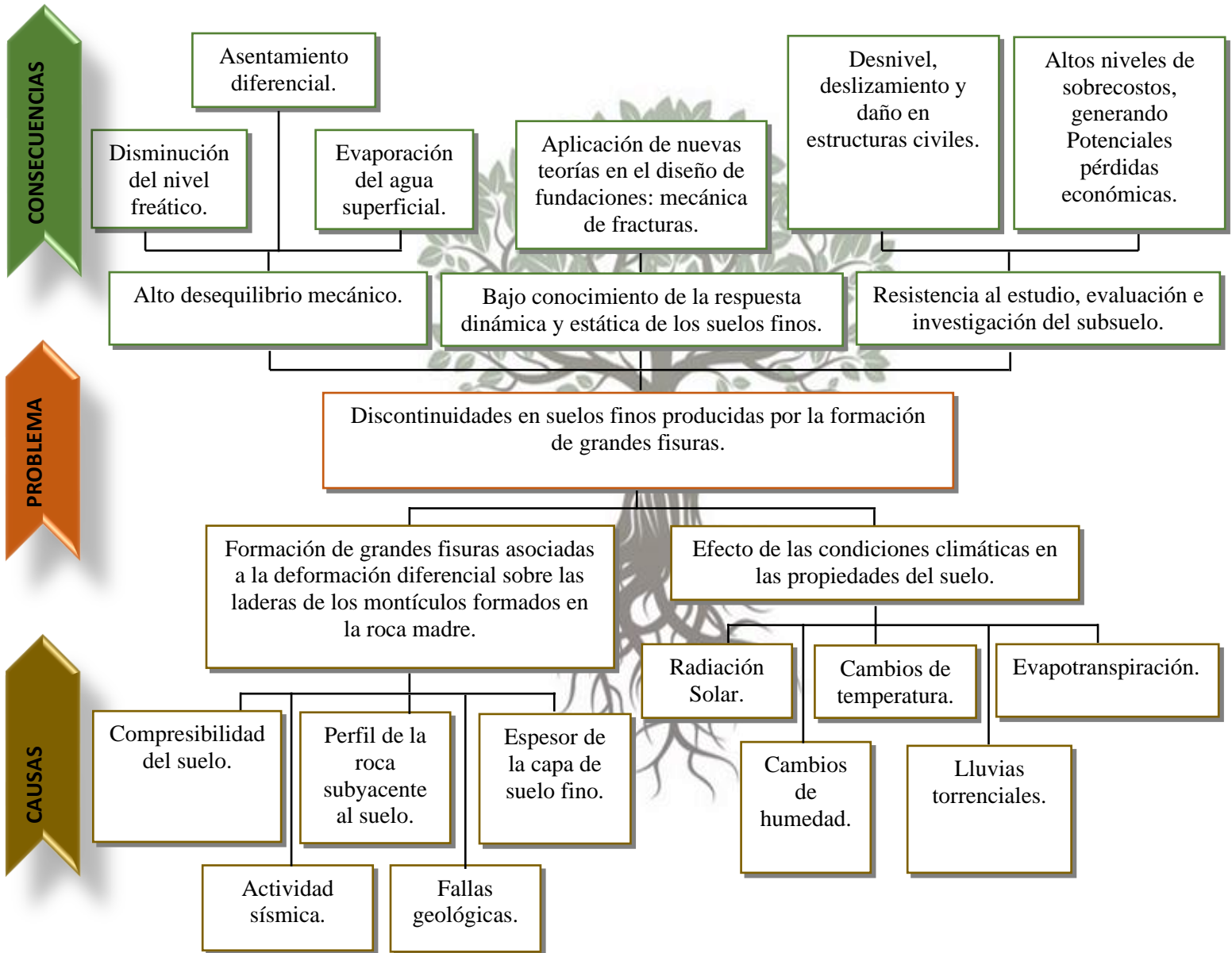


Figura 1. Árbol de problemas. Fuente Propia.

### **3. Objetivos:**

#### **3.1 Objetivo General:**

Estudiar la formación y propagación de fisuras de gran longitud en suelos finos causadas por la variación en la altura del montículo de la roca basal a través de la modelación en centrifuga geotécnica.

#### **3.2 Objetivos Específicos:**

- Diseñar un perfil de suelo a escala reducida que permita estudiar la propagación de fisuras causadas por la presencia de un montículo en la roca basal.
- Estudiar el efecto de la compresibilidad del suelo en el proceso de formación de fisuras variando la altura del montículo en la roca basal.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos en la modelación física usando la teoría de falla de Mohr Coulomb.
- Interpretar los resultados obtenidos en la modelación física a través del procesamiento de imágenes utilizando el software GeoPIV\_RG (Particle Image Velocimetry).

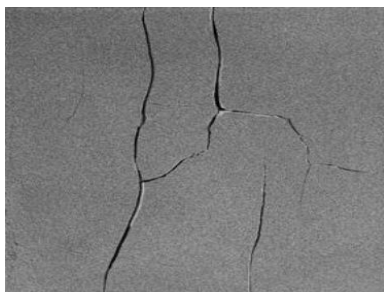
#### 4. Marco teórico:

Las grietas en suelos finos pueden o no estar relacionadas con el hundimiento del terreno. Sin embargo, es sabido que la consolidación del suelo puede generar fisuras que se propagan en áreas con asentamientos diferenciales debidos a factores locales, como la presencia de un montículo en el lecho rocoso subyacente, lo que puede dar lugar a fisuras de gran longitud (Densmore et al., 2019). Además de este agente, otros factores, como la variación climática, los cambios de temperatura, la humedad, la presencia de arcilla expansiva, la cercanía de árboles y los flujos de viento, entre otros, también pueden propiciar la propagación de fisuras con mayor frecuencia.

En esta investigación se analizan los esfuerzos de tensión y corte que causan la formación de fisuras en suelos finos debido a la existencia de un lecho rocoso, también conocido como roca basal. Para lograr este objetivo, resulta fundamental comprender los principios básicos del origen y propagación de estas fisuras, los cuales son abordados en este capítulo, junto con una visión general del estado del conocimiento sobre el agrietamiento de suelos finos, con sus respectivas referencias.

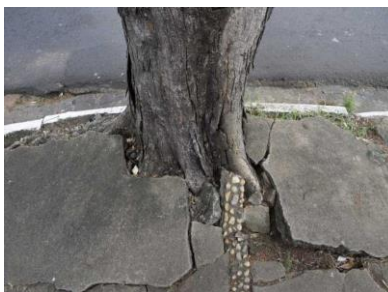
##### 4.1 Fisuras en suelos finos:

Las fisuras son superficies o planos de ruptura aislados que dividen un material continuo sin separarlo en bloques, perdiendo de esta forma el contacto entre dos partes del cuerpo (Fookes & Denness, 1969). Este fenómeno geológico se manifiesta en una o varias series de segmentos que se profundizan hacia el subsuelo y se caracteriza por tener una forma alargada y una abertura variable de unos pocos milímetros a varias decenas de centímetros. Las fisuras pueden extenderse de forma lineal por milímetros hasta kilómetros, y en este proceso el suelo se manifiesta mediante un conjunto de eventos, tales como hundimientos del terreno, socavones, colapsos del subsuelo, corrimientos de tierra, oquedades, entre otros (Morris et al., 1992). En la Figura 2 se pueden observar algunos ejemplos de fisuras.



**a)**

Grieta en laboratorio por desecación en caolinita (Hajjar et al., 2019)



**b)**

Grietas por la presencia de árboles.  
Referencia:  
<https://flourishingplants.com/why-do-trees-cause-concrete-to-crack/>



**c)**

Grietas por licuefacción del suelo.  
Referencia:  
<http://eimaformacion.com/licuefaccion/>

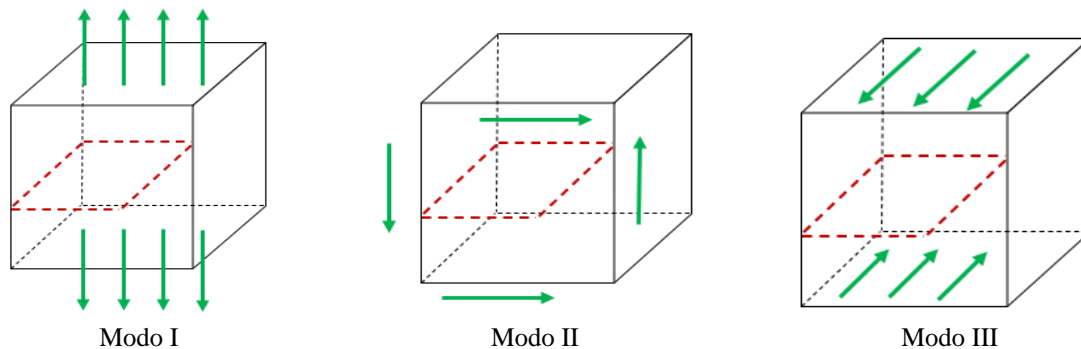
**Figura 2.** Ejemplos de grietas generadas por diferentes factores.



La abertura del subsuelo, los corrimientos de tierra y los desniveles del suelo se transmiten a las edificaciones más cercanas, generando cuarteaduras en su estructura y desplomes. De aquí surge el peligro de este fenómeno tanto en zonas urbanas como rurales (Barragán & Rodríguez, 2021).

#### 4.1.1 Modos de propagación de fisuras:

De acuerdo con los conceptos clásicos de la mecánica de fracturas, existen tres modos en que una fisura puede propagarse en un material duro o frágil, tal como se muestra en la Figura 3:

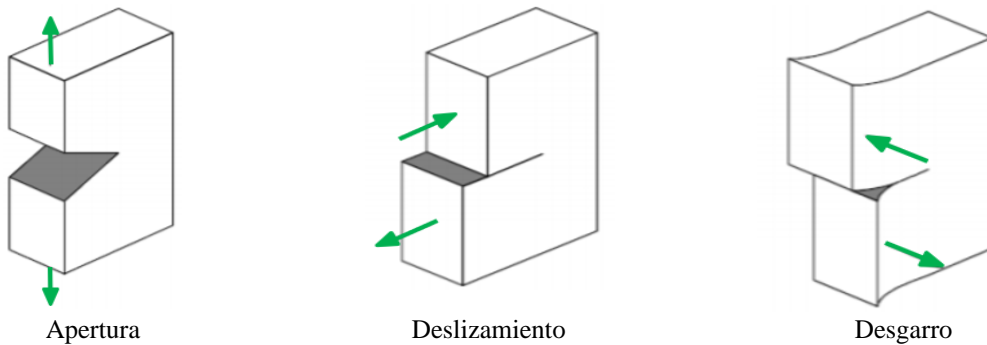


**Figura 3.** Los modos de fractura según el estado de esfuerzos que los produce. Adaptado de (Anderson, 1991).

En la Figura 3 se representa el estado de esfuerzos como:

- **Modo I (Fisura de tensión):** Se presenta una abertura simétrica. El desplazamiento relativo entre las caras correspondientes es perpendicular a la superficie de fractura, haciendo que las grietas se generen por tensión, separando las caras de la grieta.
- **Modo II (Fisura de corte):** Las caras de la grieta se deslizan una sobre la otra en dirección perpendicular al frente de la grieta, por la separación asimétrica presenta un desplazamiento tangencial y perpendicular al vértice.
- **Modo III (Fisura de corte por torsión):** Las caras de las grietas se deslizan una sobre la otra, pero con un desplazamiento paralelo al frente de la grieta, ocasionado por la inducción de un esfuerzo de torsión.

Como se puede ver en la Figura 4, los tres modos I, II y III toman los nombres de apertura, deslizamiento y desgarró, respectivamente. El modo I, en la práctica, es el más comúnmente encontrado en materiales frágiles, siendo un ejemplo de este tipo de material el suelo en condiciones de bajo contenido de agua. En general, en un cuerpo homogéneo, el agrietamiento puede ser descrito por alguno de estos modos o una combinación de ellos, y el crecimiento de la fisura usualmente tiene lugar en el modo I o cerca de él (Densmore et al., 2019).

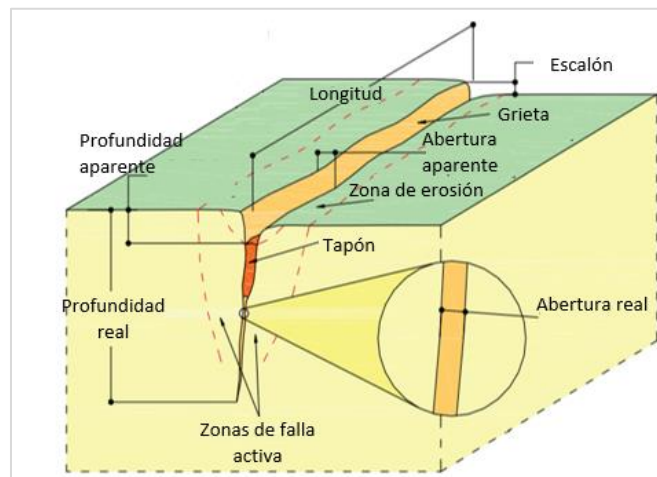


**Figura 4.** Modos de formación de una fisura. Adaptado de (Azizi, 1999).

En condiciones de bajo contenido de agua, la diferencia entre el Modo II y el Modo III radica en que en el Modo II el esfuerzo cortante es perpendicular a la grieta, mientras que en el Modo III la grieta es paralela a este esfuerzo, tal como se ilustra en la Figura 4 (Wang, 2014).

#### 4.1.2 Morfología de las grietas:

El propósito de este tipo de análisis es describir las características geométricas de las fisuras presentes en el suelo, como la longitud, profundidad, abertura, patrón de agrietamiento observado en planta y en profundidad, entre otros. Además, se busca estudiar e identificar la evolución de estas características morfológicas en el tiempo. En la Figura 5 se puede observar la configuración morfológica de una grieta.



**Figura 5.** Partes de una grieta. Adaptado de (Barragán & Rodríguez, 2021)

Las características más destacables en la morfología de una grieta son la forma, longitud, profundidad y abertura, las cuales dependen del mecanismo o modo de propagación que originó la grieta y se desarrollan generalmente de manera paralela a las curvas de nivel (Barragán & Rodríguez, 2021). Además, la inclinación de la grieta depende tanto de la magnitud y dirección de

los esfuerzos a los que está sometido el macizo de suelo como de sus características mecánicas (Michelle et al., 2011).

La caracterización morfológica de las grietas se utiliza para plantear hipótesis sobre sus posibles causas y propagación a lo largo del tiempo. La cartografía de agrietamientos observada en planta es relativamente simple. Sin embargo, se encuentra cierta dificultad para determinar con certeza la geometría de las grietas en profundidad. Esto se debe a que, tal como indican Morris et al. (1991), resulta difícil medir tanto la profundidad de las grietas como su abertura sin que estas dimensiones sean alteradas por los procesos mismos de medición. Por lo tanto, es importante realizar mediciones en tiempo real del proceso de propagación de las fisuras.

#### 4.1.3 Clasificación de las fisuras:

Las fisuras pueden clasificarse en diferentes parámetros, como el tamaño, la geometría, la rugosidad o la intensidad, como se muestra en la Tabla 1 a la Tabla 4 (Vallejo, 2021):

- **Tamaño de las fisuras:**

El tamaño de las grietas se define a partir del área de apertura de la fisura.

*Tabla 1. Clasificación de la fisura de acuerdo con el tamaño. Tomado de: (Vallejo, 2021).*

<b>Tipo</b>	<b>Tamaño o área</b>
Fisura muy grande	$\geq 100 m^2$
Fisura grande	$1 - 100 m^2$
Fisura Normal	$0.01 - 1m^2$
Fisura pequeña	$1 - 100cm^2$
Fisura muy pequeña	$\leq 1cm^2$

- **La geometría de la fisura:**

La geometría de las fisuras puede resumirse en tres tipos: planas, curvas u ondulantes (si presentan más de una curva), tal como se muestra en la Tabla 2:

*Tabla 2. Clasificación de la geometría de las fisuras según la forma de su superficie. Tomado de: (Vallejo, 2021).*

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Planar	$L/R \leq \pi/8$
Semicurva	$\pi/8 < L/R < \pi/4$
Curva	$L/R \geq \pi/4$
Semi-Ondulante	Combinación de dos de las anteriores alternativas (semi-curvado convexo y cóncavo).
Ondulante	Combinación de 2 o más de las anteriores alternativas (convexo y cóncavo curvado).
Concoidea	Como una figura concoide.

Donde:

$L$  = Longitud de la fisura.

$R$  = Radio de curvatura de  $L$ .

- **La rugosidad de la fisura:**

La rugosidad de las fisuras suele compararse con el pliegue de un papel de lija, como se muestra en la Tabla 3:

*Tabla 3. Clasificación de las fisuras según su rugosidad. Tomado de: (Vallejo, 2021).*

Tipo	Comparación con la rugosidad de un papel de lija	Indicador de la aspereza, $H$ , por encima del plano principal de la fisura (mm)
Muy lisa	0.0	$0 < H \leq 2$
lisa	0.0-0.1	$2 \leq H \leq 4$
Ligeramente áspera	0.1-0.2	-
Áspera	0.2-0.3	$4 < H \leq 6$
Muy áspera	0.3-0.4	-
Marca en forma de hoyo	0.4	$6 < H \leq 8$
Picado	-	$H > 8$

- **Intensidad de las fisuras:**

La intensidad de las fisuras se determina a partir del área de apertura por metro cubico:

*Tabla 4. Intensidad de las fisuras. Tomado de: (Vallejo, 2021).*

Intensidad de las fisuras	Área de fisuras por unidad de volumen (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
Muy baja	$\leq 3$
baja	3 – 10
Moderado	10 – 30
Alto	30 – 100
Muy alto	100 – 300
Excesivo	$\geq 300$

#### 4.1.3 Mecanismos de generación y propagación de las fisuras:

En la literatura se han descrito diversos mecanismos o modelos que contribuyen al desarrollo de fisuras. Sin embargo, debido a la complejidad del problema, actualmente no existe una metodología única que permita predecir con exactitud el lugar y la dirección exacta en que se producirá una grieta. No obstante, existen factores geológicos que determinan los cambios volumétricos en los suelos finos debido a las constantes variaciones ambientales. Por ejemplo, uno de los mecanismos de propagación de fisuras es la desecación del suelo, que consiste en la pérdida de su contenido de

humedad. Esta pérdida puede ser afectada por factores climáticos, como la temperatura, la humedad, la posición del nivel freático, la radiación solar, las corrientes de viento, entre otros. Al mismo tiempo, estos factores generan diferentes reacciones en el suelo, como la contracción, los asentamientos verticales y un aumento de los esfuerzos de tensión en el suelo, lo que disminuye su resistencia y propicia el fenómeno del agrietamiento (C. Lozada et al., 2015) (Vesga et al., 2008).

Un momento crucial en el proceso de propagación de fisuras en suelos finos es el inicio u origen, el cual se ha intentado definir en la literatura mediante algunos mecanismos como:

- *“Los suelos finos generalmente se agrietan cuando se secan. El agrietamiento ocurre bajo diferentes condiciones y no pueden explicarse de la misma manera”* (Fleureau et al., 2015).
- *“Se ha visto que las grietas comienzan en el centro de la capa de suelo y se propagan hacia la superficie o hacia el fondo con velocidad no uniforme”* (Morris et al., 1992).
- *“Las grietas se inician generalmente en la superficie de mayor tracción (a menudo cerca de la superficie) y se propagan hacia el interior del medio donde la tracción disminuye y en último caso pasan a ser una compresión”* (Lachenbruch, 1962).
- *“El inicio del agrietamiento y propagación en suelos finos es un problema complejo que involucra analizar los mecanismos de deformación y el flujo de agua en medios saturados y no saturados, así como también su interacción”* (Levatti et al., 2007).
- *“El hundimiento regional del terreno ha dado lugar a un gran número de fisuras que se forman a partir del asentamiento diferencial del terreno que se produce cerca de un lecho rocoso poco profundo”* (Conway, 2016).

#### **4.1.4 Evolución de las fisuras:**

Una vez que se genera una grieta, comienza un proceso de meteorización y erosión que provoca la degradación del suelo, tanto por factores naturales como antrópicos. Aunque la grieta inicial puede ser de longitud muy pequeña, la relajación de los esfuerzos horizontales a sus lados propicia la generación de una familia de grietas paralelas que delimitan delgados e inestables bloques (ver Figura 6). Estos bloques permanecen sujetos a la erosión y dan lugar al ensanchamiento de la fisura (Barragán & Rodríguez, 2021).



*Figura 6. Erosión de una fisura. Adaptado de(Conway, 2016).*

A medida que aumenta la abertura en la superficie, se propicia la generación de nuevas zonas de fallas activas paralelas a la grieta, las cuales se encuentran sujetas a erosión (ver Figura 7). Durante temporadas de fuertes lluvias, estas zonas se llenan de agua y la consiguiente carga hidráulica provoca un aumento en su ancho y profundidad. Además, los sismos locales aumentan la erosión de las fisuras (Morris et al., 1992).



*Figura 7. Generación de nuevas zonas de fallas. Referencia: [https://issuu.com/helios\\_comunicacion/docs/geo263-interactivo](https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/geo263-interactivo).*

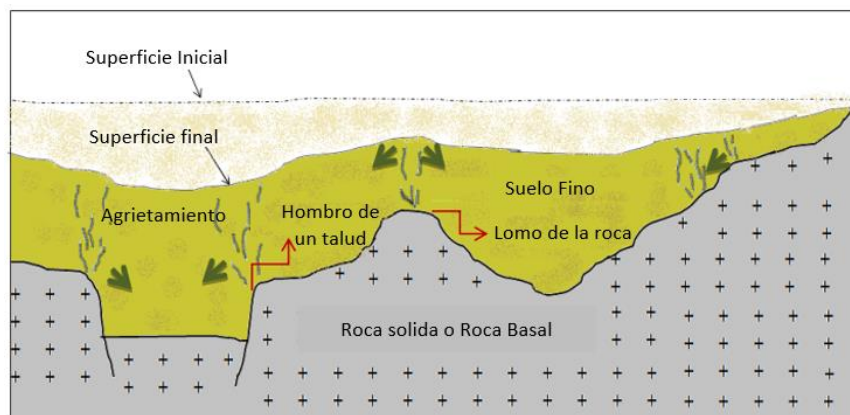
#### **4.2 Mecanismos de formación de fisuras de gran longitud:**

La formación de grietas de gran longitud en suelos finos está relacionada con procesos tectónicos y/o asentamientos diferenciales del suelo. Por lo general, estas fracturas se inician a profundidad y se propagan hacia la superficie. Además, existen otros factores geológicos que determinan la susceptibilidad a la fractura en suelos arcillosos, como señalan (Barragán & Rodríguez, 2021):

- La mineralogía y la textura de los minerales arcillosos presentes en el suelo, ya que algunos son más propensos a la contracción y la expansión debido a los cambios de humedad y temperatura.

- La presencia de estructuras sedimentarias, como capas de grava o arena, que pueden actuar como zonas de fracturación y favorecer la formación de grietas.
- La dispersión mineralógica en el material arcilloso se puede traducir en movimientos de compresión en el terreno y fracturación por efecto de la deformación diferencial.
- Suelo sedimentario, como el ambiente de depósito y estructuras preexistentes en el basamento.
- Hundimiento del terreno debido a los cambios de nivel en aguas subterráneas.
- Los movimientos sísmicos en eventos de alta intensidad.
- La influencia de las cargas superficiales, como el tráfico vehicular o la construcción de edificios, que pueden aumentar las tensiones en el suelo y provocar su fracturación.

Según Holzer (1984), las grietas tienden a propagarse en los puntos de máxima curvatura del terreno, donde pueden producirse hundimientos del suelo. Por lo tanto, en presencia de un lecho rocoso, la topografía de la roca basal se convierte en un factor muy importante para la formación y propagación de grietas.



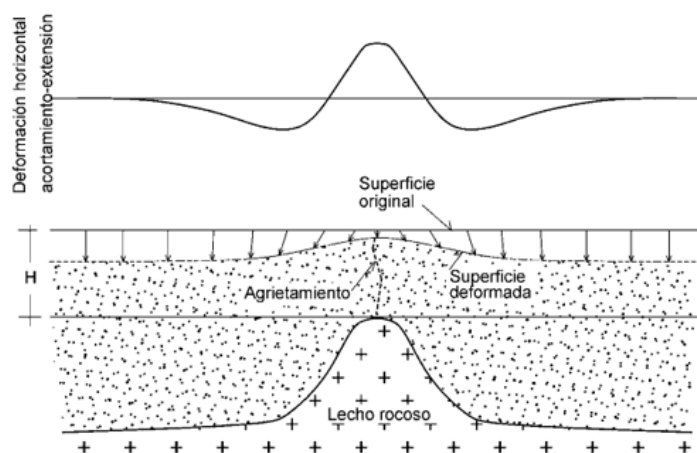
**Figura 8.** Lugares susceptibles a la aparición de grietas. Adaptado de (Holzer, 1984).

En la Figura 8 se pueden observar una serie de lugares donde es más común que aparezcan grietas y que sean susceptibles a propagarse.

- Sobre el eje del lomo de una roca basal.
- En la orilla de un talud o un frente móvil de hundimientos.

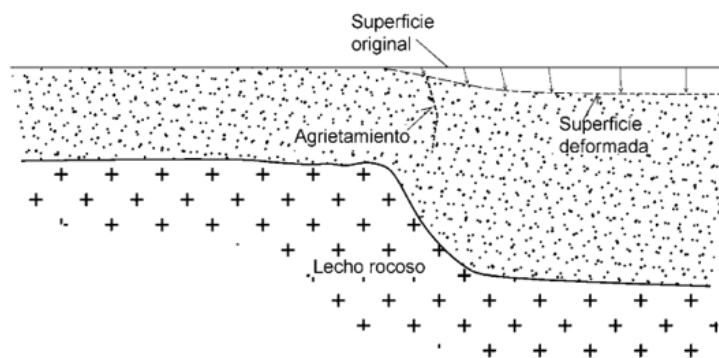
- Sobre el lomo de un talud sepultado.
- Sobre el contacto de dos fases sedimentarias de distinta compresibilidad.

En 1982, Jachens y Holzer llevaron a cabo estudios geofísicos en grietas situadas en el suroeste de Arizona. A partir de los resultados obtenidos, propusieron un modelo que se ilustra en la Figura 9, donde se aprecia un lecho rocoso en forma de horst sobre el que se asienta una capa de suelo que se deforma de forma diferencial, lo que produce una distribución de flexión. Según este modelo, si la superficie del terreno adopta una forma cóncava, la masa de suelo experimenta fuerzas de tensión que pueden generar grietas en la cima del lecho rocoso. Cabe destacar que este mismo mecanismo ya había sido descrito por Lee y Shen en 1969 (Jachens & Holzer, 1982).



**Figura 9.** Mecanismo de generación de grietas según (Jachens & Holzer, 1982).  $H$  es el espesor de suelo sin deformar sobre la protuberancia basal.

Según los autores mencionados anteriormente, otro escenario en el que se pueden generar grietas es cuando existen irregularidades en el lecho rocoso, lo que produce un quiebre abrupto en el talud de suelo que origina un asentamiento diferencial y, como consecuencia, la propagación de una fisura, tal y como se puede observar en la Figura 10.

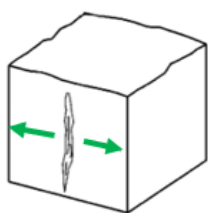


**Figura 10.** Mecanismo de generación de grietas sugerido (Jachens & Holzer, 1982).

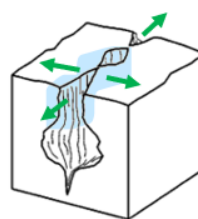


La formación de grietas de gran longitud en diferentes zonas del mundo se produce a través de diferentes mecanismos, como los descritos anteriormente. Además de estos, existen otros factores que también pueden contribuir a la formación de grietas, como (Michelle et al., 2011) (Auvinet et al., 2014):

- I. ***El agrietamiento por fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamiento, Figura 11:*** La formación de grietas por erosión se produce cuando una zona con grietas preexistentes por secado es expuesta a épocas de lluvia intensa, lo que aumenta la carga hidráulica y agranda la apertura y profundidad de las fisuras. Además, los ciclos de expansión y contracción del suelo pueden reactivar las fisuras existentes y generar nuevas.



Esfuerzos de tensión que introducen el agrietamiento en la masa de suelo.



La infiltración del agua superficial reduce la cohesión del suelo erosionado y aumentando el ancho de la fisura.

**Figura 11.** Agrietamiento por fracturamiento hidráulico. Adaptado de (Galloway et al., 1999).

- II. ***El agrietamiento asociado al asentamiento en zonas de transición abrupta, Figura 12:*** La formación de grietas por subsidencia se origina en suelos blandos que experimentan hundimientos debido al excesivo bombeo de los acuíferos, especialmente en zonas donde el contacto con los suelos firmes o el lecho rocoso es abrupto, con pendientes muy pronunciadas.



**Figura 12.** Agrietamiento asociado al asentamiento en zonas de transición abrupta. Adaptado de (Galloway et al., 1999).

- III. ***El agrietamiento atribuible al asentamiento en zonas con anomalías estratigráficas*** **Figura 13:** Los escalones en el lecho rocoso son notorios por generar una incompatibilidad de deformaciones entre un suelo blando altamente compresible y el suelo rígido del lecho rocoso. Esto se debe a que la transición abrupta entre ambos materiales crea grandes diferencias en la capacidad de deformación, lo que puede resultar en la formación de grietas.



**Figura 13.** El agrietamiento atribuible al asentamiento en zonas con anomalías estratigráficas. Adaptado de (Galloway et al., 1999).

- IV. **Las grietas atribuibles a la vegetación, Figura 14:** Típicas de zonas donde el nivel freático se está reduciendo debido a la extracción de agua por grandes y numerosos árboles, lo que provoca la deshidratación del suelo y la reducción de su capacidad de soporte.



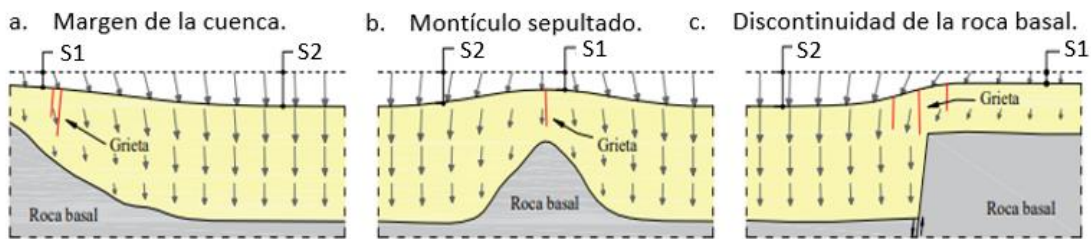
**Figura 14.** Grietas atribuibles a la vegetación. Adaptado de (Galloway et al., 1999).

- V. **Las grietas atribuibles al asentamiento diferencial en áreas donde el lecho rocoso tiene forma de cuña Figura 15.** El agrietamiento se produce como consecuencia de la consolidación diferencial de suelos blandos situados sobre montículos en la roca basal.



**Figura 15.** Grietas atribuibles al asentamiento en áreas con estructuras geológicas sepultadas. Adaptado de (Galloway et al., 1999).

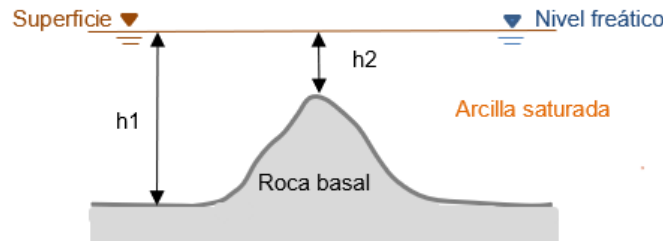
De los cinco mecanismos descritos anteriormente, las grietas tipo II, III y V son generadas por el asentamiento vertical del suelo y son los principales factores que aceleran la propagación de fisuras de gran longitud. Los esfuerzos del subsuelo y el consiguiente agrietamiento están proporcionalmente relacionados con la pendiente de la roca basal, como se muestra en los perfiles esquemáticos de la Figura 16 (Barragán & Rodríguez, 2021):



**Figura 16.** Agrietamiento asociado al asentamiento. Adaptado de (Barragán & Rodríguez, 2021).

Así, el primer tipo de agrietamiento se produce en las zonas de la cuenca con una fuerte pendiente en la profundidad de la roca basal. Cuando los suelos se consolidan, el asentamiento es menor en los márgenes de la cuenca (s1) que en el fondo (s2) (Figura 16 a). Por lo tanto, en la pendiente se producen tanto esfuerzos horizontales de tensión como leves esfuerzos cortantes debido a la deformación diferencial sobre la ladera, y ambos esfuerzos causan el agrietamiento.

Ante la presencia de un montículo en forma de cuña sepultado en el fondo de un estrato de suelo fino (como se muestra en la Figura 16 b), se generan fisuras verticales de gran longitud debido al asentamiento diferencial del suelo. Para ampliar el panorama, en la Figura 17 se ilustra el contexto en el que se estudia el problema, en el cual el nivel freático se encuentra al mismo nivel que la superficie.



**Figura 17.** Montículo sepultado con un nivel freático al mismo nivel de la superficie. Adaptado de (Barragán & Rodríguez, 2021).

De acuerdo con la teoría de la consolidación se tiene que:

$$\Delta z = H_0 \left( \frac{\Delta e}{1 + e_0} \right) \quad [1]$$

Donde:

$\Delta z$  = Asentamiento debido a la consolidación.

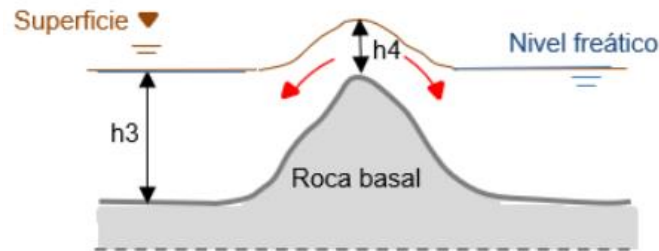
$H_0$  = Espesor de la capa de arcilla que se consolida.

$\Delta e$  = Cambio de los vacíos debido a la carga impuesta.

$e_0$  = Relación de vacíos antes de la consolidación.

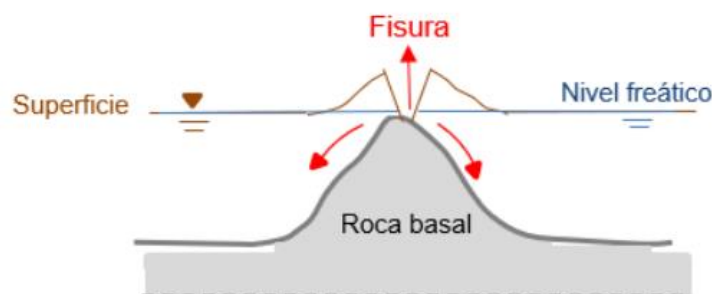
$\Delta H$  depende del espesor de la arcilla que se esta consolidando, entre mayor es el valor de  $H_0$  el asentamiento aumenta. Por consiguiente, cuando se disminuye el volumen de los poros y hay una

consolidación del suelo, las alturas  $h_1$  y  $h_2$  disminuyen, pero el lado donde esta  $h_1$  se consolida más que donde esta  $h_2$ , porque como se muestra en la ecuación (1), el lado donde se encuentra  $h_1$  tiene un espesor mayor. De manera que el nivel de consolidación va a ser mayor en  $h_1$  que en  $h_2$ .



**Figura 18** Esfuerzos de tensión a ambos lados del montículo en la roca basal. Adaptada de (Barragán & Rodríguez, 2021).

Como se observa en la Figura 18 se produce un asentamiento mucho menor sobre la cúspide del montículo (transición de  $h_2$  a  $h_4$ ) que en el fondo de la cuenca (transición de  $h_1$  a  $h_3$ ). Lo que genera una serie de esfuerzos horizontales de tensión hacia ambos lados de la cúspide y ligeros esfuerzos cortantes por la deformación diferencial sobre las laderas del montículo. Por lo tanto, el suelo que se encuentra al pie del montículo arrastra el suelo ubicado en la cima, formando un esfuerzo de tensión que produce la fisura como se puede observar en la Figura 19:



**Figura 19.** Formación de grandes fisuras en suelos finos. Adaptada de (Barragán & Rodríguez, 2021).

Por último, cuando existe una discontinuidad abrupta de la roca basal, asociada al frente de un derrame volcánico o una falla tectónica (Figura 16 c), se producen asentamientos menores sobre el bloque alto  $s_1$  que en el bloque bajo  $s_2$ . Estos asentamientos se traducen en esfuerzos horizontales de tensión y compresión sobre el bloque alto y bajo, respectivamente. También es notoria la generación de esfuerzos cortantes sobre la pared, producidos por la deformación diferencial a ambos lados de la discontinuidad (Barragán & Rodríguez, 2021).

En varios lugares del mundo se han identificado fisuras de gran longitud en suelos finos. Muchos de estos agrietamientos están relacionados con movimientos descendentes del terreno, conocidos como asentamientos. A modo de ejemplo, (Holzer, 1984) hace referencia a más de 14 áreas

afectadas en los Estados Unidos, donde se han observado fisuras de kilómetros de longitud, como se puede visualizar la Figura 20 y Figura 21:



**Figura 20.** Fisura de tierra de aproximadamente un año de antigüedad. Ubicada en el centro-sur de Arizona, debido a la disminución del nivel freático (Conway, 2016).



**Figura 21.** Fisura de tierra en el centro-sur de Arizona. Parte de la fisura en primer plano probablemente sufrirá un colapso por erosión continua debido a los grandes episodios de lluvias (Conway, 2016).

En México los problemas de fisuración se han presentado en varios sitios, dentro de los cuales se destacan los ubicados en la ciudad de Aguascalientes, Querétaro y Ciudad de México, como se puede observar en la Figura 22 (Michelle et al., 2011).



**Figura 22.** Fisura ubicada en Villas de San Martín, una colonia en el municipio de Chalco, al oriente de la ciudad de México. Referencia:  
[www.bbc.com/mundo/lg/america\\_latina/2009/08/090806\\_mexico\\_grietas\\_mf](http://www.bbc.com/mundo/lg/america_latina/2009/08/090806_mexico_grietas_mf)

En el sector noroccidental de la ciudad de Bogotá, empezaron a aparecer grietas superficiales hace aproximadamente 15 años con un aumento acelerado en los últimos cinco años. En esta zona existe una intensa explotación de agua subterránea utilizada para la ganadería y la agricultura,

especialmente para el cultivo industrial de flores. Se ha registado en algunos sitios grietas de hasta 20 m de longitud, 2 m de abertura y más de 6 m de profundidad (Vesga et al., 2003)

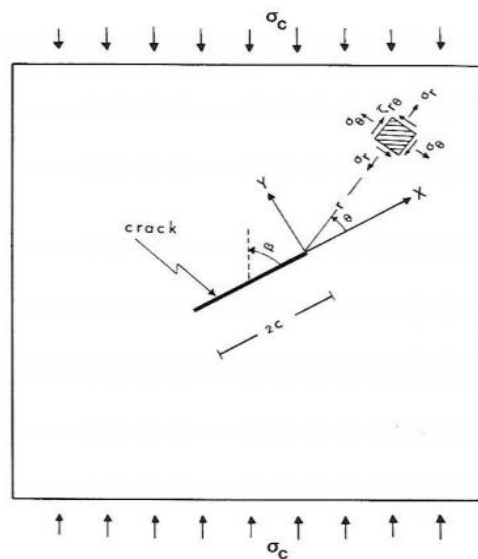


**Figura 23.** Ejemplos de fisuras en el sector noroccidental de la ciudad de Bogotá (Vesga et al., 2003).

### 4.3 Resistencia a la tracción en suelos finos:

La resistencia a la tracción es un parámetro que caracteriza el comportamiento cohesivo de los suelos y es un indicador de la capacidad del material para soportar un esfuerzo externo de tensión sin romperse (Lu et al., 2009). Por lo tanto, el proceso de fisuración de un suelo comienza en el instante en que se vence la resistencia a la tracción.

La presencia de una fisura en un sólido representa la concentración de deformaciones y esfuerzos estáticos y dinámicos. Una solución analítica del estado tensorial de una grieta es conocida y se puede calcular haciendo uso de herramientas propias de la mecánica de fracturas; la Figura 24 representa gráficamente el análisis del campo de esfuerzos y desplazamientos en dos dimensiones de un sólido agrietado (Anderson, 1991).



**Figura 24.** Notación para la definición del campo de esfuerzos y desplazamientos en el frente de una grieta (Anderson, 1991).

Las expresiones [2] [3] y [4], modelan los esfuerzos de un elemento diferencial en el frente de una fisura inclinada, abierta y sometida a esfuerzos de compresión unidireccional en coordenadas polares (Figura 24):

$$\sigma_r = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} * \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \left( 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2K_{II} \tan \frac{\theta}{2} \right] \quad [2]$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} * \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad [3]$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} * \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \quad [4]$$

Los factores de intensidad de esfuerzos “stress intensity factors”  $K_I$  y  $K_{II}$  se calculan con las ecuaciones [5] y [6], donde:

$K_I$  es dependiente del esfuerzo normal a la fisura  $\sigma_n$ , tomando un valor correspondiente a:

$$K_I = \sigma_n \sqrt{\pi c} = \sigma_c \sqrt{\pi c} \sin^2 \beta \quad [5]$$

$$K_I = \sigma_n \sqrt{\pi c} = \sigma_c \sqrt{\pi c} \sin^2 \beta \quad [6]$$

$K_{II}$  que es dependiente del esfuerzo cortante a la fisura  $\tau_n$ , toma un valor de:

$$K_{II} = \tau_n \sqrt{\pi c} = \sigma_c \sqrt{\pi c} \sin \beta \cos \beta \quad [7]$$

Los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se obtienen de:

$$\sigma_1 = \left( \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) + \left[ \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{1/2} \quad [8]$$

y

$$\sigma_3 = \left( \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) - \left[ \left( \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2 \right]^{1/2} \quad [9]$$

La dirección de los esfuerzos principales se obtiene con las expresiones [10] y [11]:

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2 * \tau_{r\theta}}{\sigma_r - \sigma_\theta} \right) \quad [10]$$

y

$$\lambda = \psi + \frac{\pi}{2} \quad [11]$$

Una grieta se puede originar como consecuencia de cualquier condición que genere esfuerzos de tensión significativos en el suelo. Algunos mecanismos, como el fracturamiento hidráulico, pueden

facilitar la generación y propagación de las grietas. Sin embargo, las grietas más importantes y destructivas son causadas por los asentamientos diferenciales asociados al hundimiento regional debido a la extracción de agua en el subsuelo. (Auvinet et al., 2014).

#### 4.4 Efecto del contenido de humedad en la falla de muestras:

El contenido de humedad en muestras de suelo fino puede afectar significativamente su comportamiento mecánico y su tendencia a fallar. Un estudio realizado por Vallejo (1988) analizó la propagación de fisuras en muestras de suelo fino con diferentes contenidos de humedad. Como se observa en la Figura 25, los modelos con mayor contenido de humedad son más resistentes a la tracción que las muestras con menor contenido de humedad. Esto se debe a que, cuando las muestras no están saturadas, el agua se mantiene en las muestras mediante un sistema de meniscos (capilaridad), lo que hace que el material se contraiga. Por lo tanto, el material con mayor cantidad de agua tiene un sistema de meniscos más amplio que los modelos con menor cantidad de humedad, lo que hace que sean más resistentes a la tracción ya que los meniscos atraen a las partículas de arcilla y las hacen más fuertes. (Vallejo, 1988).

Por lo tanto, las muestras de suelo con altos contenidos de agua pueden presentar un comportamiento más dúctil y menos propenso a la falla en comparación con las muestras con bajos contenidos de agua. Además, el contenido de humedad puede incrementar la presión intersticial en el suelo, lo que puede aumentar la resistencia del suelo a la compresión, pero también puede aumentar el riesgo de fallas.

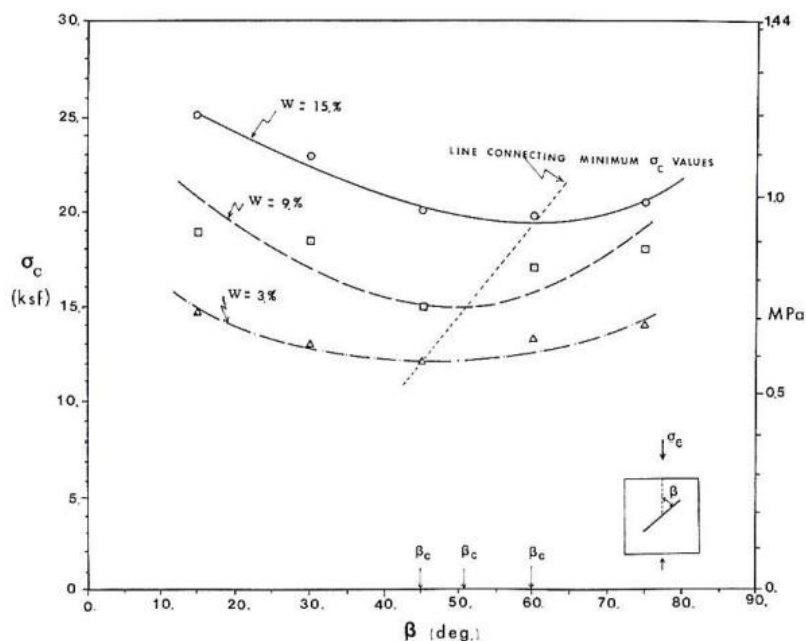
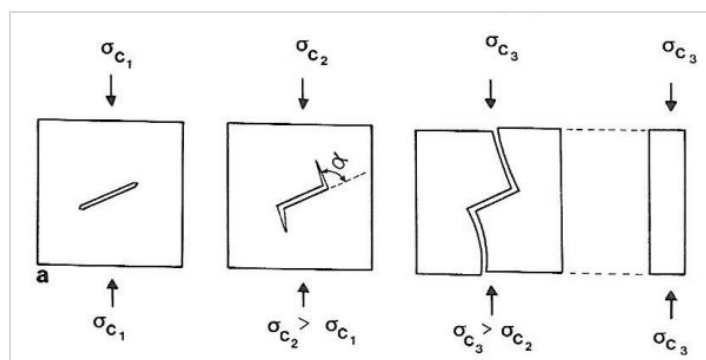


Figura 25. Efecto del contenido de humedad en la propagación de fisuras en muestras de suelo fino. (Vallejo, 1988).

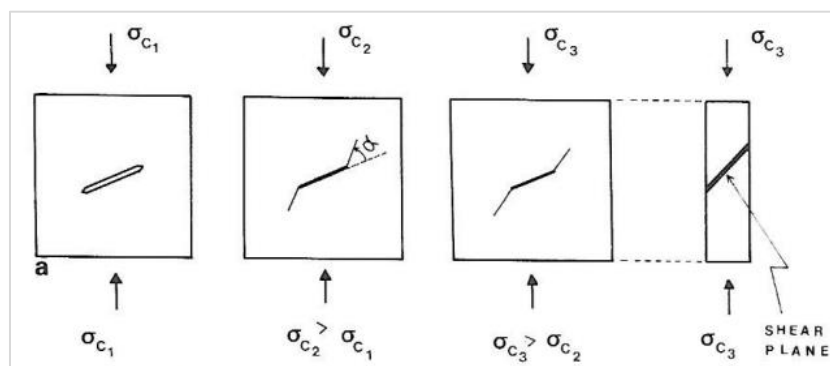


En su estudio, Vallejo (1988) analizó el efecto del contenido de humedad en la propagación de fisuras en muestras de suelo. En la Figura 26 se muestra una muestra con una fisura de unos 60 grados con respecto a la vertical y un contenido de humedad inferior al 20%, concretamente del 15%. Al someter la muestra a compresión, se produjo la propagación de una fisura con un ángulo  $\alpha$  respecto al plano de la fisura original. Esta fisura se propagó en dirección a la compresión vertical y causó la falla de la muestra, tal como se puede apreciar en la Figura 26. Al tener un contenido de humedad inferior al 20%, este modelo presentó las características de un material frágil y elástico, lo que permite aplicar la teoría de la mecánica de fracturas.



**Figura 26.** Propagación de grietas y modo de falla en muestras frágiles. (Vallejo, 1988).

La Figura 27 ilustra una muestra con un contenido de humedad mayor al 20% y una fisura con un ángulo de aproximadamente 60 grados respecto a la vertical, bajo carga de compresión. se observa que inicialmente la fisura intenta cerrarse generando una fisura secundaria, pero esta es muy pequeña y la fisura continúa propagándose en la parte lateral, similar a un corte directo. En este ensayo se generó una falla.



**Figura 27.** Propagación de grietas y modo de falla en una muestra plástica. (Vallejo, 1988).

De estos estudios se destaca que materiales con un comportamiento plástico y un contenido de humedad superior al 20%, pueden ser interpretados utilizando la teoría de Mohr Coulomb para interpretar la falla (Vallejo, 1988).

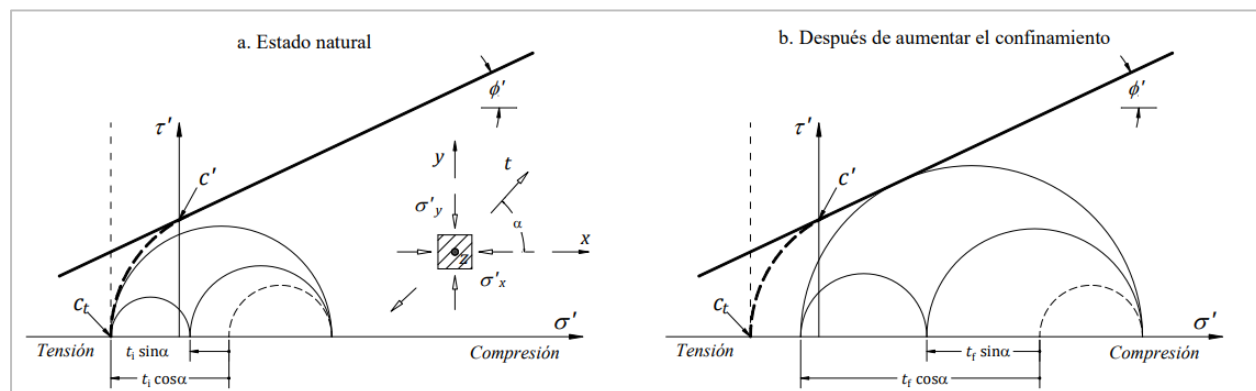
#### 4.4.1 Aplicabilidad de la teoría de falla de Mohr Coulomb:

En el modelo de Mohr-Coulomb, la falla del suelo se representa gráficamente mediante una línea recta llamada "envolvente de falla". Esta recta se traza en un diagrama de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) contra esfuerzo normal ( $\sigma$ ) para un tipo específico de suelo. La recta de falla representa la resistencia al corte del suelo.

Para trazar la recta de falla en el diagrama de Mohr-Coulomb, se deben conocer dos parámetros del suelo: el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y la cohesión ( $C$ ). El ángulo de fricción interna es la medida de la resistencia al corte del suelo debido a la fricción entre las partículas del suelo y se mide en grados. La cohesión es la medida de la resistencia al corte del suelo debido a las fuerzas de atracción entre las partículas del suelo y se mide en unidades de fuerza por unidad de área.

Supóngase un punto superficial de una masa de suelo cuya resistencia está definida por una envolvente de Mohr-Coulomb (Barragán & Rodríguez, 2021):

$$\tau' = C' + \sigma' * \tan \phi' \quad \sigma' \geq C_t \quad [12]$$



**Figura 28.** Tipos de falla en el plano de esfuerzos normales y cortantes. (Barragán & Rodríguez, 2021).

En la que  $C_t$  es la resistencia a la tensión del suelo. Dicho punto se encuentra sujeto a un esfuerzo vertical  $\sigma'_v$  producido por el peso de la columna de suelo que gravita sobre él y un esfuerzo horizontal  $\sigma'_h$  en función del primero. Si se aplica un esfuerzo de tensión  $t$  en alguna de las direcciones principales, la falla se producirá cuando el esfuerzo principal menor  $\sigma'_3$  sea igual a la resistencia de tensión (Figura 28).

Según Barragán & Rodríguez (2021), es notable que la falla en tensión es más factible cerca de la superficie, donde los esfuerzos horizontales son de menor magnitud, mientras que la del tipo cortante se produce a profundidades mayores. En la Figura 28 b se observa que el incremento del confinamiento cambia el tipo de falla de tensión a cortante y además aumenta la que puede ser tensión resistida. Un criterio similar puede seguirse para considerar la componente desviadora inducida por la presencia de esfuerzos cortantes en el subsuelo.

#### 4.5 Modelación física en centrifuga geotécnica:

La modelación en ensayos de centrifuga geotécnica es una técnica utilizada para crear una simulación de distintos procesos geotécnicos a escala reducida. Consiste en la construcción de un modelo a escala reducida del prototipo real, el cual es introducido en una máquina centrífuga capaz de generar aceleraciones mayores que las debidas a la gravedad. De esta manera, se logra desarrollar los procesos en un periodo de tiempo mucho más corto que en escala real. Entre los procesos que pueden ser simulados se incluyen deslizamientos, asentamientos, consolidaciones, deformaciones, fallas, entre otros.

Las leyes básicas de aproximación mecánica entre el modelo y el prototipo, que establece la base de esta técnica de simulación, pueden resumirse en (García & Melentijevic, 2015):

- Si se utiliza una muestra de suelo con características físicas idénticas a las del prototipo, como la densidad, la fricción interna y la cohesión, en la realización de ensayos geoméricamente similares, tanto en el prototipo a escala natural como en el modelo a escala  $1/N$ , se requerirá acelerar centrífugamente  $N$  veces este último para lograr estados tensionales similares, de acuerdo con las leyes básicas de aproximación mecánica entre el modelo y el prototipo utilizadas en la técnica de simulación en centrifuga geotécnica.
- Una vez que exista una relación entre la distribución de presiones intersticiales del modelo y el prototipo, los procesos de flujo primario sucesivos son correctamente modelizados, después de un tiempo  $t_m$  (en el modelo) menor que  $t_p$  (en el prototipo), cumpliendo la siguiente relación:

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{N^2} \quad [13]$$

##### 4.5.1 Leyes de escala:

Una vez construido el modelo es sometido a un campo de aceleración  $N$  veces la gravedad de la tierra ( $g$ ), con una profundidad ( $h_m$ ). El esfuerzo vertical ( $\sigma_v$ ) estará dado por las expresiones [15] y [16], (usando el subíndice  $m$  para indicar al modelo y el subíndice  $p$  para indicar el prototipo) (Azizi, 1999):

$$h_p = N * h_m \quad [14]$$

El esfuerzo vertical  $\sigma_{vm}$  a una profundidad  $h_m$  en el modelo, inducido por una aceleración  $Ng$  es:

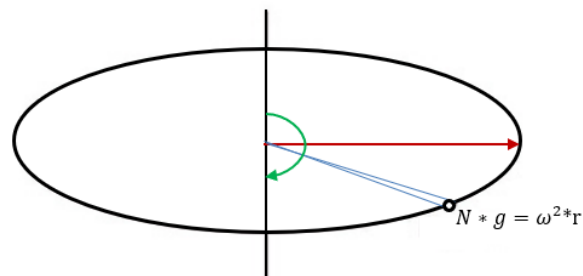
$$\sigma_{vm} = N \rho g h_m \quad [15]$$

y el esfuerzo vertical  $\sigma_{vp}$  a una profundidad  $h_p$  en el prototipo es:

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad [16]$$

Por tanto:

Cuando la muestra de suelo es introducida en el contenedor, que se sitúa al final del brazo de la centrífuga, con la vertical perpendicular al brazo; en el momento que la máquina comienza a rotar el modelo es posicionado de tal manera que su vertical coincide con la dirección de la aceleración en la maquina centrífuga que es el plano horizontal (Figura 29) (García & Melentijevic, 2015).



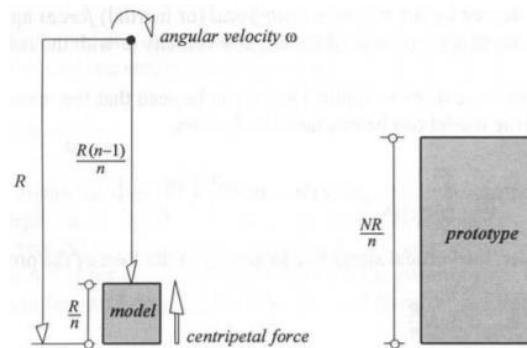
**Figura 29.** Esquema de giro de la centrífuga. Adaptado de (García & Melentijevic, 2015).

Donde:

$\omega$  = La velocidad angular.

$r$  = El radio de curvatura.

La gravedad de la tierra es uniforme, pero cuando se usa una máquina centrífuga para generar un campo de alta aceleración en la modelización centrífuga, se genera una ligera variación en la aceleración a través del modelo. Esto es debido a que el campo de aceleración inercial viene dado por  $\omega^2 \times r$  de cualquier elemento en el modelo de suelo. La distribución del esfuerzo vertical en el modelo y en su prototipo correspondiente viene explicada en la Figura 30.



**Figura 30.** Esquema de la centrífuga con respecto al prototipo. tomado de: (Azizi, 1999).

$$\sigma_{vm} = \sigma_{vp} \Rightarrow \frac{Ng}{\omega^2 R} = 1 - \frac{1}{2n} \quad [17]$$

A partir de las ecuaciones anteriores se genera un error  $\Delta S$ , como se muestra en la ecuación (16):

$$\Delta s = \frac{1}{4n - 3} \quad [18]$$

#### 4.5.2 Análisis de escala:

A continuación, en la Tabla 5 se muestra las leyes de escala más comunes asociadas a la modelización física con centrífuga geotécnica; estas son obtenidas a través de un análisis dimensional de las ecuaciones que rigen determinado fenómeno y de los principios de similitud entre el modelo y el prototipo (García & Melentijevic, 2015).

**Tabla 5.** Relación de las variables en el prototipo y en el modelo. Tomado de: (Azizi, 1999).

VARIABLE	MODELO	PROTOTIPO
Longitud	$L_m$	$L_m * N$
Peso unitario	$\gamma_m$	$\gamma_m * N$
Gradiente hidráulico	$i_m$	$i_m/N$
Velocidad	$v_m$	$v_m/N$
Tiempo	$t_m$	$t_m * N^2$
Flujo	$q_m$	$q_m * N^2$
Numero de Reynolds	$Re_m$	$Re_m/N$

Las especificaciones de la centrífuga geotécnica del laboratorio de suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se muestran en la Tabla 6 y en la Figura 31 se observa una imagen fotográfica de la misma.

**Tabla 6.** Especificaciones de la centrífuga de la ECI (Catalina Lozada et al., 2021).

Rango de aceleración	10 a 200g
Radio a la plataforma	610 mm
Rampa de aceleración recomendada	1 min
Rampa de frenado recomendada	2 min
Velocidad máxima	582.6 RPM @ 200 g
Carga a la aceleración máxima de 200 g	12 kg
Dimensiones útiles (canastas basculares)	
Largo	230 mm
Ancho	150 mm
Alto	150 mm
Desbalance máximo	1%
G-fuerza	2.4 g ton

Conectores rotativos	4@ 100 PSI
Potencia eléctrica del motor	5 HP



*Figura 31. Centrífuga de la ECI. Fuente propia.*

#### **4.6 Uso de GEOPIV\_RG (Particle Image Velocimetry) en geotecnia:**

GeoPIV\_RG es un programa de medición de velocidades desarrollado inicialmente para el campo de la mecánica de fluidos experimental en el año 1991. En el área de la geotecnia es utilizado para analizar campos de desplazamientos en dos direcciones (White et al., 2003).

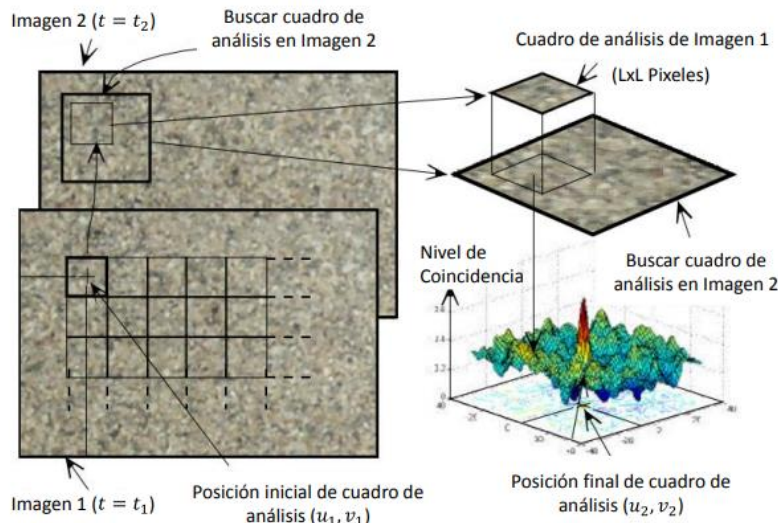
Para realizar un análisis de imagen preciso, es crucial registrar el proceso de interés en diferentes momentos del tiempo. De esta manera, se pueden obtener resultados con un margen de error reducido en el desplazamiento de partículas para los instantes analizados. El resultado final consiste en un campo vectorial de deformación del fenómeno en cuestión. (White et al., 2003).

##### **4.6.1 Funcionamiento de GEOPIV\_RG:**

GeoPIV\_RG es un programa basado en MATLAB, que utiliza los principios del procesamiento de imágenes para recopilar datos de desplazamiento de un conjunto de imágenes digitales capturadas durante el proceso de pruebas geotécnicas. Luego se implementa PIV para asignar el flujo de material. A grandes rasgos esta técnica puede resumirse en las 5 etapas que se presentan a continuación y se resumen en la Figura 32 (Senatore et al., 2013).

- **Etapla 1:** Se aplica un mallado a la imagen de referencia.
- **Etapla 2:** Se identifica un cuadro de análisis en la imagen de referencia con coordenadas  $(u1, v1)$  y dimensiones  $L \times L$ .
- **Etapla 3:** Se evalúa la correlación entre el cuadro extraído de la imagen 1 (*tiempo* =  $t1$ ) y un subconjunto más grande de la imagen 2 (*tiempo* =  $t2$ ). La nueva posición del cuadro de análisis se establece por la ubicación del subconjunto que genere la mejor correlación (determinada por el máximo valor).

- **Etapa 4:** La ubicación de la correlación máxima se establece con precisión a los píxeles de la imagen.
- **Etapa 5:** El procedimiento se repite para todos los cuadros del mallado dentro de la imagen y luego, para todas las imágenes dentro de la serie analizada, generando las trayectorias completas de cada cuadro.



**Figura 32.** Esquema de funcionamiento de la técnica de inspección visual por puntos (VIP). Adaptado de (White et al. 2002).

El programa GeoPIV-RG es un software gratuito que permite obtener los desplazamientos y deformaciones mediante una mezcla de las técnicas de fotogrametría: velocimetría de imágenes de partículas (VIP) y correlación digital de imágenes (CDI) (White et al., 2003).

GeoPIV-RG utiliza una combinación de un análisis de saltos (leapfrog) y uno secuencial (sequential). El primero consiste en analizar cada imagen respecto a la imagen de referencia inicial, lo que permite que no se generen errores aleatorios ya que considera el desplazamiento como el valor total existente entre dos imágenes y no como la suma de varios desplazamientos menores. Sin embargo, esto genera que exista una posible incompatibilidad entre lo analizado, por la baja correlación en las zonas de grandes deformaciones (Senatore et al., 2013). Cuando la correlación alcanza el valor límite definido por el usuario, la imagen de referencia se actualiza y se desarrolla el análisis secuencial, lo que permite que disminuya la distorsión y, por ende, mejore la correlación entre las imágenes. Sin embargo, al mismo tiempo aumenta la acumulación de errores aleatorios debido a que el desplazamiento final es encontrado como la suma de muchos desplazamientos pequeños, cada uno de los cuales tiene asociado un error.

#### **4.6.2 Resultados gráficos del programa GeoPIV-RG:**

GeoPIV-RG es capaz de proporcionar resultados en forma de matrices de desplazamientos horizontales y verticales, así como el campo de deformaciones  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  y  $\epsilon_{xy}$ , después de procesar las imágenes. Los desplazamientos vectoriales de los puntos analizados y los gráficos de contorno de los desplazamientos horizontales, verticales y totales son visualizados de forma clara. Además, el programa también proporciona gráficos de la deformación incremental en cada fotografía analizada para una mejor comprensión del fenómeno estudiado (White et al., 2003).

#### **4.7 Estudios de formación de fisuras realizados en centrifuga Geotécnica:**

La modelación física en centrifuga geotécnica ha permitido simular el proceso de fisuración en prototipos bajo condiciones de frontera bien definidas, con el objetivo de evidenciar ciertos modos de propagación y compararlos con casos reales. Se han publicado varios artículos relacionados con el tema de fisuras, en los cuales se ha aplicado la técnica de modelación en centrifuga geotécnica. Algunos de ellos son:

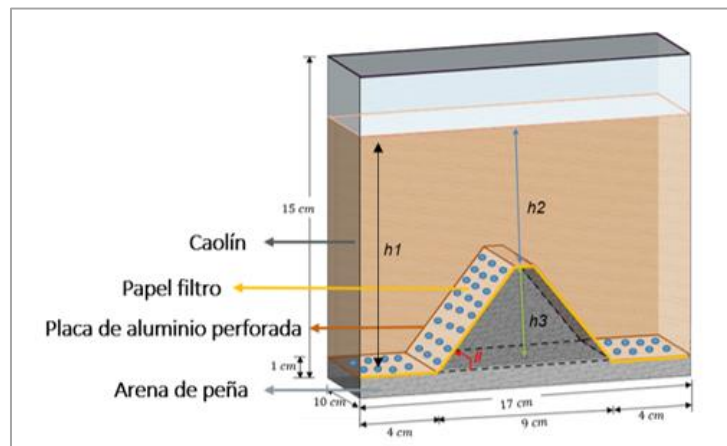
- Efectos de las grietas y la desecación en la capacidad portante de los depósitos de suelo (C. Lozada et al., 2015), este estudio realizado en cimientos circulares de poca profundidad, resalta que existen diferentes mecanismos de falla en función de la profundidad de las fisuras.
- Capacidad portante de zapatas circulares apoyadas sobre suelos desecados no saturados (C. Lozada et al., 2019).
- Una nueva cámara climática adaptada a la mini centrífuga para simular el secado del suelo (P. Castiblanco et al., 2016), este artículo resalta el análisis del contenido de agua en el suelo y variables como la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar que generan desecación en las capas de suelo.
- Dos aplicaciones de la modelación en centrifuga para suelos arcillosos: consolidación natural de mezclas y mecánica de fracturas en taludes verticales (Jaime Morón, 2002).
- Modelación física a escala reducida del fenómeno de desecación de arcillas (Ensamblaje cámara climática pequeña y ensayos a una gravedad) (Paula Castiblanco, 2015).
- Estudio experimental sobre la propagación de grietas y el comportamiento de falla de materiales frágiles bajo cargas dinámicas utilizando modelos en centrifuga geotécnica (Zhang et al., 2019).



## 5. Metodología:

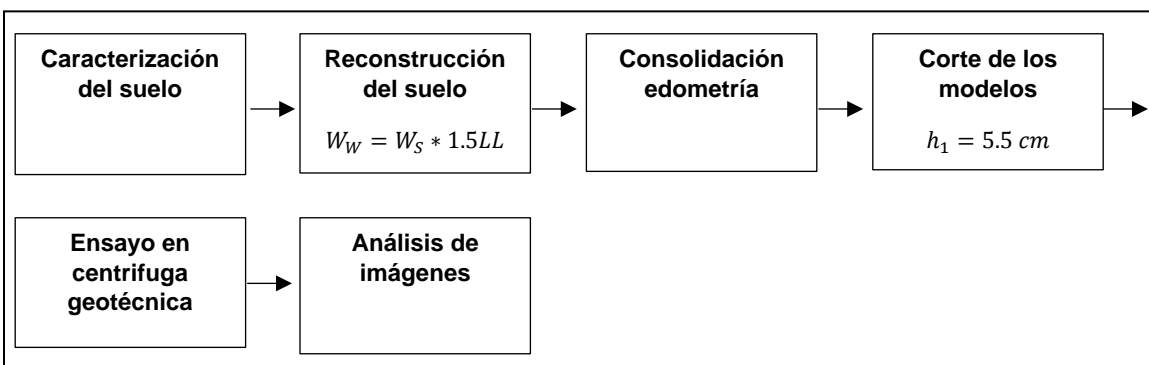
Con el fin de desarrollar completamente los objetivos propuestos para esta investigación de tipo experimental, se diseñó un modelo físico mediante procesos sistemáticos que permitieron controlar las variables que influyen en el agrietamiento de un suelo fino en presencia de un montículo en la roca basal (ver Figura 33).

El modelo se desarrolló a través de un enfoque metódico, que permitió establecer los parámetros y condiciones necesarias para llevar a cabo los experimentos de forma rigurosa y sistemática. De esta manera, se logró controlar de manera precisa los factores que influyen en el agrietamiento del suelo, lo que permitió obtener datos confiables y precisos para el posterior análisis.



*Figura 33. Diseño del modelo. Fuente propia.*

Para identificar el surgimiento y propagación de las grietas, se realizaron diferentes fases en la modelación física y el análisis aplicado:



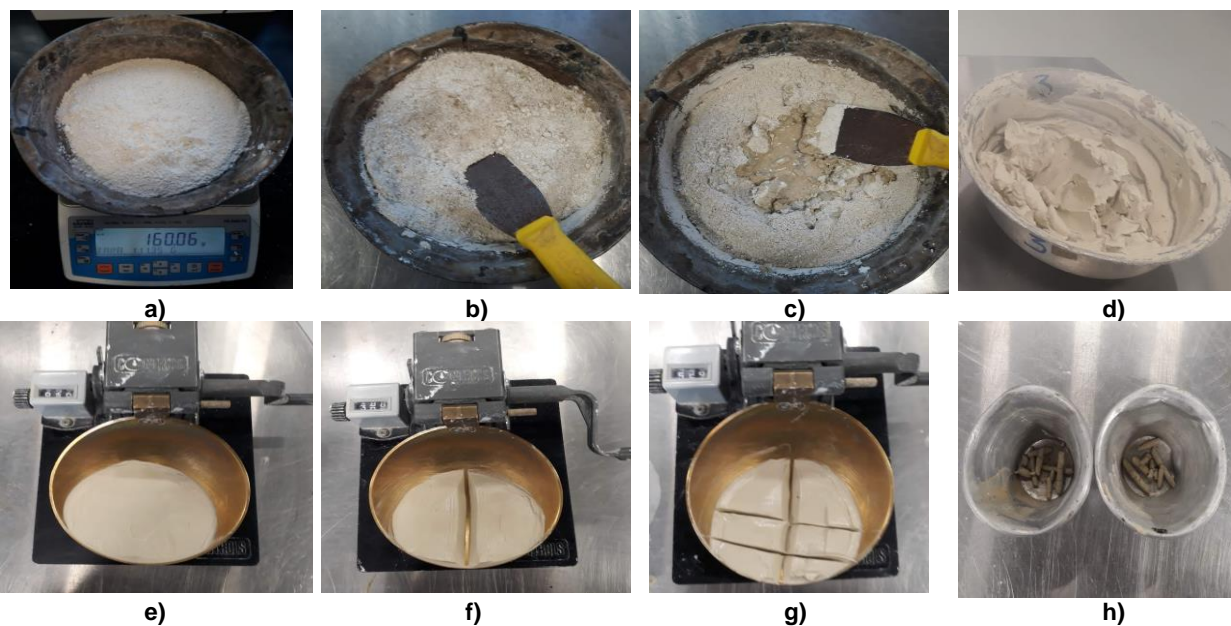
*Figura 34. Metodología que se realizara. Fuente propia.*

Con el fin de ampliar el panorama presentado en las fases previas, se abordarán las siguientes etapas de desarrollo:

### 5.1 Etapa 1: Caracterización del suelo:

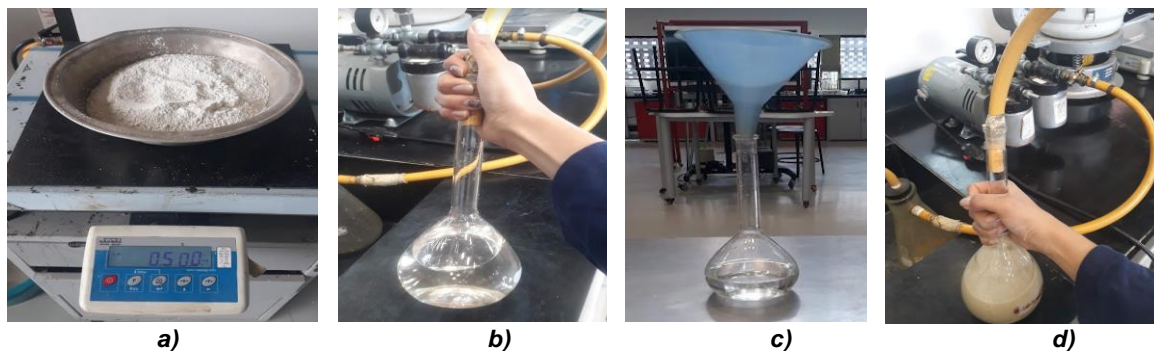
El material utilizado en el modelo para la reconstrucción del suelo fino es caolín en su estado puro. El caolín es un mineral de arcilla de color blanco que se comercializa para uso industrial. Las propiedades índice y mecánicas de esta arcilla se determinaron a través de una serie de ensayos de caracterización llevados a cabo en el laboratorio de geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Estos ensayos incluyen:

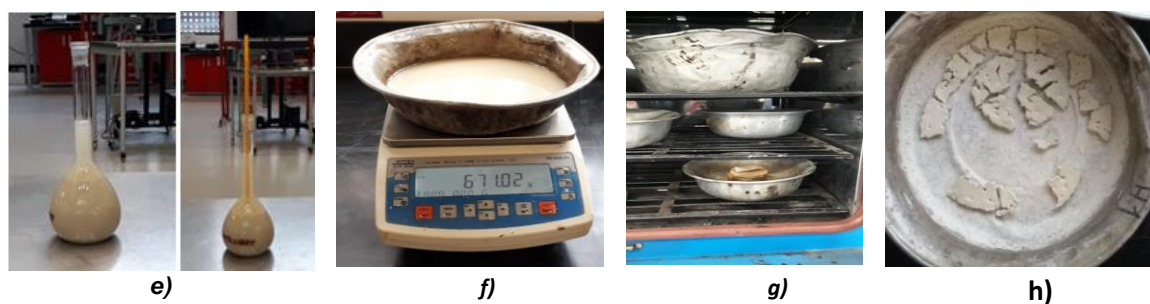
- Límite líquido y límite plástico



*Figura 35. Ensayo del límite líquido y plástico según la norma I.N.V.E.-125-13 y I.N.V.E.-126-13. Fuente propia.*

- Gravedad específica



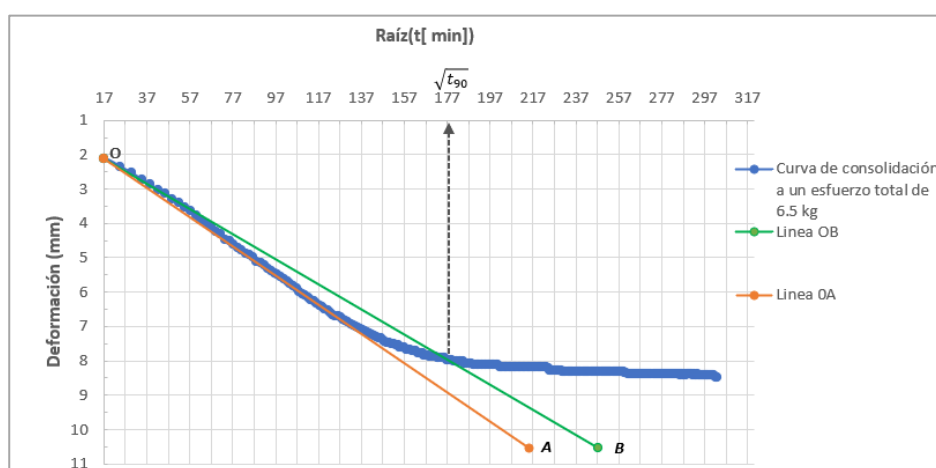


**Figura 36.** Ensayo de Gravedad específica de sólidos según norma I.N.V.E.-128. Fuente propia.

• Consolidación



**a)**



**b)**

**Figura 37.** a) Consolidometro electrónico b) Curva de consolidación. Fuente propia.

• Peso unitario



**a)**



**b)**



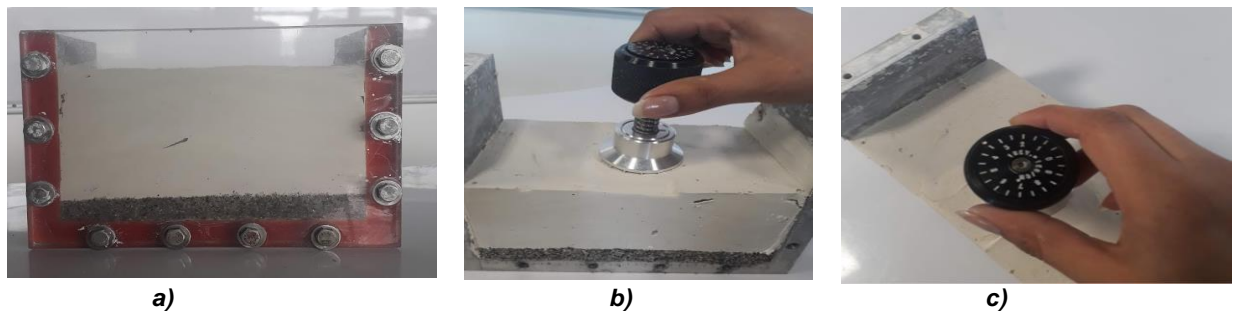
**c)**



**d)**

**Figura 38.** Peso unitario según la norma ASTM D7263. Fuente propia.

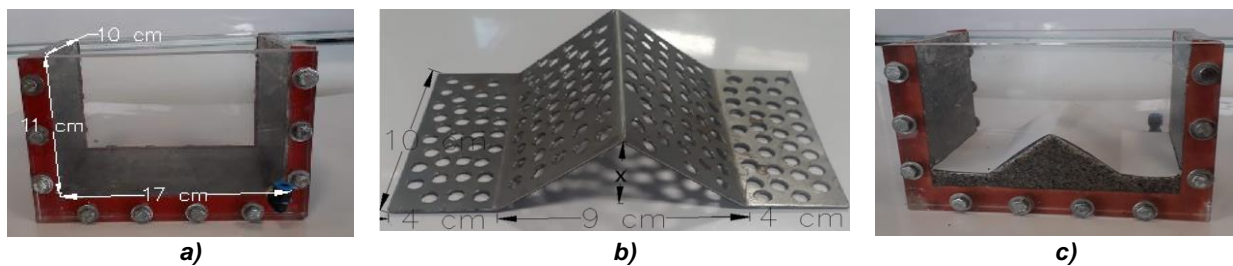
- Resistencia al corte



**Figura 39.** Resistencia al corte del suelo con veleta de campo. Fuente propia.

## 5.2 Etapa 2: Selección de las dimensiones y el material para la simulación física del montículo en la roca basal:

En esta etapa, se establecieron las dimensiones para la simulación de la roca basal. Se determinó que el tamaño de la caja para la modelación física sería de 17 cm de largo, 10 cm de ancho y 11 cm de alto. A partir de esto, se precisó la magnitud de la roca basal (ver Figura 40-b). La roca basal estaba conformada por una capa de arena de peña de un centímetro de alto, seguida de un montículo en forma de cuña regular a lo ancho de la caja, también formado por arena de peña. Este montículo se ubicaba en la mitad del montaje a diferentes alturas: 2.5, 3.5, 4 y 4.5 cm. Luego, se instaló una lámina de aluminio perforada con el objetivo de permitir el drenaje del agua y lograr la consolidación del suelo fino. Finalmente, se agregó papel filtro (ver Figura 40-c).



**Figura 40.** a) Dimensiones de la caja a emplear en la simulación física b) Medidas de la roca basal c) conformación de la roca basal. Fuente propia.

## 5.3 Etapa 3: Instrumentación del suelo:

Durante los ensayos de prueba, se observó que para obtener información precisa sobre el proceso de propagación de fisuras en el suelo, era necesario instalar instrumentos que permitieran medir el asentamiento de la arcilla y el momento exacto de la propagación de las grietas. Para ello, se instaló y calibró un sensor de deformación LVDT. Además, se ajustó una cámara GoPro Hero 7 en una lámina de aluminio ubicada y asegurada en la parte superior de la caja. La cámara fue sometida a pruebas en la centrifuga geotécnica en intervalos de tiempo para verificar que estuviera sujeta a la

caja y que la grabación funcionara correctamente. Estos elementos se pueden apreciar en la Figura 41.



**Figura 41.** a) Instrumentos utilizados para controlar la deformación del suelo b) montaje de la instrumentación.  
Fuente propia.

#### 5.4 Etapa 4: Definición de los equipos utilizados en la modelación física:

Este estudio se desarrolló en la máquina centrífuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como se muestra en la Figura 42. Dicha máquina tiene forma de viga, un radio de 610 mm y un rango de aceleración entre 10xg y 200xg. Además, en su aceleración máxima puede soportar una carga límite de 12 kg en cada cesta. Las dimensiones de las cajas utilizadas para la preparación de los modelos fueron de 17 cm de largo, 10 cm de ancho y 11 cm de alto.



**Figura 42.** Máquina centrífuga empleada en la modelación física. Fuente propia.

Adicionalmente se utilizó los siguientes equipos:

- Consolidómetros electrónicos.
- Veleta de campo.
- Horno- Termostáticamente controlado, la temperatura para el secado de las muestras fue de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ .
- Mezcladora industrial.
- Cajas de acrílico.
- Segueta de hilo
- Balanza con una precisión de  $\pm 1 \text{ g}$ .
- Elementos misceláneos: Taladro, llaves Bristol, destornilladores, pltones, reglas, espátulas, bisturí.

## 5.5 Etapa 5: Preparación física de los modelos:

### 5.5.1 Preparación del suelo fino:

Para la preparación del suelo fino se utilizó una batidora industrial, en la cual se mezclaron los componentes en las proporciones necesarias. Para lograr una textura homogénea, se adicionó agua hasta alcanzar 1.5 veces el límite líquido (LL) del peso del suelo fino. La cantidad de caolín empleada para llenar una caja fue de 1.5 Kg, por lo que la cantidad de agua utilizada se determinó a partir de este peso:

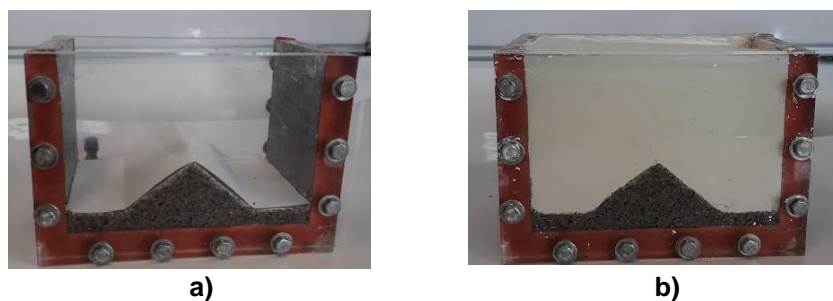
$$W_W = W_S * 1.5LL \quad [19]$$

$$W_W = 1.5 * 1.5 * 0.71$$

$$W_W = 1.6 \text{ Kg}$$

### 5.5.2 Montaje del suelo en las cajas del modelo:

Para generar condiciones de fronteras, se aplicó aceite a las paredes de la caja. Luego, se construyó una roca basal junto con un papel filtro tal como se indica en la etapa 2. A continuación, se adicionó el suelo homogéneo en capas, utilizando una espátula para asegurar la menor cantidad de vacíos posibles, hasta llenar completamente la canasta. Al final, se dejó un espacio aproximado de 0.5 cm para colocar otro papel filtro, permitiendo así un drenaje doble de agua.



*Figura 43. a) Modelación de la roca madre b) Suelo arcilloso. Fuente propia.*

### 5.5.3 Consolidación del suelo:

Las cajas fueron sometidas a un proceso de consolidación en los consolidómetros neumáticos, utilizando escalones de carga asignados manualmente. El esfuerzo efectivo vertical aplicado fue de 30 kPa (ver Tabla 7), utilizando la metodología de D. W. Taylor. Esta metodología consiste en determinar el tiempo necesario para que la muestra alcance el 100% de consolidación primaria, utilizando una gráfica de desplazamiento vertical contra la raíz cuadrada del tiempo. El proceso se llevó a cabo siguiendo las indicaciones de la norma INVIAS INV E-154-13.

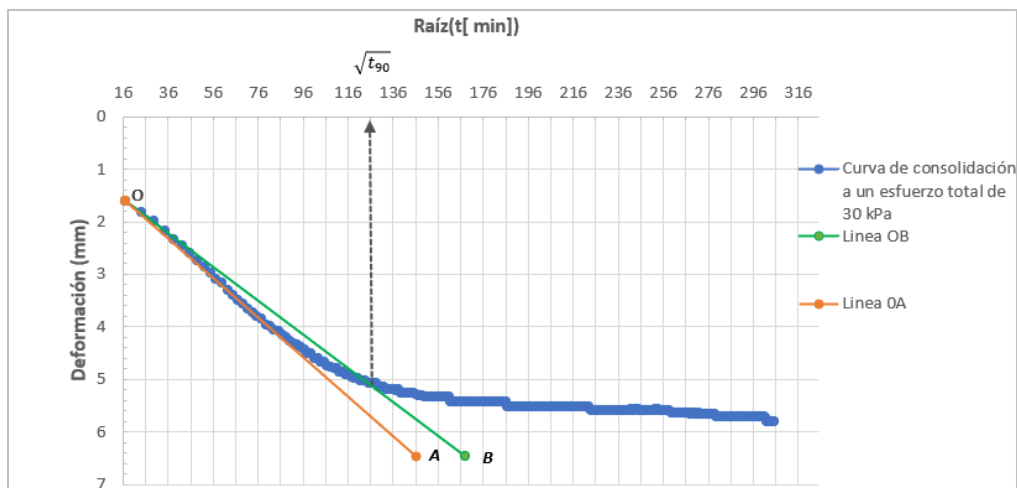
**Tabla 7. Incremento de carga y esfuerzo vertical. Fuente propia.**

Incremento de carga (kg)	6.5	13	26	52
Esfuerzo vertical (kPa)	3.75	7.50	15.00	30.00



**Figura 44. Consolidómetros neumáticos. Fuente propia.**

Se obtuvieron los datos de desplazamiento y tiempo registrados en un archivo de texto utilizando el software de manejo correspondiente. A partir de estos datos, se graficaron las curvas de consolidación para cada incremento de carga. En la Figura 45 se presenta como ejemplo la curva de consolidación obtenida para un esfuerzo total de 30 kPa. Es importante destacar que el 100% de consolidación se alcanzó al finalizar todos los incrementos de carga, con un tiempo promedio de una semana por muestra.

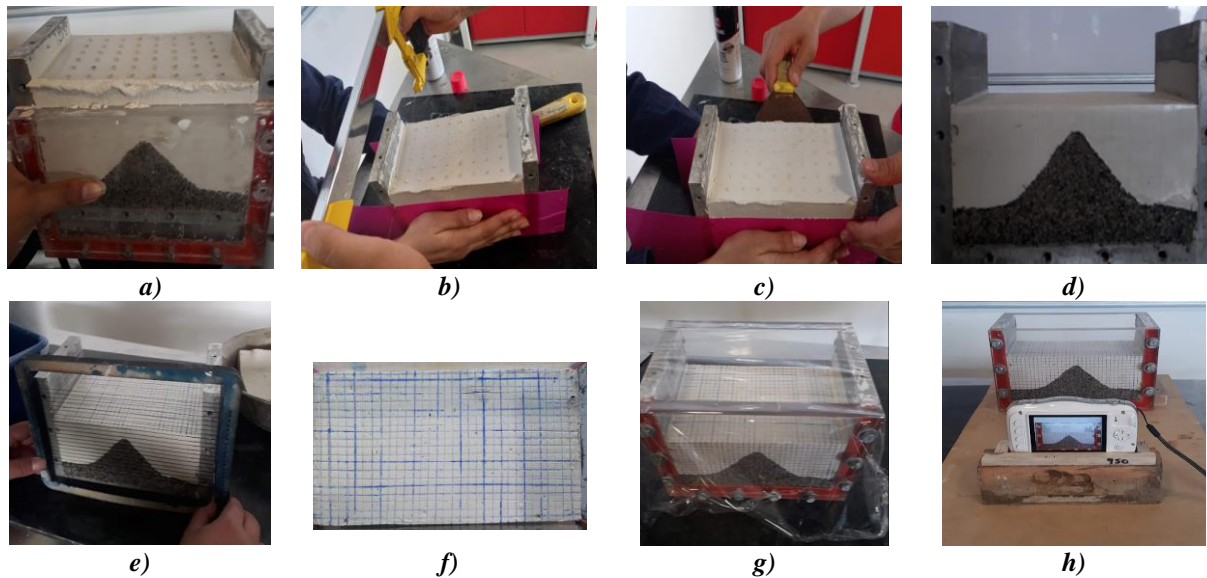


**Figura 45. Curva de consolidación. Fuente propia.**

#### 5.5.4 Construcción de los modelos:

Después de la consolidación final de las muestras, se retiraron las tapas laterales de cada modelo y se utilizó una guía para cortar el suelo a una altura constante  $h_1$  de 5.5 cm, tal como se muestra en la Figura 46-b. Luego, se retiró el material sobrante y se tomaron muestras de humedad. Con el fin de controlar la deformación del suelo, se trazó una cuadrícula en una de las caras laterales y en la parte superior del modelo. En el costado restante se añadió grafito. Inmediatamente se colocaron

las tapas laterales de las cajas y se selló la caja con papel vinipel, a fin de que las muestras se mantuvieran en un ambiente sellado lejos de toda fuente de humedad. Finalmente, se realizó un registro fotográfico del modelo.



**Figura 46.** *a) Se retiran las tapas de la caja b) Se ponen guías laterales y con una cequeta de hilo se corta el suelo c) Con ayuda de la espátula se retira el suelo restante d) se retiran las guías e) se marca una cuadrícula en el suelo para el control de imágenes f) se marca una cuadrícula en la cara superior g) se instalan las caras laterales y se sella la caja con papel vinipel h) se realiza un registro fotográfico. Fuente propia.*

### 5.5.5 Montaje de la instrumentación en el suelo:

En cada ensayo, se instaló un sensor de deformación (LVDT) en uno de los lados del montículo, y se ubicó una cámara GoPro Hero 7 en la mitad de la caja, tal como se muestra en la Figura 47, como se había contemplado en la etapa 3.

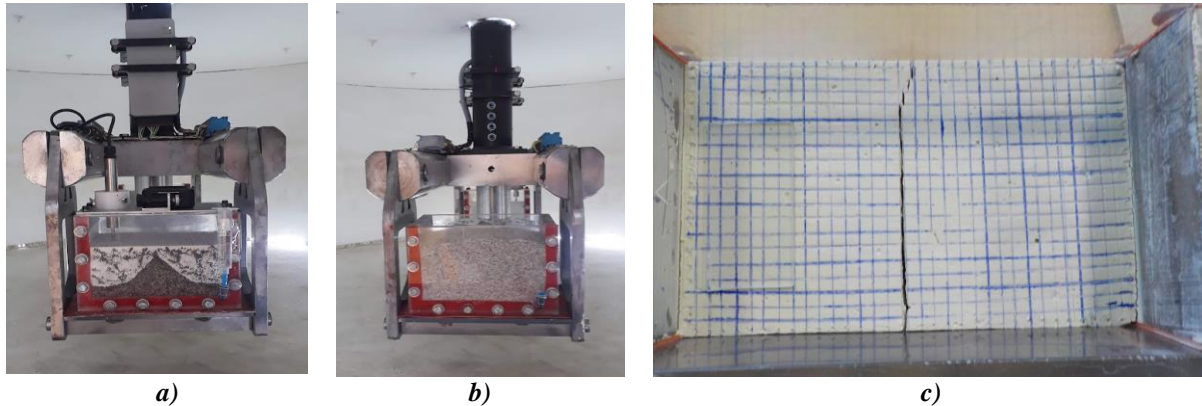


**Figura 47.** *Instalación de la instrumentación en el suelo. Fuente propia.*



### 5.5.6 Vuelo en centrifuga geotécnica:

Se llevaron a cabo ensayos con modelos reducidos para simular un prototipo real en condiciones de frontera bien definidas. Para esto, se realizaron pruebas en la máquina centrífuga geotécnica, en la que se colocó la muestra en uno de los brazos, como se puede ver en la Figura 48-a, mientras que en el brazo opuesto se montó el contrapeso.

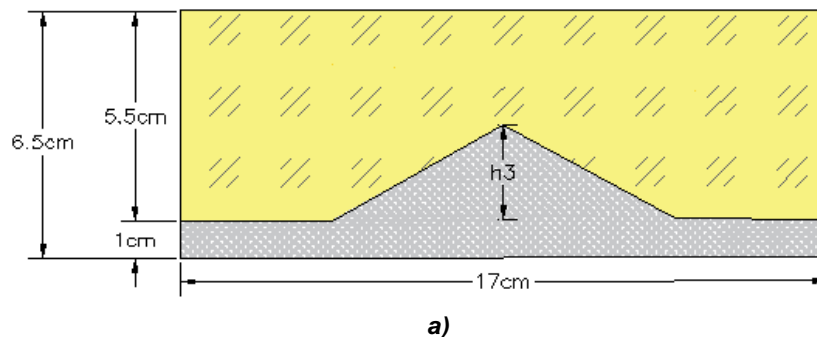


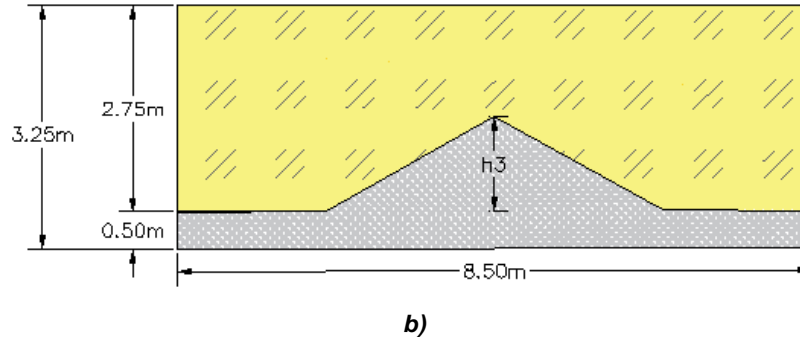
**Figura 48.** Montaje en la máquina centrífuga geotécnica **a)** caja del modelo físico **b)** Contrapeso **C)** Falla del suelo.  
Fuente propia.

Las relaciones de escalamiento usadas para la interpretación de los resultados de la modelación de grandes fisuras atribuibles al asentamiento de suelos finos ante la presencia de un montículo en la roca basal son:

- **Numero de gravedades N**

Para precisar este factor de escala se realizaron ensayos en la centrifuga geotécnica con la instrumentación definida en la etapa 3. De las pruebas realizadas se definió que para esta investigación el número de gravedades seria de  $N= 50$  g, por tanto, las dimensiones del modelo y el prototipo se pueden ver en Figura 49.





**Figura 49.** a) Dimensiones del modelo b) Dimensiones del prototipo. Fuente propia.

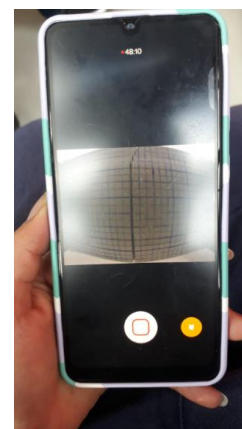
Se realizaron cuatro modelos, en los cuales la altura  $h_3$  variaba de 2.5 a 4.5 cm (ver Tabla 8) y la altura  $h_1$  fue constante para todos los modelos.

**Tabla 8.** Dimensión variable de los modelos. Fuente propia.

<b>Modelo</b>	<b>Altura del montículo <math>h_3</math> (modelo) (cm)</b>	<b>Altura del montículo <math>h_3</math> (prototipo) (m)</b>
M1	2,5	1,25
M2	3.5	1,75
M3	4	2
M4	4.5	2.25

- **Tiempo de vuelo**

Para determinar el tiempo de vuelo en la máquina centrífuga, se llevaron a cabo varios ensayos de prueba, y se determinó que el tiempo aproximado para que la grieta comenzara a propagarse era de 20 a 30 minutos. Es importante destacar que, al principio, se realizaron ensayos en intervalos de tiempo de 10 minutos. Durante cada intervalo, se llevaba la muestra a la centrífuga, se descargaba, se observaba el comportamiento del suelo en ese tiempo y se volvía a llevar al vuelo por otros 10 minutos hasta completar el proceso de formación de la fisura. Sin embargo, debido al comportamiento elastoplástico del suelo, se decidió monitorear el tiempo de vuelo utilizando la aplicación GoPro Quik (ver Figura 50). De esta manera, se obtuvo el tiempo exacto de propagación de las fisuras sin tener que descargar las muestras.

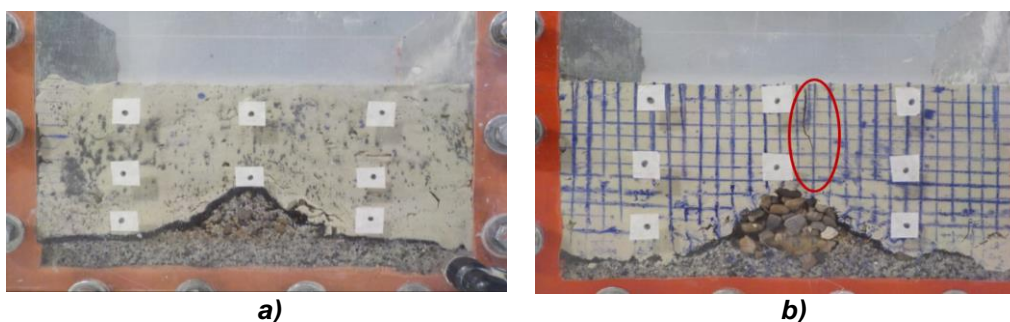


**Figura 50.** Control de la propagación de la fisura en tiempo real. Fuente propia.

## 5.6 Etapa 6: Ensayos de prueba:

Con el fin de analizar el comportamiento del suelo en estudio, se llevaron a cabo varios ensayos preliminares. Durante estos ensayos, se registraron lecciones aprendidas y se identificaron aspectos a mejorar, tales como:

- Entre las lecciones aprendidas durante los ensayos preliminares, se identificó que la técnica de construcción del montículo (ver Figura 51) no era óptima inicialmente. Esto generaba que el suelo fino colapsara con la roca basal, lo que afectaba el comportamiento del suelo en estudio.



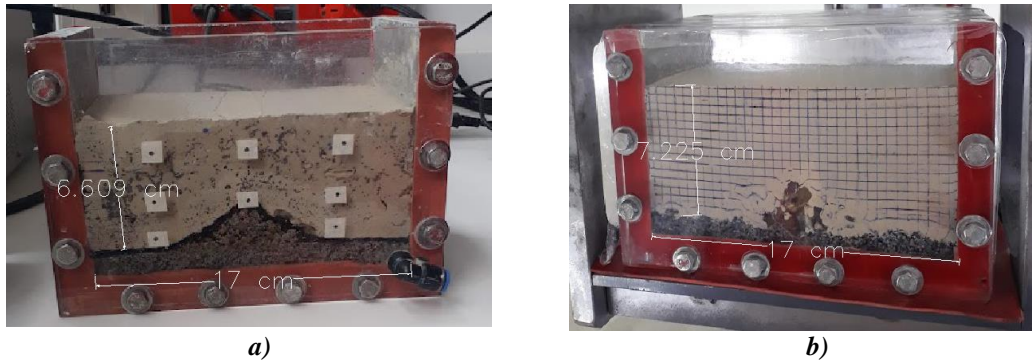
**Figura 51.** Ensayos prueba en la Construcción del montículo. Fuente propia.

- En cuanto a la mezcla de suelo, inicialmente se llevaron a cabo ensayos con una mezcla de suelo arcilloso compuesta por un 60% de caolín y un 40% de bentonita. Sin embargo, se observó que el tiempo de consolidación de las muestras era de aproximadamente un mes. Por lo tanto, se decidió cambiar la mezcla de suelo a una de 100% caolín, lo que redujo el tiempo de consolidación a una semana. Esta decisión se tomó debido a que el estudio en cuestión no contaba con muchas investigaciones previas, y el tiempo ahorrado permitiría realizar más ensayos y analizar el comportamiento del suelo con mayor profundidad.
- Se vio la necesidad de sellar el modelo (cara libre de la canasta) debido a la influencia del viento durante el vuelo en la centrífuga geotécnica sobre la superficie de suelo libre. El viento generó la desecación del suelo superficial que trajo como consecuencia la aparición de una grieta perpendicular a la grieta generada por el asentamiento diferencial de la roca basal (ver Figura 52). Este fenómeno se eliminó mediante el uso de papel vinipel cubriendo la cara superior de los contenedores.



*Figura 52. Fisuras adicionales al proceso de asentamiento diferencial. Fuente propia.*

- Después de realizar varios ensayos con diferentes alturas (ver Figura 53), se definió una altura estándar de  $h_1=5.5$  cm para la construcción de todos los modelos. Esto se debió a que con esta altura se pudo observar claramente la propagación de la fisura en los ensayos. Con la experiencia adquirida, se determinó que esta altura proporciona los resultados óptimos para la evaluación de la fisuración.



*Figura 53. Alturas variables ( $h_1$ ) en la construcción de los modelos a)  $h_1=6.61$  cm b)  $h_1=7.23$  cm. Fuente propia.*

### 5.7 Etapa 7: Análisis de imágenes:

En la actualidad, todas las variables que suelen ser monitoreadas in situ a escala normal también son observadas en modelos. Estos modelos comprenden parámetros como el desplazamiento del suelo, que en esta investigación fue medido a través del procesamiento de imágenes y la fotointerpretación de vectores. El objetivo era visualizar el cambio antes y después de la propagación de la fisura mediante el programa GeoPIV. De esta forma, se logró evaluar de manera precisa el comportamiento de la fisuración en los modelos, lo cual permitió obtener información valiosa para su posterior análisis y estudio.

En esta etapa, se organizó una serie de fotografías antes y después del vuelo en la centrifuga geotécnica de cada muestra. Estas fotografías se procesaron posteriormente en el programa GeoPIV, el cual permitió analizar los desplazamientos del suelo fino en cada muestra. Gracias a este análisis, se pudo obtener información detallada sobre la propagación de la fisura en cada caso, lo que resultó fundamental para el desarrollo de la investigación y la interpretación de los resultados obtenidos.

## 6. Resultados y análisis de resultados experimentales:

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos del desarrollo experimental realizado para estudiar la propagación de fisuras en un suelo arcilloso en presencia de un montículo en la roca basal. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando una máquina centrífuga.

En el capítulo anterior, se detalló la construcción del modelo físico empleado en la simulación física, así como las condiciones en las que se realizó. Este modelo se diseñó para simular condiciones reales de propagación de fisuras en un suelo arcilloso. Además, estos resultados son relevantes para comprender mejor el fenómeno de la propagación de fisuras y su posible relación con la geología de la zona estudiada.

### 6.1 Resultados de laboratorio:

#### 6.1.1 Caracterización del suelo arcilloso:

En este estudio, se determinaron las propiedades índice y mecánicas del material arcilloso en estudio (caolín comercial) a través de una serie de ensayos de laboratorio. Estos ensayos se llevaron a cabo siguiendo las normativas colombianas aplicables.

- **Límites de Atterberg:**

En cumplimiento de la norma INV - E 125 y 126-13, se llevaron a cabo tres ensayos con el objetivo de obtener un valor promedio y reducir los errores que puedan surgir en la toma de datos muestrales. Los ensayos se realizaron utilizando el método de la Cazuela de Casagrande para determinar el límite líquido del material en estudio.

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de los tres ensayos realizados, los cuales se promediaron para obtener el valor final del límite líquido del material. La Tabla muestra también los rangos de los valores obtenidos en cada uno de los ensayos individuales, lo que permite evaluar la consistencia de los resultados obtenidos y la calidad de los ensayos.

*Tabla 9. Resultados obtenidos del Limite líquido. Fuente propia.*

	<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>		
	1	2	3
No Muestras	1	2	3
No Recipiente	C1	2	14
Masa Recipiente (g)	17.74	17.00	16.66
No. Golpes	29.00	24.00	20.00
Masa Recipiente + muestra húmeda (g)	25.98	26.15	26.58
Masa Recipiente + muestra seca (g)	22.39	22.06	22.03

	<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>		
Masa de suelo seco (g)	4.65	5.06	5.37
Masa de agua (g)	3.59	4.09	4.55
HUMEDAD (%)	77.20%	80.83%	84.73%
Limite liquido	70%		

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del límite plástico del material en estudio, los cuales se determinaron utilizando el método de los rollitos.

*Tabla 10. Resultados obtenidos del Limite plástico. Fuente Propia.*

	<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>		
	1	2	3
No Recipiente	B1	65	5
Masa Recipiente (g)	17.10	16.98	18.01
Masa Recipiente + muestra húmeda (g)	24.44	26.64	28.25
Masa Recipiente + muestra seca (g)	22.05	23.49	24.91
Masa de suelo seco (g)	4.95	6.51	6.90
Masa de agua (g)	2.39	3.15	3.34
HUMEDAD (%)	48.28%	48.39%	48.41%
Limite plástico	48.36%		

Se han determinado los límites líquido y plástico, siendo estos del 70% y 48.36%, respectivamente. Además, se ha obtenido un índice de plasticidad (IP) igual a:

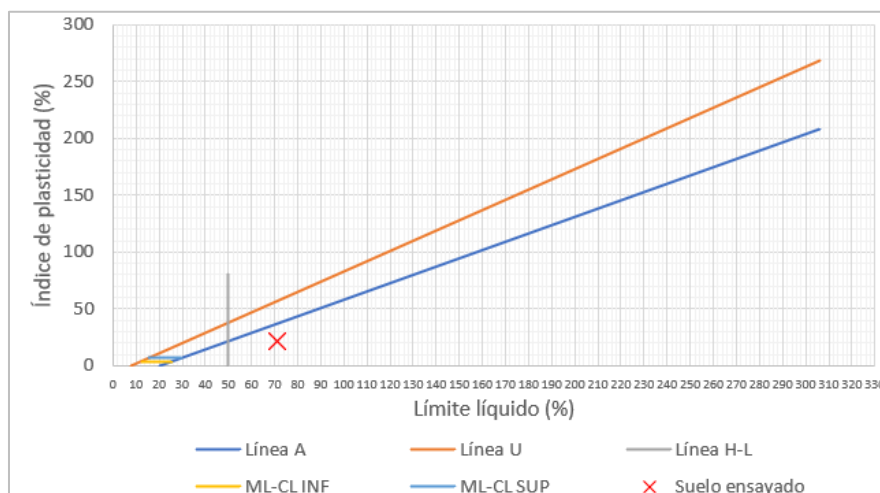
$$IP = LL - LP \quad [20]$$

$$IP = 70\% - 48.36\%$$

$$IP = 21.64\%$$

De acuerdo con los resultados obtenidos y la clasificación de Casagrande, se determinó que se trata de un limo inorgánico con alta plasticidad, específicamente del tipo MH (ver Figura 54).

Los resultados obtenidos revelan que la muestra analizada es un limo inorgánico, un tipo de suelo compuesto principalmente por partículas de tamaño muy fino, la mayoría de ellas inferiores a 0,002 mm. Además, se encontró que este limo posee una alta plasticidad, lo que significa que tiene la capacidad de deformarse y moldearse fácilmente cuando se manipula con agua, y puede ser moldeado en diversas formas sin fracturarse. Adicionalmente, la muestra fue clasificada como tipo MH según la clasificación de Casagrande, lo que indica que el material es altamente compresible y puede experimentar grandes cambios de volumen en respuesta a variaciones en el contenido de agua.



**Figura 54.** Carta de plasticidad. Fuente propia.

- **Gravedad específica:**

En la Tabla 11 y Tabla 12 se presenta el resultado del ensayo de gravedad específica INV-E 127-13. Estas tablas permiten visualizar de manera clara y detallada los valores obtenidos para la muestra analizada, lo que permite una comparación y evaluación precisa de los resultados.

**Tabla 11.** Calibración del picnómetro. Fuente propia.

<b>CALIBRACIÓN DEL PICNÓMETRO</b>	
Masa picnómetro (g)	173.80
Masa picnómetro + agua a temperatura de calibración (g)	672.21
T° calibración del picnómetro + agua (°C)	23.40
$\rho$ Agua a la temperatura de calibración (g/cm <sup>3</sup> )	0.99745
V calibrado del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	499.37

**Tabla 12.** Gravedad específica del suelo. Fuente propia.

<b>GRAVEDAD ESPECIFICA</b>	
No. Picnómetro	15.00
Masa (picnómetro + agua) (g)	668.21
Masa (picnómetro + agua + suelo) (g)	700.00
T ensayo (°C)	18.20
Masa platón (g)	107.00
Masa platón + suelo seco (g)	156.02
Masa de muestra seca	49.02
Gs temperatura de ensayo	2.80
K	1.00059
Gs 18°C	2.80

La densidad del suelo  $G_s$  en relación con el agua por medio de un picnómetro es de 2.80.

- **Peso unitario:**

Para determinar el peso unitario del modelo físico, que había sido consolidado previamente a un esfuerzo neto de 30 kPa, se tomó una muestra y se realizó un ensayo siguiendo el método descrito en la norma ASTM D7263 (ver Tabla 13).

*Tabla 13. Peso unitario en parafina. Fuente propia.*

<b>PESO UNITARIO EN PARAFINA</b>	
Suelo consolidado (muestra sin montículo)	
Masa del suelo al aire (g)	259.90
Masa del suelo + parafina al aire (g)	285.10
Masa del suelo + parafina sumergida (g)	82.70
$\rho$ parafina (g/cm <sup>3</sup> )	0.89
T° agua (°C)	15.20
$\rho$ agua (g/cm <sup>3</sup> )	0.998
Masa de parafina al aire (g)	25.20
Volumen del agua desplazada (empuje) cm <sup>3</sup>	202.76
Volumen de la parafina (empuje) cm <sup>3</sup>	28.31
Volumen agua desplazada - Volumen parafina	174.45
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.49
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1489.84
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.62

El peso unitario de la muestra intacta es de 14.62 kN/m<sup>3</sup>.

- **Resistencia al corte del suelo:**

El ensayo de resistencia al corte con veleta es un método clásico para determinar las características del suelo in situ. En este caso, se utilizó una veleta de corte de bolsillo Humboldt H-4212MH para medir la fuerza de torsión necesaria para romper una superficie cilíndrica cizallada por la veleta en el suelo inalterado. Como resultado, se obtuvo una resistencia al corte de 0.7 kg/cm<sup>2</sup>, como se puede ver en la Figura 55.



a)

Vane	Stress Range	Usage
Standard	0 to 1 kg/cm <sup>2</sup>	Fully saturated cohesive soils with undrained strength independent of normal pressure
Large	0.2 kg/cm <sup>2</sup>	Remolded samples
Small	2.5 kg/cm <sup>2</sup>	Stiffer clays

b)

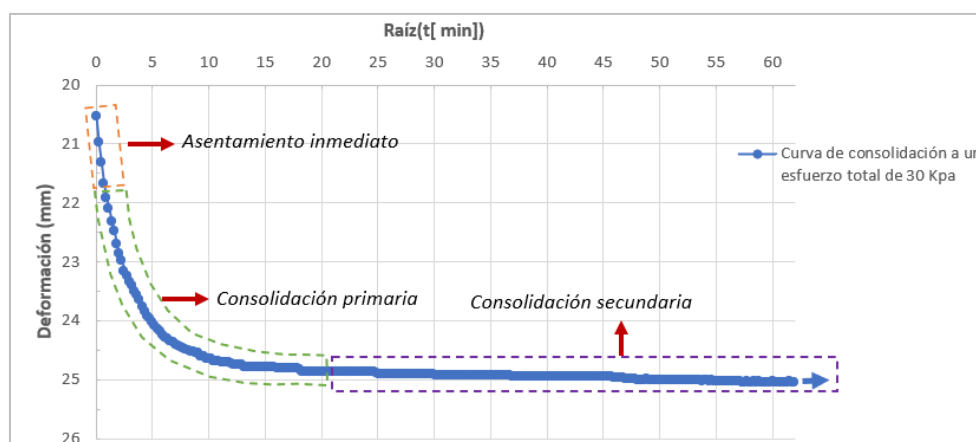
**Figura 55. Resistencia al corte del suelo a) Ensayo en el laboratorio b) Tarjeta de instrucciones. Fuente propia.**



- **Consolidación:**

Con el fin de obtener datos más precisos en el proceso de consolidación unidimensional en dirección vertical, se llevó a cabo una muestra sin montículo en la roca basal. Este proceso de consolidación se siguió utilizando la metodología establecida en la norma INV E 151-13, mediante incrementos de carga de 3.75 kPa, 7.50 kPa, 15 kPa y finalmente 30 kPa. Para cada aumento de carga, se trazó una curva de deformación vertical contra la raíz cuadrada del tiempo (en minutos), mediante la metodología D.W. Taylor. Esta metodología consiste en determinar el tiempo  $t_{90}$ , que representa el tiempo necesario para alcanzar el 90% de consolidación primaria.

En la Figura 56 se presenta la gráfica de consolidación correspondiente a la muestra sin montículo, para un esfuerzo neto de 30 kPa. En esta figura, se observan las distintas etapas de asentamiento por consolidación, que incluyen el asentamiento inmediato, la consolidación primaria y la consolidación secundaria, que corresponden a las deformaciones en el tiempo para una carga vertical constante.



**Figura 56.** Asentamiento por consolidación a un esfuerzo total de 30 kPa. Fuente propia.

- **Tiempo de consolidación para el modelo:**

La teoría de consolidación de Terzaghi permite calcular el tiempo necesario para alcanzar un determinado grado de consolidación, mediante la siguiente ecuación:

$$T_v = \frac{C_v * t}{H_d^2} \quad [21]$$

Donde  $T_v$  es un factor adimensional de tiempo que describe el grado de consolidación,  $C_v$  es el coeficiente de consolidación del material,  $t$  es el tiempo y  $H_d$  es una distancia relacionada con la longitud de la trayectoria de drenaje. Despejando el tiempo de la ecuación se tiene:

$$t = \frac{T_v * H_d^2}{C_v} \quad [22]$$

Para las condiciones dadas por los modelos en la centrifuga se tiene que:

$T_v = 0.85$ , factor de tiempo para lograr un grado de consolidación de 90% (Terzaghi).

$H_d$  = La distancia de drenaje se define como la mayor distancia vertical que debe recorrer el agua para salir del suelo. En los ensayos realizados, se permitió el drenaje vertical del agua por ambas caras, superior e inferior, lo que se conoce como " drenaje doble".

$C_v = 0.0005 \text{ cm}^2/\text{s}$ , coeficiente de consolidación del caolín a utilizar hallado mediante un previo ensayo de consolidación en el laboratorio.

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior, se obtiene el tiempo de consolidación:

$$t = \frac{0.85 * (2.75 \text{ cm})^2}{0.0005 \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$t = 12856.3 \text{ s} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}}$$

$$t = 3.57 \text{ h}$$

Este es un valor constante de consolidación en la centrifuga para cualquier modelo en caolín con una altura inicial de suelo igual a 5.5 cm y el mismo  $C_v$ . **Nótese que este tiempo de consolidación es independiente de la escala N.**

- **Curva de compresibilidad:**

La Tabla 14 proporciona información importante acerca de las características mecánicas del suelo investigado, en muestras sin montículo. La relación de vacíos inicial presentada en dicha tabla, permite establecer una correlación entre la relación de vacíos y el esfuerzo efectivo aplicado a las muestras, lo que facilita la identificación de las propiedades de compresibilidad del suelo.

El coeficiente de consolidación se calculó con la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{T_v * H_d^2}{t_{90}} \quad [23]$$

Utilizando la ecuación número [1], es posible determinar la relación de vacíos inicial en cada escalón de carga a partir del asentamiento  $\Delta z$ , el espesor de la capa de arcilla que se consolida  $H_o$  y la relación de vacíos final [24], tal como se muestra en la ecuación [25].

$$e_f = W * G_s \quad [24]$$

Donde:

$W$  = Humedad final del suelo después del proceso de consolidación.

$G_s$  = Gravedad específica.

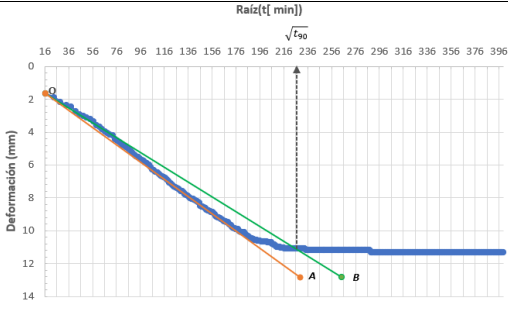
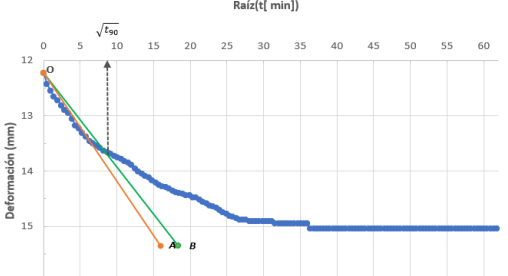
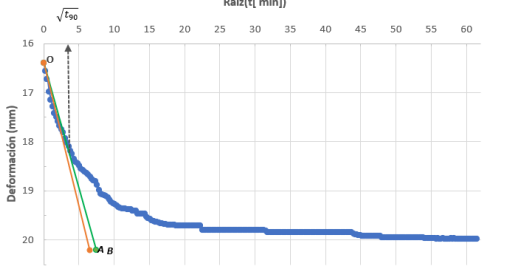
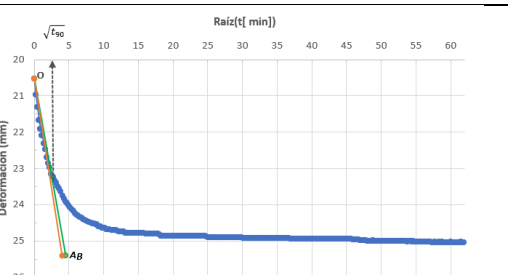
$$e_f = 0.794 * 2.8$$

$$e_f = 2.22$$

Relación de vacíos inicial:

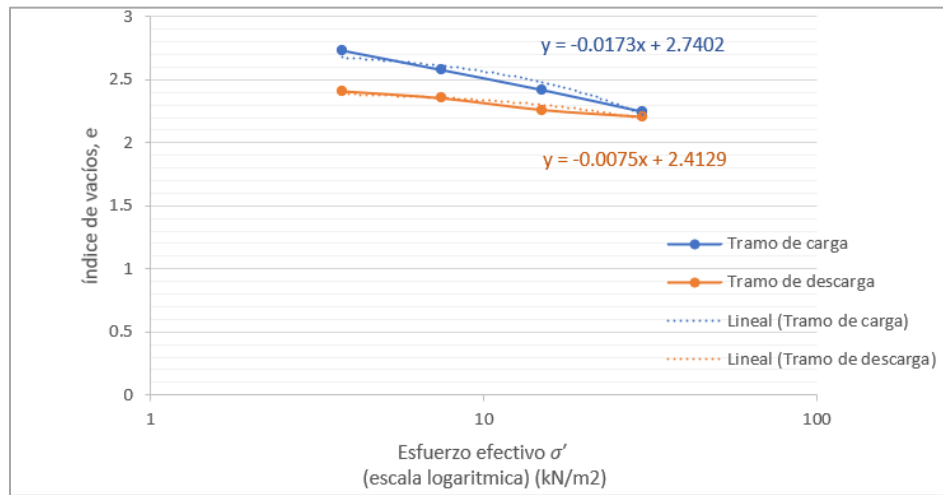
$$e_o = \frac{-(\Delta z - H_o * e_f)}{\Delta z + H_o} \quad [25]$$

**Tabla 14.** Relación de vacíos inicial. Fuente propia.

<b>Curva de consolidación</b>	<b>Esfuerzo efectivo</b>	<b>Coficiente de consolidación</b>	<b>Deformación vertical</b>	<b>Relación de vacíos inicial</b>
	$\sigma' (kPa)$	$C_v (m/s)$	$\varepsilon_z$	$e_o$
	3.75	$6.24 \times 10^{-10}$	0.137	2.735
	7.50	$3.94 \times 10^{-7}$	0.100	2.580
	15.00	$1.99 \times 10^{-6}$	0.058	2.422
	30.00	$5.10 \times 10^{-6}$	0.009	2.250

La curva de compresibilidad se generó utilizando consolidómetros neumáticos a partir de una muestra sin montículo. Se realizaron cargas y descargas escalonadas de forma manual sobre la muestra. El esfuerzo neto efectivo vertical aplicado fue de 30 kPa.

La Figura 57, ilustra la variación del volumen específico del suelo con la carga aplicada, lo que permite comprender el comportamiento del suelo ante las cargas verticales y la deformación resultante.



**Figura 57.** Curva de compresibilidad del suelo fino. Fuente propia.

En la Figura 57 en el tramo de carga, la pendiente de esta sección es una constante del suelo conocida como índice de compresión ( $C_c$ ), cuyo valor es de 0.0173.

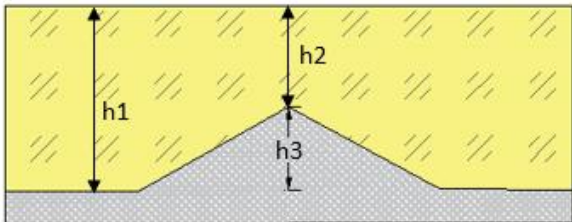
El índice de recompresión es un parámetro fundamental para entender el comportamiento de un suelo después de haber sido sometido a una sobrecarga y luego descargado. En esta investigación, se realizó un análisis detallado del comportamiento del suelo estudiado mediante la realización de ensayos de consolidación unidimensional. A partir de estos ensayos, se determinó el valor del índice de recompresión,  $C_r = 0.0075$ .

## 6.2 Análisis del registro fotográfico:

Con el propósito de recordar las dimensiones proyectadas y presentar de manera clara los cuatro modelos junto con su dimensión variable correspondiente, se presenta en la Tabla 15 un resumen completo de los mismos.

**Tabla 15.** Dimensión variable de los modelos. Fuente propia.

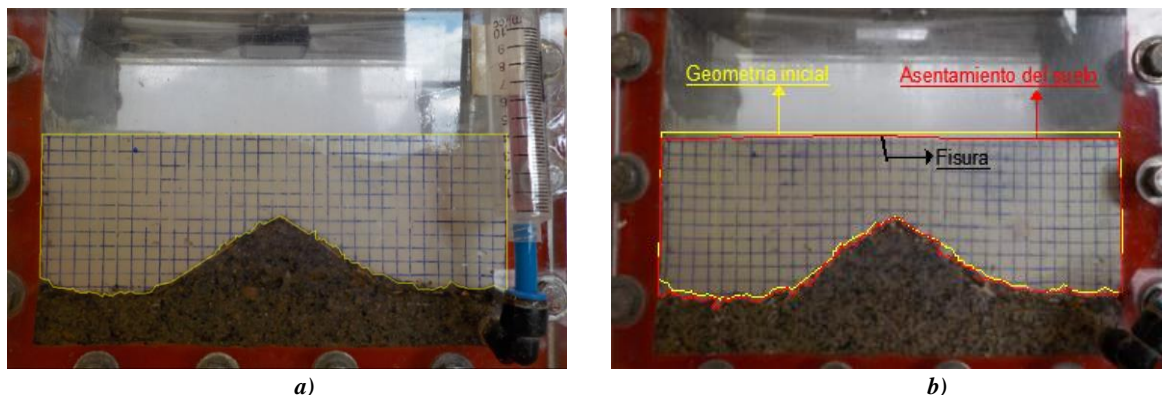
Modelo	Altura del montículo h3 (modelo) (cm)	Altura del montículo h3 (prototipo) (m)
M1	2,5	1,25
M2	3,5	1,75
M3	4	2
M4	4,5	2,25



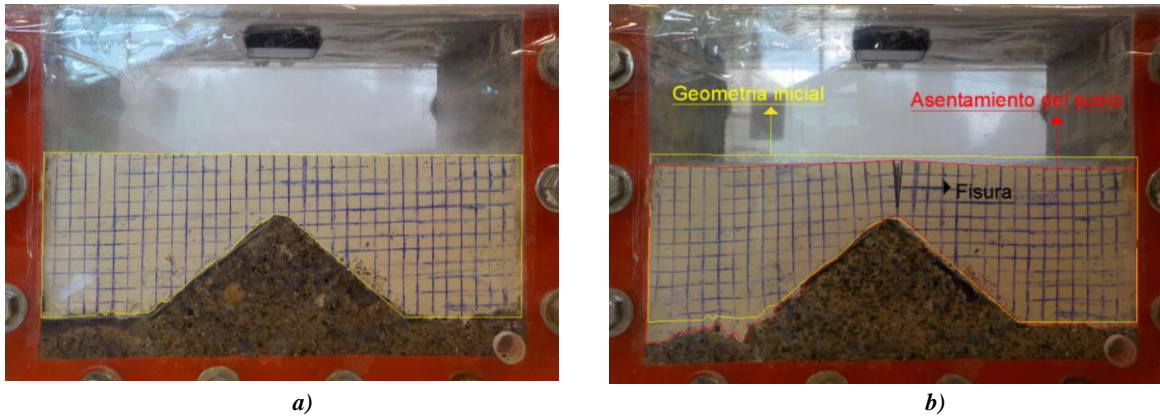
El diagrama muestra un modelo de un montículo de suelo sobre una base plana. El montículo tiene una forma trapezoidal con una cuspide central. Se indican tres alturas: h1 es la altura total del montículo desde la base hasta la cuspide; h2 es la altura desde la base hasta la cuspide en un punto lateral; h3 es la altura desde la base hasta la cuspide en el punto central. El interior del montículo está sombreado con líneas diagonales.

**Figura 58.** Dimensiones del modelo. Fuente propia.

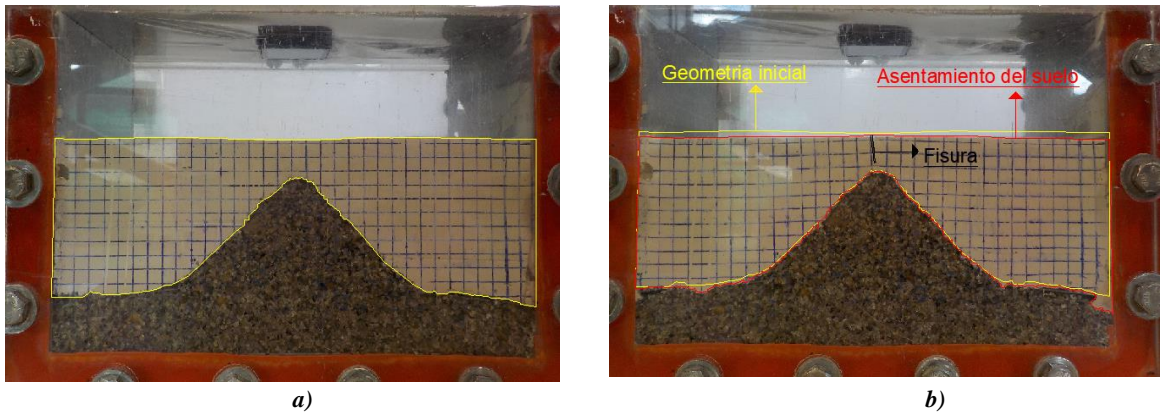
Para llevar a cabo la extracción de información, se empleó el software AutoCAD con el objetivo de marcar, en las fotografías tomadas antes y después del vuelo en la centrifuga geotécnica, la posición inicial del suelo con una línea amarilla y la posición final con una línea roja. Asimismo, se delimitó la profundidad de la fisura, tal como se puede observar en las Figura 59 a la Figura 62. Dichas figuras evidencian un asentamiento diferencial en el estrato de arcilla, en el que se aprecia un mayor asentamiento a los lados del montículo y un menor asentamiento en la cúspide del mismo. Este comportamiento se debe a que el suelo ubicado al pie del montículo arrastra el suelo de la cima, lo que genera un esfuerzo de tensión que ocasiona la fisura, tal como señala el estudio de (Barragán & Rodríguez, 2021).



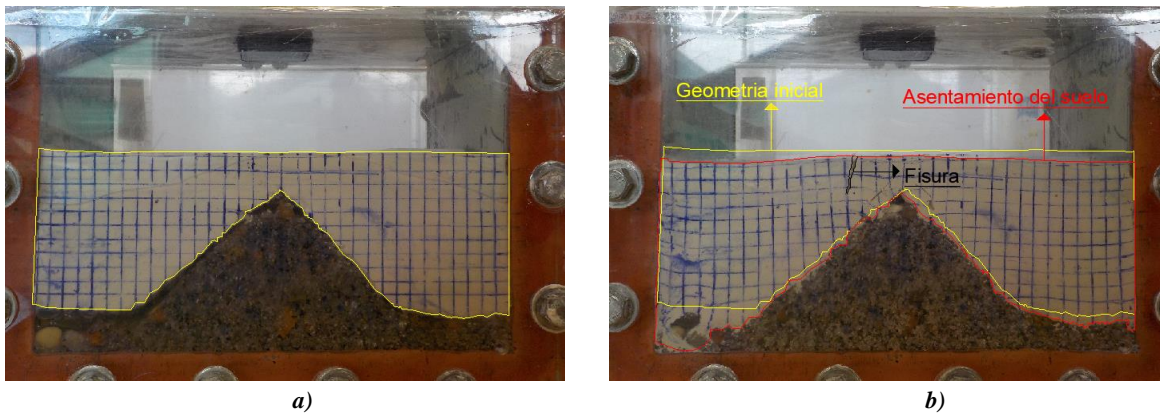
**Figura 59.** Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 1. Fuente propia.



**Figura 60.** Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 2.  
Fuente propia.



**Figura 61.** Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 3.  
Fuente propia.



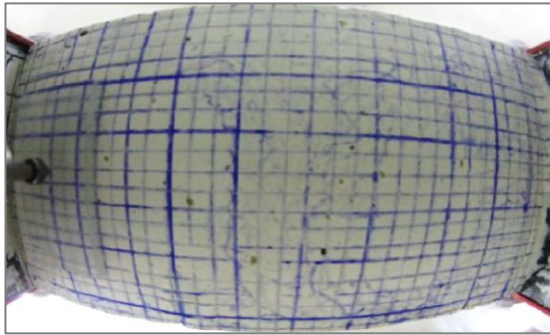
**Figura 62.** Comparación de los modelos a) antes y b) después del ensayo en la centrifuga geotécnica, Modelo 4.  
Fuente propia.

### 6.2.1 Propagación de fisuras en superficie:

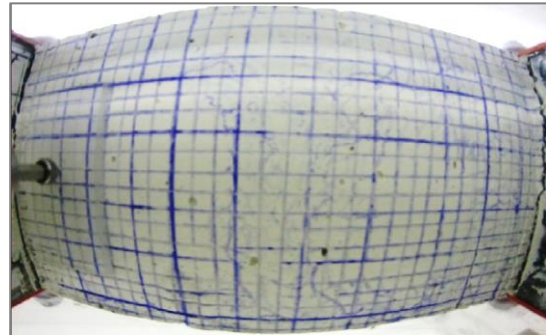
A continuación, se muestra un registro fotográfico del proceso de formación de fisuras durante el vuelo en la centrifugadora geotécnica, el cual incluye información correspondiente al tiempo en el modelo y en el prototipo.

⊗ **Modelo 1, Altura del montículo  $h_3 = 1.25 \text{ m}$ .**

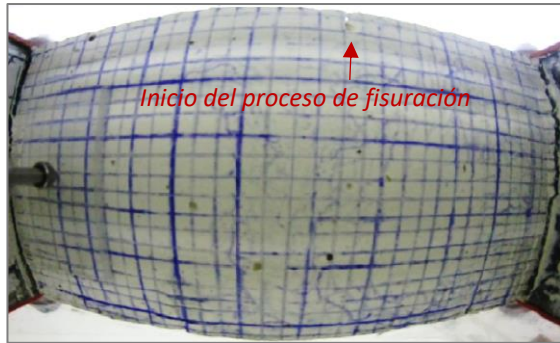
En el modelo 1, se puede observar que la fisura inicial se produjo a los 41 días, específicamente en uno de los extremos de la caja. Posteriormente, a los 66 días, se observaron fisuras en ambos extremos de la caja. Con el tiempo, la fisura se propagó en forma de tres fragmentos, los cuales se extendieron en una línea dominante ubicada en el centro de las muestras, sobre la cúspide del montículo. Esta propagación abarcó todo el ancho de la caja en un período total de 112 días.



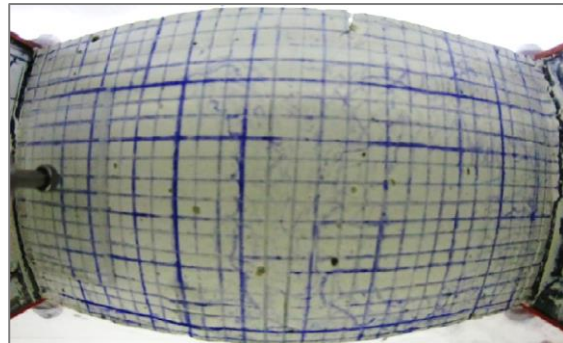
$t_{Modelo} = 0 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 0 \text{ días}$   
Foto # 1



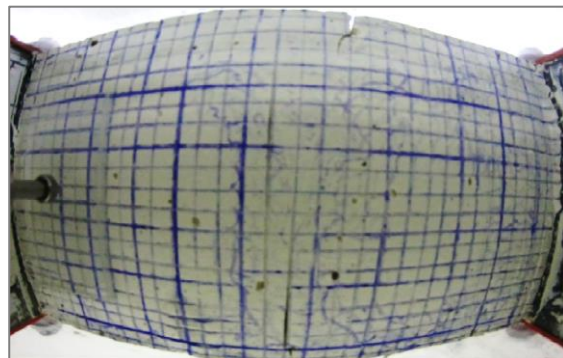
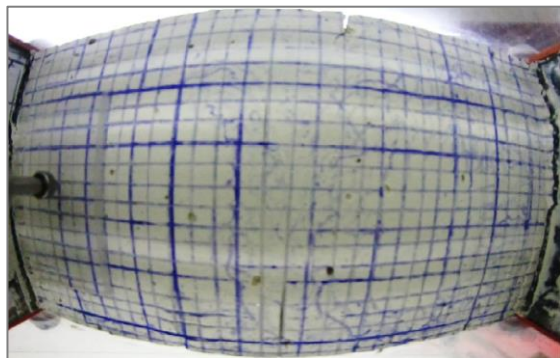
$t_{Modelo} = 19.34 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 33.58 \text{ días}$   
Foto # 2



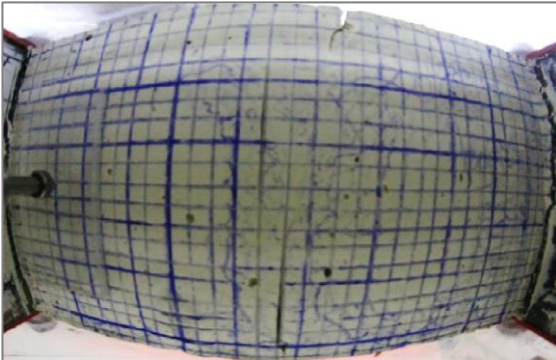
$t_{Modelo} = 23.62 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 41.01 \text{ días}$   
Foto # 3



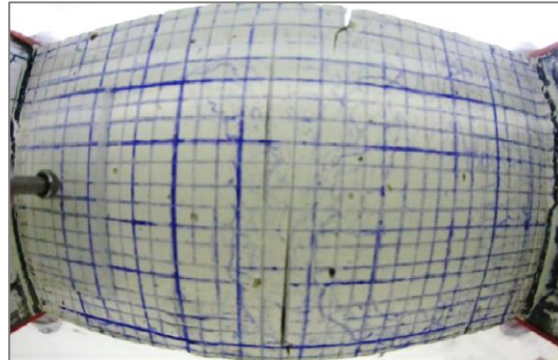
$t_{Modelo} = 38.40 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 66.67 \text{ días}$   
Foto # 4



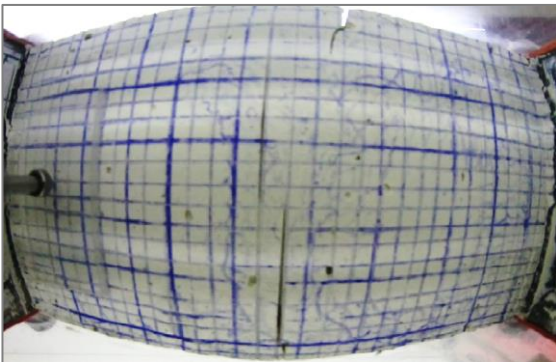
$t_{Modelo} = 44.04 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 76.46 \text{ días}$   
 Foto # 5



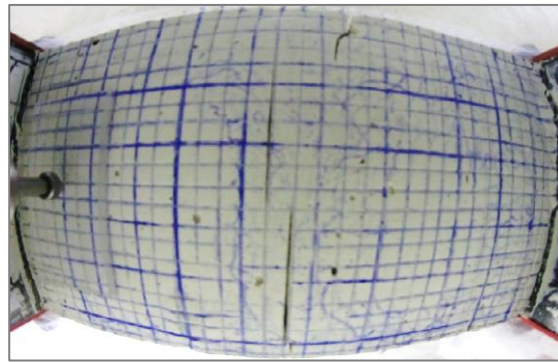
$t_{Modelo} = 51.91 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 90.12 \text{ días}$   
 Foto # 6



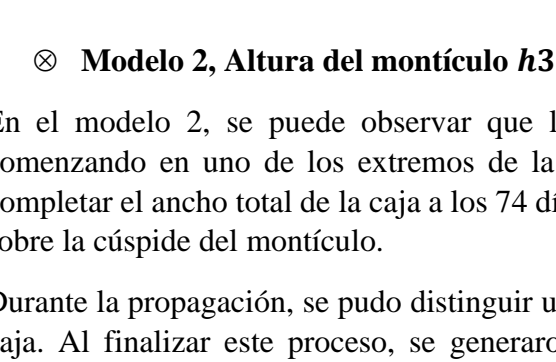
$t_{Modelo} = 55.11 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 95.68 \text{ días}$   
 Foto # 7



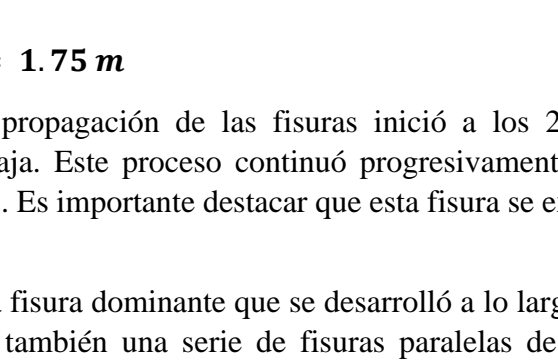
$t_{Modelo} = 58.25 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 101.13 \text{ días}$   
 Foto # 8



$t_{Modelo} = 62.98 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 109.34 \text{ días}$   
 Foto # 9



$t_{Modelo} = 64.76 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 112.43 \text{ días}$   
 Foto # 10



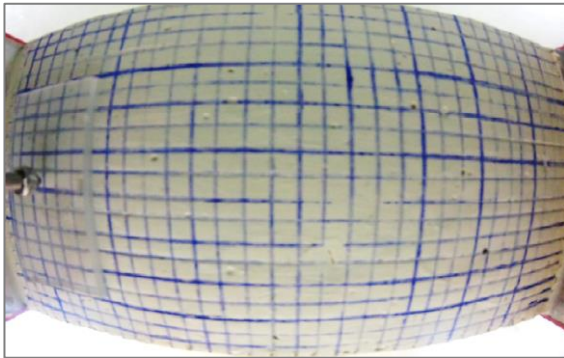
⊗ **Modelo 2, Altura del montículo  $h_3 = 1.75 \text{ m}$**

En el modelo 2, se puede observar que la propagación de las fisuras inició a los 25 días, comenzando en uno de los extremos de la caja. Este proceso continuó progresivamente hasta completar el ancho total de la caja a los 74 días. Es importante destacar que esta fisura se extendió sobre la cúspide del montículo.

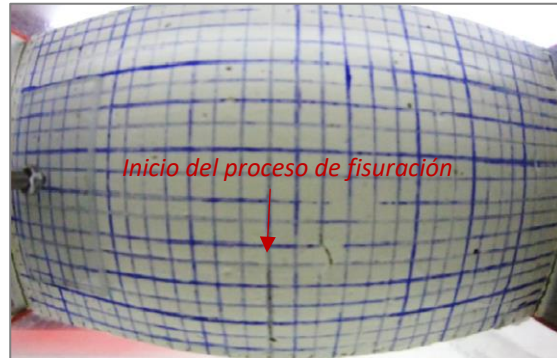
Durante la propagación, se pudo distinguir una fisura dominante que se desarrolló a lo largo de la caja. Al finalizar este proceso, se generaron también una serie de fisuras paralelas de menor longitud, formando una familia de fisuras.

Los resultados obtenidos en el modelo 2 demuestran que la propagación de las fisuras siguió un patrón similar al observado en el modelo anterior, pero con una secuencia temporal y una distribución espacial ligeramente diferentes. Estos hallazgos son relevantes para comprender cómo la relajación de los esfuerzos horizontales y la presencia de un montículo afectan la propagación de las fisuras en el suelo.

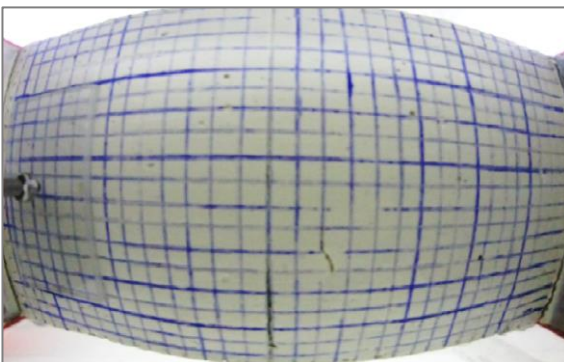




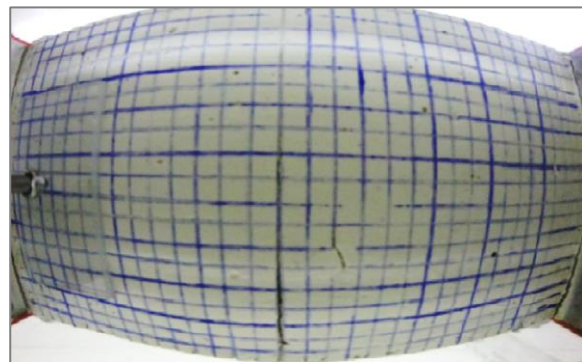
$t_{Modelo} = 0 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 0 \text{ días}$   
 Foto # 1



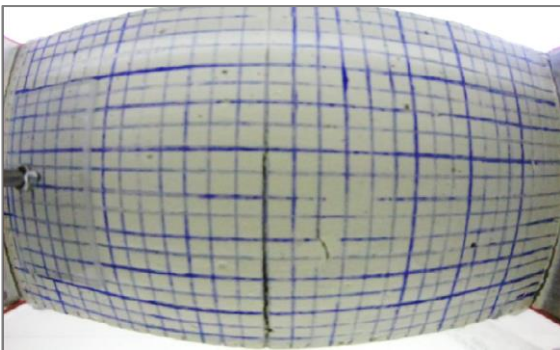
$t_{Modelo} = 14.80 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 25.69 \text{ días}$   
 Foto # 2



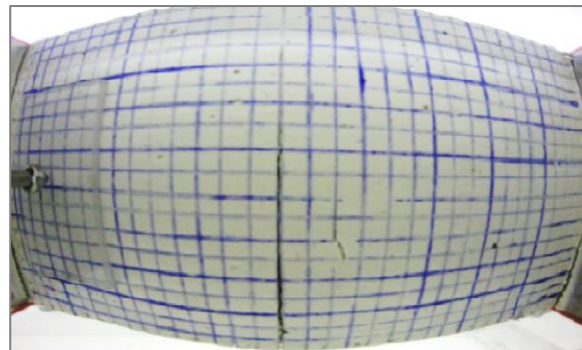
$t_{Modelo} = 20.62 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 35.80 \text{ días}$   
 Foto # 3



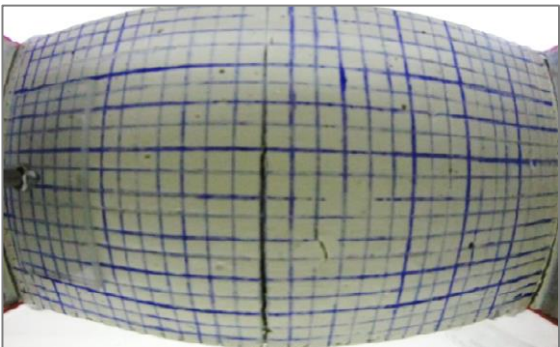
$t_{Modelo} = 23.52 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 40.83 \text{ días}$   
 Foto # 4



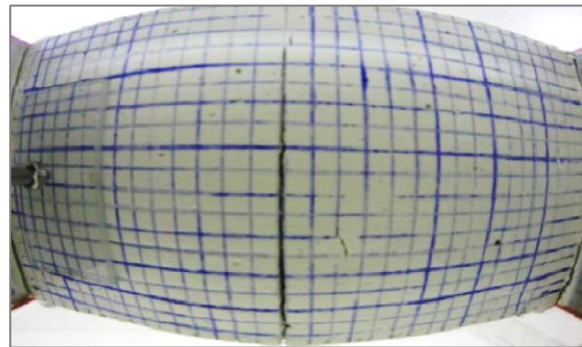
$t_{Modelo} = 26.17 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 45.43 \text{ días}$   
 Foto # 5



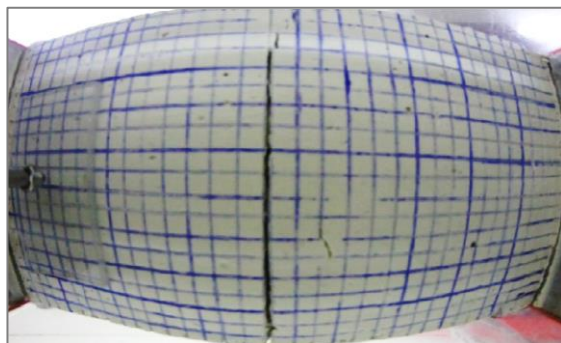
$t_{Modelo} = 28.12 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 48.82 \text{ días}$   
 Foto # 6



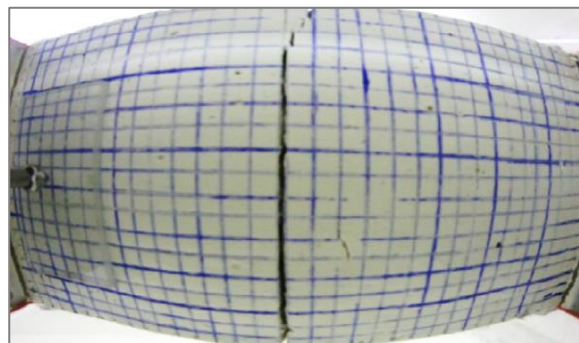
$t_{Modelo} = 30.93 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 53.70 \text{ días}$   
 Foto # 7



$t_{Modelo} = 32.57 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 56.55 \text{ días}$   
 Foto # 8



$t_{Modelo} = 35.95 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 62.41 \text{ días}$   
 Foto # 9



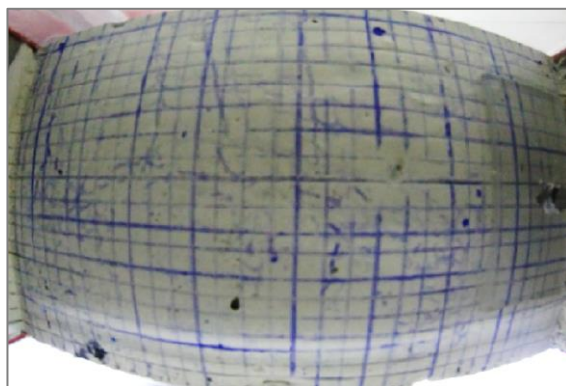
$t_{Modelo} = 42.64 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 74.03 \text{ días}$   
 Foto # 10

### ⊗ Modelo 3, Altura del montículo $h3 = 2 \text{ m}$

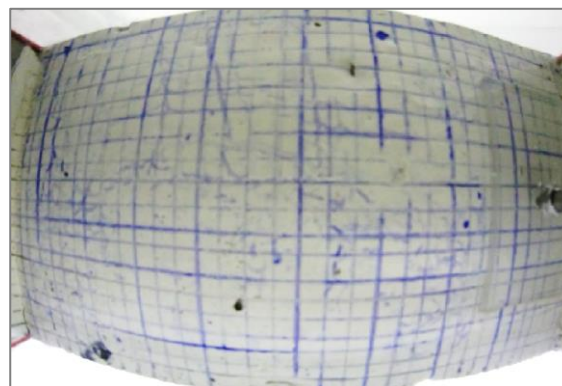
En el modelo 3, se observó que la fisuración comenzó a los 25 días, iniciando su propagación en uno de los extremos de la caja. Durante este proceso, se pudo apreciar que la fisura se extendió en tres segmentos distintos. Conforme la abertura en la superficie aumentaba, se generaron zonas de fallas activas paralelas a la grieta.

La propagación de la grieta en el modelo 3 concluyó a los 54 días. Es importante destacar que, en comparación con los modelos anteriores, se pudo observar que la apertura de las grietas fue mayor en este caso.

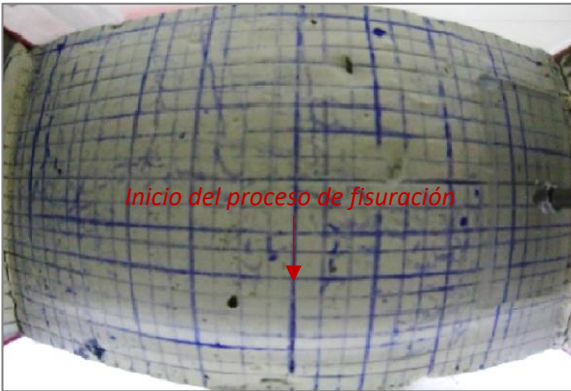
Estos resultados del modelo 3 brindan una visión más detallada, de las zonas de fallas activas. Estos hallazgos son importantes para comprender cómo la apertura de las grietas evoluciona y puede afectar la estabilidad de estructuras aledañas a la propagación de fisuras.



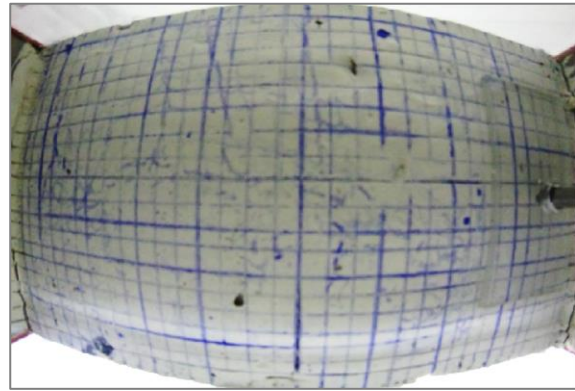
$t_{Modelo} = 0 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 0 \text{ días}$   
 Foto # 1



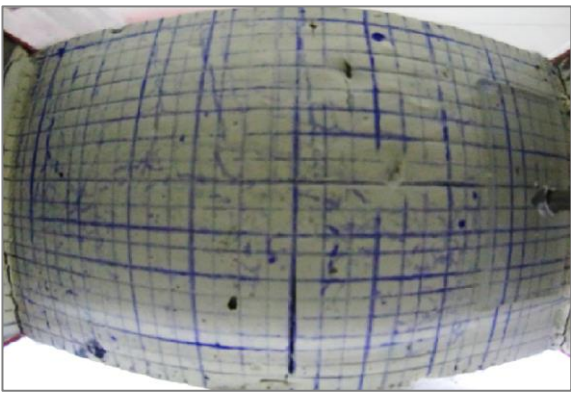
$t_{Modelo} = 13.80 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 23.96 \text{ días}$   
 Foto # 2



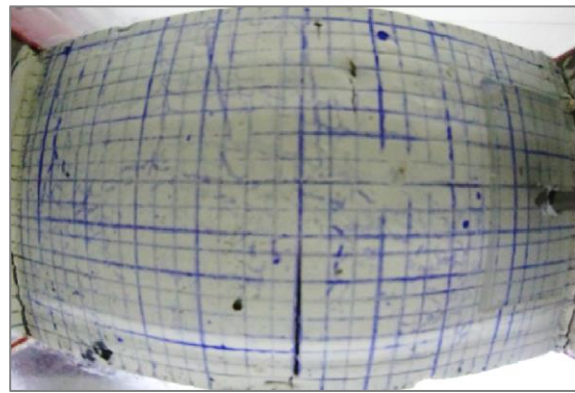
$t_{Modelo} = 14.82 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 25.73 \text{ días}$   
Foto # 3



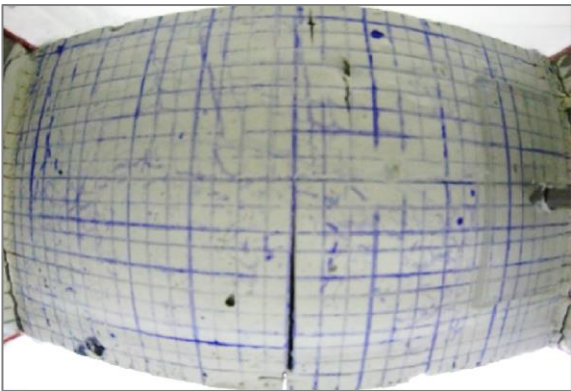
$t_{Modelo} = 15.7 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 27.26 \text{ días}$   
Foto # 4



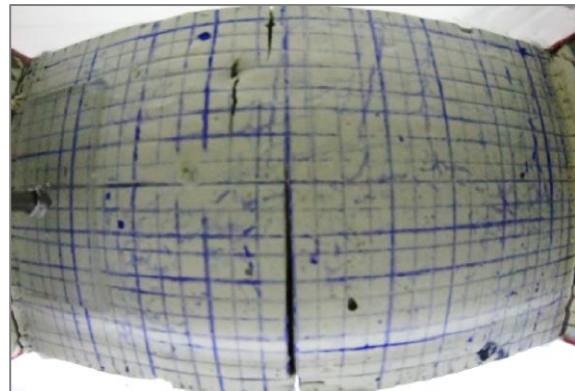
$t_{Modelo} = 16.75 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 29.08 \text{ días}$   
Foto # 5



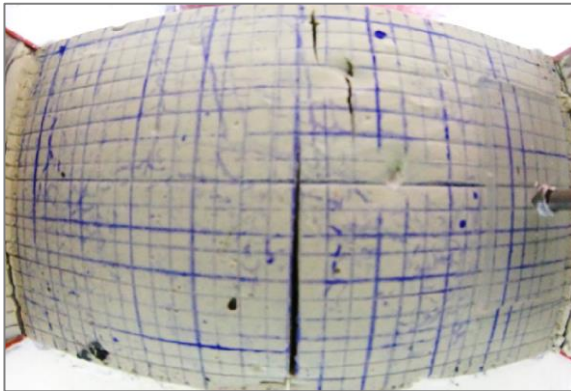
$t_{Modelo} = 19.71 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 34.22 \text{ días}$   
Foto # 6



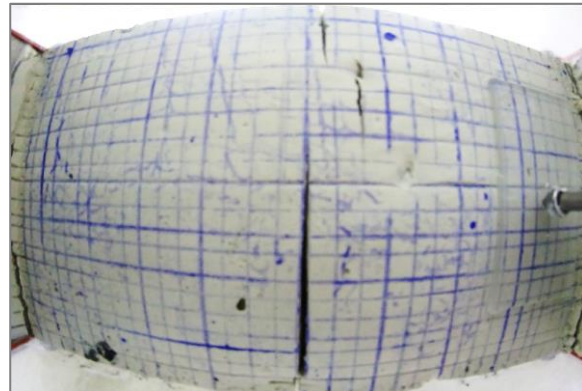
$t_{Modelo} = 21.68 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 37.64 \text{ días}$   
Foto # 7



$t_{Modelo} = 23.65 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 41.06 \text{ días}$   
Foto # 8



$t_{Modelo} = 27.59 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 47.90 \text{ días}$   
 Foto # 9

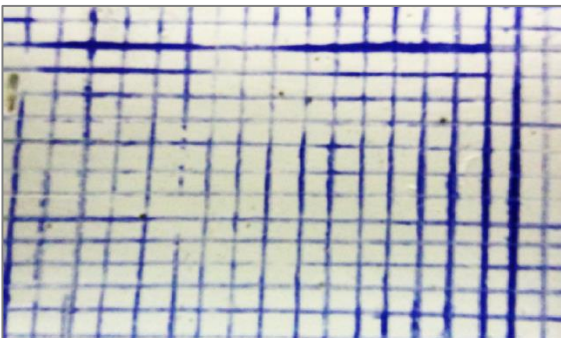


$t_{Modelo} = 31.53 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 54.25 \text{ días}$   
 Foto # 10

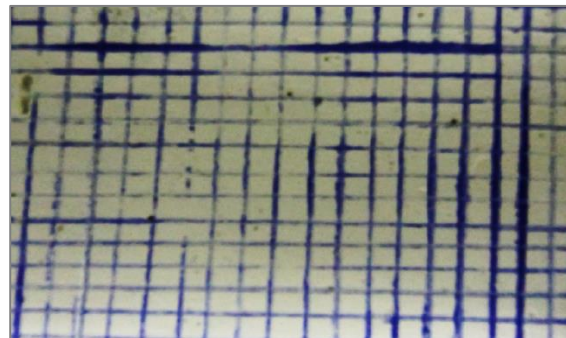
⊗ **Modelo 4, Altura del montículo  $h3 = 2.25 \text{ m}$**

En el modelo 4, se pudo observar una propagación de la fisura muy similar a la del modelo 3, y esto se debe a que la altura del montículo en ambos casos es análoga, siendo de 2 metros en el modelo 3 y 2.25 metros en el modelo 4. Sin embargo, se presentó un cambio en la calidad de la imagen capturada debido a que en este modelo se utilizó por primera vez la cámara GoPro, lo que resultó en una distorsión del lente diferente a la de los vuelos anteriores.

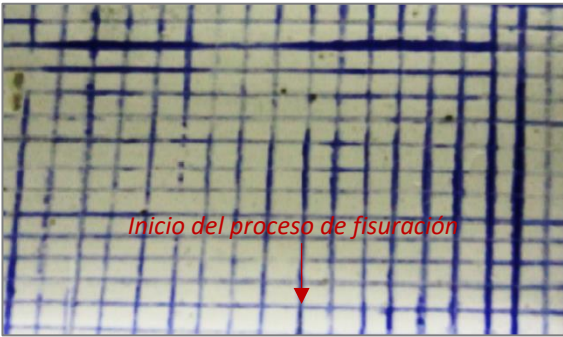
La incorporación de la cámara GoPro en el modelo 4 tuvo como objetivo mejorar la claridad de la imagen. Aunque se experimentó con una distorsión del lente en esta ocasión, las lecciones aprendidas de este vuelo permitieron corregir y obtener una mayor nitidez en las imágenes capturadas en los vuelos posteriores.



$t_{Modelo} = 0 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 0 \text{ días}$   
 Foto # 1

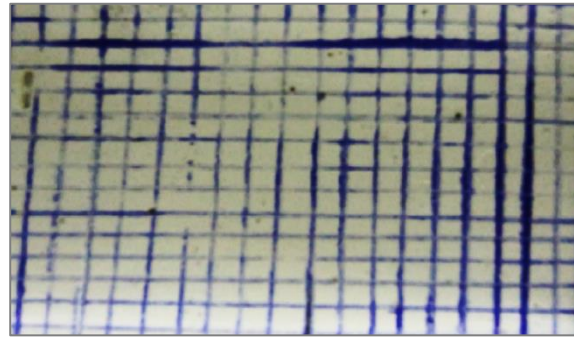


$t_{Modelo} = 12.08 \text{ min}$   $t_{Prototipo} = 20.97 \text{ días}$   
 Foto # 2



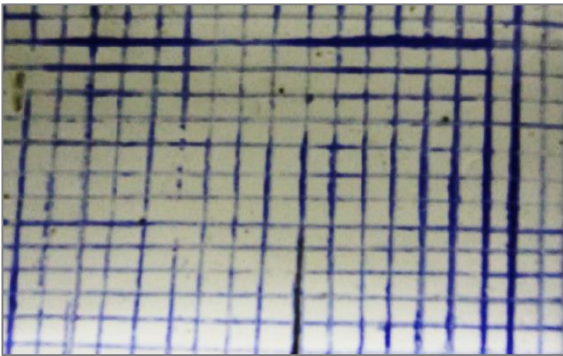
$t_{Modelo} = 13.04 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 22.64 \text{ días}$

Foto # 3



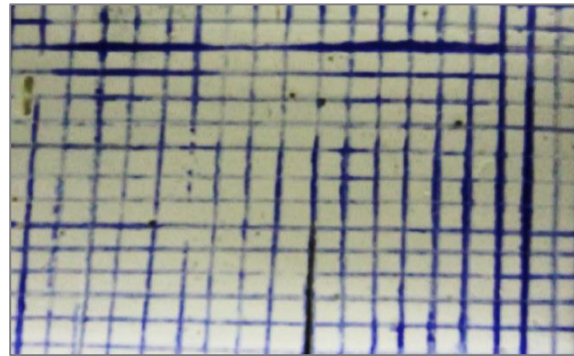
$t_{Modelo} = 14.01 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 24.32 \text{ días}$

Foto # 4



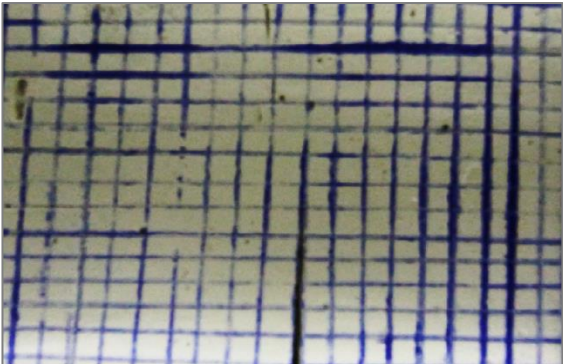
$t_{Modelo} = 15.01 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 26.06 \text{ días}$

Foto # 5



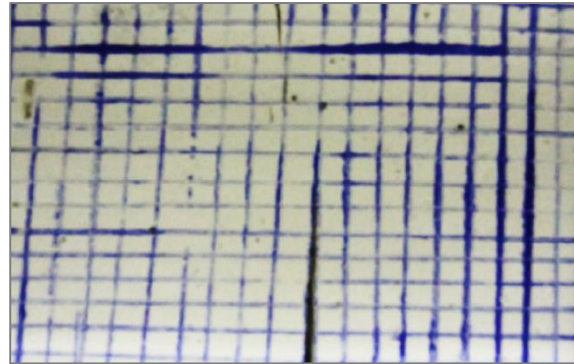
$t_{Modelo} = 16.42 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 28.51 \text{ días}$

Foto # 6



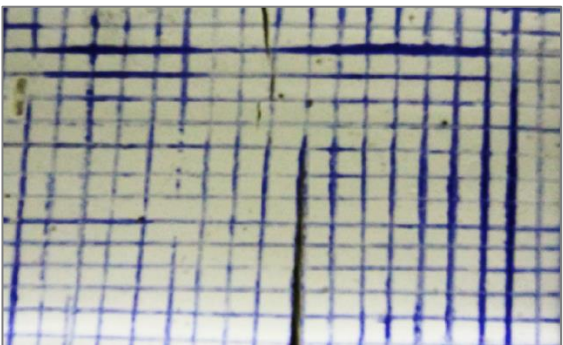
$t_{Modelo} = 17.52 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 30.42 \text{ días}$

Foto # 7



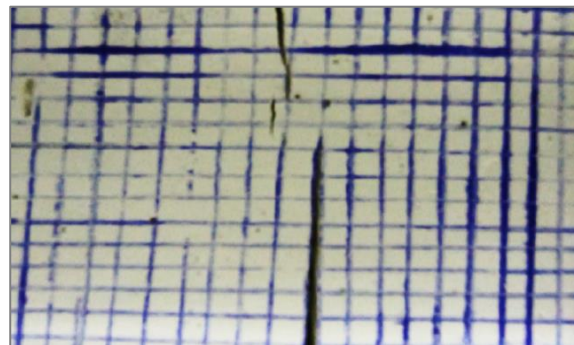
$t_{Modelo} = 19.3 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 33.51 \text{ días}$

Foto # 8



$t_{Modelo} = 24.90 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 43.23 \text{ días}$

Foto # 9



$t_{Modelo} = 25.53 \text{ min}$   $t_{prototipo} = 44.32 \text{ días}$

Foto # 10

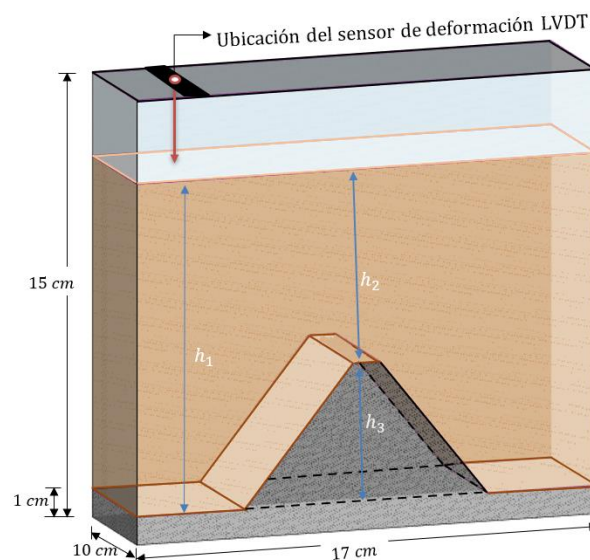
A partir del registro fotográfico previo, que muestra el proceso de propagación de fisuras en los cuatro modelos de estudio, se pueden observar una serie de grietas que se extienden en una línea dominante, pero no continua, ubicada en el centro de las muestras, sobre la cúspide del montículo, y que se extiende a lo ancho de la caja. Además, se puede apreciar que la apertura de las grietas comienza en las zonas más débiles desde la superficie del suelo y se propaga a lo largo y en profundidad del estrato de suelo (la generación de la grieta es descendente), iniciando su propagación desde los extremos del ancho de la caja. Este comportamiento se debe a que la arcilla no soportar esfuerzos de tensión.

El proceso de propagación de las fisuras puede ser analizado a través de la medición de los tiempos de avance y la velocidad de expansión. Los resultados obtenidos indican que, a medida que la altura del montículo disminuye, el tiempo de formación tanto de la fisura inicial como de la fisura final tiende a aumentar.

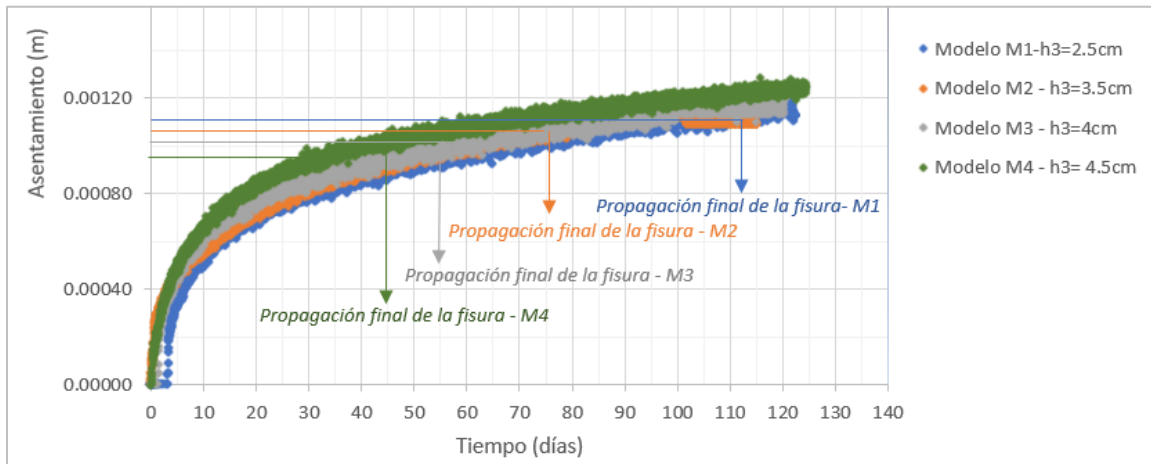
Este tipo de propagación de fisuras de gran longitud en superficie se pudo observar en el caso estudio realizado por Jachens y Holzer en el año 1982. En el cual observaron fisuras de longitudes acumuladas de más de 8.7 km, que ocurrieron sobre crestas o escalones de la roca subyacente a suelo arcilloso, en el sureste de Casa Grande, Arizona (Jachens & Holzer, 1982).

### 6.3 Control de asentamientos:

Con el fin de controlar el asentamiento del suelo fino durante el vuelo en la centrifuga geotécnica, se instaló un sensor de deformación LVDT en uno de los lados de la caja, como se puede observar en la Figura 63. De esta manera, se pudo inspeccionar el movimiento descendente vertical del terreno y tomar un registro en tiempo real, como se muestra en la Figura 64.



**Figura 63.** Ubicación del sensor de deformación LVDT. Fuente propia.



**Figura 64.** Tiempo contra asentamiento en el vuelo en la centrifuga geotécnica- Prototipo. Fuente propia.

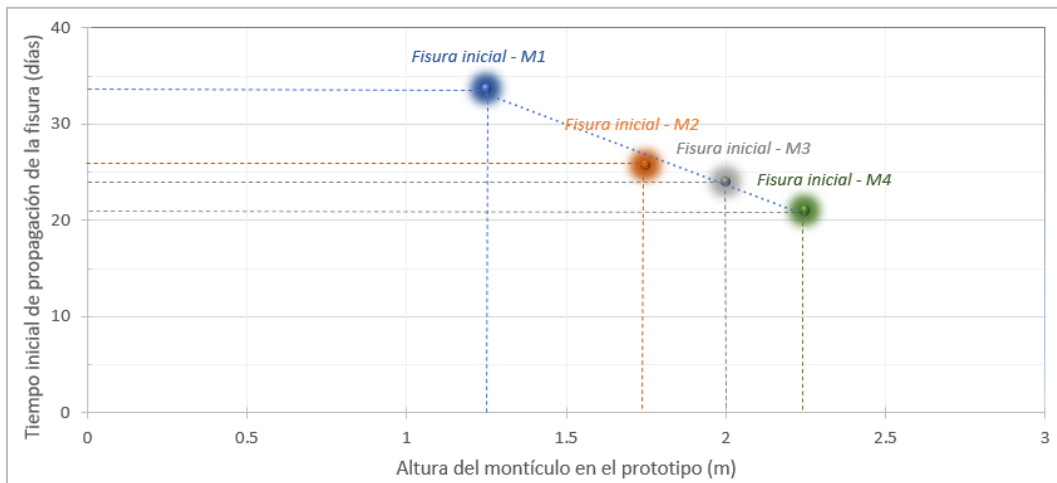
En la Figura 64 se muestra el asentamiento del suelo en cada uno de los modelos durante el proceso de consolidación y el momento en que culmina la propagación de la fisura en el vuelo de la centrifuga geotécnica.

Se encontró que, en presencia de un montículo de menor altura, el tiempo para terminar la formación de la fisura aumentaba. La teoría de consolidación de Terzaghi proporciona un marco teórico que sustenta la observación anteriormente planteada. En particular, la ecuación número [22], de esta teoría muestra que el tiempo ( $t$ ) necesario para alcanzar un determinado grado de consolidación depende de la distancia de drenaje (en este caso, la altura  $h_2$ ). Si la distancia de drenaje aumenta, esto se traducirá en un mayor tiempo de propagación de las fisuras.

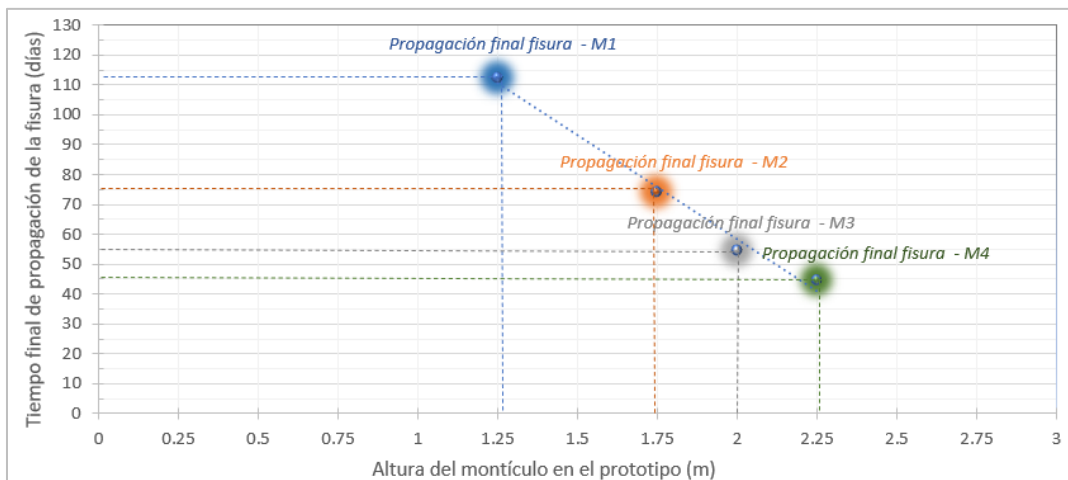
$$t = \frac{T_v * H_d^2}{C_v} \quad [22]$$

A continuación, se llevará a cabo un análisis de la propagación de fisuras en las muestras de arcilla sometidas a un esfuerzo de compresión unidireccional durante el vuelo en la centrifuga geotécnica:

De acuerdo con los registros obtenidos del comportamiento del suelo, tal como se muestra en la Figura 65 y la Figura 66, se puede analizar el comportamiento de las fisuras durante el proceso de consolidación de la arcilla. En concreto, se ha detectado que las fisuras tienen un tiempo mayor de inicio y finalización (propagación total a lo ancho de las cajas de diseño) cuando la altura del montículo de la roca basal es menor.



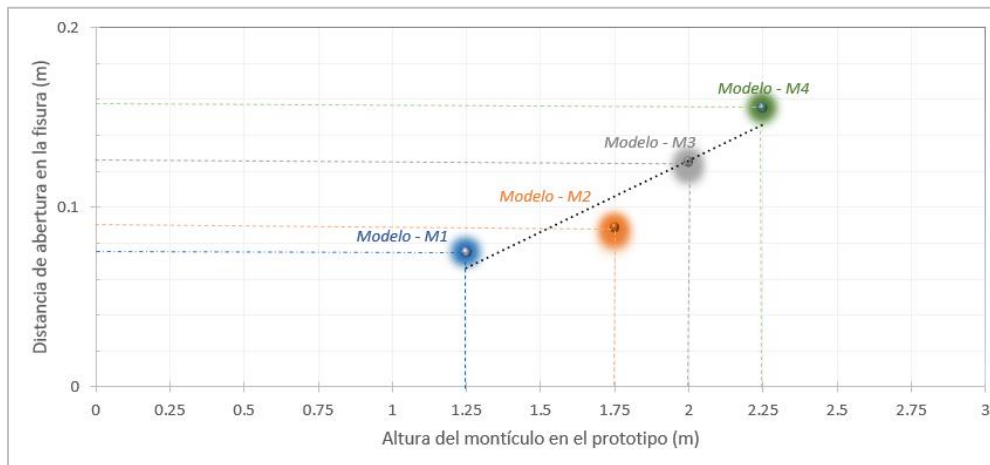
**Figura 65.** Altura del montículo contra tiempo inicial de propagación de las fisuras. Fuente propia.



**Figura 66.** Altura del montículo contra tiempo final de propagación de las fisuras. Fuente propia.

Los resultados obtenidos indican que a medida que la altura del montículo en la roca basal disminuye, se observa una reducción en la apertura de la fisura medida en superficie al final de su propagación (ver Figura 67). En particular, se midió el mayor ancho de apertura de la grieta para evaluar este efecto. Este fenómeno puede explicarse debido a que los esfuerzos de tensión que dan origen a la primera grieta son menores cuando la altura del montículo es menor, como se evidencia en la Tabla 22.

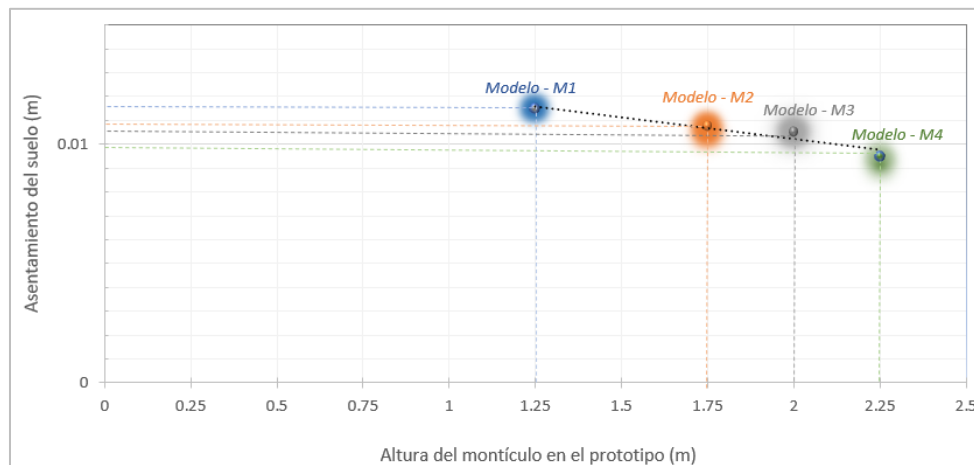




**Figura 67.** Altura del montículo contra distancia de apertura en la fisura. Fuente propia.

La Figura 68 muestra claramente que el asentamiento del suelo fino se incrementa en presencia de una roca basal de menor altura. Esta relación era esperada, ya que el asentamiento depende del espesor de la arcilla que se consolidó. Según la teoría de la consolidación (ver ecuación [1]), un estrato más grande de suelo produce un mayor grado de asentamiento.

$$\Delta z = H_o \left( \frac{\Delta e}{1 + e_o} \right) \quad [1]$$



**Figura 68.** Altura del montículo contra asentamiento del suelo. Fuente propia.

#### 6.4 Vectores de desplazamiento:

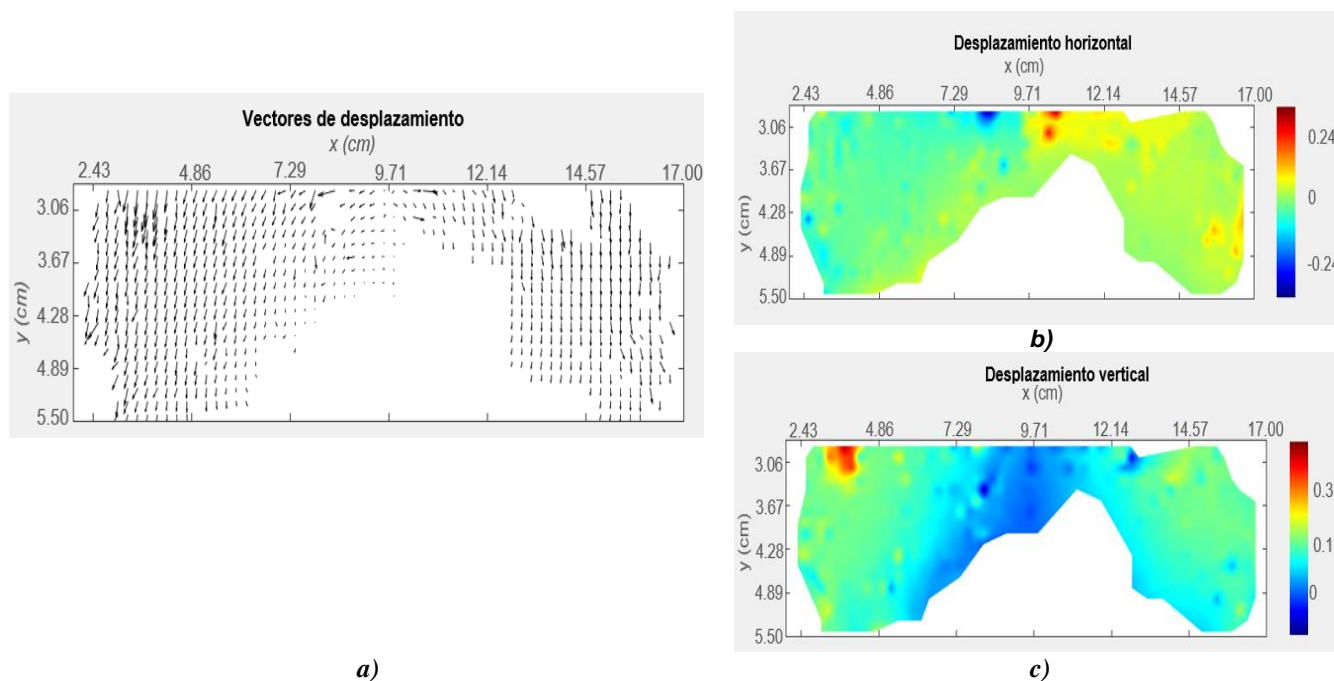
Para esta investigación, a partir de las fotografías tomadas antes y después del vuelo en la centrifuga geotécnica, se realiza un análisis de imágenes con el fin de definir los vectores de desplazamiento del suelo fino. Se hace uso de la Velocimetría de Imagen de Partículas (GEO-PIV\_RG) sobre la plataforma de MatLab, la cual permite determinar el recorrido de los pixeles en una serie de

fotografías. Esto tiene como objetivo definir la dirección preferencial de los desplazamientos en cada uno de los modelos.

Las imágenes obtenidas a través de GEO-PIV\_RG muestran claramente los desplazamientos que se producen en los modelos. En particular, se observa que hay una incompatibilidad entre las deformaciones de la arcilla blanda y el estrato rígido del montículo sepultado, lo que produce un asentamiento mucho menor sobre la cúspide del montículo que en el estrato de suelo de mayor espesor.

De la Figura 69 a la Figura 72 se muestran los vectores de desplazamiento en los cuatro modelos, donde se observa claramente que se producen desplazamientos hacia ambos lados del montículo de la roca basal, generando una fuerza tangencial que produce las fisuras. Además, se generaron desplazamientos verticales que originan ligeros esfuerzos cortantes por la deformación diferencial sobre las laderas del montículo. Se presenta el mecanismo de generación de grietas propuesto por Barragán y Rodríguez (2021).

⊗ **Modelo 1, Altura del montículo  $h_3 = 1.25 \text{ m}$ .**

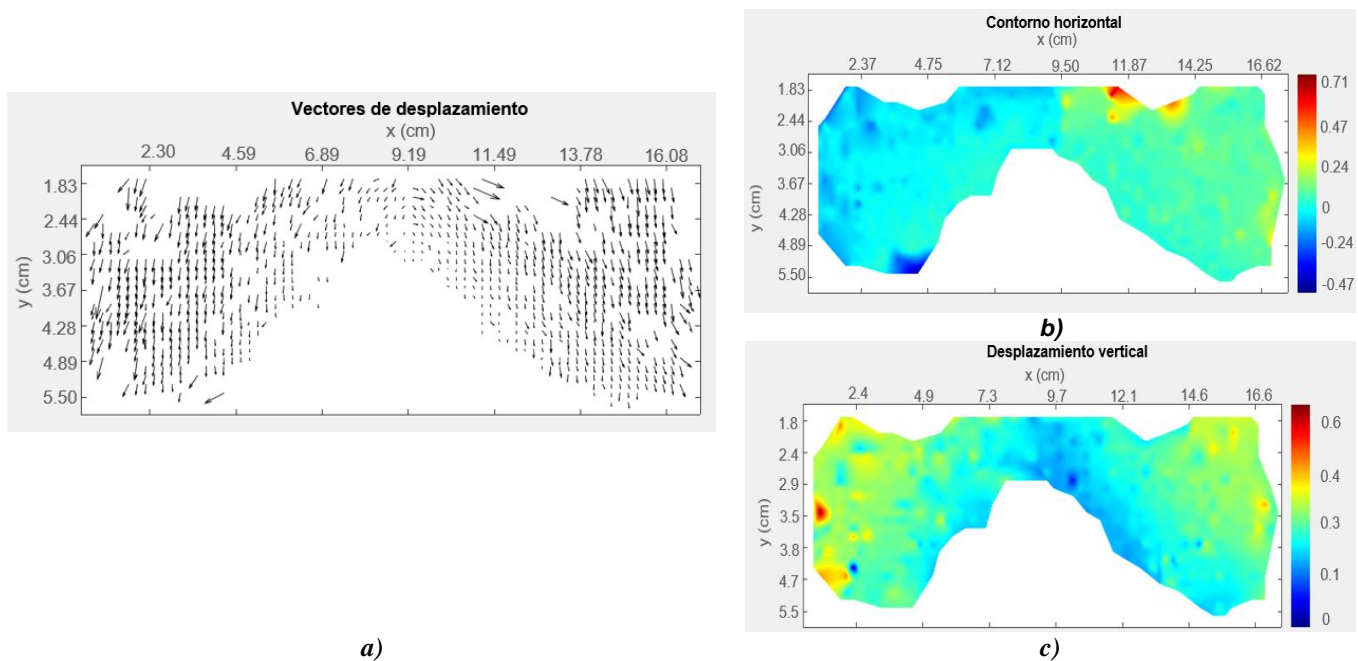


**Figura 69.** Procesamiento de fotografías del modelo M1 (Humedad 78.67%) **a)** Vectores de desplazamiento **b)** Desplazamiento horizontal **c)** Desplazamientos vertical. Fuente propia.

En el modelo 1, se pueden apreciar los vectores de desplazamiento que se extienden a lo largo de las laderas del montículo. Se observa un desplazamiento horizontal mayor hacia el lado derecho, indicado por la zona zonificada en color rojo. Por otro lado, en términos de desplazamiento vertical, se evidencia un mayor desplazamiento en el lado izquierdo.

La disparidad en los desplazamientos verticales podría ser atribuida a una posible discrepancia en el corte de las muestras durante la preparación. Es posible que algunas muestras hayan quedado ligeramente más pequeñas, lo cual podría haber influido en los resultados de los desplazamientos verticales observados.

⊗ **Modelo 2, Altura del montículo  $h_3 = 1.75\text{ m}$**

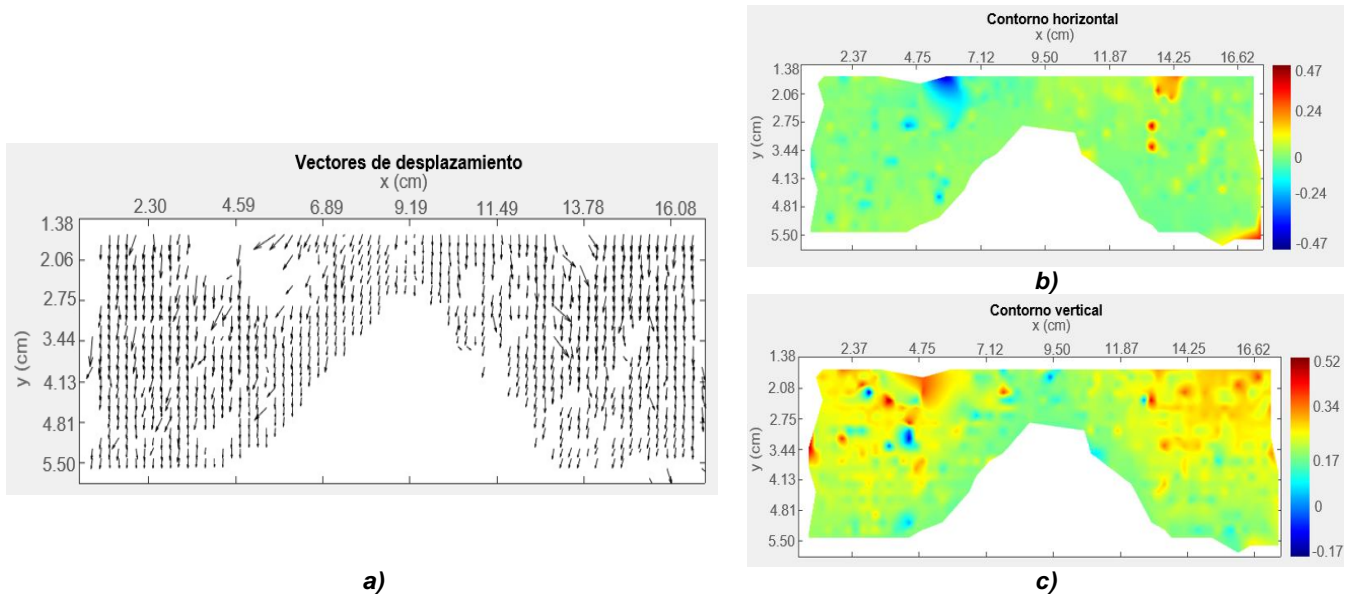


**Figura 70.** Procesamiento de fotografías del modelo M2 (Humedad 77.50%) **a)** Vectores de desplazamiento **b)** Desplazamiento horizontal **c)** Desplazamientos vertical. Fuente propia.

En el modelo 2, se puede observar que el vector de desplazamiento sigue un comportamiento similar al del modelo anterior, pero con una mayor extensión hacia las laderas del montículo. Además, en términos de desplazamiento vertical, se evidencia un mayor desplazamiento en el talud derecho. En cuanto al desplazamiento vertical, se observa un comportamiento similar en ambos lados de la roca basal.

El mayor desplazamiento horizontal en el talud derecho indica la presencia de fuerzas y factores que influyen en la deformación del suelo en esa zona específica. Asimismo, el comportamiento similar en los desplazamientos verticales en ambos lados de la roca basal sugiere una distribución uniforme de las fuerzas y condiciones en esas áreas.

⊗ **Modelo 3, Altura del montículo  $h_3 = 2\text{ m}$**

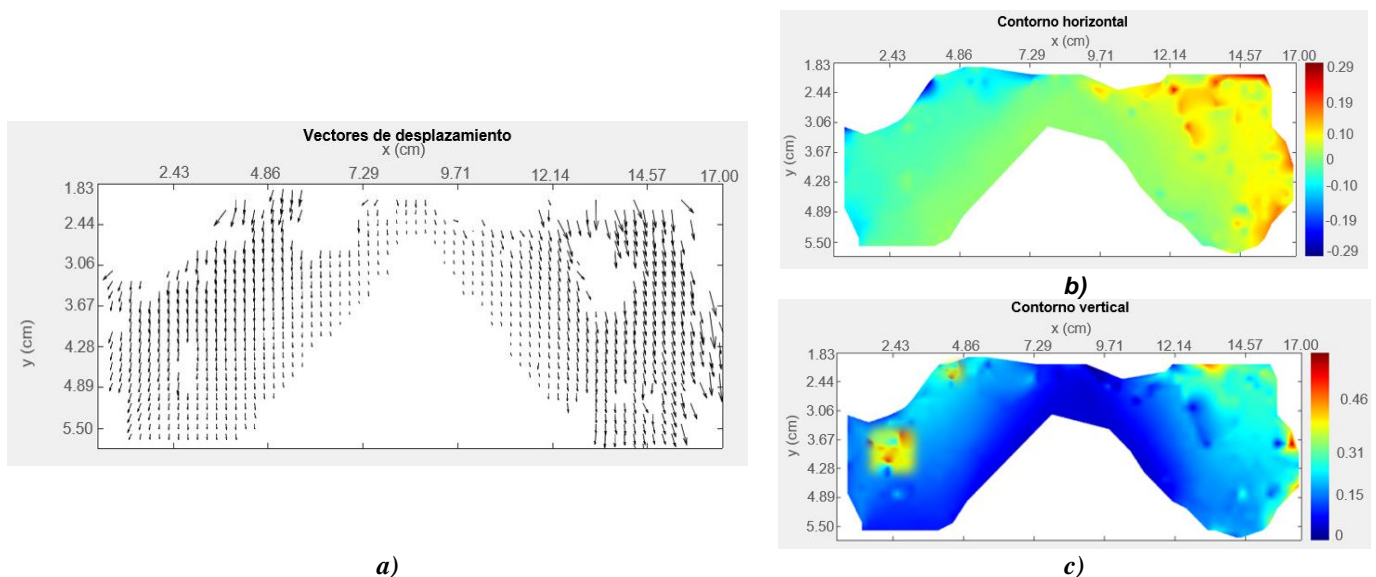


**Figura 71.** Procesamiento de fotografías del modelo M3 (Humedad 77.10%) **a)** Vectores de desplazamiento **b)** Desplazamiento horizontal **c)** Desplazamientos vertical. Fuente propia.

En el modelo 3 y el modelo 4, que se observan en las Figura 71 y Figura 72 respectivamente. En ambos casos, se puede apreciar un comportamiento muy similar a los dos modelos anteriores.

Estos hallazgos indican una consistencia en el comportamiento de la propagación de fisuras en los cuatro modelos estudiados. A pesar de algunas variaciones en las condiciones específicas de cada modelo, los resultados muestran similitudes en cuanto a la forma y extensión de las fisuras.

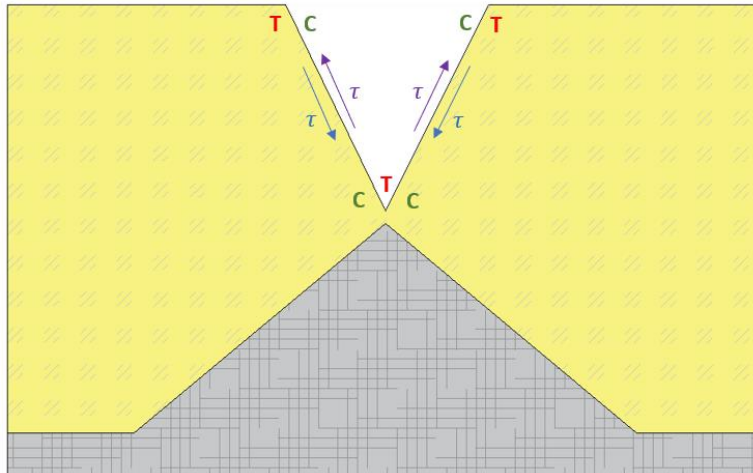
⊗ **Modelo 4, Altura del montículo  $h_3 = 2.25\text{ m}$**



**Figura 72.** Procesamiento de fotografías del modelo M4 (Humedad 76.72%) **a)** Vectores de desplazamiento **b)** Desplazamiento horizontal **c)** Desplazamientos vertical. Fuente propia.

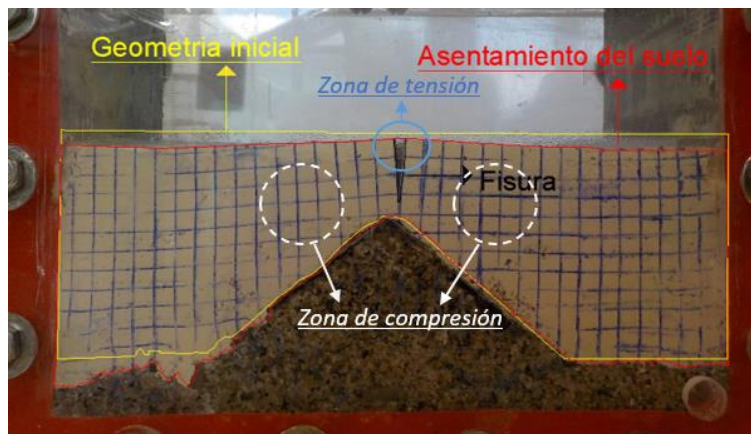
### 6.5 Fuerzas y zonas de tensión y compresión:

La expansión de una fisura provoca la deformación de la superficie del suelo, generando una acumulación de esfuerzos de compresión y tensión en los extremos o puntas de la fisura (ver Figura 73). Como consecuencia, en las zonas sometidas a tensión, la superficie se levanta, mientras que, en las zonas sometidas a compresión, la superficie se hunde.



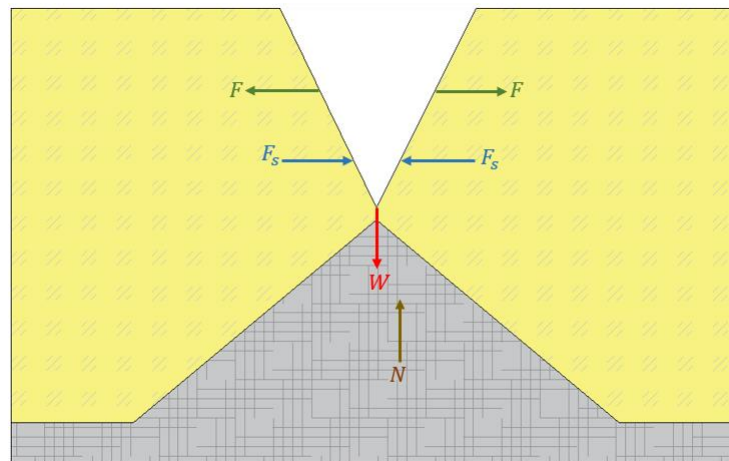
**Figura 73.** Zonas de tensión y compresión. Fuente propia.

Para explicar la propagación de los esfuerzos cortantes (Figura 73), en el escenario estudiado la muestra de suelo se comprime a los dos lados del montículo de la roca basal debido al peso propio del suelo (ver Figura 74). Cuando el suelo se deforma, los taludes laterales se desplazan hacia abajo y generan un esfuerzo de corte en la misma dirección que debe ser contrarrestado con un esfuerzo de corte hacia arriba (Vallejo, 2021).



**Figura 74.** Zona de tensión y zonas de compresión. Fuente propia.

La formación y propagación de una fisura resultan de la interacción de fuerzas verticales y horizontales, tal como se ilustra en la Figura 75. Estas fuerzas combinadas dan lugar a la aparición y expansión de la fisura (Vallejo, 2021).



**Figura 75.** Fuerzas en la propagación de la fisura. Fuente propia.

Donde:

- $F$  = Fuerzas de tensión producidas por la arcilla a la izquierda y a la derecha.
- $F_s$  = Presión lateral del suelo, que tratan de cerrar la fisura.
- $W$  = Peso propio del suelo.
- $N$  = Fuerza normal.

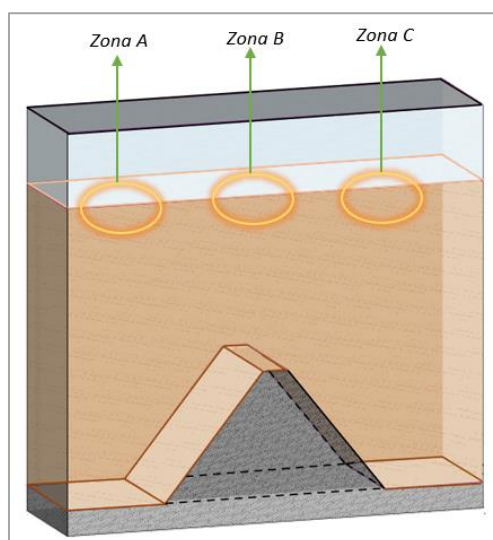
### 6.6 Contenido de humedad:

El contenido de humedad presente en el suelo es un factor fundamental en la evaluación de las propiedades mecánicas y físicas del terreno, ya que su presencia puede afectar significativamente la densidad, resistencia y estabilidad de los materiales. En este estudio, se analizó el contenido de humedad en tres puntos de la muestra después de finalizar el vuelo en la centrifugadora geotécnica. Los datos presentados representan el promedio obtenido de los cuatro modelos estudiados: la Zona A (lado izquierdo del montículo), Zona B (sobre el montículo) y Zona C (lado derecho del montículo) (ver Figura 76).

Como se puede observar de Figura 77 a la Figura 79, el contenido de humedad de las arcillas se mantuvo en un rango moderado a alto, fluctuando entre el 70% y el 80%. Este nivel de humedad indica que el material está significativamente saturado de agua, lo que puede tener un impacto negativo en la estabilidad y resistencia de las estructuras. En particular, en fisuras de gran longitud, un contenido de humedad elevado puede aumentar la presión hidrostática y debilitar las estructuras cercanas.

Un contenido de humedad en fisuras de gran longitud entre el 70% y el 80% se considera moderadamente alto, lo que indica la necesidad de tomar medidas para garantizar la seguridad y estabilidad de las estructuras. La presencia de humedad en estas fisuras aumenta el riesgo de deslizamientos, asentamientos diferenciales y otros problemas de estabilidad, por lo que es importante monitorear y mitigar los riesgos asociados para garantizar una construcción segura.

En conclusión, el contenido de humedad en el suelo es un factor crucial en la evaluación de la estabilidad y seguridad de las estructuras en geotecnia. Por lo tanto, es necesario prestar atención a los niveles de humedad en fisuras de gran longitud y tomar medidas adecuadas para garantizar una construcción segura y estable.

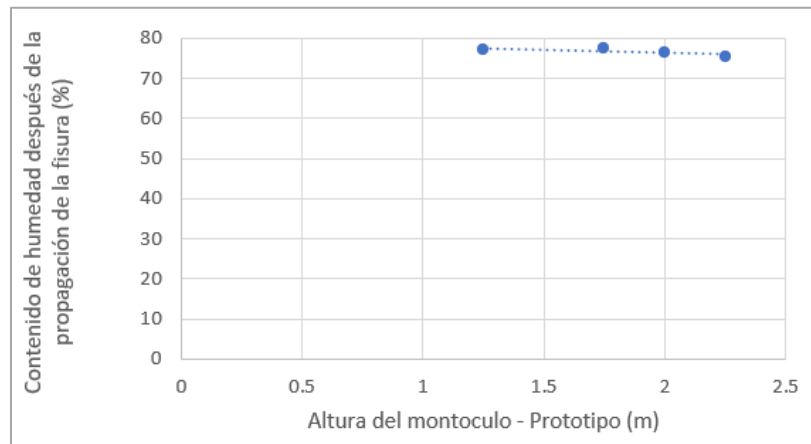


**Figura 76.** Zonas de análisis - Contenido de humedad. Fuente propia.

La Tabla 16 muestra el contenido de humedad media y la desviación estándar en cada una de las zonas en cuestión, lo cual permite una observación detallada de dicha variable en el área de estudio.

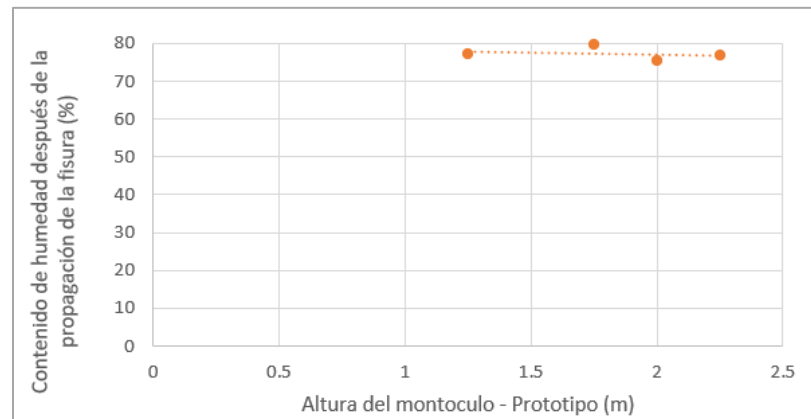
**Tabla 16.** Contenido de Humedad. Fuente propia.

	Humedad media	Desviación estándar
Zona A	76.62%,	0.867
Zona B	77.18%,	1.778
Zona C	75.94%,	2.761



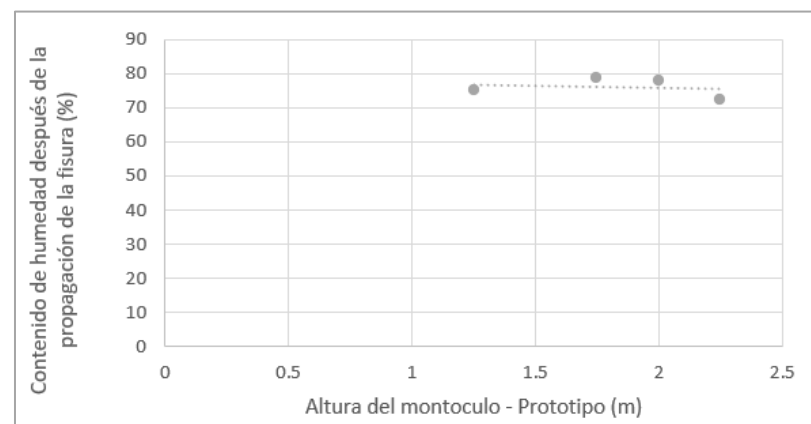
**Figura 77.** Contenido de humedad después de la propagación final de la fisura-Zona A. Fuente propia.

En la zona A, la humedad media es del 76.62%, con una desviación estándar de 0.867.



**Figura 78.** Contenido de humedad después de la propagación final de la fisura-Zona B. Fuente propia.

En la zona B, la humedad media es del 77.18%, con una desviación estándar de 1.778.



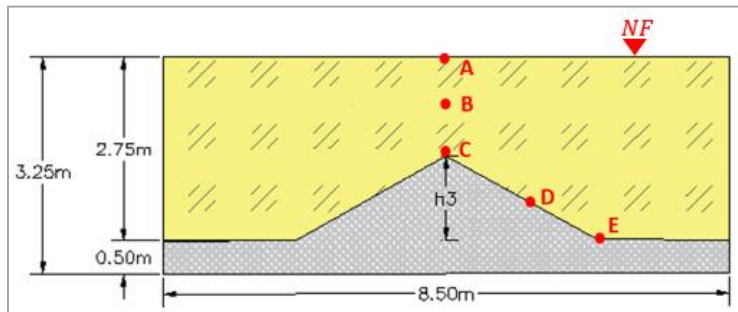
**Figura 79.** Contenido de humedad después de la propagación final de la fisura-Zona C. Fuente propia.

En la zona C, la humedad media es del 75.94%, con una desviación estándar de 2.761.



### 6.7 Esfuerzos geostáticos:

En la mecánica de suelos, los esfuerzos geostáticos que actúan en una masa de suelo son generados por su propio peso, lo que los convierte en un fenómeno ideal para ser modelado mediante el uso de la centrífuga geotécnica. En este sentido, al aplicar una fuerza gravitatoria de  $N=50\text{ G}$ , se lograron obtener los esfuerzos efectivos verticales iniciales en las profundidades que se observan en la Figura 80:



**Figura 80.** Profundidad de análisis de los esfuerzos geostáticos-Prototipo. Fuente propia.

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad [26]$$

$$\sigma' = \gamma * h - \gamma_w * N_F \quad [27]$$

**Tabla 17.** Esfuerzos verticales iniciales. Fuente propia.

Prototipo	Esfuerzo efectivo vertical inicial (kPa)				
	A	B	C	D	E
M1- $h3 = 1.25m$	0	3.61	7.22	10.22	13.23
M2- $h3 = 1.75m$	0	2.41	4.81	9.02	13.23
M3- $h3 = 2.00m$	0	1.80	3.61	8.42	13.23
M4- $h3 = 2.25m$	0	1.20	2.41	7.82	13.23

A continuación, se presenta el estado de esfuerzos inicial (ver Figura 81 a la Figura 84) para cada uno de los modelos en el punto B, lugar hasta donde se originó la fisura, según el registro fotográfico realizado al final de los vuelos en la centrífuga geotécnica. Estos esfuerzos son principales debido a la ausencia de cortante. El esfuerzo horizontal se calculó utilizando la siguiente expresión [28]:

$$\sigma'_{ho} = k_o * \sigma'_{vo} \quad [28]$$

$$\sigma'_{ho} = (1 - \text{sen}\phi')\sqrt{OCR} * \sigma'_{vo} \quad [29]$$

La envolvente de falla es única para cada material. Los valores de la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo se obtuvieron a partir del estudio realizado por Catalina Lozada y colaboradores, según se reporta en su artículo del año 2022 (Lozada, C. et al., 2022). La investigación utilizó arcilla caolinita como suelo de estudio, y se obtuvieron los siguientes valores

a través de ensayos triaxiales: una cohesión  $c' = 5.5 \text{ kPa}$  y un ángulo de fricción interna  $\phi' = 24^\circ$ .

⊗ Modelo M1  $h_3 = 1.25 \text{ m}$

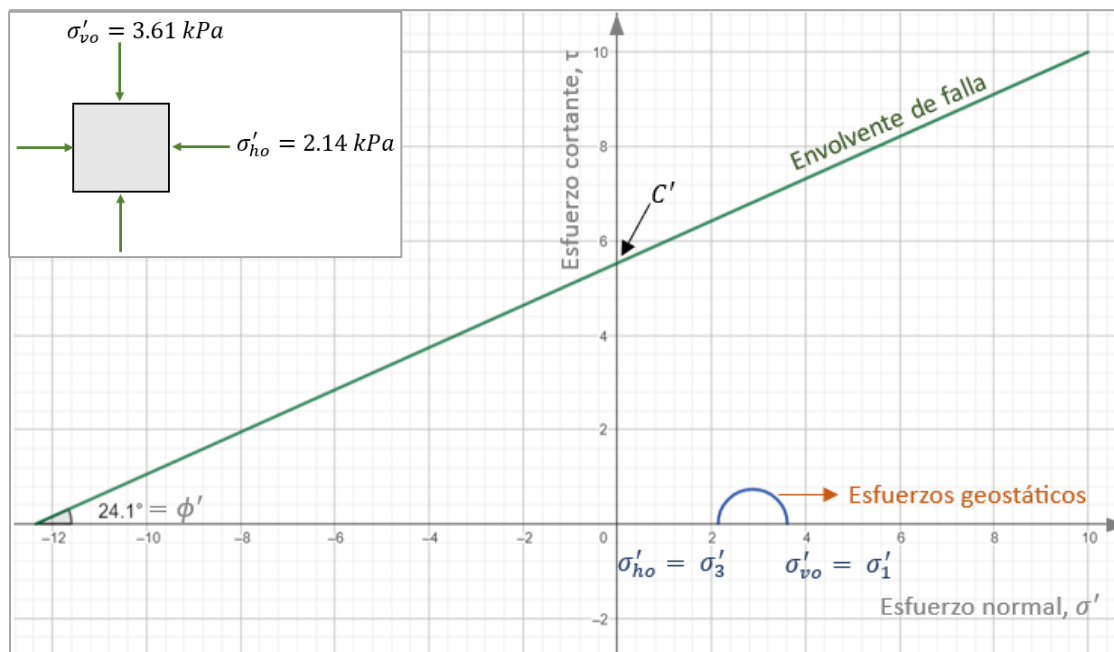


Figura 81. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M1. Fuente propia.

⊗ Modelo M2  $h_3 = 1.75 \text{ m}$

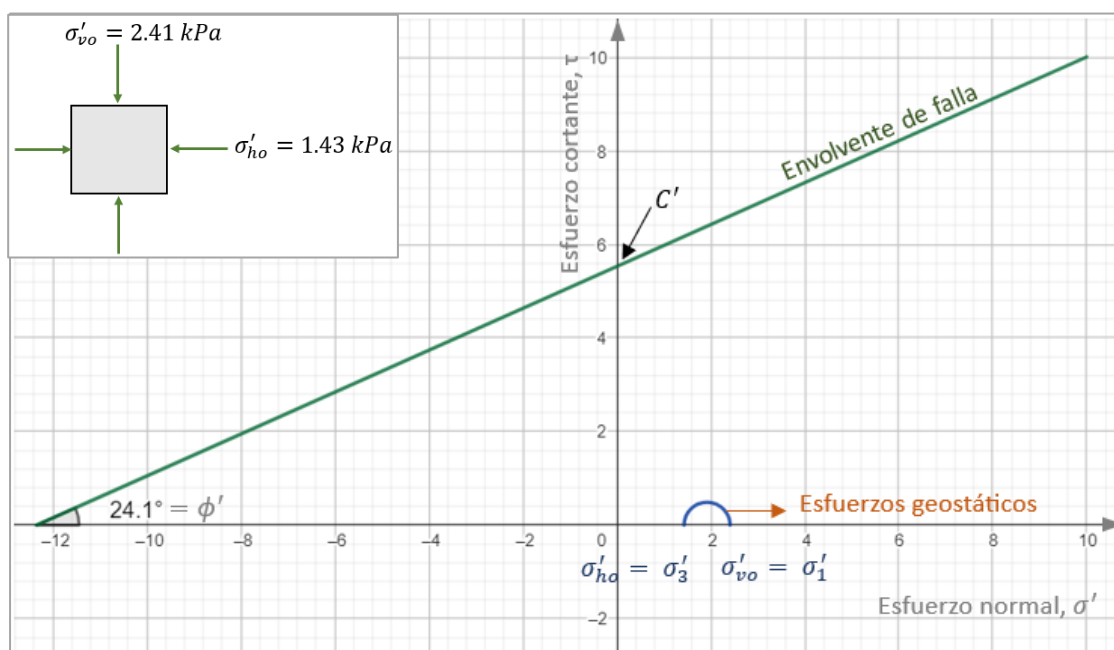


Figura 82. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M2. Fuente propia.

⊗ Modelo M3  $h_3 = 2 \text{ m}$

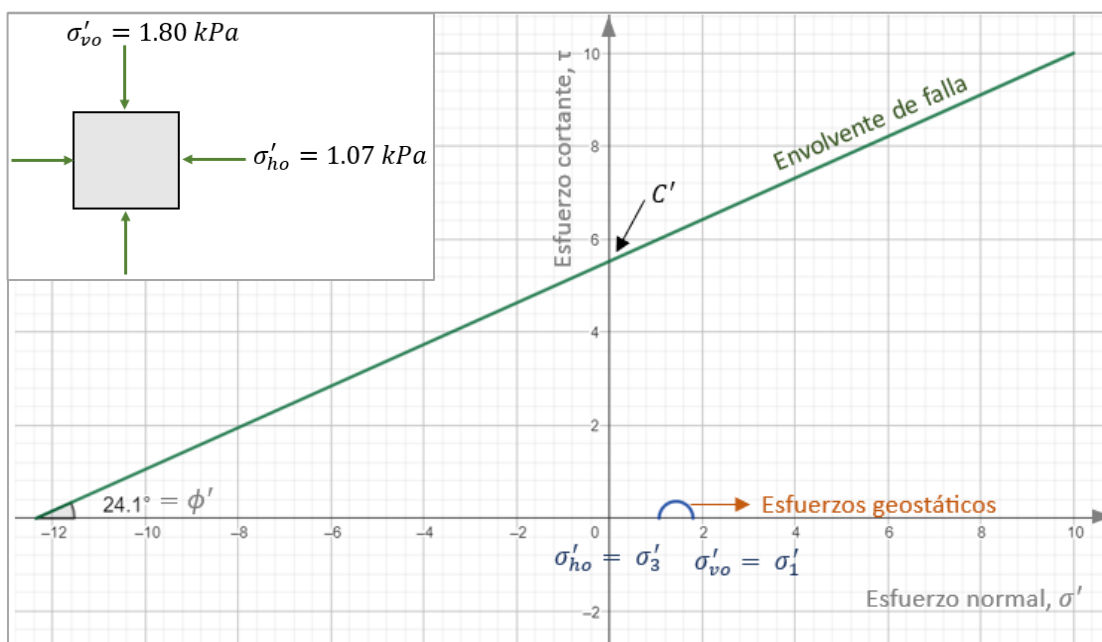


Figura 83. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M3. Fuente propia.

⊗ Modelo M4  $h_3 = 2.25 \text{ m}$

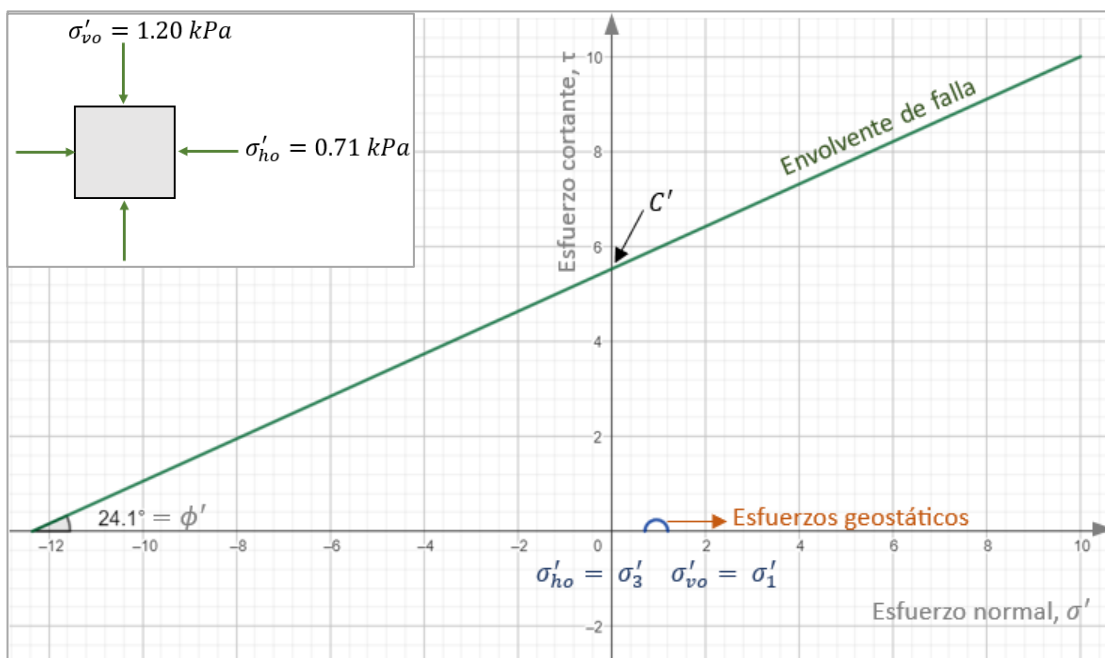
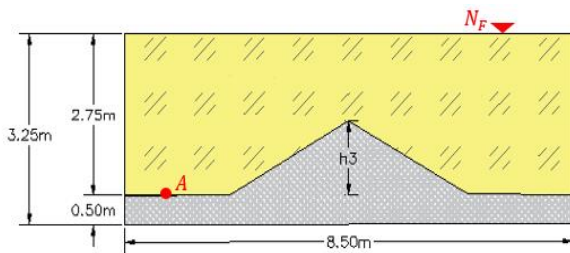


Figura 84. Estado de esfuerzos inicial - Modelo M4. Fuente propia.

### 6.8 Asentamiento por consolidación-Caso Unidimensional:

En la presente investigación, se generó el asentamiento del suelo mediante el proceso de consolidación, el cual se produce cuando el suelo es sometido a cargas y el agua presente en sus poros es expulsada. Este fenómeno provoca una disminución en el volumen del suelo y un asentamiento gradual a lo largo del tiempo.

Durante la prueba de consolidación, se aplicó un esfuerzo de preconsolidación de 30 kPa. Al comparar este valor con el esfuerzo final aplicado en el punto A (Figura 85), se obtiene el siguiente resultado:



$$\sigma'_A = \sigma - \mu \quad [26]$$

$$\sigma'_A = \gamma * h - \gamma_w * N_F \quad [27]$$

$$\sigma'_A = 14.62 \frac{kN}{m^3} * 2.75m - 9.81 \frac{kN}{m^3} * 2.75 m$$

$$\sigma'_A = 13.23 kPa$$

$$13.23 kPa < 30 kPa$$

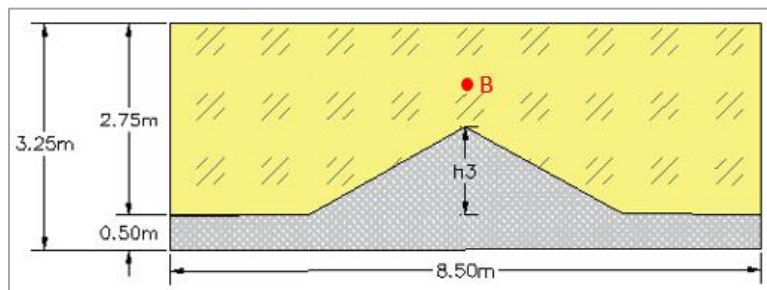
**Figura 85.** Profundidad del esfuerzo final-Prototipo.  
Fuente propia.

En este caso, se observó que el esfuerzo final es menor que el esfuerzo de preconsolidación ( $\sigma'_{final} < \sigma'_p$ ), lo que indica que los asentamientos se producen a lo largo de la línea de descarga:

$$\Delta Z = H_o \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{H_o}{1 + e_0} C_r \text{Log} \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{inicial}} \quad [30]$$

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{inicial} * 10^{\left(\frac{\Delta Z (1+e_0)}{H_o C_r}\right)} \quad [31]$$

Al utilizar la ecuación anterior en cada uno de los modelos, es posible calcular los esfuerzos verticales efectivos finales en el momento que se produce la primera fisura, para cada uno de los modelos en el punto B, lugar hasta donde se originó la fisura (Figura 86).



**Figura 86.** Profundidad hasta donde se originó las fisuras (B). Fuente propia.

⊗ Modelo M1  $h_3 = 1.25 \text{ m}$

**Tabla 18.** Esfuerzos geostáticos – Modelo M1. Fuente propia.

$\Delta Z$	Asentamiento en la formación de la primera fisura	0.00343 m
$H_o$	Altura del estrato de suelo	1.5 m
$G_s$	Gravedad específica	2.8
$W_i$	Humedad inicial de la muestra	80%
$e_0$	Relación de vacíos	2.24
$Cr$	Índice de recompresión	0.0075
$\sigma'_{inicial}$	Esfuerzo efectivo inicial	3.61 kPa
$\sigma'_{final}$	Esfuerzo efectivo final	4.53 kPa

⊗ Modelo M2  $h_3 = 1.75 \text{ m}$

**Tabla 19.** Esfuerzo geostáticos – Modelo M2. Fuente propia.

$\Delta Z$	Asentamiento en la formación de la primera fisura	0.00373 m
$H_o$	Altura del estrato de suelo	1 m
$G_s$	Gravedad específica	2.8
$W_i$	Humedad inicial de la muestra	79%
$e_0$	Relación de vacíos	2.21
$Cr$	Índice de recompresión	0.0075
$\sigma'_{inicial}$	Esfuerzo efectivo inicial	2.41 kPa
$\sigma'_{final}$	Esfuerzo efectivo final	3.47 kPa

⊗ Modelo M3  $h_3 = 2 \text{ m}$

**Tabla 20.** Esfuerzo geostáticos – Modelo M3. Fuente propia.

$\Delta Z$	Asentamiento en la formación de la primera fisura	0.00460 m
$H_o$	Altura del estrato de suelo	0.75 m
$G_s$	Gravedad específica	2.8
$W_i$	Humedad inicial de la muestra	80%
$e_0$	Relación de vacíos	2.24
$Cr$	Índice de recompresión	0.0075
$\sigma'_{inicial}$	Esfuerzo efectivo inicial	1.80 kPa
$\sigma'_{final}$	Esfuerzo efectivo final	3.32 kPa

⊗ Modelo M4  $h_3 = 2.25 \text{ m}$

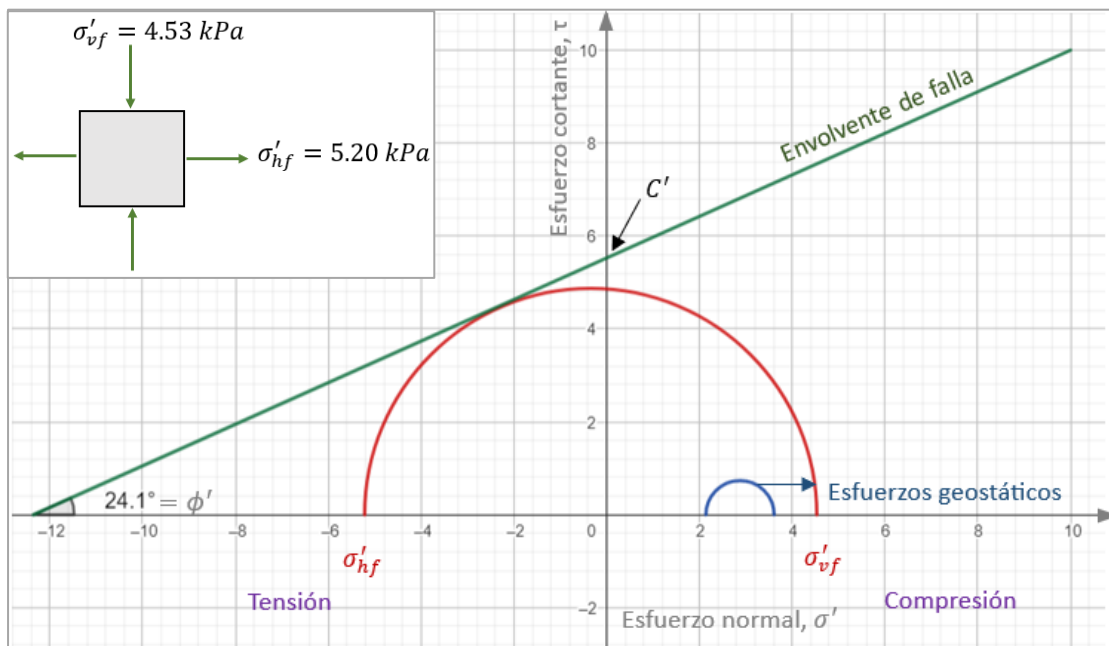
**Tabla 21.** Esfuerzo geostáticos – Modelo M3. Fuente propia.

$\Delta Z$	Asentamiento en la formación de la primera fisura	0.00449m
$H_o$	Altura del estrato de suelo	0.5 m

$G_s$	Gravedad específica	2.8
$W_i$	Humedad inicial de la muestra	78%
$e_0$	Relación de vacíos	2.18
$Cr$	Índice de recompresión	0.0075
$\sigma'_{inicial}$	Esfuerzo efectivo inicial	1.20 kPa
$\sigma'_{final}$	Esfuerzo efectivo final	2.90 kPa

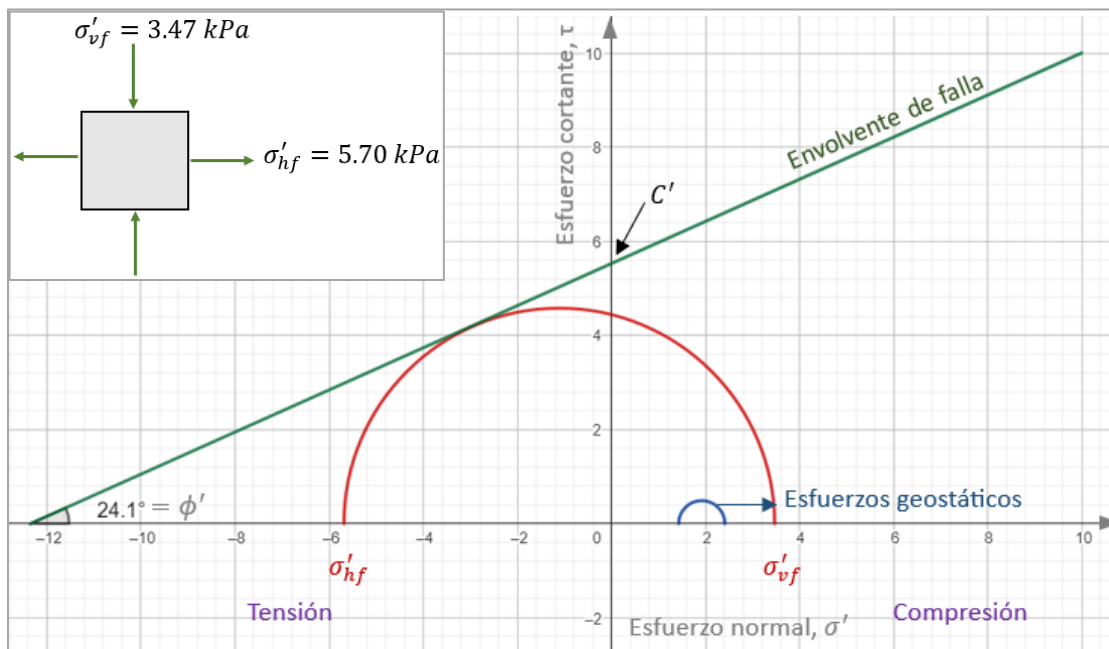
A partir de los datos previamente calculados y empleando la teoría de falla de Mohr-Coulomb, se determinó el esfuerzo de tensión en la falla (ver la Figura 87 a la Figura 90), considerando que:

- ✓ La falla ocurre cuando la combinación de esfuerzos cortantes y normales del círculo es tangente a la envolvente de falla.
- ⊗ Modelo M1  $h_3 = 1.25 \text{ m}$



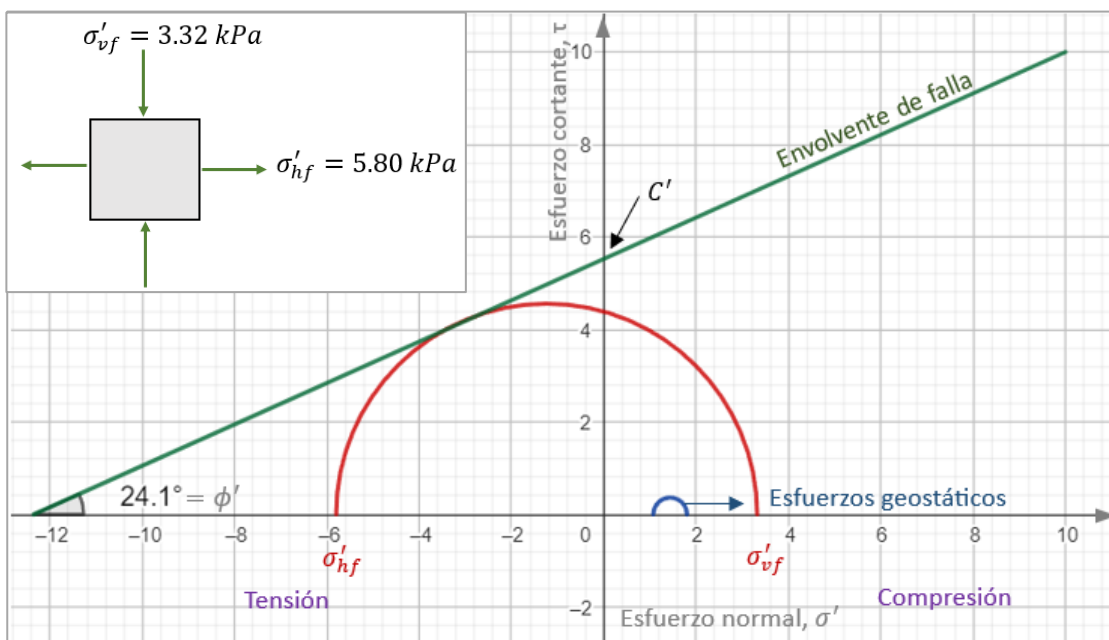
**Figura 87.** Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M1. Fuente propia.

- ⊗ Modelo M2  $h_3 = 1.75 \text{ m}$



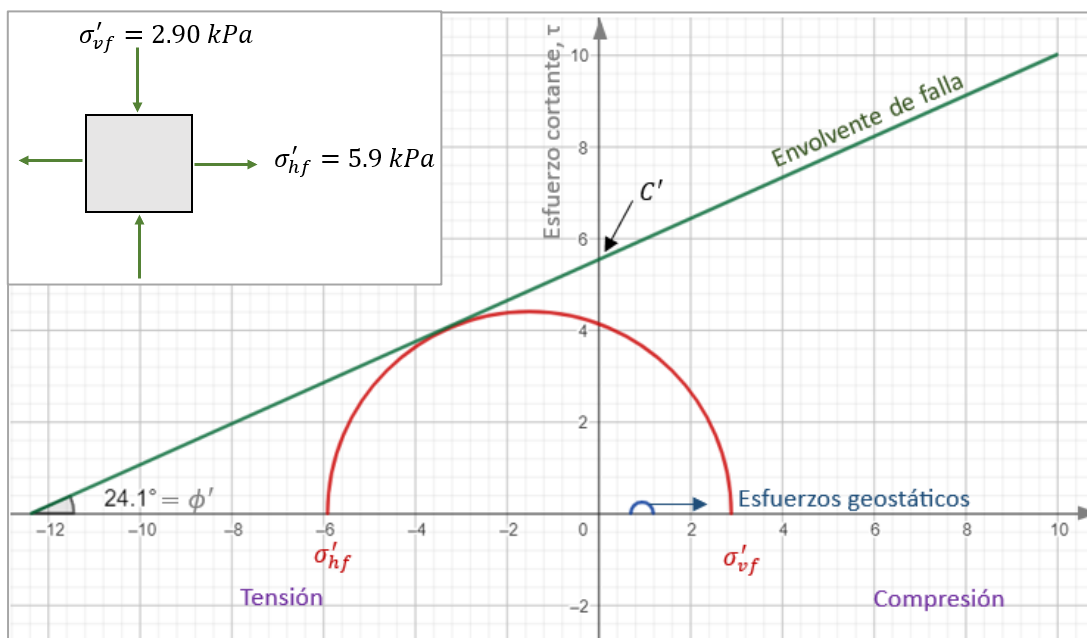
**Figura 88.** Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M2. Fuente propia.

⊗ Modelo M3  $h_3 = 2 \text{ m}$



**Figura 89.** Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M3. Fuente propia.

⊗ Modelo M4  $h_3 = 2.25 \text{ m}$



**Figura 90.** Esfuerzo de Tensión que genera la primera fisura - modelo M4. Fuente propia.

En las Figura 87 a la Figura 90 se presentan las envolventes de falla de Mohr-Coulomb, donde los círculos azules representan los esfuerzos geostáticos y los rojos corresponden a los esfuerzos en la falla resultantes de la combinación de esfuerzos cortantes y normales del círculo tangente a la envolvente. La Tabla 22 muestra los esfuerzos de tensión que generan la primera fisura en cada uno de los modelos:

**Tabla 22.** Esfuerzo de tensión que generan la primera fisura. Fuente propia.

M1-h3 = 1.25 m	5.20 kPa
M2-h3 = 1.75 m	5.70 kPa
M3-h3 = 2.00 m	5.80 kPa
M4-h3 = 2.25 m	5.90 kPa

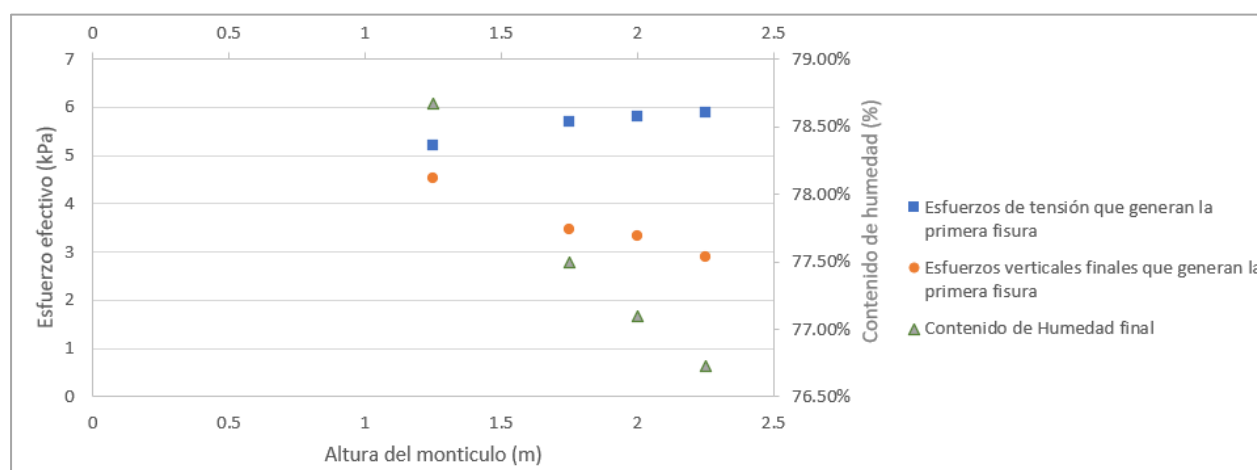
La Figura 91 ilustra la variación de la humedad en las muestras de suelo agrietado obtenidas al final del vuelo en la centrifuga geotécnica (sobre el montículo de la roca basal). Se observa que la variación en el contenido de humedad conlleva a cambios significativos en las propiedades mecánicas del suelo, incluida su resistencia a la tensión, lo que a su vez afecta los esfuerzos horizontales a los que está sometido el suelo.

Se encontró que, a medida que se pierde humedad, se requiere un mayor esfuerzo para generar una falla por tensión en el suelo. Aunque la resistencia a la tracción de un material debería ser independiente de la altura del montículo, en la investigación, se encontró que esto no sucedió. A pesar de utilizar el mismo material, la resistencia a la tracción varió.



Para explicar este fenómeno, se analizó la Tabla 22 y la Figura 91. Durante el vuelo en la centrifuga geotécnica, se produjo cierta desecación en las muestras (en la zona de propagación de la grieta), lo que provocó cambios en el contenido de humedad y afectó los resultados. Se observó que, a medida que se disminuye el contenido de humedad en el suelo, aumenta su resistencia a la tracción debido a la cohesión de la arcilla, que es una propiedad física de los suelos que proporciona una cementación aparente, lo que contribuye a su estabilidad.

Al reducir el contenido de humedad en las muestras, el esfuerzo vertical disminuye. Esto se debe a que, si las muestras tenían un exceso de presión de poros, al aplicarles una carga, en este caso geostática, se incrementa el esfuerzo necesario para disipar esa presión adicional.



**Figura 91.** Altura del montículo contra esfuerzo efectivo en la propagación de la primera grieta. Fuente propia.

Es importante destacar que las fallas por tensiones suelen manifestarse con mayor frecuencia cerca de la superficial, donde los esfuerzos horizontales presentan menor magnitud. Por otro lado, las fallas por corte se producen a mayor profundidad, tal y como lo indica el estudio llevado a cabo por (Barragán & Rodríguez, 2021).

## 7. Conclusiones:

La formación del suelo es un proceso complejo y multifásico que involucra varios factores clave, como la meteorización o alteración del material madre y el desarrollo del perfil del suelo. A lo largo de este proceso, se originan los perfiles del suelo a partir del material meteorizado, tanto en los suelos formados in situ como en aquellos transportados. Es importante tener en cuenta que las irregularidades presentes en la roca basal pueden impactar significativamente el estrato de suelo adyacente durante la formación del mismo.

Este estudio se enfocó específicamente en examinar la relación entre la existencia de un montículo en la roca basal y la aparición de fisuras de gran longitud en suelos finos, haciendo uso de la centrifuga geotécnica para lograr los objetivos planteados al inicio de la investigación. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas de este trabajo de investigación:

- ✓ La presencia de un montículo enterrado en el fondo de un estrato de suelo fino puede provocar un asentamiento diferencial, en el cual el volumen de la arcilla experimenta una variación menor en la cima del montículo ( $h_2$ ) que en el fondo de la depresión ( $h_1$ ). Esta diferencia genera esfuerzos de tensión hacia las laderas del montículo, lo que produce la fisuración del suelo. La causa de este fenómeno radica en que el suelo ubicado al pie del montículo arrastra el suelo situado en la cima del mismo.
- ✓ Durante el proceso de consolidación de las muestras de suelo, se generó una fisura principal abierta que se compone de segmentos y actúa como una única fisura relativamente rectilínea con forma de cuña a lo largo del montículo de la roca basal.
- ✓ Aunque la fisura inicial en cada modelo fue pequeña, la relajación de los esfuerzos horizontales a los lados de la roca basal propició la generación de una familia de fisuras y conforme la abertura en la superficie crecía, generó zonas de fallas activas paralelas a la grieta, las cuales pueden ser afectadas por la erosión del suelo.
- ✓ Las fisuras se desarrollaron en sentido descendente, desde la superficie hacia la profundidad del material. Este proceso se produjo como consecuencia de los esfuerzos de tensión que se ejercieron en las laderas del montículo, lo que propició un debilitamiento o discontinuidad en la estructura del material y generó la formación de las fisuras.
- ✓ Las fisuras se formaron por un asentamiento diferencial en el estrato de suelo fino, correspondiente a un modo de propagación de fisuras tipo I. La dirección de las grietas son un indicador del sentido de la tensión que las generó.
- ✓ Con el análisis del asentamiento del suelo fino mediante el sensor de deformación LVDT, se observó que:

- A menor altura del montículo el tiempo de formación de la fisura inicial aumenta.
  - A menor altura del montículo el tiempo de propagación final de la fisura aumenta.
  - A mayor altura del montículo la distancia de apertura de la fisura aumenta.
  - A mayor altura del montículo el asentamiento del suelo disminuye.
- 
- ✓ El análisis de imagen permitió evidenciar que durante el proceso de consolidación del suelo, se produjeron desplazamientos horizontales hacia ambos lados del montículo de la roca basal, lo que generó una fuerza tangencial que contribuyó a la formación de las fisuras. Además, se observaron desplazamientos verticales que dieron lugar a una deformación diferencial en las laderas del montículo, generando ligeros esfuerzos cortantes. En resumen, el análisis de imagen permitió identificar los procesos físicos que contribuyeron a la formación de las fisuras en el suelo.
  - ✓ La humedad del suelo juega un papel fundamental en sus propiedades mecánicas, incluyendo su resistencia a la tensión. Por lo tanto, los esfuerzos horizontales a los que está sometido el suelo también se ven afectados. En particular, se observó que a medida que se pierde humedad, se requiere un mayor esfuerzo para generar una falla por tensión en el suelo.
  - ✓ Para predecir con cierto grado de certeza la aparición y progreso de fisuras, es necesario realizar un estudio exhaustivo de la topografía de la roca basal. Por lo tanto, resulta crucial que los ingenieros geotécnicos conozcan ampliamente el fenómeno de agrietamiento en la zona. El uso de técnicas geotécnicas avanzadas, como la tomografía sísmica, puede ser muy útil para comprender mejor la naturaleza y extensión de las fisuras, con el fin de tomar en cuenta las consideraciones pertinentes y evitar repetir los problemas actuales.
  - ✓ La identificación y análisis temprano de la formación de fisuras en suelos finos debidas a la presencia de un montículo en la roca basal puede resultar clave para prevenir futuros deslizamientos o colapsos en el terreno. Esto no solo contribuirá a reducir los costos y riesgos a largo plazo, sino que también permitirá adoptar medidas preventivas o correctivas oportunamente, asegurando la estabilidad y seguridad de las construcciones y la protección del medio ambiente.

## **8. Recomendaciones:**

Luego de realizar esta investigación, se han formulado una serie de recomendaciones que se consideran importantes para próximas investigaciones:

- Para futuras modelaciones físicas variar diferentes condiciones como: la altura y las formas del montículo en la roca madre, la altura del estrato de suelo fino, el tipo de suelo o incluso diseñar suelos heterogéneos e incluir la influencia de posibles edificaciones cercanas a la propagación de la fisura.
- Proponer soluciones para mitigar los efectos del asentamiento y la formación de fisuras en el suelo fino ante la existencia de un montículo en la roca basal.
- Es recomendable incorporar un sistema de nivel de agua durante el montaje del modelo para mantener un nivel constante durante el vuelo. Esto es especialmente importante, ya que el contenido de humedad puede variar durante el vuelo y afectar los resultados obtenidos.

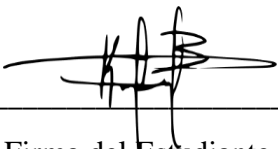
## 9. Bibliografía:

- Anderson, T. (1991). *Fracture mechanics Fundamentals and aplicaciones* (3er ed.). Library of congress cataloging in publication data by CRD press.
- Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M., & Hernández, F. (2014). Avances sobre el agrietamiento del suelo asociado al hundimiento regional en el Valle de México. *XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 8.
- Azizi, F. (1999). *Applied analyses in Geotechnics*. CRC Press.
- Barragán, E., & Rodríguez, J. (2021). Génesis y Mitigación del Agrietamiento del Subsuelo en el Suroriente del Valle de México. *XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica Del 16 Al 19 de Marzo 2021*, 11.
- Borchers, J., & Carpenter, M. (2014). Land Subsidence from Groundwater Use in California. In *Luhdorff & scalmanini consulting engineers*.
- Castiblanco, P, Lozada, C., Caicedo, B., & Thorel, L. (2016). A new climatic chamber adapted to the mini-centrifuge for simulating soil drying. *EUROFUGE 2016. 3rd European Conference on Physical Modelling in Geotechnics*, 111–115.
- Castiblanco, Paula. (2015). *MODELACIÓN FÍSICA A ESCALA REDUCIDA DEL FENÓMENO DE DESECACIÓN DE ARCILLAS (Ensamblaje cámara climática pequeña y ensayos a una gravedad)*.
- Conway, B. D. (2016). Land subsidence and earth fissures in south-central and southern Arizona, USA. *Hydrogeology Journal*, 24, 649–655.
- Densmore, J., Ellett, K., & Sneed, M. (2019). Evaluation of Land Subsidence and Ground Failures at Bicycle Basin , Fort Irwin National Training Center, California, 1992-2017. *USGS Science for a Changing World*, 1992–2017.
- Ferrians, O. (1966). Effects of the Earthquake of March 27, 1964, In the Copper River Basin Area, Alaska. In *US Government Printing Office*.
- Fleureau, J., Wei, X., Ighil-Ameur, L., Hattab, M., & Bicalho, K. (2015). Experimental Study of the Cracking Mechanisms of Clay during Drying. *Fundamentals to Applications in Geotechnics*, 2101–2108.
- Galloway, D., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States. *US Geological Survey Circular*.
- García, E. J., & Melentijevic, S. (2015). Centrífuga Geotécnica Geotechnical Centrifuge. *Revista Digital Del Cedex*, 85–94.
- Hajjar, A., Ouahbi, T., Eid, J., Taibi, S., Bouchemella, S., & Eid, J. (2019). Desiccation and cracking behaviour of clayey soils: Experimental characterization and mechanisms identification. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2019 - Proceedings, 2019-Septe(September)*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0998>
- Holzer, T. (1984). Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediment. *Reviews in Engineering Geology*, 67–105.
- Jachens, R. C., & Holzer, T. L. (1982). Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 998–1012.

- Jaime Morón, M. (2002). Dos aplicaciones de la modelación en centrifuga para suelos arcillosos: consolidación natural de mezclas y mecánica de fracturas en taludes verticales. *Spill Science and Technology Bulletin*, 8(1), 698–703. <https://doi.org/10.1155/2013/704806>
- Lachenbruch, A. (1962). Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. *Geological Society of America*, 261–262.
- Levatti, H., Prat, P., & Ledesma, A. (2007). Numerical modelling of formation and propagation of drying cracks in soils. *IX International Conference on Computational Plasticity*, 4.
- Lozada, C., Caicedo, B., & Thorel, L. (2015). Effects of cracks and desiccation on the bearing capacity of soil deposits. *Géotechnique Letters*, 112–117.
- Lozada, C, Thorel, L., & Caicedo, B. (2019). Bearing capacity of circular footings resting on unsaturated desiccated soils. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 19(3), 154–166.
- Lozada, Catalina, Garzón, L. X., & Campagnoli, S. X. (2021). Geotechnical centrifuge applications in the teaching of applied soil mechanics. *Revista Educación En Ingeniería*, 10(20), 10–15. <https://doi.org/10.26507/rei.v16n32.1188>
- Lozada, Catalina, Mendoza, C., & Amortegui, J. V. (2022). Physical and Numerical Modeling of Clayey Slopes Reinforced with Roots. *International Journal of Civil Engineering*, 20(9), 1115–1128. <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00733-0>
- Lu, N., Kim, T.-H., Sture, S., & Likos, W. J. (2009). Tensile Strength of Unsaturated Sand. *Journal of Engineering Mechanics*, 1410–1419.
- Michelle, E., Auvinet, G., & Matus, U. (2011). Caracterización de anomalías geotécnicas en las zonas lacustre y de transición de la ciudad de México. *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, 8.
- Morris, P., Graham, J., & Williams, D. (1992). Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 263–277.
- Quesada Balaguer, A. M. (2008). Resistencia a la tracción y parámetros de fractura en un suelo limoso. *Estudio Experimental*, 21(3), 295–316.
- Senatore, C., Wulfmeier, M., Vlahinić, I., Andrade, J., & Iagnemma, K. (2013). Design and implementation of a particle image velocimetry method for analysis of running gear-soil interaction. *Journal of Terramechanics*, 311–326.
- Vallejo, L. E. (1988). The brittle and ductile behavior of clay samples containing a crack under mixed mode loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 10(1), 73–78. [https://doi.org/10.1016/0167-8442\(88\)90058-4](https://doi.org/10.1016/0167-8442(88)90058-4)
- Vallejo, L. E. (2021). Teoría de la mecánica de fracturas. Curso internacional de verano, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Vesga, L., Caicedo, B., & Mesa, L. (Universidad de los A. (2003). *Agrietamiento Profundo en la Arcilla " Sabana de Bogotá "*. 6.
- Vesga, L., Vallejo, L., & Guerrero, L. (2008). DEM analysis of the crack propagation in brittle clays under uniaxial compression tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, octubre, 1405–1415.

Wang, J. (2014). Hydraulic fracturing of rock-fill dam. *John Wiley & Sons*, 199–219.

White, D. J., Take, W. A., & Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*, 619–631.



---

Firma del Estudiante



---

Firma del Director del Trabajo Dirigido



Aprobado: \_\_\_\_\_ Aplazado: \_\_\_\_\_ Rechazado: \_\_\_\_\_

Jurado 1: \_\_\_\_\_

Jurado 2: \_\_\_\_\_

Jurado 3: \_\_\_\_\_