

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO

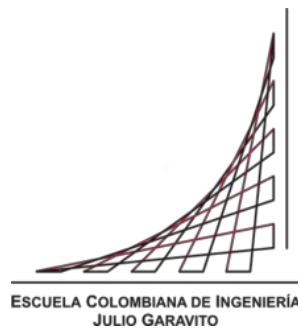
GARAVITO

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

ESTUDIO DE LA FORMACIÓN DE FISURAS DE DESECACIÓN POR MEDIO DE

FRACTALES



LAURA DANIELA MARTINEZ ORTIZ

EGNA KATHERINE VIJA ARÉVALO

DIRIGIDO POR:

PhD CATALINA LOZADA LOPEZ

BOGOTÁ D.C.

CUNDINAMARCA

BOGOTA D.C. 04 DE JUNIO

2020

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Contenido

Introducción	10
Objetivos	11
Objetivo General	11
Objetivos Específicos	11
Marco teórico	12
Fisuras de desecación	12
Definición de Fractal	15
Microestructura de los suelos.....	17
Problema	19
Metodología	21
Resultados	23
Etapa 1: Definición y caracterización del suelo que se va a emplear en la investigación, por medio de la nomenclatura SUCS	23
Etapa 2: Definición de cantidad, material y tamaño de los moldes sobre los cuales se va a poner las muestras y elaboración de estos.....	28
Etapa 3: Diseño y construcción de trípodes que permitan la toma de fotografías en las mismas posiciones a la misma distancia, para posteriormente realizar el análisis.....	30
Etapa 4: Definición y preparación de la muestra que se va a emplear y vertimiento en los moldes.	31

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 5: Monitoreo de las muestras por medio de fotos y mediciones de temperatura, humedad del ambiente y humedad del suelo.	35
Para la muestra del molde A	36
Para la muestra de molde B	37
Para la muestra de molde C	38
Para la muestra de molde D	39
Análisis de resultados	40
Etapa 6: Análisis general de la información obtenida.....	40
Etapa 7: Análisis de las imágenes obtenidas.....	48
Molde A:	52
Molde C:	59
Molde D:	65
Etapa 8: Análisis de las dimensiones fractales encontradas.....	76
Conclusiones.....	79
Etapa 9: Conclusión de acuerdo con los resultados obtenidos.....	79
ANEXOS	80
Bibliografía	83

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla de Figuras

Figura 1 Ejemplo de un fractal en la naturaleza (Helecho)	15
Figura 2 Curva de Koch.....	16
Figura 3 Triángulo de Sierpinski	16
Figura 4 Árbol de problemas, causas y consecuencias del problemas	20
Figura 5 Metodología para el desarrollo de la investigación.....	21
Figura 6 Carta de plasticidad. Recuperado de Geomecánica Capitulo 5 Clasificación de suelos, Universidad nacional	26
Figura 7 Tripodes construidos para cada muestra.....	30
Figura 8 Muestra del molde A	31
Figura 9 Muestra Molde B	31
Figura 10 Muestra del molde C	32
Figura 11 Muestra del molde D	32
Figura 12 Muestra del molde A	33
Figura 13 Muestra del molde B	33
Figura 14 Muestra del molde C	34
Figura 15 Muestra del molde D	34
Figura 16. Características de las mallas para el molde A	52
Figura 17. Mallas para la muestra A.....	53
Figura 18 Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 65.9 horas.	54
Figura 19. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 70.72 horas.	54

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Figura 20. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 73.6 horas.	55
Figura 21. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 91.87 horas.	55
Figura 22. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 136.75 horas	56
Figura 23. Características de las mallas para el molde C	59
Figura 24. Mallas para la muestra C	60
Figura 25. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 65.9 horas	60
Figura 26. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 70.72 horas	61
Figura 27. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 73.6 horas	61
Figura 28. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 91.87 horas	62
Figura 29. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 136.75horas	62
Figura 30 Características de las mallas para el molde D	65
Figura 31 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 65.90$ horas	66
Figura 32 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 70.72$ horas	66
Figura 33 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 73.60$ horas	67
Figura 34 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 91.87$ horas	67

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Figura 35 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 136.75$ horas	68
Figura 36 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 65.90$ horas	69
Figura 37 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 70.72$ horas	70
Figura 38 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 73.6$ horas	71
Figura 39 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 91.87$ horas	72
Figura 40 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 136.75$ horas	73

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla de gráficas

Gráfica 1 Porcentaje de humedad contra numero de golpes.....	25
Gráfica 2 Comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa al momento de tomar cada una de las fotos.....	35
Gráfica 3 Relación tiempo de paricion de las primeras fisuras y el diametro del molde	40
Gráfica 4. Tiempo Vs Humedad para cada muestra	47
Gráfica 5 Humedad a la que aparece la primera fisura en cada uno de los moldes.....	47
Gráfica 6 Método de J Días, (2019).....	49
Gráfica 7 Método de Gacel Rodríguez (2017).....	50
Gráfica 8 Método de L Vallejo (2009)	50
Gráfica 9. Relación L/l y N para cada tiempo en el molde A.....	57
Gráfica 10 Detalle Relación L/l y N para cada tiempo en el molde A	58
Gráfica 11. Relación L/l y N para cada uno de los tiempos en el molde C	64
Gráfica 12 Relación entre L/l y N para cada uno de los tiempos en el molde D.....	75
Gráfica 13. Relación de la dimensión fractal y el tamaño del molde en todos los tiempos	77
Gráfica 14. Relación de la dimensión fractal y el tiempo en cada uno de los moldes.....	78

Tabla de tablas

Tabla 1 Resultados para el ensayo de límite líquido.....	24
Tabla 2 Resultados para el ensayo de límite plástico	25
Tabla 3 Dimensiones molde A.....	28
Tabla 4 Dimensiones molde B.....	28
Tabla 5 Dimensiones molde C.....	28
Tabla 6 Dimensiones molde D.....	29

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 7 Masa de los moldes en Kg	29
Tabla 8 fecha y hora de los registros de control junto con su humedad y temperatura correspondiente	35
Tabla 9 Evolucion de las muestras del molde.....	36
Tabla 10 Evolucion de las muestras del molde B.....	37
Tabla 11 Evolucion de las muestras del molde C.....	38
Tabla 12 Evolucion de las muestras del molde D.....	39
Tabla 13 Datos correspondiente al Molde A	41
Tabla 14 Datos de masa seca y humeda de la muestra usada para llenar los moldes en el momento inicial.....	42
Tabla 15 Humedad inicial promedio del suelo	43
Tabla 16 Resumen de los cálculos obtenidos para cada control del molde A	44
Tabla 17 Datos correspondiente al Molde B.....	44
Tabla 18 Resumen de los cálculos obtenidos para cada control del molde B	44
Tabla 19 Datos correspondiente al Molde C.....	45
Tabla 20 Resumen de los cálculos obtenidos para cada control del molde C	45
Tabla 21 Datos correspondiente al Molde D	46
Tabla 22 Datos correspondiente al Molde D	46
Tabla 23 Ejemplo de los distintas relaciones para el metodo de cajas	49
Tabla 24 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 65.90$ horas	69
Tabla 25 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 70.72$ horas	70

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 26 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 73.60$ horas	71
Tabla 27 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 91.87$...	72
Tabla 28 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 136.75$ horas	73
Tabla 29 Resumen de las dimensiones fractales encontradas en cada tiempo y en cada molde con su ajuste.....	76
Tabla 30 Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la $\text{Log}(L/l)$ y $\text{Log}(N)$ para el molde A.....	80
Tabla 31. Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la $\text{Log}(L/l)$ y $\text{Log}(N)$ para el molde C.....	81
Tabla 32. Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la $\text{Log}(L/l)$ y $\text{Log}(N)$ para el molde D.....	82

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Introducción

Las grietas por desecación en suelos son un fenómeno de estudio muy relevante, por el cuidado que demanda en obras de ingeniería, ya que estas son frecuentes en suelos arcillosos apareciendo especialmente en temporadas de sequía, es aquí donde radica la necesidad de describir la respuesta de estas grietas a factores ambientales, a la composición mineralógica del suelo y otros factores.

En el presente trabajo de investigación se tiene como objetivo analizar las fisuras por desecación que se forman en mezclas de arcilla y la influencia que tiene el tamaño del molde en la formación de estas, esto se realizó por medio de matemática fractal, la cual permite explicar un comportamiento caótico de forma racional, además de estudiar las características geométricas de este fenómeno referente a su relación con propiedades y parámetros del suelo.

Los fractales tienen una estructura irregular, poseen características como la autosimilitud y dimensión; esto permite explicar las fisuras generadas en la muestra por medio de las propiedades geométricas o matemáticas de los fractales, esta investigación se enfoca en la determinación de la dimensión fractal y su relación con propiedades físicas del suelo como la humedad presente en este o el tiempo de formación de las grietas, proponiendo los fractales como un método de análisis sencillo para describir teóricamente el proceso de formación de fisuras, además de cuantificar la influencia de los factores que las generan y estudiar su desarrollo con relación al tiempo de exposición de la superficie del suelo al ambiente, es aquí donde se deben tener en cuenta la influencia de variables como, la temperatura ambiente o la humedad relativa, las cuales influyen en la velocidad de desecación, además del cambio volumétrico y los esfuerzos de tensión que estos generan en el suelo o en la muestra.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Objetivos

Objetivo General

Determinar la influencia del tamaño del molde en la formación de fisuras de desecación por medio del uso de la matemática fractal.

Objetivos Específicos

- Elaborar un marco teórico sobre la formación de fisuras el uso de la matemática fractal.
- Estudiar visualmente el efecto del tamaño del molde en la formación de fisuras de desecación en muestras de laboratorio.
- Determinar la influencia del tamaño de la muestra en la dimensión fractal, analizando para cada muestra esta característica y como esta se relaciona con su tamaño.
- Evaluar la correspondencia entre las estructuras fractales con la formación de grietas por desecación en arcillas.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Marco teórico

Fisuras de desecación

Las fisuras por desecación es un fenómeno de agrietamiento en el suelo debido al cambio de la humedad en el mismo. Este fenómeno de agrietamiento tiene una alta complejidad ya que depende de más de una variable y no se conoce la influencia de cada una de ellas de manera precisa en la formación de las grietas, algunas de estas variables son la humedad del suelo, la temperatura, la humedad relativa, la resistencia a la tracción del suelo, sus propiedades hidráulicas, entre otras. Por estas razones poder estudiar el agrietamiento y predecirlo se convierte en un problema complejo, como conocer la forma en la que se propagan y se forman las fisuras, sin embargo, se han realizado algunos estudios sobre su morfología, formas de inicio y propagación, así como de las variables que interviene en este proceso, estos estudios se pueden hacer en diferentes escalas, a nivel macro, intermedio o micro, para el caso de esta investigación se realiza el estudio a escala intermedia. Algunos de los estudios que se conocen son: Modelo de Lee et al (1988) el cual estudia la dirección de propagación de las fisuras, el modelo de Morris et al (1992), que busca ver la propagación de las fisuras de acuerdo con propiedades mecánicas para suelos parcialmente saturados, haciendo tres tipos de análisis, teoría lineal elástica, mecánica de fractura lineal elástica y relaciones de resistencia al corte. Otro de los modelos son el modelo de Bronswijk (1988) y el modelo de Abu-Hejleh y -znidarcic (1995). El modelo de Bronswijk modela el agrietamiento, el balance de agua y el progresivo hundimiento que se genera, por otro el modelo de Abu-Hejleh y -znidarcic describe el agrietamiento teniendo en cuenta la consolidación, desecación, succión para suelos en condición saturada.

Desde el punto de vista de la resistencia a la tracción, en la cual influyen dos variables importantes, la succión y el grado de saturación, el proceso de rotura por tracción inicia en un suelo con succión

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

uniforme, luego al aplicar tracción las partículas se ubican de forma paralela y se presenta un distanciamiento entre ellas, por lo que se incrementa la succión para mantenerlas unidas, posteriormente se produce la rotura parcial de los enlaces y la fractura de grupos de partículas, finalmente se produce la rotura total y se forman láminas de extremos angulosos paralelos (Cuadrado, 2013).

Otra forma de abordar el estudio de las fisuras es por medio de la mecánica de fractura, la cual no usa como base únicamente la teoría de la resistencia a la tracción, sino que agrega un parámetro muy importante, la energía presente en la muestra y cómo se comporta está en el momento de la deformación y la fisuración, esta teoría se usa para comprender la fractura de sólidos por medio de la propagación de grietas, se estudian usualmente materiales frágiles o cuasi frágiles, de altas resistencias y alta rigidez, como el concreto y el acero. De acuerdo con esta metodología la fractura, que corresponde al momento en el que termina la deformación plástica, es producto de la propagación de fisuras, estas fracturas pueden ser frágiles o dúctiles, dependiendo del comportamiento que se evidencie en la zona cercana a la fractura y no de acuerdo con el comportamiento general, esto se explica en el artículo Conceptos básicos de la mecánica de fractura (2010). Adicionalmente estas fracturas pueden ser clasificadas como lentas o rápidas, en el caso de las fracturas lentas, estas se conocen como fracturas estables, sin embargo, estas pueden pasar a ser rápidas, las cuales se conocen como fracturas inestables.

El concepto de la energía en la mecánica de fracturas fue introducido por Griffith, basándose en la primera ley de la termodinámica la cual enuncia que en un sistema cerrado la energía se conserva. Para poder observar la relación entre las fisuras y la energía, Griffith realizó un ensayo sobre vidrio (fractura frágil, elástica), donde definió una energía superficial y una energía de deformación, el experimento consistía en realizar un ensayo a tracción de dos probetas, una con una pequeña fisura

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

y otra sin fisuras, los resultados mostraron que en la probeta con fisuras se requería de menor carga para llegar a la misma deformación que en la probeta sin fisura y llegaron a la conclusión de que la formación de fisuras consume energía. SA (2010) “la fisura ocurrirá cuando la velocidad en que disminuye la energía potencial elástica es igual a la velocidad con la que es absorbida para generar nuevas superficies de fisuras” (p. 3).

Teniendo en cuenta la teoría mecánica de fractura, los suelos arcillosos de acuerdo con Ávila (2004) pueden ser de modo de apertura o modo uno en la clasificación hecha por Broek, donde se aplican fuerzas normales de tensión al plano de fractura, por lo que la fisura se abre. Basados en ensayos de deformación controlada realizados por Ávila (2014) en arcillas de Bogotá, a un menor tamaño de grieta inicial se obtiene una resistencia mayor. Un aspecto importante que incluye esta teoría es el efecto del tamaño de la muestra, donde para muestras más grandes se tiene una resistencia menor a la fracturación, así como la influencia de la geometría.

El agrietamiento también se puede estudiar de acuerdo con los patrones que se puedan llegar a generar en su geometría, de acuerdo con Agustín Cuadrado (2013) los patrones del proceso de fisuración, muestran características del estado de la estructura del suelo y de acuerdo con su tratamiento si se presentan diferentes patrones en suelos tratados de diferente manera, se puede indicar que las propiedades de juntos pueden ser distintas, sin embargo se ha notado que las formas geométricas en distintos materiales y en distintas escalas presentan ciertas similitudes. Para el caso de esta investigación se analizará la forma de estas en dos dimensiones, sin tener en cuenta la profundidad.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Definición de Fractal

Los fractales son figuras que se caracterizan por tener la siguiente particularidad: independientemente de la escala a la que se vea la figura, esta presenta un mismo patrón que se remonta al patrón de inicio, esta característica se llama la auto similitud, por lo cual se pueden tener elementos de los cuales, al extraer partes de ellos, estas son idénticamente iguales a las iniciales, solo se diferencian por la escala (Gustavo, 2000). Para poder entender mejor esta característica se verán algunos ejemplos de fractales.



Figura 1 Ejemplo de un fractal en la naturaleza (Helecho)

Recuperado de <https://www.publicdomainpictures.net>

En la figura 1 se puede apreciar que al ir acercándose a la imagen se tiene de forma recurrente la misma figura, teniendo un detalle de este infinito teóricamente.

Dentro de estas figuras existen otros ejemplos de construcciones matemáticas de fractales como la curva de Koch, el triángulo de Sierpinski, entre otros.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Curva de Koch

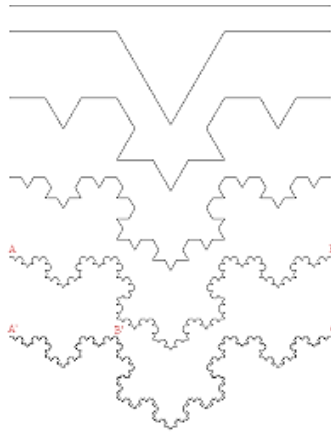


Figura 2 Curva de Koch

Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Koch_snowflake0192.png

Triángulo de Sierpinski

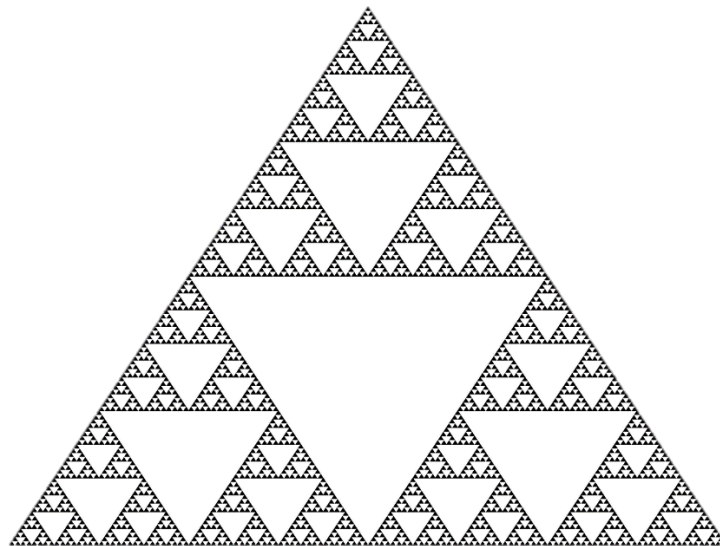


Figura 3 Triángulo de Sierpinski

Recuperado de <https://pixabay.com/es/vectors/matematicas-sierpinski-triangulo-696806/>

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

La segunda característica de los fractales se refiere a la dimensión. Las dimensiones de forma general se definen de la siguiente manera, para un punto su dimensión corresponde a cero, para una línea la dimensión es uno, para un área es la segunda dimensión y para un volumen es la tercera dimensión, sin embargo, esto en la geometría fractal no corresponde de forma exacta, ya que esta considera dimensiones intermedias por lo que se pueden tener dimensiones de 1,5. Esto se puede ver por ejemplo en la figura del triángulo de Sierpinski, en la cual después de tener muchas repeticiones constructivas de la misma se llega a tener bordes, que depende del nivel de detalle, se pueden ver como áreas o no, por lo que para esta figura es complejo definirla como de dimensión uno o dos y por lo tanto toma una dimensión intermedia entre estas (Gustavo, 2000).

Para poder calcular la dimensión fractal se emplea la siguiente fórmula:

$$D = \frac{\ln N}{\ln 1/r}$$

Donde:

$D =$ *dimensión Fractal*

$N =$ *numero de elementos nuevos de cada proceso*

$\frac{1}{r} =$ *escala a la que se a reducido la escala inicial*

Microestructura de los suelos

Arreglo geométrico de los elementos estructurales

El suelo es un material complejo y heterogéneo con componentes o elementos estructurales que están espacialmente arreglados en forma continua en un patrón tridimensional, la caracterización de este patrón incluye la distribución de vacíos (Diaz Rodrigues J. Abraham, 2019).

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Encontrar un orden a este problema puede ser complicado, pero los fractales dan una representación muy cercana a este problema, el tipo de fractales que se va a utilizar serán los fractales naturales los cuales son auto similares solo en el sentido estadístico, es decir, si se toma un conjunto suficientemente grande de objetos de la misma clase y se amplía una porción de alguno de ellos, es posible que no sea idéntico al original, pero la probabilidad de encontrar algún otro miembro en la colección es alto, presentando autosimilitud solo en el sentido estadístico. Ya que los fractales que se van a estudiar son naturales se determinara la dimensión fractal por el método de conteo de cajas, ya que aquí se desconoce el generador y el iniciador, el procedimiento consiste en:

- Tomar la figura a analizar y colocarla en una caja de longitud L, sobre la que se construye una malla de cuadrados en la que cada segmento tiene una longitud l.
- Se cuenta las cajas que tienen alguna parte de la figura, obteniendo un número N.
- Este procedimiento se repite varias veces, utilizando mallas cada vez más pequeñas.
- Estos resultados se dibujan en papel logarítmico con N Vs L/l, se realiza el ajuste de los datos en una recta cuya pendiente es la dimensión fractal estimada.

Esto indica la siguiente relación entre las dos variables:

$$N \cong \left(\frac{L}{l}\right)^{D_c}$$

La ecuación anterior implica que sin importar lo complicado de la figura geométrica, se puede describir mediante un número, facilitando el uso de esta en expresiones matemáticas que relación la geometría con propiedades físicas.(Diaz Rodrigues J. Abraham, 2019)

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Problema

En el desarrollo de la ingeniería y por ende en la geotecnia la incertidumbre a la hora de modelar los fenómenos en el laboratorio además de la cuantificación de esta en el ámbito académico a significado un gran reto desde los inicios de esta práctica, de aquí radica la importancia de realizar modelos matemáticos y prácticas de laboratorio confiables, que representen los sistemas suelo-estructura lo más aproximado a la realidad posible, para lograrlo es necesario conocer todos los factores que afectan los resultados de los modelos y el porcentaje de influencia de cada uno de estos, el objetivo de esta investigación es conocer la influencia del tamaño de los moldes en la formación de fisuras por medio de los fractales, esto permitirá determinar si la influencia de estos es significativa en los resultados, además de si es necesario su evaluación o por el contrario es poco influyente.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

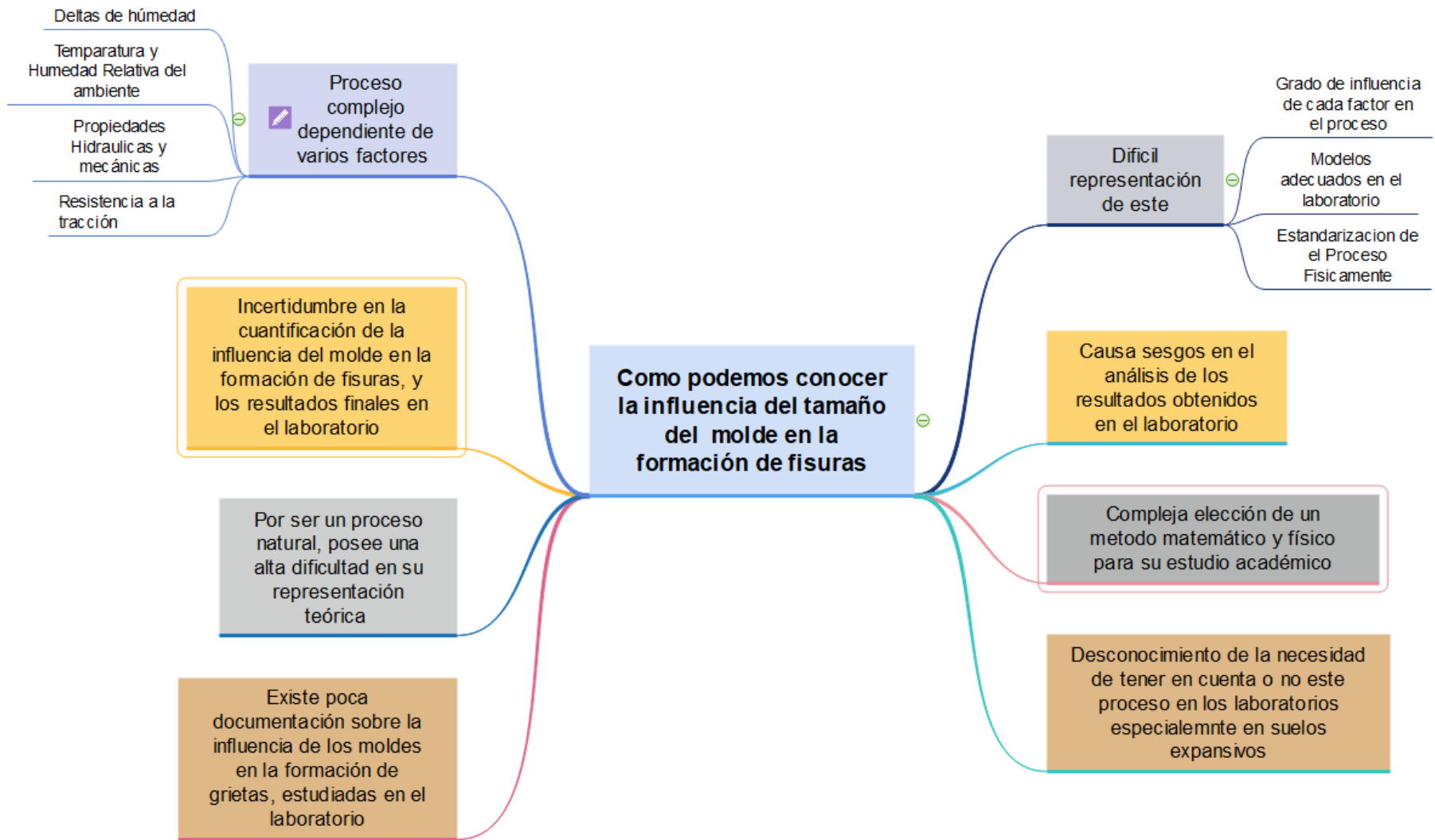


Figura 4 Árbol de problemas, causas y consecuencias del problemas

Metodología

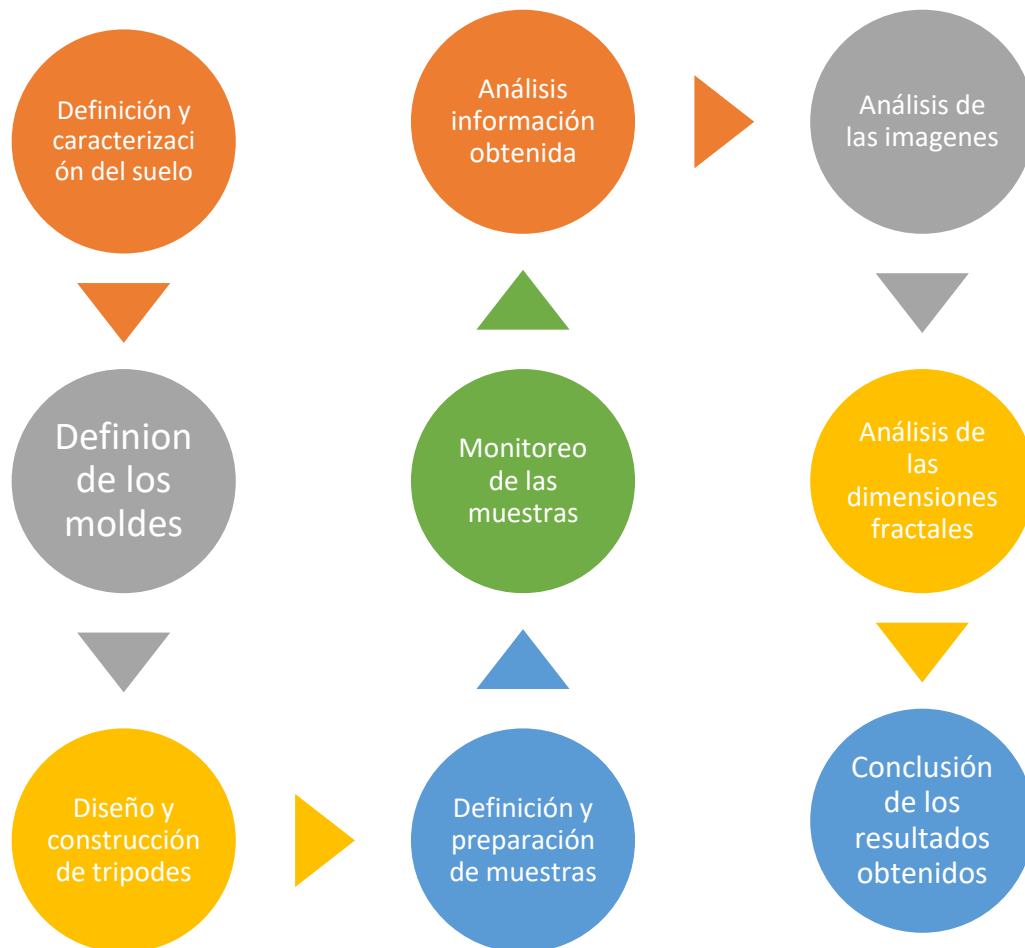


Figura 5 Metodología para el desarrollo de la investigación

- Etapa 1: Definición y caracterización del suelo que se va a emplear en la investigación, por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS.
- Etapa 2: Definición de cantidad, material y tamaño de los moldes sobre los cuales se va a poner las muestras y elaboración de estos.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

- Etapa 3: Diseño y construcción de trípodes que permitan la toma de fotografías en las mismas posiciones a la misma distancia, para posteriormente realizar el análisis.
- Etapa 4: Definición y preparación de la muestra que se va a emplear y vertimiento en los moldes.
- Etapa 5: Monitoreo de las muestras por medio de fotos y mediciones de temperatura, humedad del ambiente y humedad del suelo.
- Etapa 6: Análisis general de la información obtenida.
- Etapa 7: Análisis de las imágenes obtenidas.
- Etapa 8: Análisis de las dimensiones fractales encontradas.
- Etapa 9: Conclusión de acuerdo con los resultados obtenidos.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Resultados

Etapa 1: Definición y caracterización del suelo que se va a emplear en la investigación, por medio de la nomenclatura SUCS

Para la realización de las muestras se realizó una mezcla de Caolín y Bentonita, 70% y 30% correspondientemente.

El caolín es una arcilla de color blanco, con brillo mate, cuya estructura química corresponde a silicato de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), en la cual el mineral principal es caolinita y presenta plasticidad entre baja y moderada. Tiene propiedades como aislante eléctrico, resiste altas temperaturas, no es tóxico, no es abrasivo, presenta conductividad térmica reducida, se usa en la industria de la agricultura y construcción (secretaría de economía México, 2014, p.1)

La Bentonita también es una arcilla, silicato de aluminio hidratado, su principal mineral es la montmorillonita, tiene colores entre café claro y amarillo verdoso a café oscuro. Se usa en la construcción en el área de perforaciones, para la fabricación de materiales de construcción, también como agente ligante en arenas de fundición, en cosméticos, entre otros. (Protokimica, 2020)

Para su clasificación en el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS, sabiendo que son suelos finos arcillosos con tamaño de partícula menor a 0.075mm (tamiz No. 200), se realizaron ensayos de los límites de Atterberg para determinar el límite líquido y el límite plástico y con ello clasificar el suelo. Para el límite líquido se usa la cazuela de Casagrande, hallando la humedad para la cual la muestra en la cazuela separada por 13 mm a los 25 golpes se cierra. Para el límite de plasticidad se realizaron rollos de arcilla hasta que estos se empiezan a cuartear.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Los datos del ensayo se presentan a continuación:

Límite líquido

Tabla 1 Resultados para el ensayo de límite líquido

	Límite líquido		
M recipiente (g)	7,11	7,22	7,24
No golpes	34	26	20
M recipiente + suelo húmedo (g)	15,48	16,86	16,15
M recipiente + suelo seco (g)	10,51	10,99	10,64
M suelo seco (g)	3,4	3,77	3,4
M agua (g)	4,97	5,87	5,51
W %	146,18	155,70	162,06

Se preparo la mezcla con Caolín y bentonita en las proporciones anteriormente estipuladas y se realizó en ensayo de la cazuela de Casagrande, y posteriormente se tomó un recipiente para colocar la muestra de cada uno de los ensayos realizados, se pesó el recipiente, el recipiente más la muestra húmeda y se llevó al horno, después de seco se tomó nuevamente su peso y se calculó el peso de agua y la humedad.

Teniendo en cuenta:

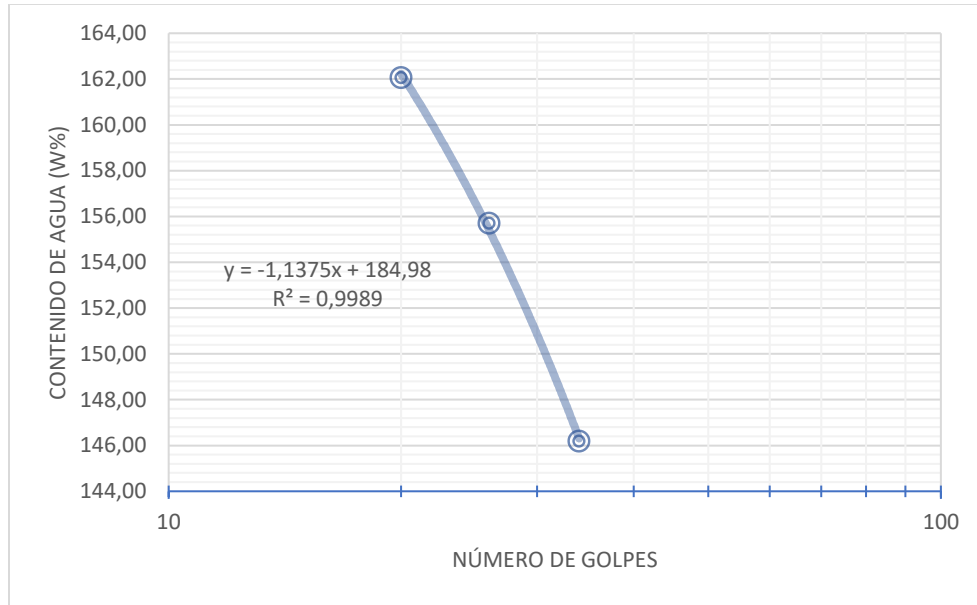
$$M_{agua} = M_{recipiente+suelo\ humedo} - M_{suelo\ seco} - M_{recipiente}$$

$$W\% = \frac{M_{agua}}{M_{Suelo\ seco}}$$

Con los datos obtenidos se realizó la siguiente gráfica:

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Gráfica 1 Porcentaje de humedad contra numero de golpes

Se calculo la humedad como se ha dicho anteriormente, y se graficó contra el número de golpes en escala logarítmica, y se halla la ecuación de la recta para encontrar la humedad de 25 golpes.

Para $x = 25$ golpes se obtiene una humedad W% de 156.54 %

Límite plástico:

Tabla 2 Resultados para el ensayo de límite plástico

	Límite plástico	
M recipiente (g)	11,07	11,05
M recipiente + suelo húmedo (g)	17,69	17,88
M recipiente + suelo seco (g)	15,2	15,3
M suelo seco (g)	4,13	4,25
M agua (g)	2,49	2,58
W %	60,29	60,71

Se preparo la mezcla con Caolín y bentonita en las proporciones anteriormente estipuladas y se realizaron los rollos, y posteriormente se tomó un recipiente para colocar la muestra de cada uno

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

de los ensayos realizados, se pesó el recipiente, el recipiente más la muestra húmeda y se llevó al horno, después de seco se tomó nuevamente su peso y se calculó el peso de agua y la humedad.

$$LP = \frac{60.29 + 60.71}{2} = 60.5 \%$$

El límite líquido hallado para la muestra es de 60.5%

El índice de plasticidad hallado fue de 96.04%

$$IP = LL - LP = 156.54\% - 60.5\% = 96.04\%$$

Carta de plasticidad

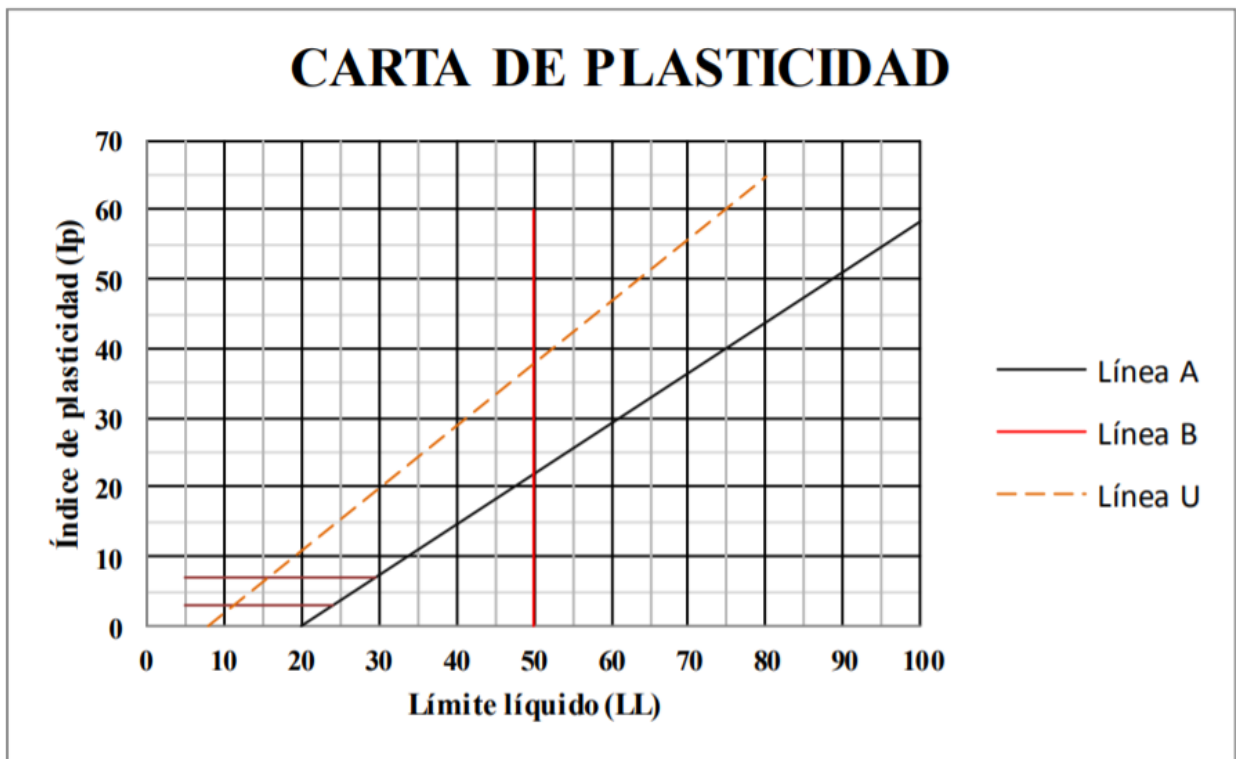


Figura 6 Carta de plasticidad. Recuperado de Geomecánica Capítulo 5 Clasificación de suelos, Universidad nacional

Aplicando la ecuación de la línea A se tiene:

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

$$IP = 0.73(LL - 20)$$

$$IP = 0.73(156.54 - 20)$$

$$IP = 99.67\%$$

Por lo tanto, la muestra es una arcilla limosa y debido a que presenta un límite líquido mayor a 50% es de alta plasticidad, de acuerdo con la nomenclatura su clasificación es MH.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 2: Definición de cantidad, material y tamaño de los moldes sobre los cuales se va a poner las muestras y elaboración de estos.

Se realizaron 4 moldes de forma circular, en acrílico, cada uno con distinto diámetro, pero misma altura, a los cuales se les tomaron tres medidas de los diámetros y tres medidas de las alturas para obtener un diámetro y altura promedio, los resultados se ilustran en las siguientes tablas (medidas en mm):

Tabla 3 Dimensiones molde A

Molde A			
D1	90,48	H1	14,45
D2	91,46	H2	14,39
D3	91,43	H3	14,20
D Prom	91,12	H prom	14,35

Tabla 4 Dimensiones molde B

Molde B			
D1	189,53	H1	14,52
D2	189,34	H2	14,50
D3	189,29	H3	14,42
D Prom	189,39	H prom	14,48

Tabla 5 Dimensiones molde C

Molde C			
D1	289,77	H1	14,56
D2	289,26	H2	14,47
D3	289,17	H3	14,35
D Prom	289,40	H prom	14,46

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 6 Dimensiones molde D

Molde D			
D1	390,00	H1	14,28
D2	387,00	H2	14,34
D3	388,00	H3	14,23
D Prom	388,33	H prom	14,28

La masa de los moldes es:

Tabla 7 Masa de los moldes en Kg

Molde	Masa (Kg)
A	0,053
B	0,177
C	0,316
D	0,671

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 3: Diseño y construcción de trípodes que permitan la toma de fotografías en las mismas posiciones a la misma distancia, para posteriormente realizar el análisis.

Para tomar las fotos de las muestras se construyeron trípodes de balsa y se realizaron marcas en la mesa para asegurar que en cada control estuvieran en la misma posición al instante de tomar las fotografías, además se instalaron unas tapas en la superficie de los trípodes con un orificio que permitía a la cámara tener el mismo ángulo en cada toma y control de imagen.



Figura 7 Trípodes contruidos para cada muestra

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 4: Definición y preparación de la muestra que se va a emplear y vertimiento en los moldes.

Para la realización de la muestra que se empleó en el ensayo, se preparó una mezcla de Caolín y bentonita en las proporciones que se han mencionado antes, con una humedad de 1.5 veces el límite líquido, teniendo una humedad inicial teórica de 234.8% , la cual luego fue verificada y se obtuvo un valor de 239%.

La mezcla en los moldes quedó de la siguiente forma:



Figura 8 Muestra del molde A



Figura 9 Muestra Molde B

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Figura 10 Muestra del molde C



Figura 11 Muestra del molde D

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

El resultado final se evidencia en las fotos que se presentan a continuación:



Figura 12 Muestra del molde A



Figura 13 Muestra del molde B

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Figura 14 Muestra del molde C



Figura 15 Muestra del molde D

SEMILLERO DE GEOTECNIA

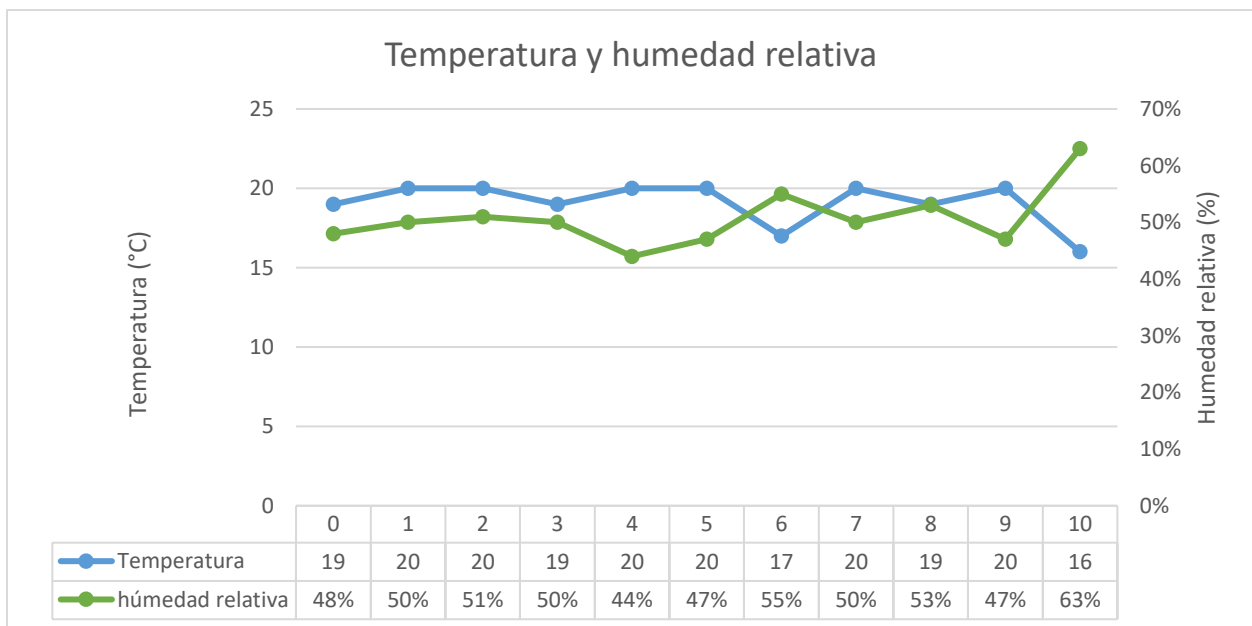
TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 5: Monitoreo de las muestras por medio de fotos y mediciones de temperatura, humedad del ambiente y humedad del suelo.

En cada uno de los controles que se realizaron se tomó la humedad relativa, la temperatura y el peso, en la siguiente tabla están los resultados y posteriormente las fotografías para cada tiempo.

Tabla 8 fecha y hora de los registros de control junto con su humedad y temperatura correspondiente

#control	Fecha	Tiempo (h)	humedad relativa	Temperatura (°C)
0	10/03/2020 16:01	0	48%	19
1	11/03/2020 11:24	19,38	50%	20
2	11/03/2020 16:13	24,20	51%	20
3	12/03/2020 11:09	43,13	50%	19
4	12/03/2020 14:46	46,75	44%	20
5	12/03/2020 16:20	48,32	47%	20
6	13/03/2020 9:55	65,90	55%	17
7	13/03/2020 14:44	70,72	50%	20
8	13/03/2020 17:37	73,60	53%	19
9	14/03/2020 11:53	91,87	47%	20
10	16/03/2020 8:46	136,75	63%	16



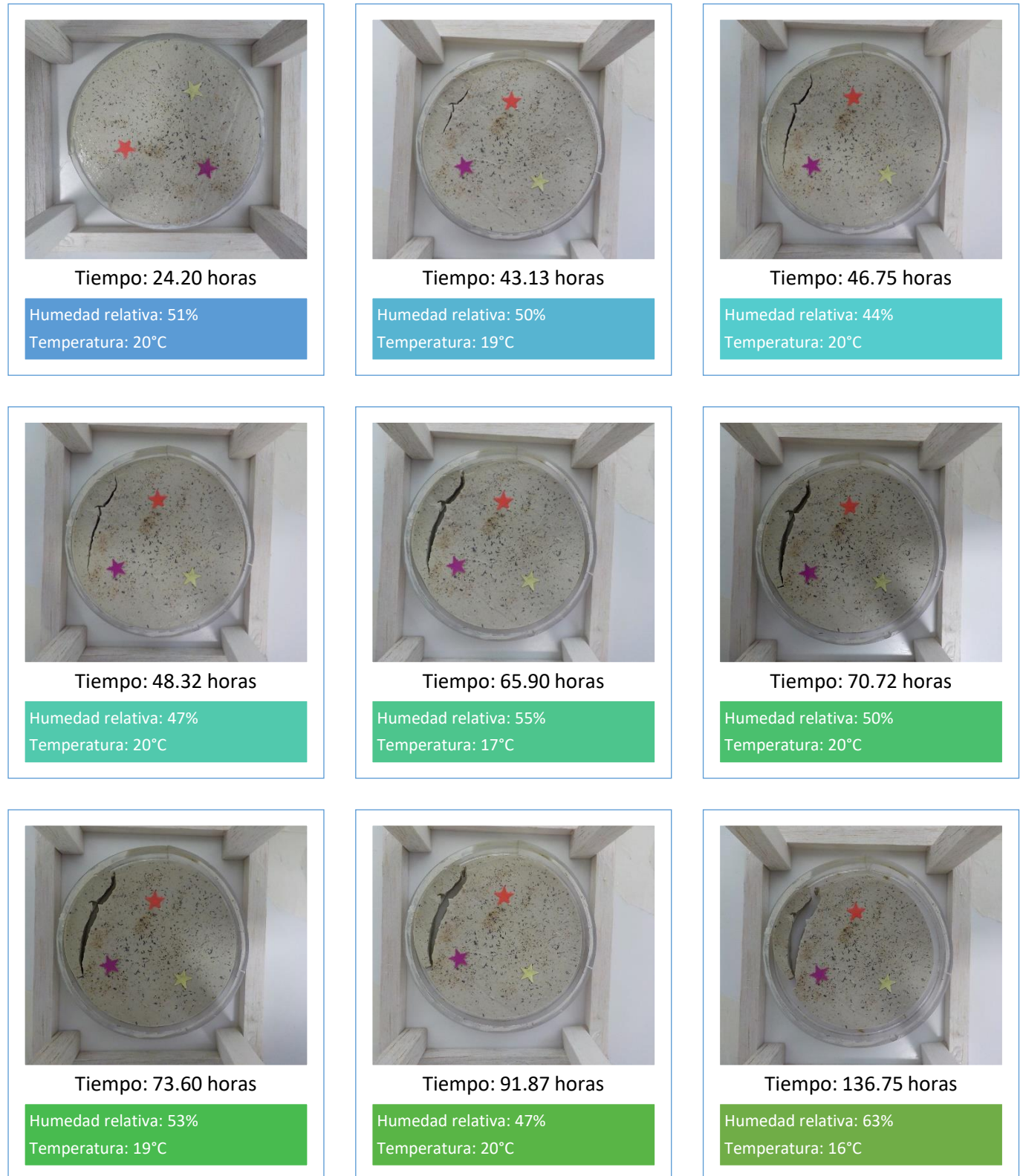
Gráfica 2 Comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa al momento de tomar cada una de las fotos

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para la muestra del molde A

Tabla 9 Evolucion de las muestras del molde












SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para la muestra de molde B

Tabla 10 Evolucion de las muestras del molde B

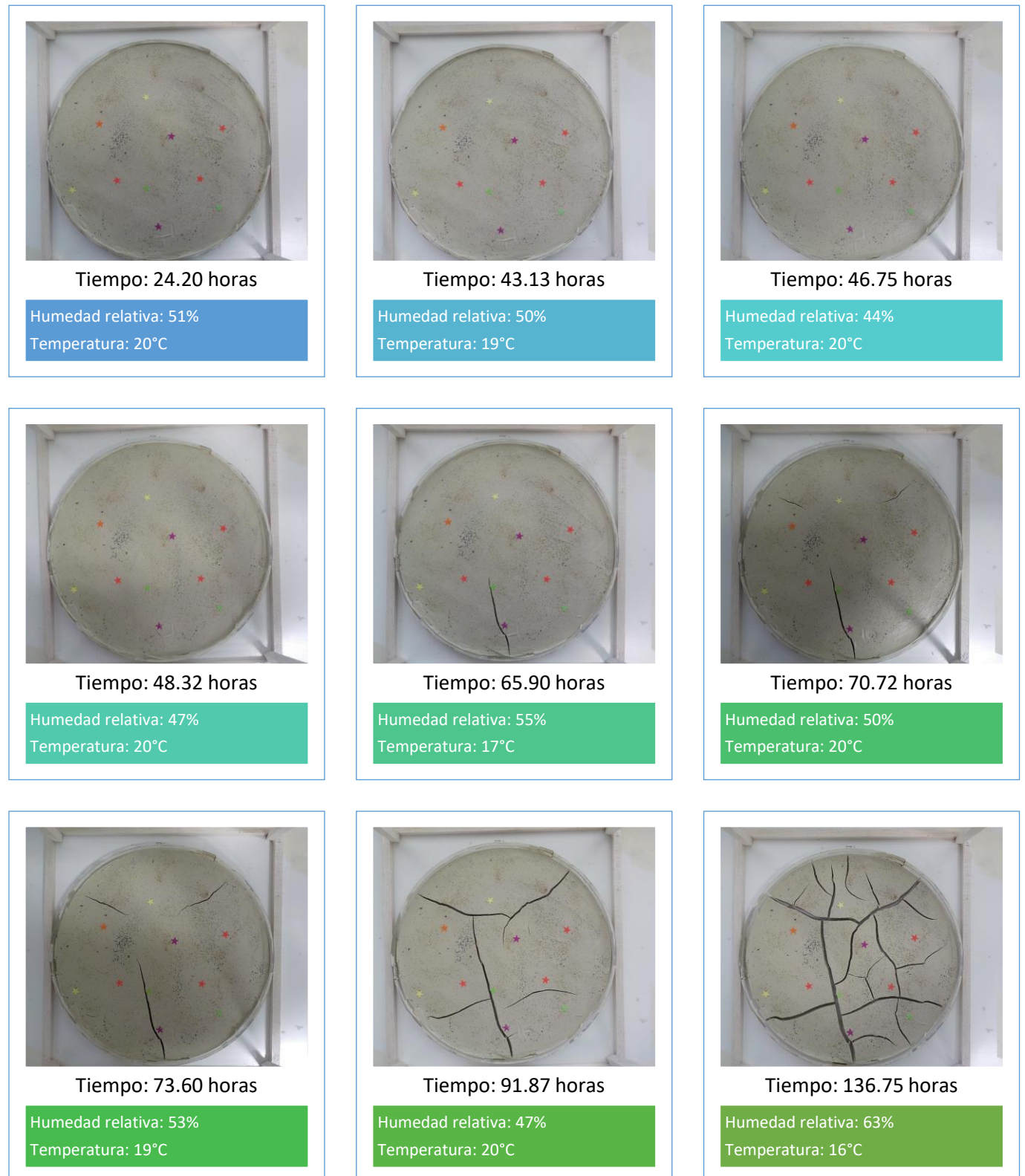
 <p>Tiempo: 24.20 horas</p> <p>Humedad relativa: 51%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>	 <p>Tiempo: 43.13 horas</p> <p>Humedad relativa: 50%</p> <p>Temperatura: 19°C</p>	 <p>Tiempo: 46.75 horas</p> <p>Humedad relativa: 44%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>
 <p>Tiempo: 48.32 horas</p> <p>Humedad relativa: 47%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>	 <p>Tiempo: 65.90 horas</p> <p>Humedad relativa: 55%</p> <p>Temperatura: 17°C</p>	 <p>Tiempo: 70.72 horas</p> <p>Humedad relativa: 50%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>
 <p>Tiempo: 73.60 horas</p> <p>Humedad relativa: 53%</p> <p>Temperatura: 19°C</p>	 <p>Tiempo: 91.87 horas</p> <p>Humedad relativa: 47%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>	 <p>Tiempo: 136.75 horas</p> <p>Humedad relativa: 63%</p> <p>Temperatura: 16°C</p>

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para la muestra de molde C

Tabla 11 Evolucion de las muestras del molde C



SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para la muestra de molde D

Tabla 12 Evolucion de las muestras del molde D

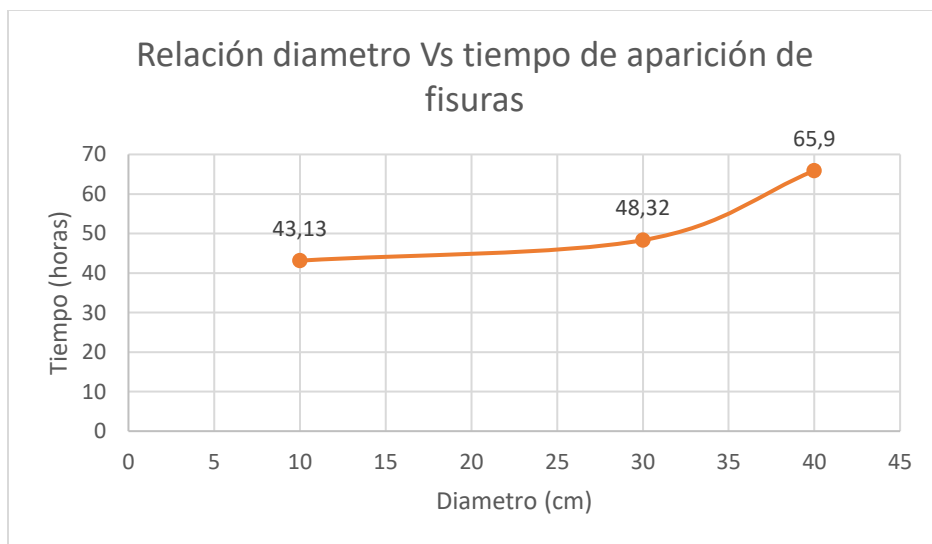
 <p>Tiempo: 24.20 horas</p> <p>Humedad relativa: 51%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>	 <p>Tiempo: 43.13 horas</p> <p>Humedad relativa: 50%</p> <p>Temperatura: 19°C</p>	 <p>Tiempo: 46.75 horas</p> <p>Humedad relativa: 44%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>
 <p>Tiempo: 48.32 horas</p> <p>Humedad relativa: 47%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>	 <p>Tiempo: 65.90 horas</p> <p>Humedad relativa: 55%</p> <p>Temperatura: 17°C</p>	 <p>Tiempo: 70.72 horas</p> <p>Humedad relativa: 50%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>
 <p>Tiempo: 73.60 horas</p> <p>Humedad relativa: 53%</p> <p>Temperatura: 19°C</p>	 <p>Tiempo: 91.87 horas</p> <p>Humedad relativa: 47%</p> <p>Temperatura: 20°C</p>	 <p>Tiempo: 136.75 horas</p> <p>Humedad relativa: 63%</p> <p>Temperatura: 16°C</p>

Análisis de resultados

Etapa 6: Análisis general de la información obtenida.

Para cada Molde **A**, **B**, **C** y **D** se determinó la humedad de la muestra y la masa del agua para los 10 controles realizados, para el control #1 el ángulo del trípode no fue el mismo que para los demás controles, razón que impide el análisis de esta Figura, dejando el análisis para los sucesivos 9 controles realizados, el control cero es el estado inicial de la muestra equivalente al instante de la preparación de estas.

Con las imágenes obtenidas de cada uno de los moldes se puede ver que el tiempo al cual empezaron a aparecer las fisuras, se fue incrementando a medida que el diámetro del molde aumentaba, excluyendo al molde B el cual no presento fisuras, esta relación se muestra en la figura que se encuentra a continuación. De modo que para el molde A la primera fisura de acuerdo con el registro fotográfico se presentó alrededor de las 43 horas, para el molde C la primera fisura se empezó a notar a las 48 horas y a las 65.9 horas ya se había pronunciado y para el molde D se empezó a ver una pequeña fisura a las 65.9 horas.



Gráfica 3 Relación tiempo de aparición de las primeras fisuras y el diámetro del molde

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Por otro lado el grado de fisuración en cada uno de los moldes fue distinto, para el molde A la cantidad de fisuras es baja y hay poca ramificación, estas se empezaron a desarrollar en un costado de la muestra, la apertura de la grieta fue muy grande por lo que finalmente quedaron dos partes separadas, para el molde C las fisuras iniciaron cerca de los bordes de la muestra en tres partes y avanzaron hacia el centro, presentó varias ramificaciones de una apertura grande, donde se pueden ver claramente las primeras fisuras que se formaron, finalmente para el molde D se evidencia una fisuración mucho mayor que en las muestras anteriores y sus aperturas son de menor magnitud, estas se empezaron a formar en un costado y tomo dos caminos de forma similar a como paso con la muestra del molde A. Por lo tanto, entre mayor el diámetro del molde, se presentó una mayor fisuración, mientras que la abertura de la fisura disminuyendo.

En el caso del molde C, la muestra no presentó fisuras, lo único que se evidencia es que se contrajo, despejándose de todo el perímetro de las paredes del molde, reducción que es apreciable.

Para cada molde se determinó la masa del recipiente estos resultados se muestran en la tabla 7, sucesivo a esto en cada control se pesa la muestra con el fin de obtener los datos suficientes para realizar los cálculos y análisis relacionados con la humedad, estos cálculos se muestran posteriormente.

Molde A:

Se muestra los cálculos detallados y datos obtenidos en el siguiente procedimiento:

Tabla 13 Datos correspondiente al Molde A

Masa recipiente 10 cm (kg)	0,053
Humedad inicial Promedio	239,0%
Masa total (kg)	0,168
Masa suelo (kg)	0,03392235
Masa agua (kg)	0,08107765

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Nota 1: Para cada molde se determina la masa del suelo y sus humedades respectivas por ser este un cálculo repetitivo, se realizará un ejemplo numérico aplicando las ecuaciones respectivas a los datos obtenidos para el molde **A**, este mismo ejercicio se realiza para los moldes **B, C y D** empleando los datos correspondientes según la muestra, los resultados obtenidos se resumen en tablas posteriores.

Para la determinación de la masa del suelo se utiliza la siguiente ecuación:

$$m_{suelo} = \frac{m_{total} - m_{molde}}{W_{prom\ inicial} + 1}$$

Donde:

$$W_{prom\ inicial} = \frac{m_{agua\ i}}{m_{suelo\ i}} = \frac{m_{recipiente+muestra\ húmeda} - m_{recipiente+ muestra\ seca}}{m_{recipiente+muestra\ seca} - m_{recipiente}}$$

Para hallar esta humedad inicial se tomaron los datos de masa del recipiente, masa de muestra húmeda más recipiente, luego se llevó al horno la muestra y se tomó el peso de recipiente más muestra húmeda, este procedimiento se realizó dos veces, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14 Datos de masa seca y húmeda de la muestra usada para llenar los moldes en el momento inicial

Masa recipiente (g)	11,13	10,92
Masa recipiente + muestra húmeda (g)	26,2	29,34
Masa recipiente + muestra seca (g)	15,53	16,41

$$m_{suelo\ i} = m_{recipiente+muestra\ seca} - m_{recipiente} = 15.53 - 11.13 = 4.4\ g$$

$$m_{agua\ i} = m_{recipiente+muestra\ húmeda} - m_{recipiente+ muestra\ seca} = 26.2 - 15.53 = 10.67\ (g)$$

$$w_i = \frac{m_{agua\ i}}{m_{suelo\ i}} = \frac{10.67}{4.4} = 242.5\%$$

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Se realiza el mismo procedimiento con los datos de la segunda muestra y se promedian las humedades encontradas, con esto se tiene que:

Tabla 15 Humedad inicial promedio del suelo

Masa suelo	4,4	5,49
Masa agua	10,67	12,93
Humedad inicial	242,5%	235,5%
Humedad inicial prom	239,0%	

Luego ya teniendo la humedad inicial se retoma el cálculo de la humedad de cada uno de los controles

$$m = \text{masa (kg)}$$

$$w = \text{humedad (\%)}$$

$$m_{\text{suelo}} = \frac{0.168 - 0.053}{239,0\% + 1} = 0.0339Kg$$

Posteriormente a determinar la masa de suelo se determina la masa del agua, y se calcula la humedad de la muestra.

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{total}} - m_{\text{suelo}} - m_{\text{recipiente}}$$

$$m_{\text{agua}} = 0.168 - 0.0339 - 0.053 = 0.081Kg$$

$$w = \frac{m_{\text{agua}}}{m_{\text{suelo}}} = \frac{0.081}{0.0339} = 239\%$$

El cálculo de la humedad se repite para los controles del 1 al 9, obteniendo la tabla que se muestra a continuación.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 16 Resumen de los cálculos obtenidos para cada control del molde A

Control	Masa total (Kg)	Masa agua (Kg)	Humedad (%)
#0	0,168	0,081	2,390
#1	0,157	0,070	2,066
#2	0,149	0,062	1,830
#3	0,147	0,060	1,771
#4	0,146	0,059	1,742
#5	0,139	0,052	1,535
#6	0,137	0,050	1,476
#7	0,136	0,049	1,447
#8	0,13	0,043	1,270
#9	0,118	0,031	0,916

Molde B:

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, con el proceso explicado anteriormente:

Tabla 17 Datos correspondiente al Molde B

Masa recipiente 20 cm (kg)	0,177
Humedad inicial	239,0%
Masa total (kg)	0,694
Masa suelo (kg)	0,15250307
Masa agua (kg)	0,36449693

Tabla 18 Resumen de los cálculos obtenidos para cada control del molde B

Control	Masa total (Kg)	Masa agua (Kg)	Humedad (%)
#0	0,694	0,364	2,390
#1	0,659	0,329	2,161
#2	0,63	0,300	1,970
#3	0,625	0,295	1,938
#4	0,621	0,291	1,911
#5	0,596	0,266	1,747

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

#6	0,589	0,259	1,702
#7	0,586	0,256	1,682
#8	0,566	0,236	1,551
#9	0,521	0,191	1,256

Molde C:

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, con el proceso explicado en el molde A:

Tabla 19 Datos correspondiente al Molde C

masa recipiente 30 cm (kg)	0,316
Humedad inicial	239,0%
Masa total (kg)	1,348
Masa suelo (kg)	0,30441619
Masa agua (kg)	0,72758381

Tabla 20 Resumen de los cálculos obtenidos para cada control del molde C

Control	Masa total (Kg)	Masa agua (Kg)	Humedad (%)
#0	1,348	0,728	2,390
#1	1,281	0,661	2,170
#2	1,221	0,601	1,973
#3	1,209	0,589	1,933
#4	1,204	0,584	1,917
#5	1,154	0,534	1,753
#6	1,141	0,521	1,710
#7	1,133	0,513	1,684
#8	1,092	0,472	1,549
#9	0,997	0,377	1,237

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Molde D:

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, con el proceso explicado en el molde A.

Tabla 21 Datos correspondiente al Molde D

Masa recipiente 40 cm (kg)	0,671
Humedad inicial	239,0%
Masa total (kg)	2,43
Masa suelo (kg)	0,51886442
Masa agua (kg)	1,24013558

Tabla 22 Datos correspondiente al Molde D

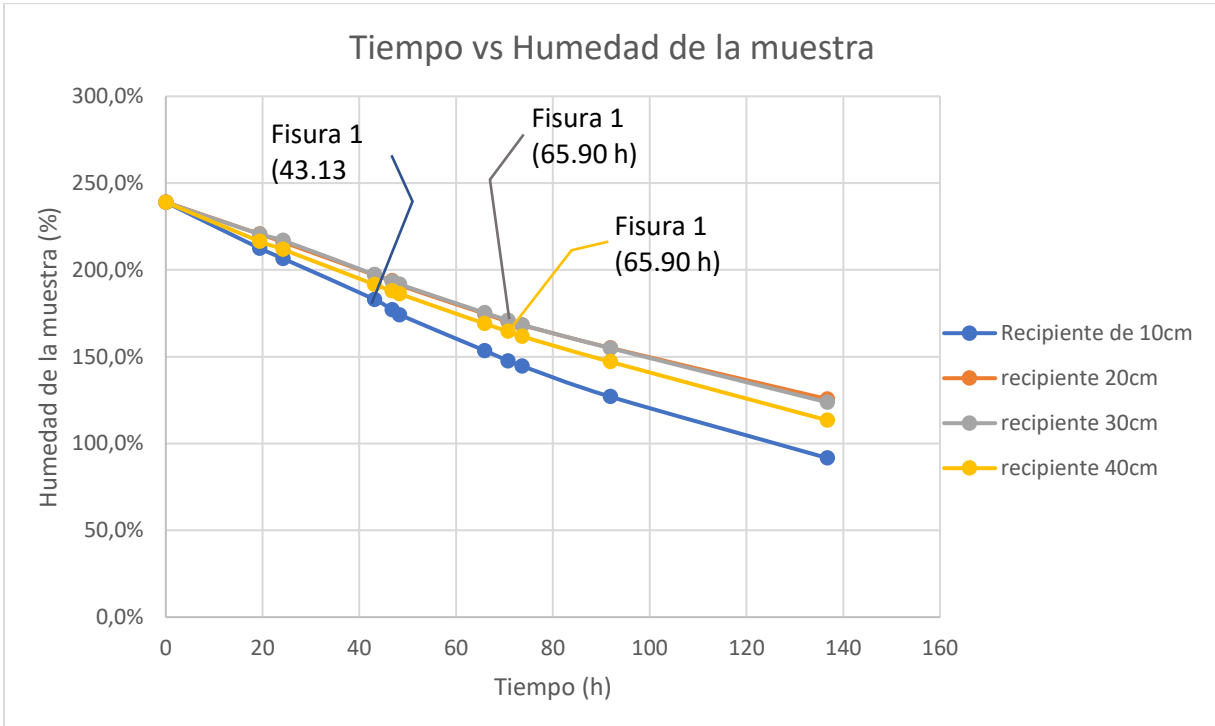
Control	Masa total (Kg)	Masa agua (Kg)	Humedad (%)
#0	2,43	1,240	2,390
#1	2,289	1,099	2,118
#2	2,184	0,994	1,916
#3	2,165	0,975	1,879
#4	2,156	0,966	1,862
#5	2,067	0,877	1,690
#6	2,044	0,854	1,646
#7	2,029	0,839	1,617
#8	1,953	0,763	1,471
#9	1,778	0,588	1,134

Se grafican los datos de Humedad obtenidos de cada muestra con respecto al tiempo, la tasa de variación de todas las muestras es ascendente respecto al tiempo, esto corresponde al resultado esperado, además para muestras de menor tamaño la tasa de variación es mayor y con una relación exponencial siendo esta tendencia la más cercana a su comportamiento, comparadas las muestras de 20 y 30 cm el proceso de pérdida de humedad es semejante casi homologado, mientras que para

SEMILLERO DE GEOTECNIA

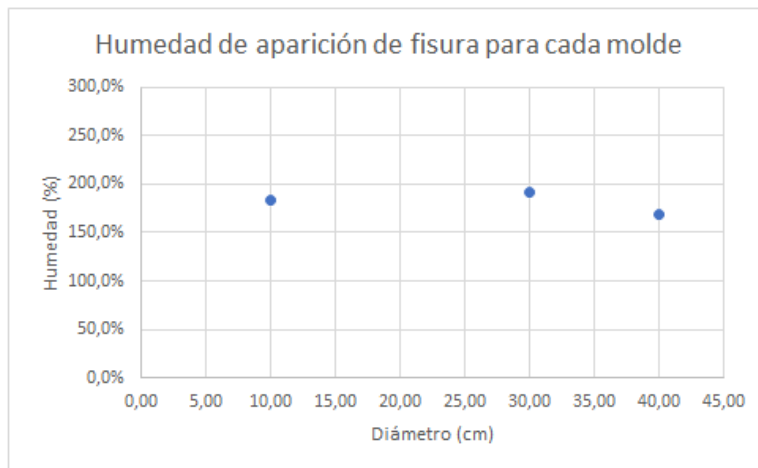
TRABAJO DIRIGIDO

la muestra de 10cm comparada con las demás presenta una tasa de variación mucho más alta y acelerada, lo descrito anteriormente puede evidenciarse con claridad en la siguiente grafica.



Gráfica 4. Tiempo Vs Humedad para cada muestra

La relación de la humedad en el momento de fisuración de cada molde se muestra en la siguiente gráfica, lo que puede mostrar que la humedad de aparición de las fisuras es relativamente similar



Gráfica 5 Humedad a la que aparece la primera fisura en cada uno de los moldes

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 7: Análisis de las imágenes obtenidas.

A las imágenes que se tomaron en los tiempos de 65,9 horas, 70,72 horas, 73,6 horas, 91,78 horas, 136,75 horas, se les halló la dimensión fractal por el método de cajas. El método, como se ha explicado en el marco teórico, consiste en hacer una malla sobre la figura, para posteriormente contar la cantidad de cuadros que contienen alguna parte de la figura (N). Este procedimiento se realiza varias veces cambiando el tamaño del cuadrado de la malla (lado l), sin embargo, el tamaño del cuadrado general se mantiene (lado L).

Se ha encontrado que el método de cajas en distintas literaturas no tiene la misma expresión, por lo que se compararon algunas de las que se encontraron.

De acuerdo con J. Días, (2019), la dimensión fractal es la relación entre $\text{Log}(L/l)$ y $\text{Log}(N)$, que se puede evidenciar en una gráfica con distintos tamaños de malla, donde $\text{Log}(L/l)$ corresponde a la variable en el eje X y $\text{Log}(N)$ corresponde a la variable del eje Y.

Otros autores como Gacel Rodríguez (2017) nos muestran que la dimensión fractal es la relación que se ve en una gráfica que en el eje X contiene la variable $\text{Log}(l)$, y en el eje Y se tiene la variable $\text{Log}(1/N)$.

Por otro lado L. Vallejo (2009) muestra que la dimensión fractal es la relación de una gráfica cuyos ejes son, para el eje X $\text{Log}(l)$ y para el eje Y $\text{Log}(N)$.

Para análisis mejor cada una de las relaciones mostradas anteriormente se realizó un ejemplo donde el L corresponde a 30 unidades y se realizaron 5 mallas.

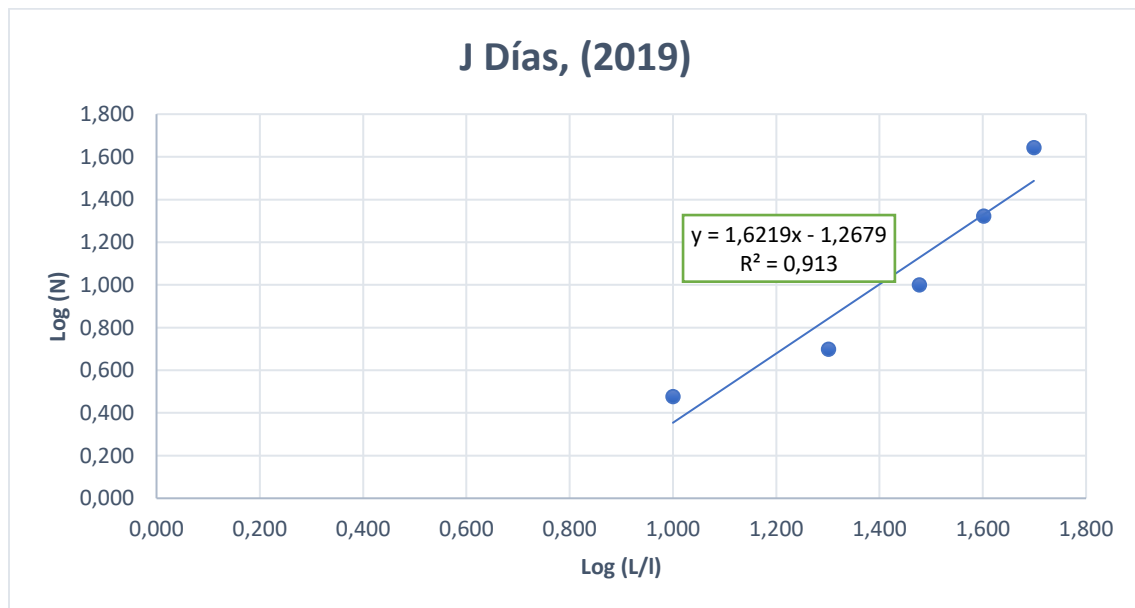
SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 23 Ejemplo de los distintas relaciones para el metodo de cajas

L	L/l	# cuadros	J. Días, (2019)		Gacel Rodríguez (2017)		L. Vallejo (2009)	
			X log(L/l)	Y log(N)	X log(l)	Y log(1/N)	X Log (l)	Y log(N)
3	10	3	1,000	0,477	0,477	-0,477	0,477	0,477
1,5	20	5	1,301	0,699	0,176	-0,699	0,176	0,699
1	30	10	1,477	1,000	0,000	-1,000	0,000	1,000
0,75	40	21	1,602	1,322	-0,125	-1,322	-0,125	1,322
0,6	50	44	1,699	1,643	-0,222	-1,643	-0,222	1,643

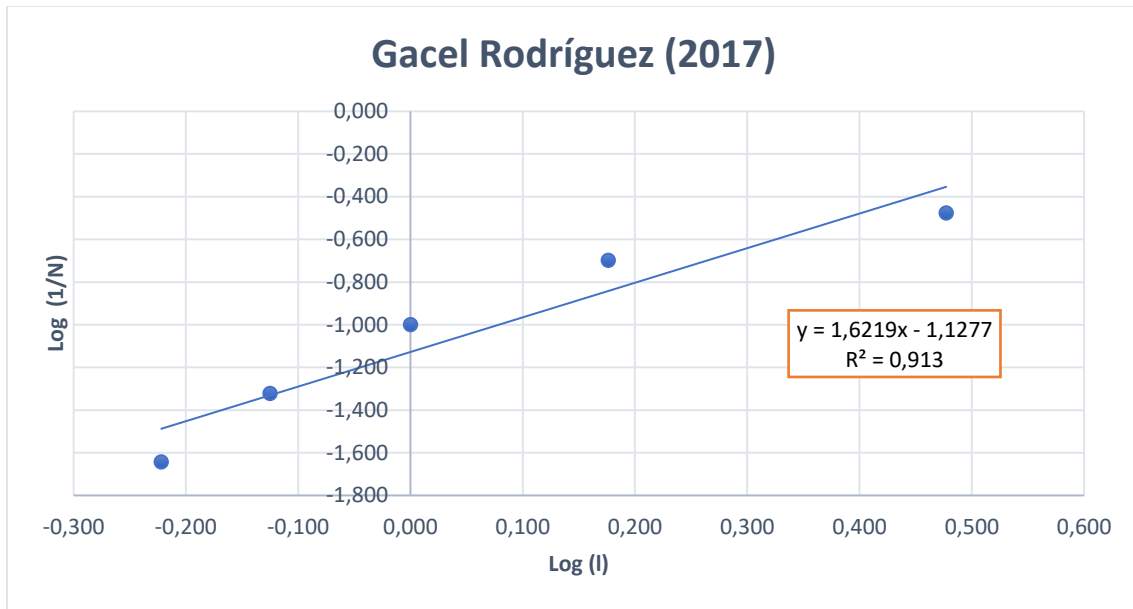
Las gráficas correspondientes son las siguientes:



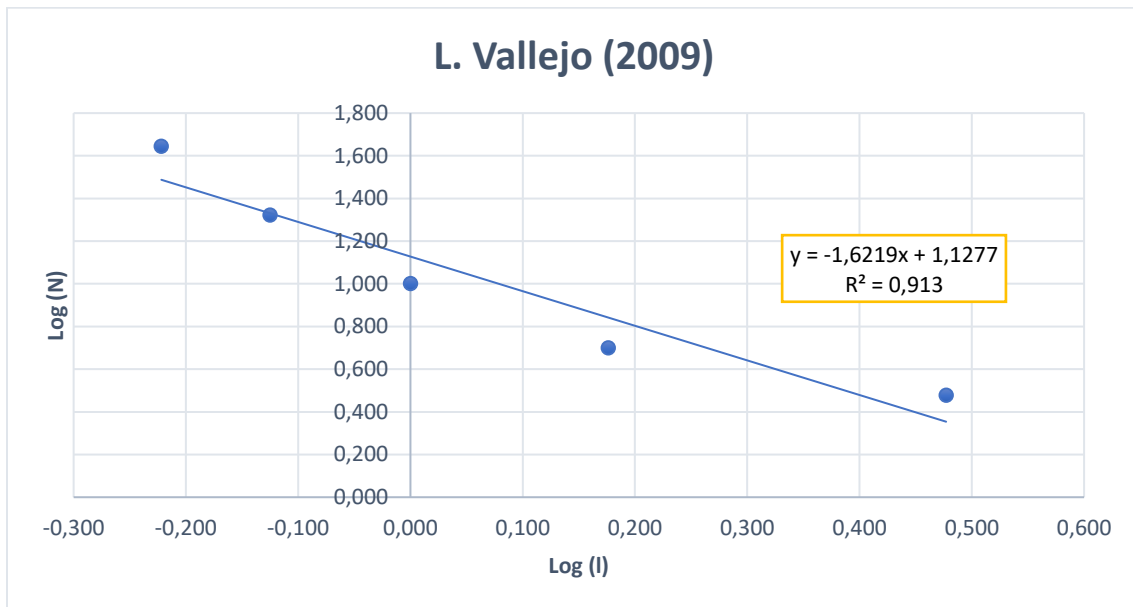
Gráfica 6 Método de J Días, (2019)

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Gráfica 7 Método de Gacel Rodríguez (2017)



Gráfica 8 Método de L Vallejo (2009)

Analizando cada una de ellas se puede ver que todas muestran la misma pendiente, y por lo tanto la misma dimensión fractal, que para el ejemplo es de 1,6219. Para el análisis de cada una de las muestras de esta investigación se empleó el primer método de J. Días (2019).

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Debido a que las muestras que se tomaron tienen forma circular, con el fin de evitar la concentración de esfuerzos, el cuadrado general sobre el que se analizó fue un cuadrado inscrito en el círculo que define el molde de la muestra. Se realizaron cinco mallas, la primera de ellas partiendo el lado del cuadrado en 10 partes iguales, la segunda en 20 partes iguales, la tercera en 30 partes iguales, la cuarta en 40 y la quinta en 50 partes iguales. Los resultados de las mallas para cada muestra y en los tiempos mencionados antes, se muestran posteriormente.

Como se mostrará a continuación luego de colocar la malla sobre las fotografías se sombrearon los cuadros que contenían parte de las fisuras en AutoCAD, de forma que la cantidad de cuadros sombreados se halló por medio de una relación entre el área sombreada y el área total.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Molde A:

Las mallas y las dimensiones usadas para el análisis fractal del Molde A en diferentes tiempos de agrietamiento de la muestra están a continuación.

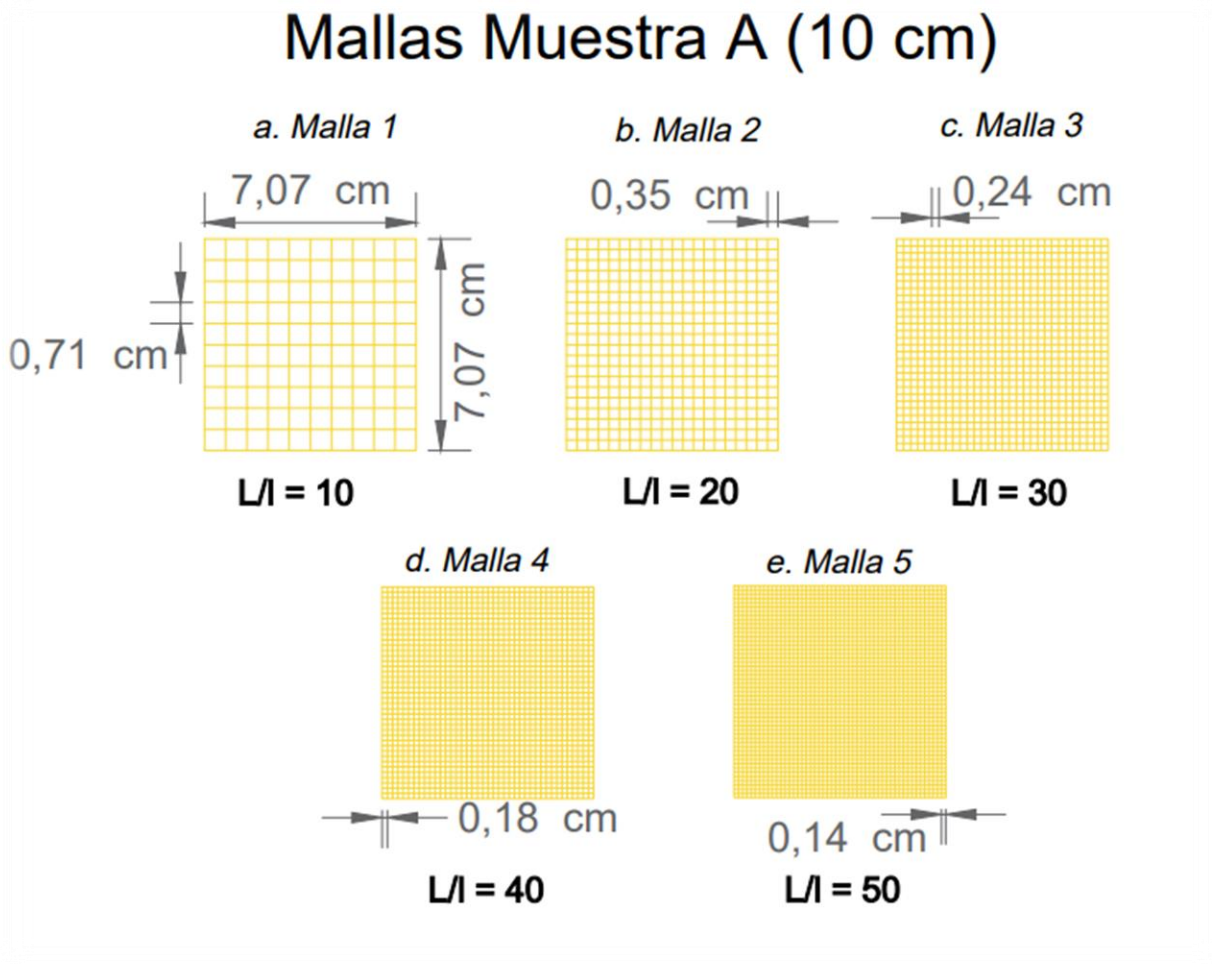


Figura 16. Características de las mallas para el molde A

Cada malla tiene de lado general 7.07 cm, para la malla 1 el lado del cuadrado interior es 0.71 cm, para la malla 2 es de 0.35 cm, para la malla 3 es de 0.24 cm, para la malla 4 es de 0.18 cm y para la última es de 0.14 cm.

Estas mallas se ubican dentro de un círculo de diámetro de 10cm, sobre la imagen a analizar como se muestra.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

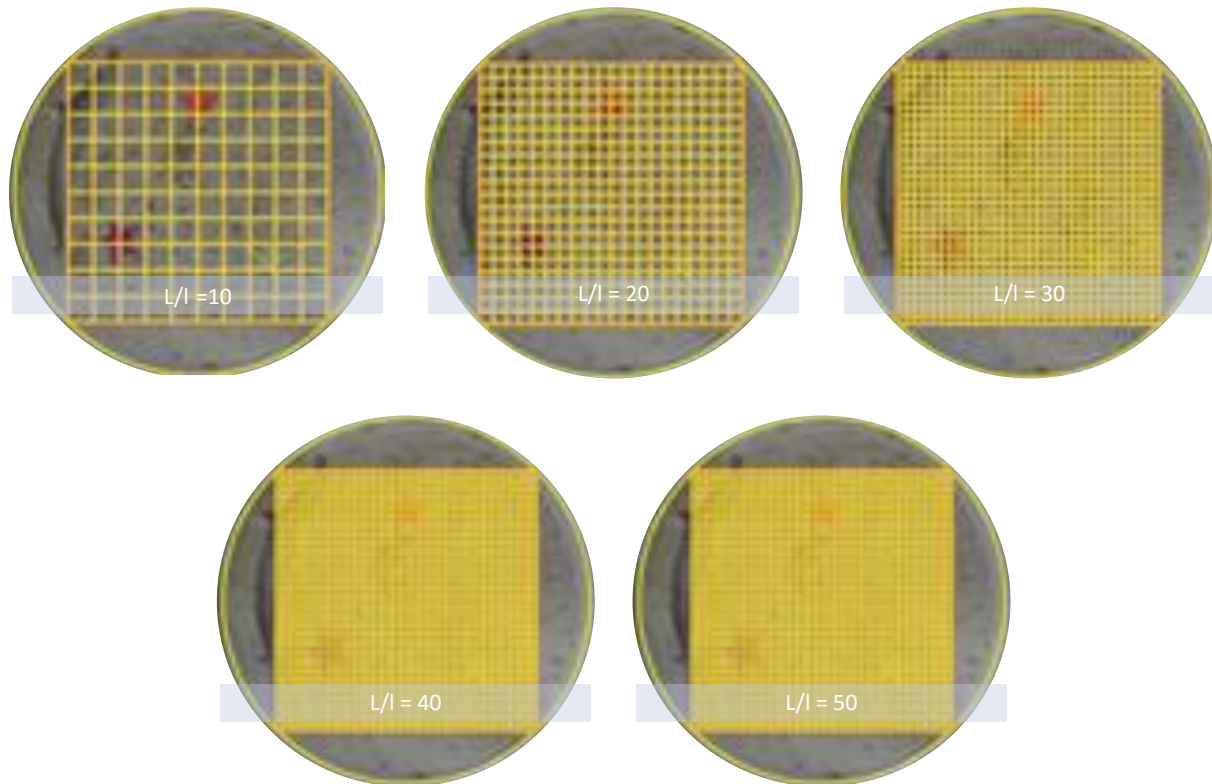


Figura 17. Mallas para la muestra A

Se sombrea los cuadros dentro los cuales hay parte de las grietas en los cinco tiempos antes mencionados, las figuras se muestran a continuación.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

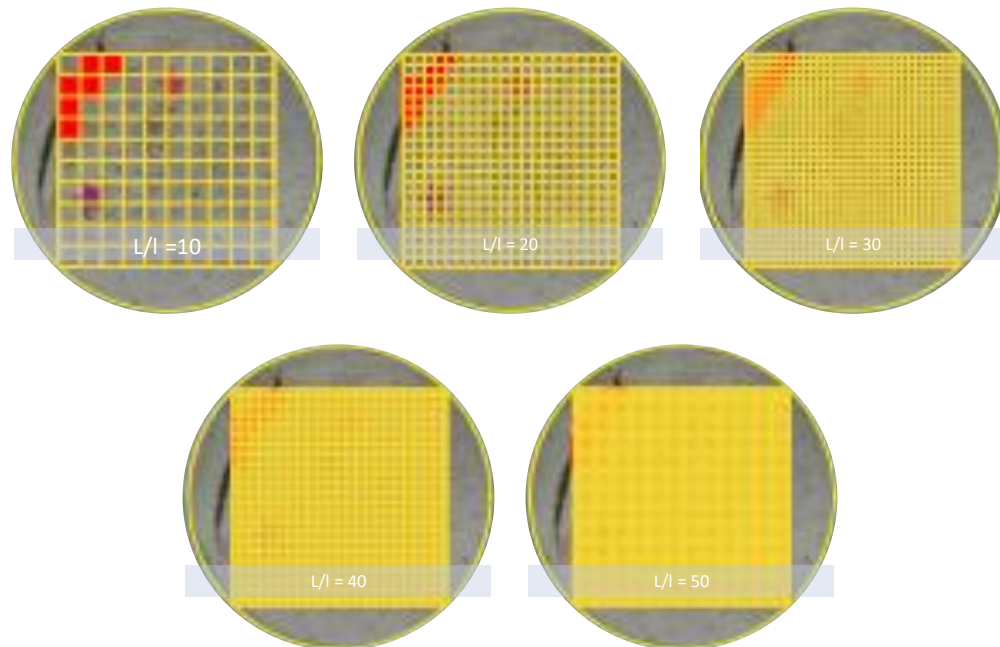


Figura 18 Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 65.9 horas.

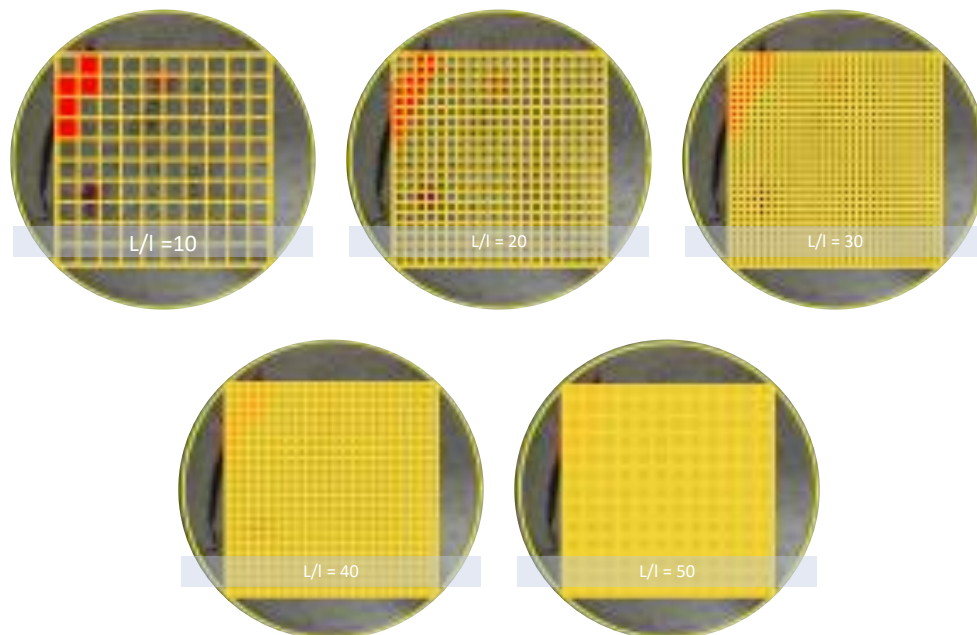


Figura 19. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 70.72 horas.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

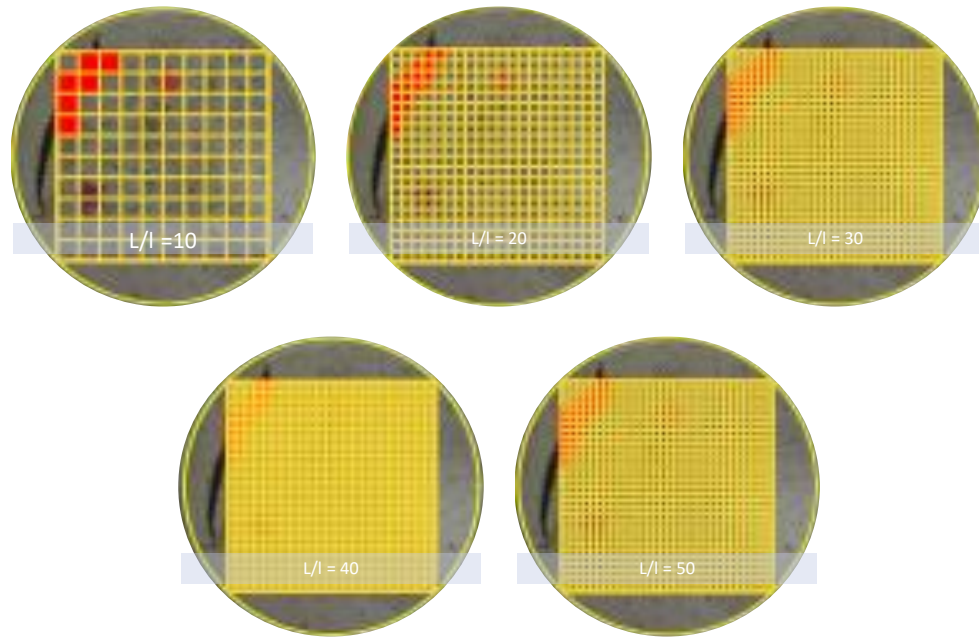


Figura 20. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 73.6 horas.

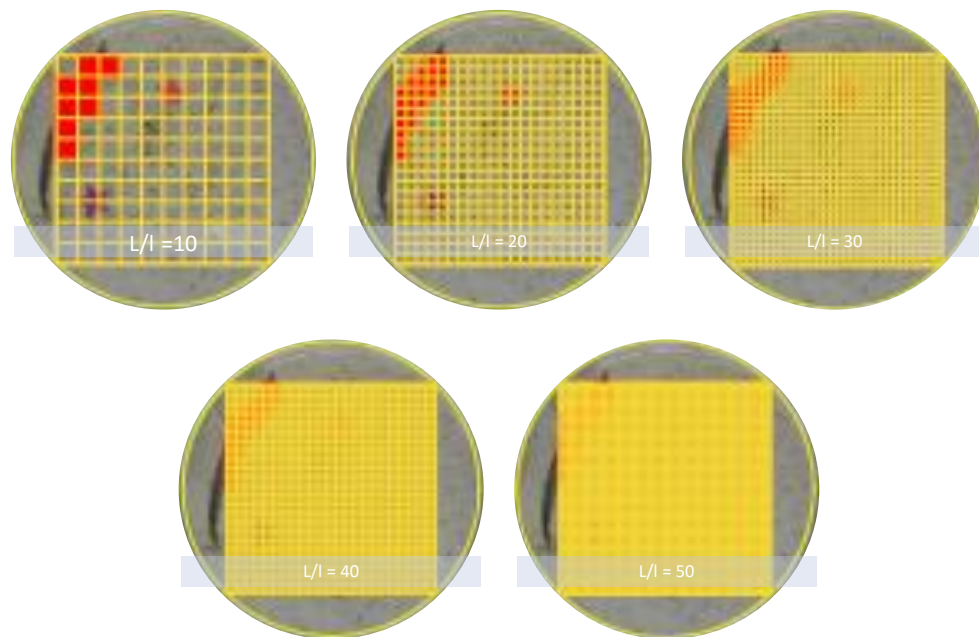


Figura 21. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 91.87 horas.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

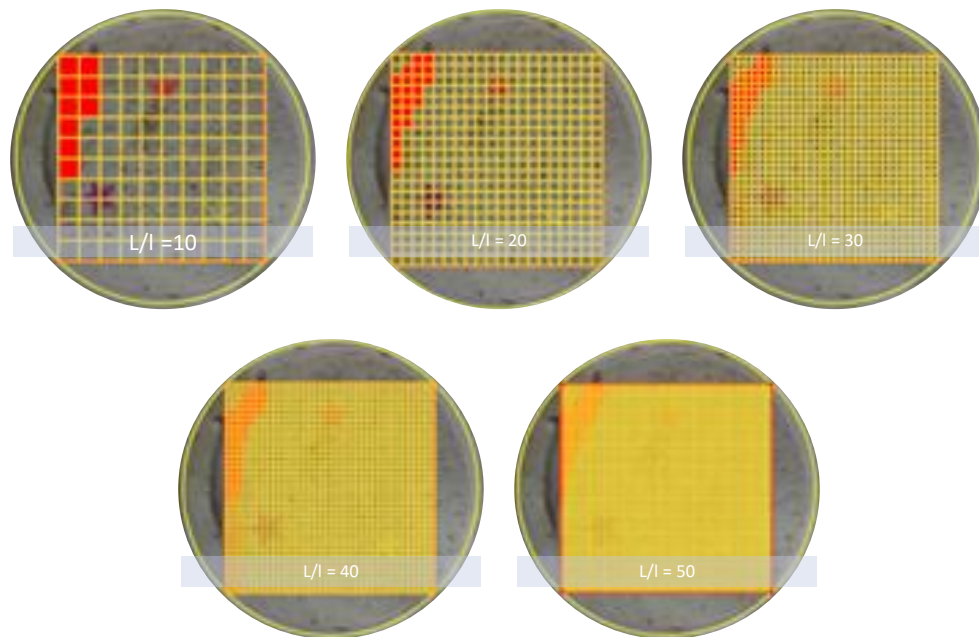
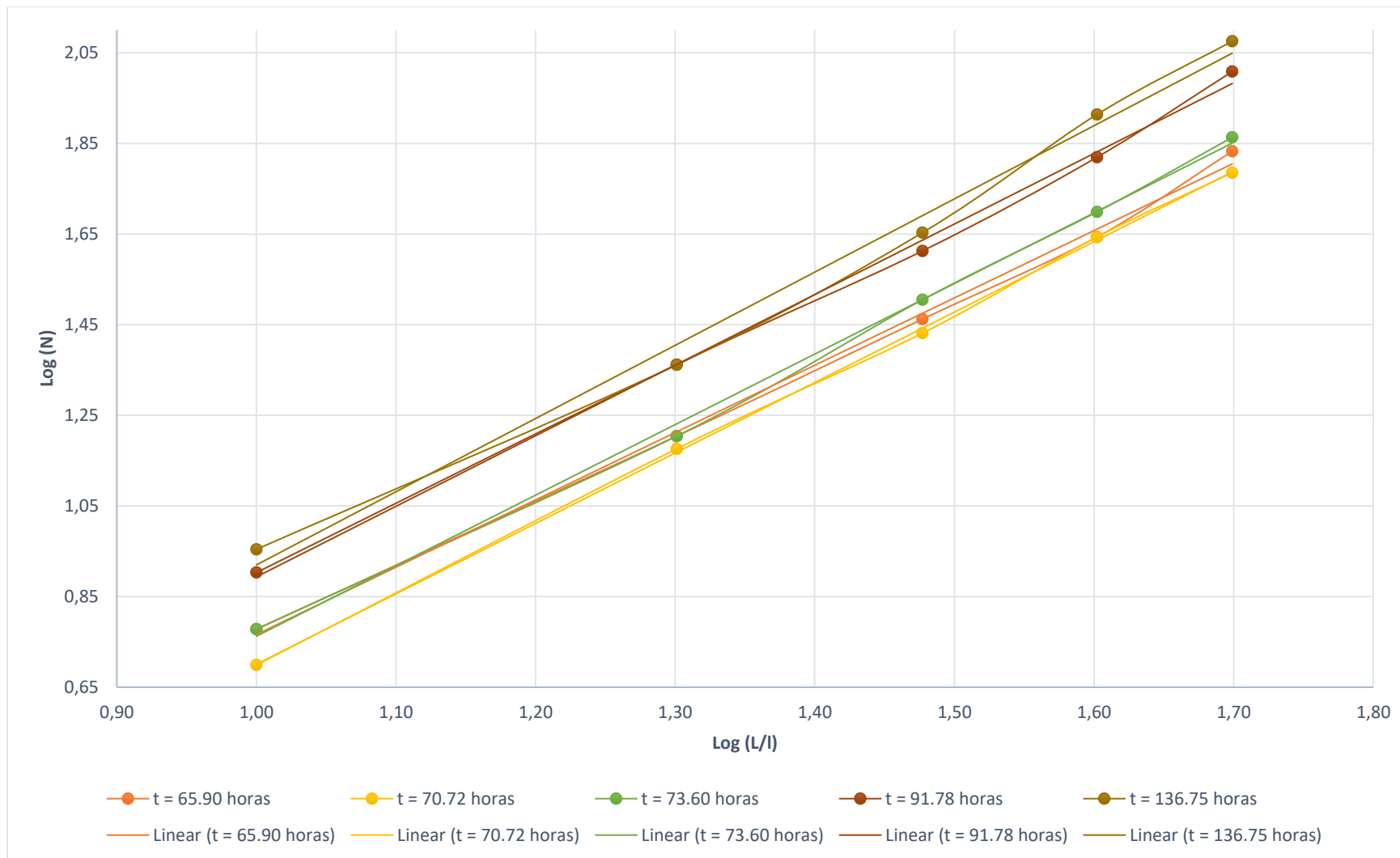


Figura 22. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 136.75 horas

La tabla de resultados que contiene la cantidad de cajas sombreadas en cada una de las muestras en los distintos tiempos se puede ver en los anexos **Error! Reference source not found.** y a las graficas se presentan a continuación con sus respectivas líneas de tendencia.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

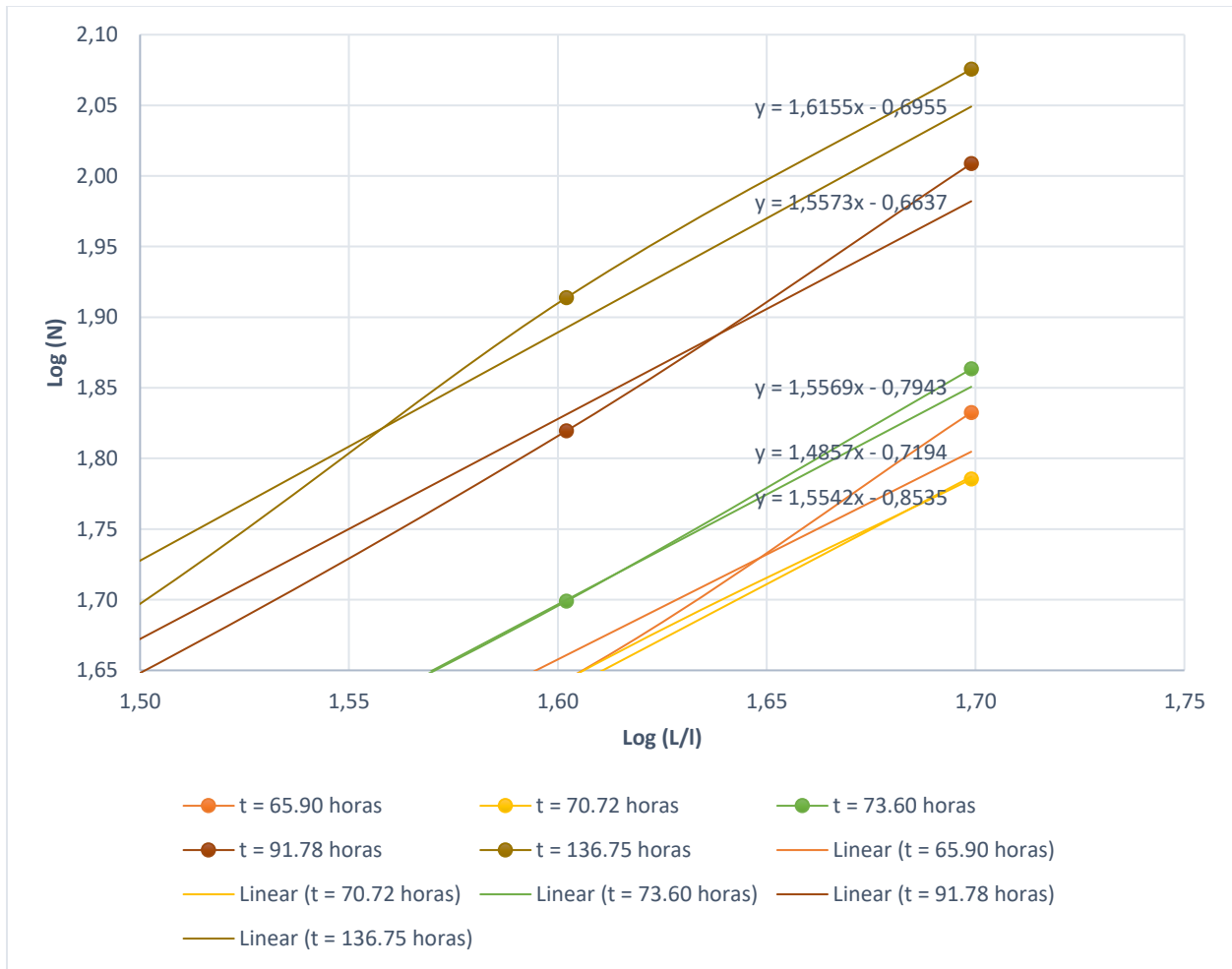
TRABAJO DIRIGIDO



Gráfica 9. Relación L/l y N para cada tiempo en el molde A

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Gráfica 10 Detalle Relación L/l y N para cada tiempo en el molde A

De acuerdo con las gráficas la dimensión fractal para la muestra A en el tiempo $t = 65.90$ horas es de 1.4857, en el tiempo $t = 70.72$ horas es de 1.5542, en el tiempo $t = 73.60$ horas es de 1.5569, en el tiempo $t = 91.85$ horas es de 1.5573 y para el tiempo $t = 136.75$ horas es de 1.6155.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Molde C:

El procedimiento descrito para la muestra A se repite para esta muestra, cambiando la escala y mallas de trabajo, estas poseen las características mostradas a continuación:

Mallas Muestra C (D = 30)

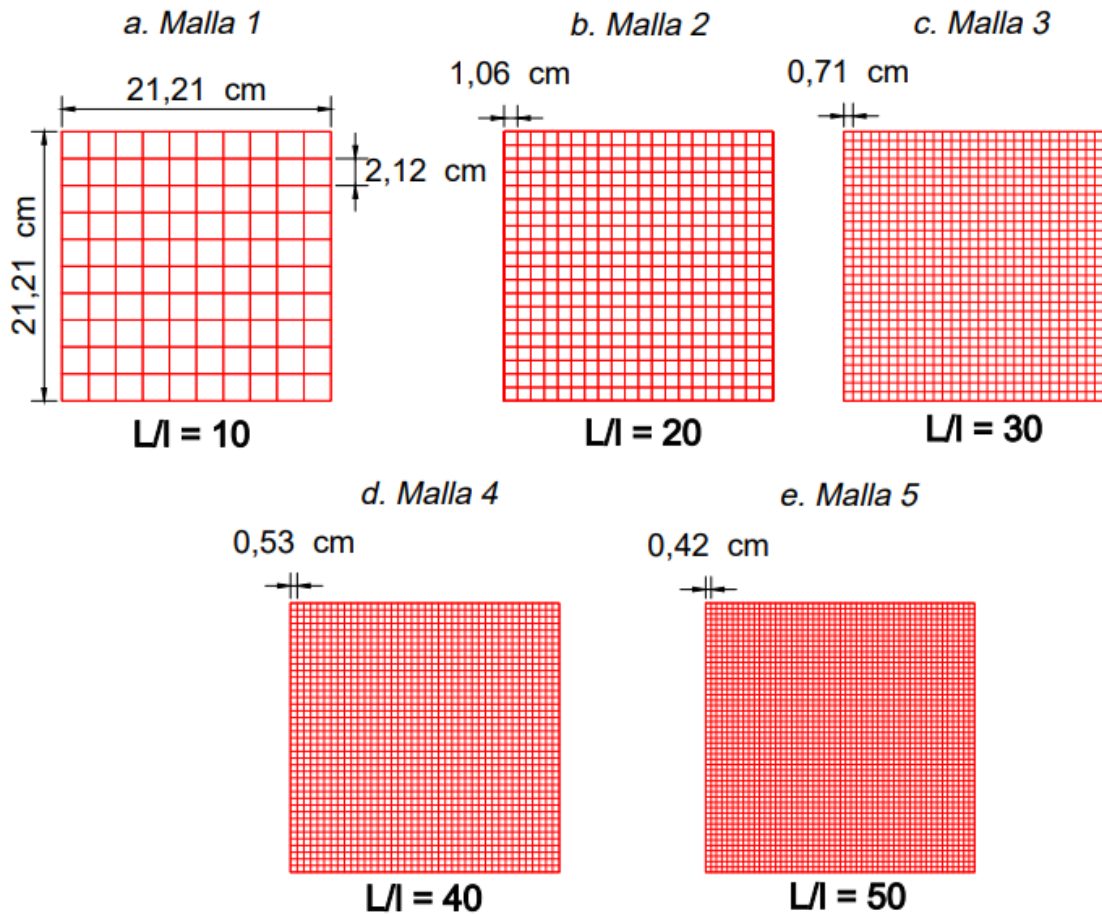


Figura 23. Características de las mallas para el molde C

Cada malla tiene de lado general 21,21 cm, para la malla 1 el lado del cuadrado interior es 2.12 cm, para la malla 2 es de 1.06 cm, para la malla 3 es de 0.71 cm, para la malla 4 es de 0.53 cm y para la última es de 0.42 cm.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

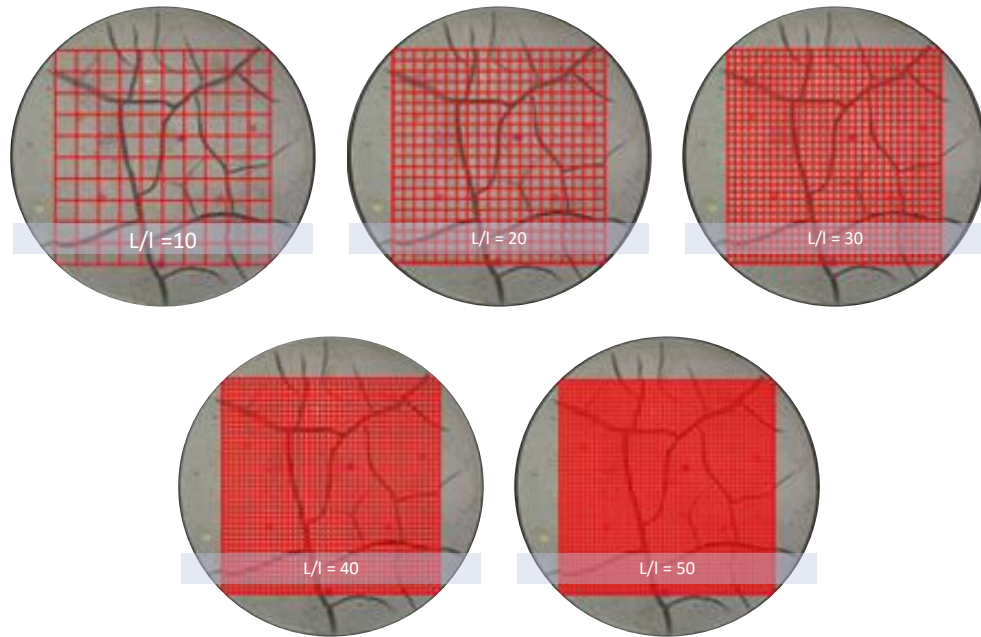


Figura 24. Mallas para la muestra C

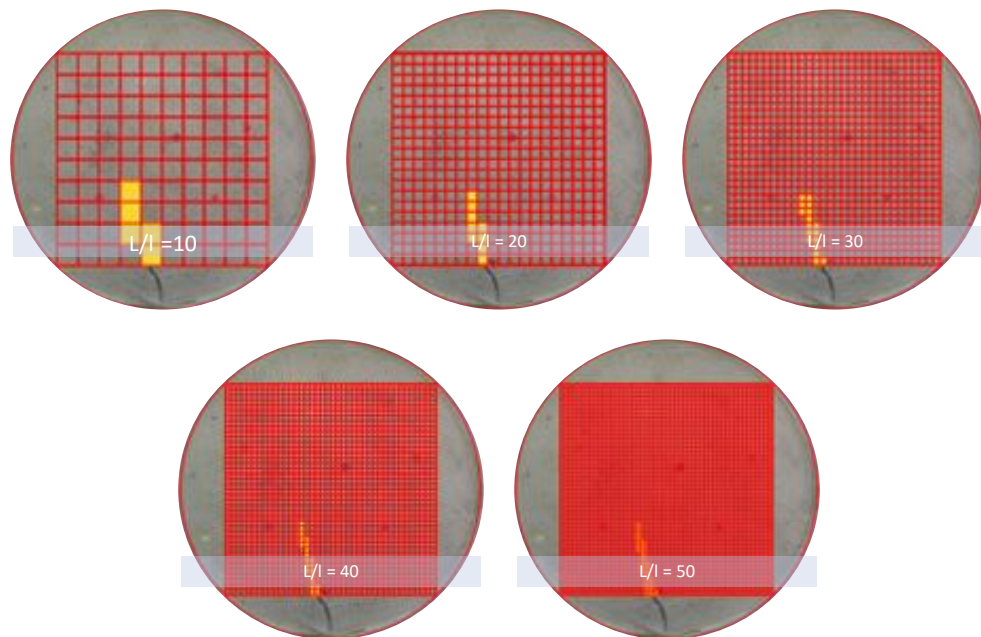


Figura 25. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 65.9 horas

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

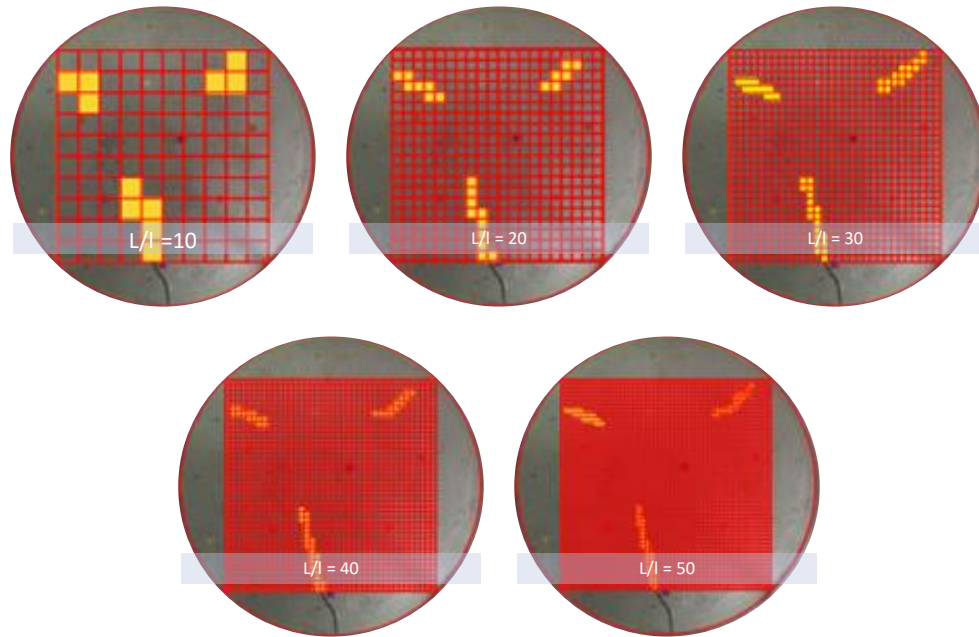


Figura 26. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 70.72 horas

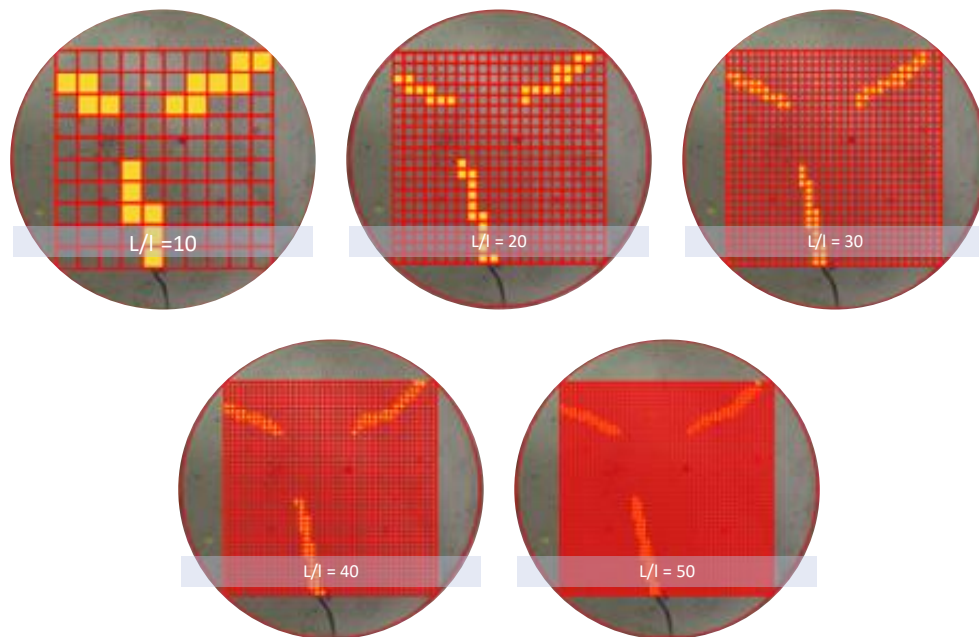


Figura 27. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 73.6 horas

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

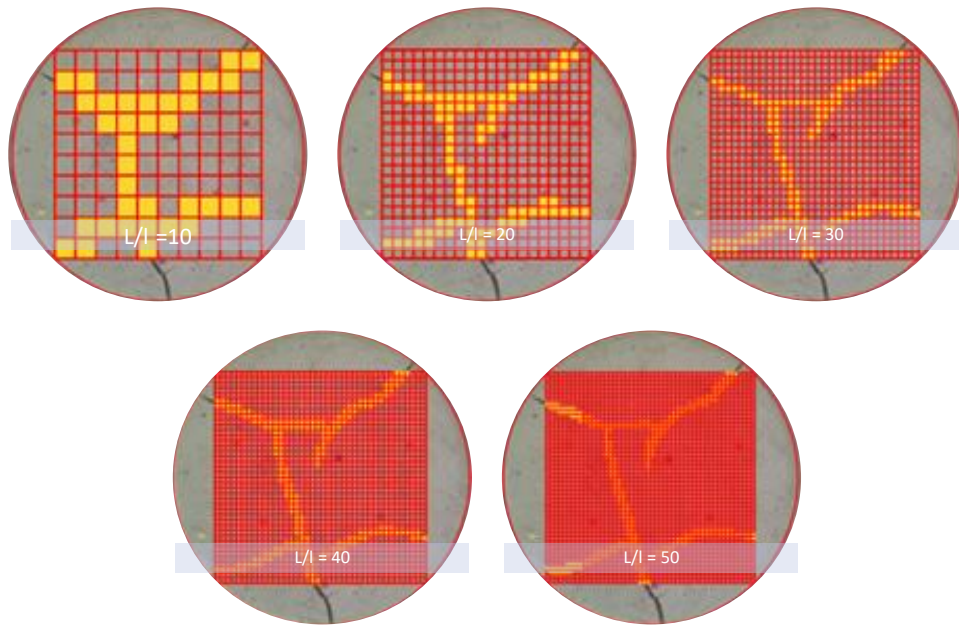


Figura 28. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 91.87 horas

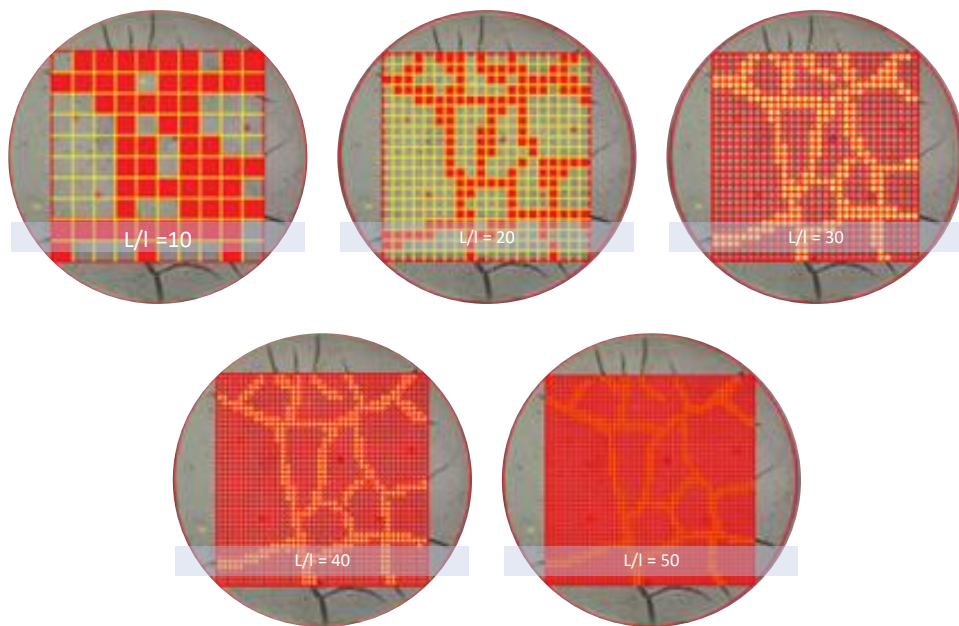


Figura 29. Número de cuadros sombreados para la determinación de la Dimensión Fractal en el Tiempo 136.75 horas

SEMILLERO DE GEOTECNIA

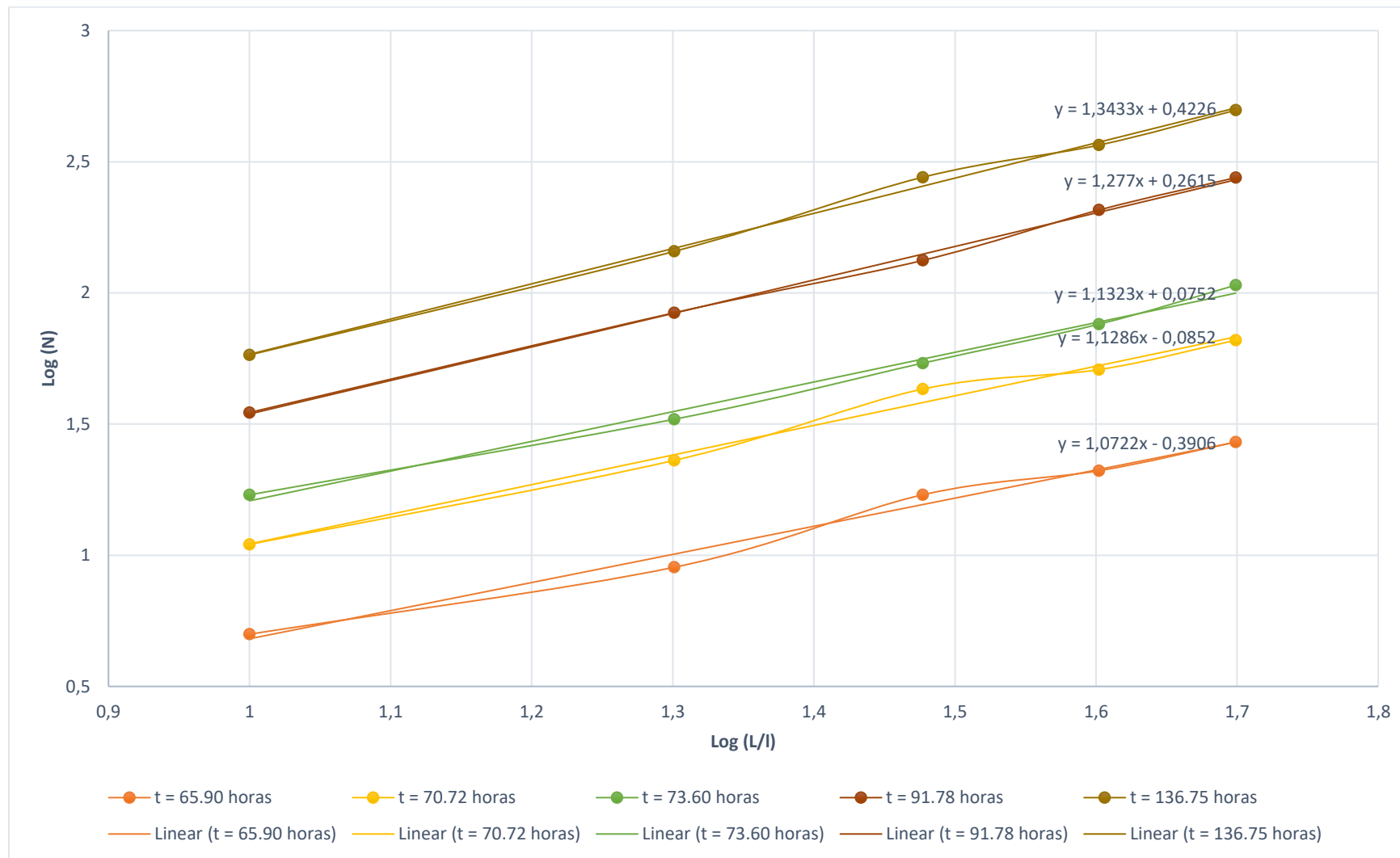
TRABAJO DIRIGIDO

La tabla de resultados que contiene la cantidad de cajas sombreadas en cada una de las muestras en los distintos tiempos se puede ver en los anexos Tabla 31. Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la Log (L/l) y Log (N) para el molde C y a las graficas se presentan a continuación con sus respectivas líneas de tendencia.

De acuerdo con la Gráfica 11. Relación L/l y N para cada uno de los tiempos en el molde C, la dimensión fractal para la muestra C en el tiempo $t = 65.90$ horas es de 1.0722, en el tiempo $t = 70.72$ horas es de 1.1286, en el tiempo $t = 73.60$ horas es de 1.1323, en el tiempo $t = 91.85$ horas es de 1.277 y para el tiempo $t = 136.75$ horas es de 1.3433.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Gráfica 11. Relación L/l y N para cada uno de los tiempos en el molde C

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Molde D:

Las mallas que se aplicaron al molde D tienen las siguientes características:

Mallas Muestra D (D = 40 cm)

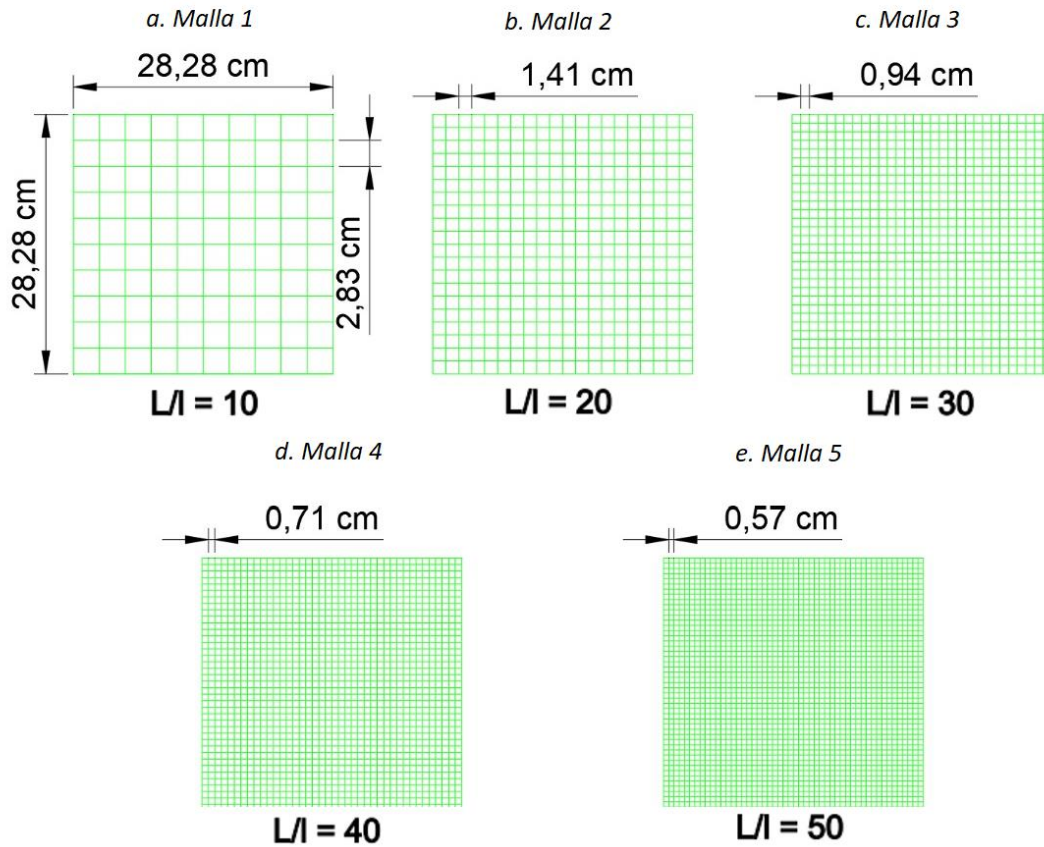


Figura 30 Características de las mallas para el molde D

Cada malla tiene de lado general 28.2843 cm, para la malla 1 el lado del cuadrado interior de la malla es 2.828 cm, la segunda es de 1.414 cm, la tercera es de 0.943 cm, la cuarta es de 0.707 cm y la quinta es de 0.566 cm. Con lo que se obtiene en la primera malla un total de 100 cuadros, la segunda se tienen 400 cuadros, la tercera 900 cuadros, la cuarta se tiene 1600 cuadros y la quinta 2500 cuadros.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 65.90$ horas

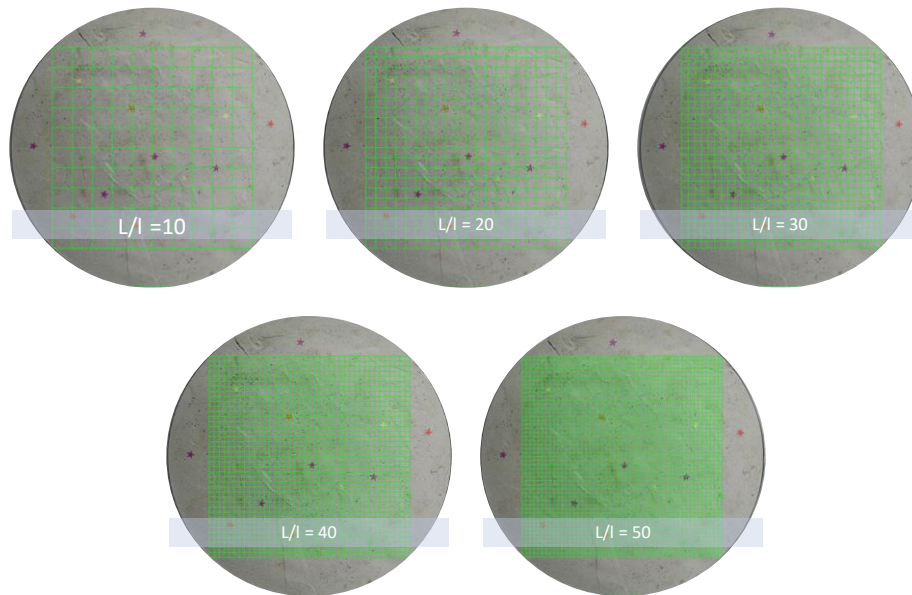


Figura 31 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 65.90$ horas

Para un tiempo $t = 70.72$ horas

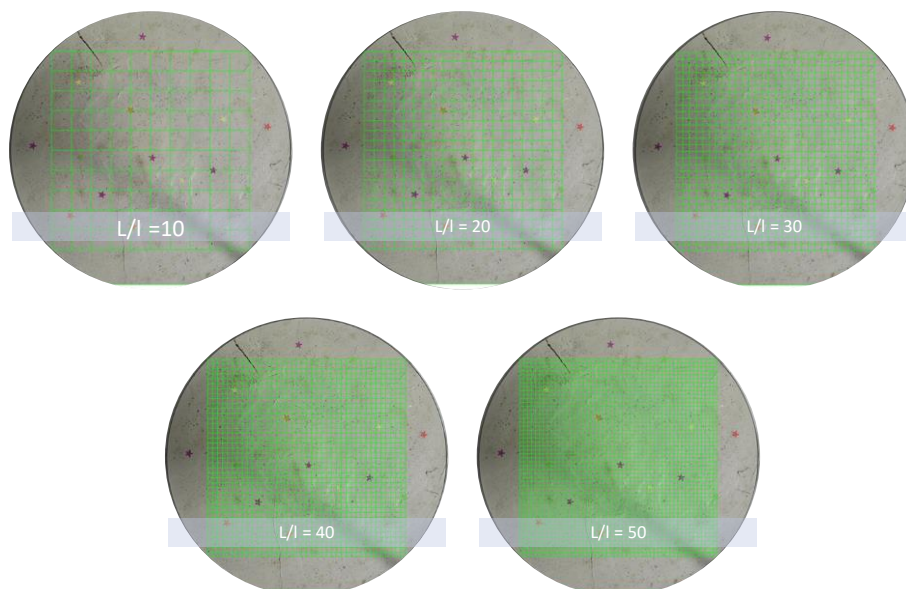


Figura 32 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 70.72$ horas

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 73.60$ horas

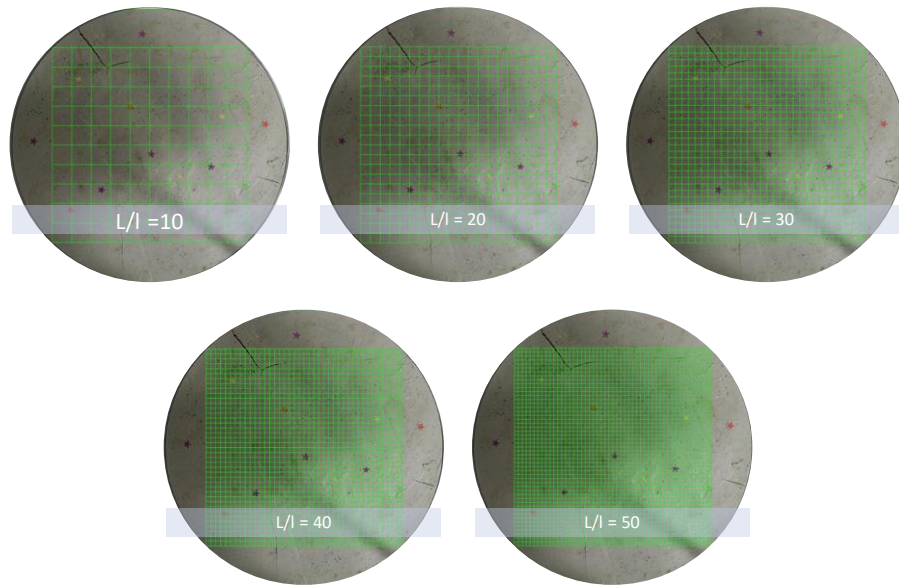


Figura 33 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 73.60$ horas

Para un tiempo $t = 91.87$ horas

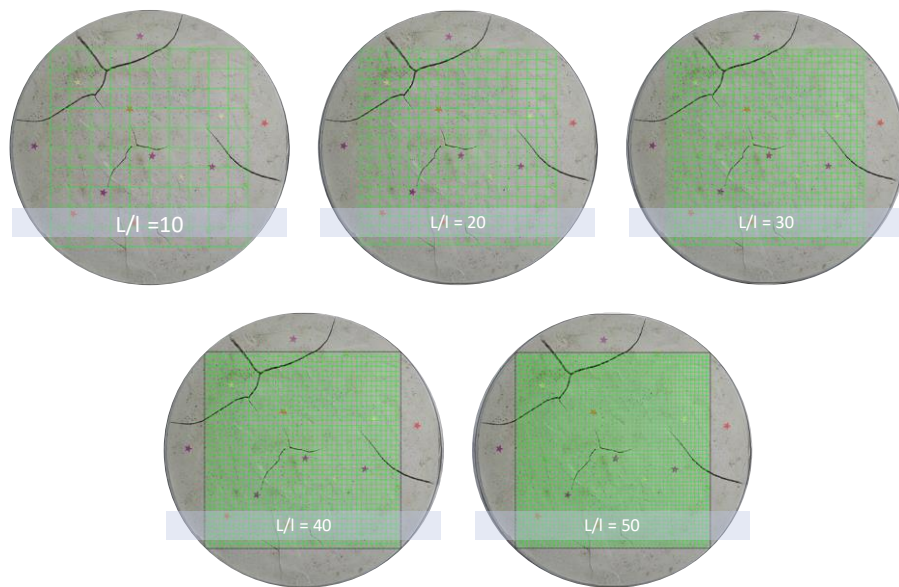


Figura 34 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 91.87$ horas

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 136.75$ horas

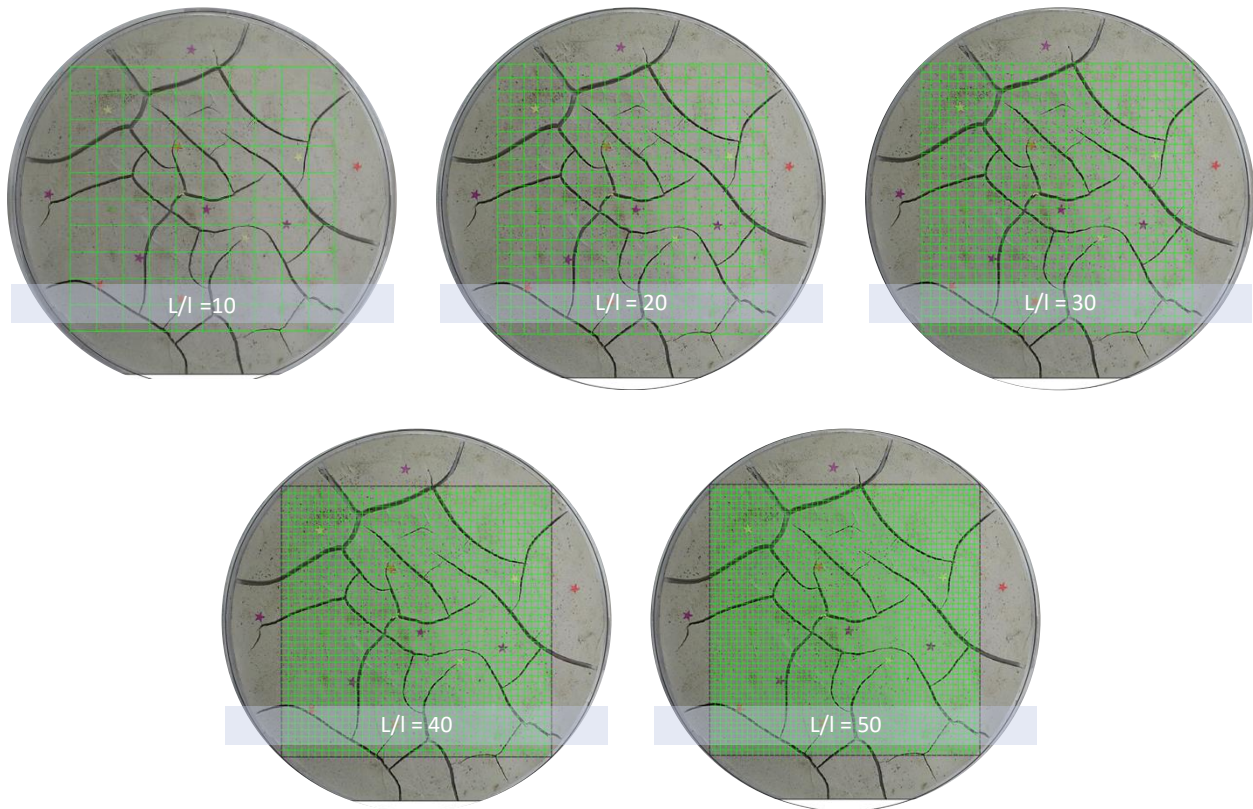


Figura 35 Mallas para la muestra en el tiempo $t = 136.75$ horas

Las características de las mallas en cada uno de los tiempos son las mismas, tanto en dimensión como en cuanto al número de cuadrados en cada malla.

Posteriormente se colorearon los cuadros que contenían parte de la figura. Los resultados de las imágenes coloreadas se muestran a continuación para cada uno de los tamaños de malla, en cada tiempo.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 65.90$ horas

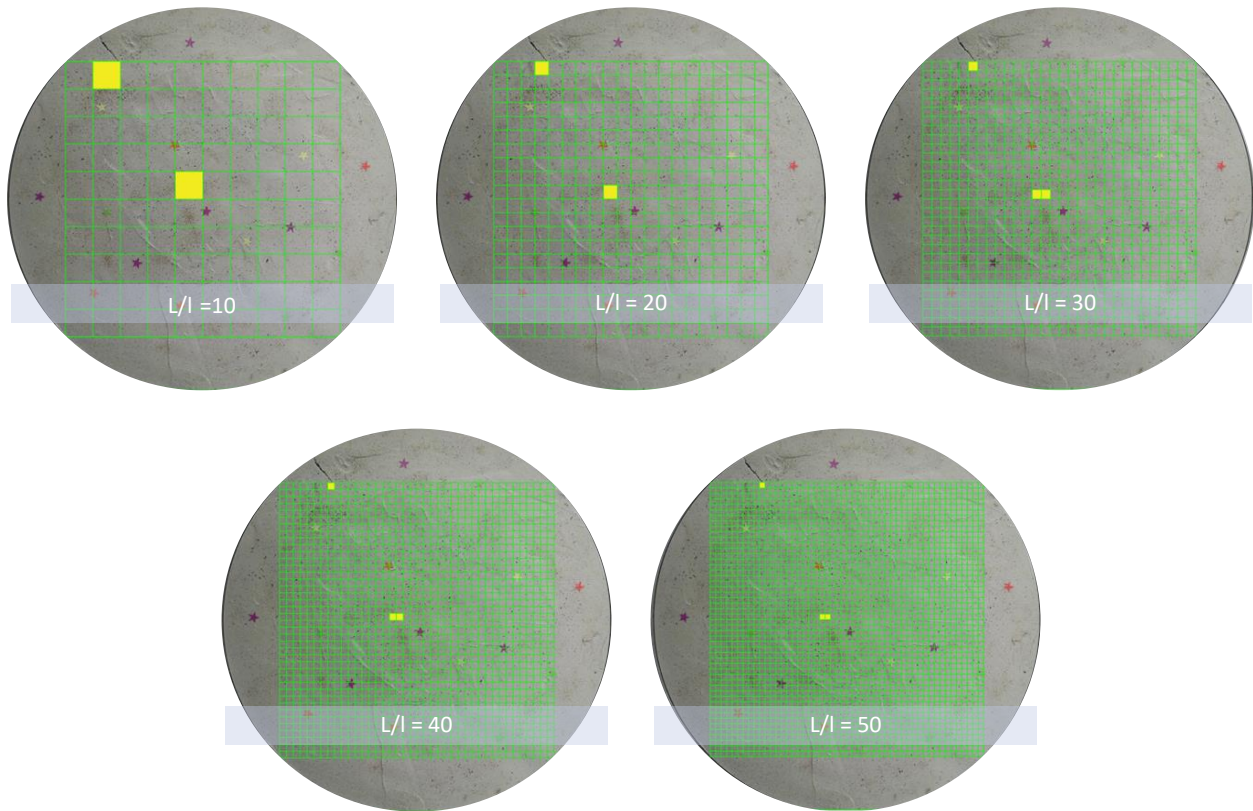


Figura 36 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 65.90$ horas

La cantidad de cuadros sombreados en cada malla se muestran a continuación.

Tabla 24 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 65.90$ horas

Escala de la malla (L/l)	Área total (cm ²)	Área subrayada (cm ²)	# cuadros
10	800	16.00	2
20	800	4.00	2
30	800	2.67	3
40	800	1.50	3
50	800	0.96	3

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 70.72$ horas

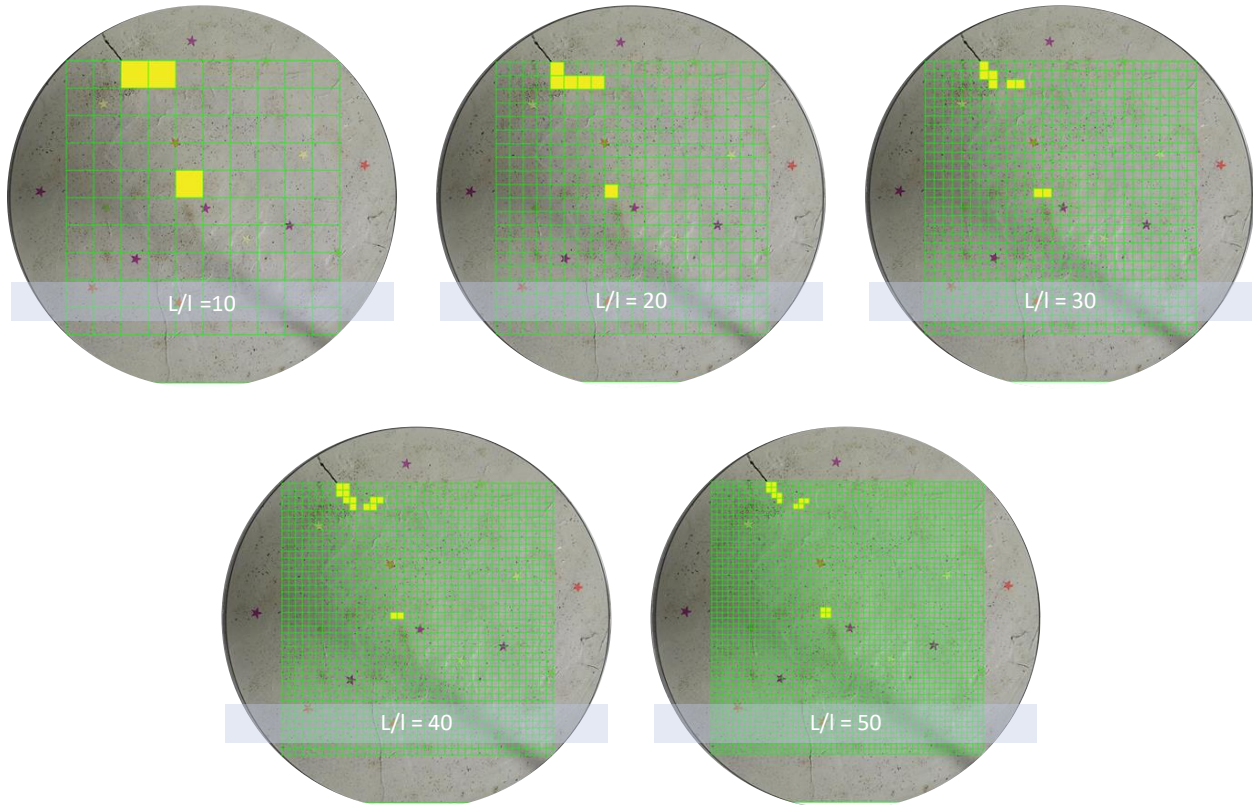


Figura 37 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 70.72$ horas

De la misma forma que en el apartado anterior, en la siguiente tabla se muestran los resultados del número de cuadros sombreados para cada malla.

Tabla 25 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 70.72$ horas

Escala de la malla (L/l)	Área total (cm ²)	Área subrayada (cm ²)	# cuadros
10	800	24.00	3
20	800	12.00	6
30	800	7.11	8
40	800	6.50	13
50	800	4.80	15

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 73.6$ horas

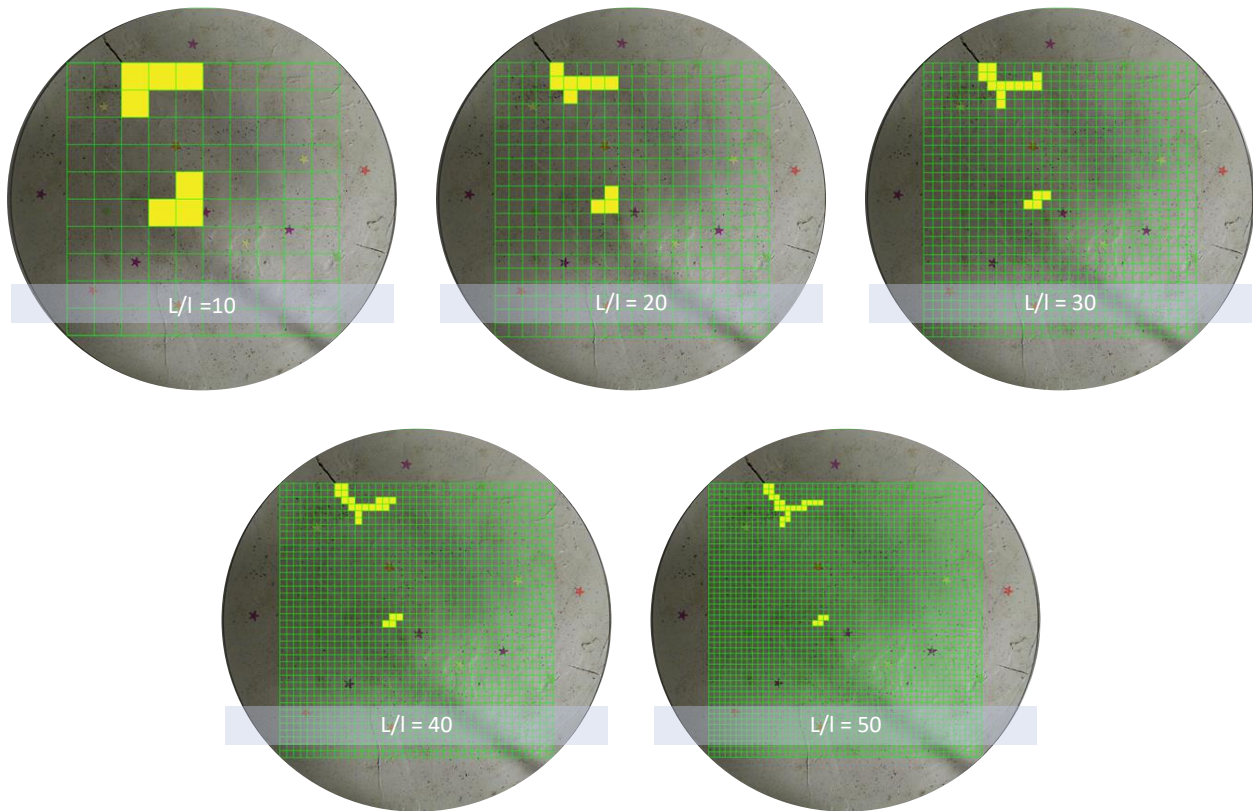


Figura 38 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 73.6$ horas

Número de cuadrados sombreados para cada malla.

Tabla 26 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 73.60$ horas

Escala de la malla (L/l)	Área total (cm ²)	Área subrayada (cm ²)	# cuadros
10	800	56.00	7
20	800	20.00	10
30	800	15.11	17
40	800	10.50	21
50	800	8.32	26

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 91.87$ horas

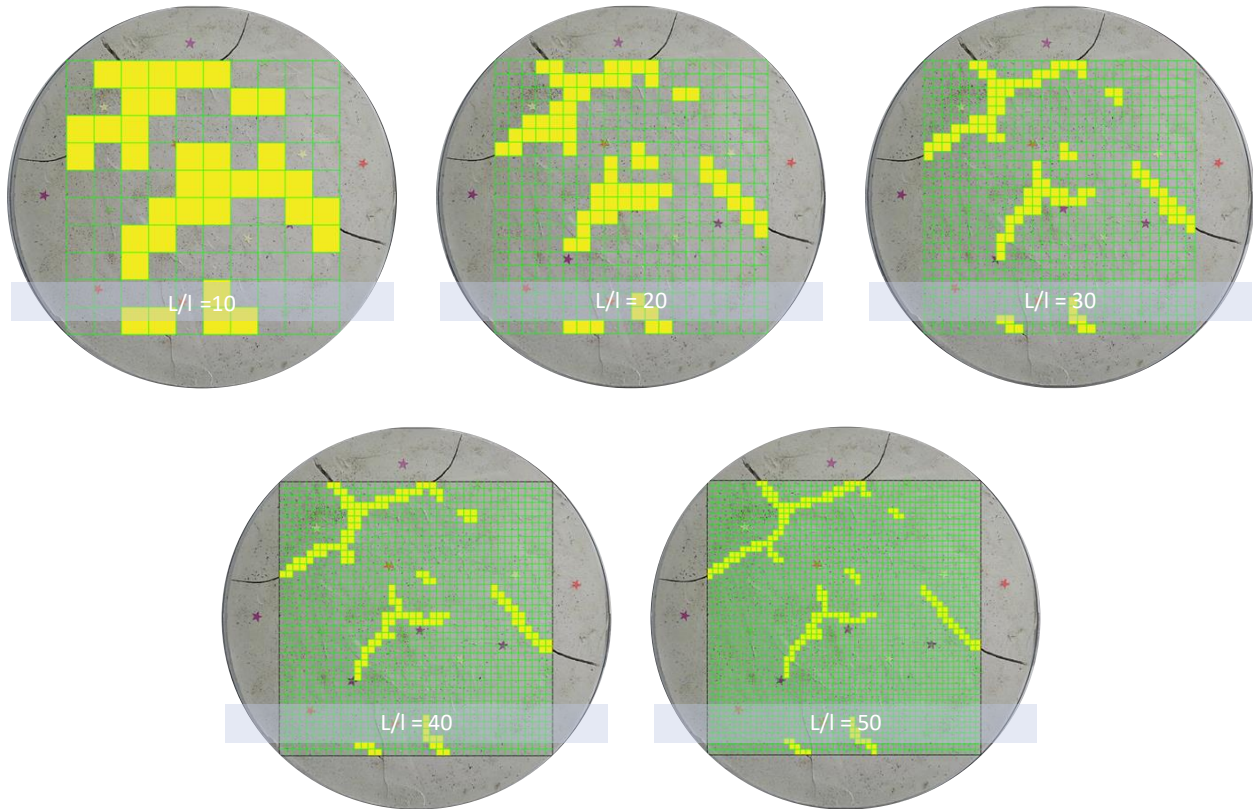


Figura 39 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 91.87$ horas

Número de cuadrados sombreados para cada malla.

Tabla 27 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 91.87$

Escala de la malla (L/l)	Área total (cm ²)	Área subrayada (cm ²)	# cuadros
10	800	288,00	36
20	800	142,00	71
30	800	89,78	101
40	800	68,50	137
50	800	54,40	170

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Para un tiempo $t = 136.75$ horas

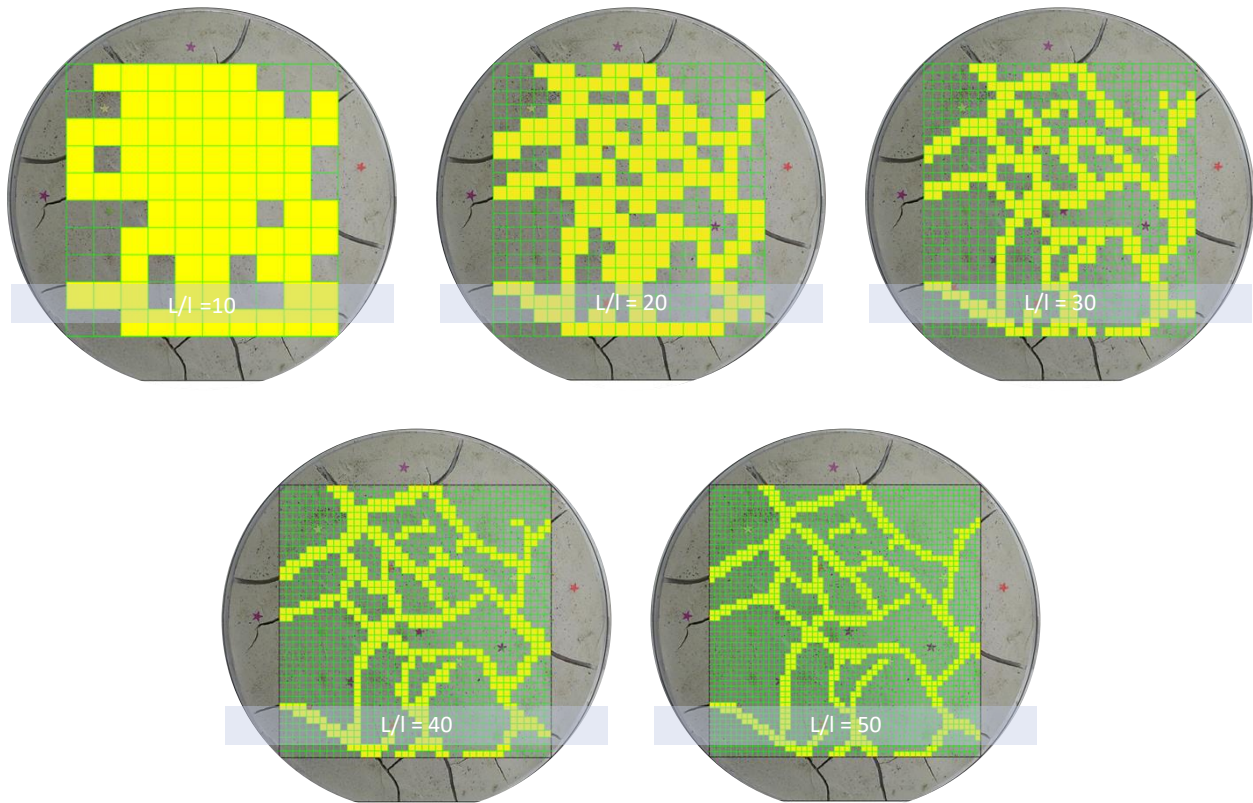


Figura 40 Mallas sombreadas para la muestra en el tiempo $t = 136.75$ horas

Número de cuadrados sombreados para cada malla.

Tabla 28 Numero de cuadros sombreados en cada una de las mallas para el tiempo $t = 136.75$ horas

Escala de la malla (L/l)	Área total (cm ²)	Área subrayada (cm ²)	# cuadros
10	800	592,00	74
20	800	398,00	199
30	800	284,44	320
40	800	233,00	466
50	800	196,48	614

SEMILLERO DE GEOTECNIA

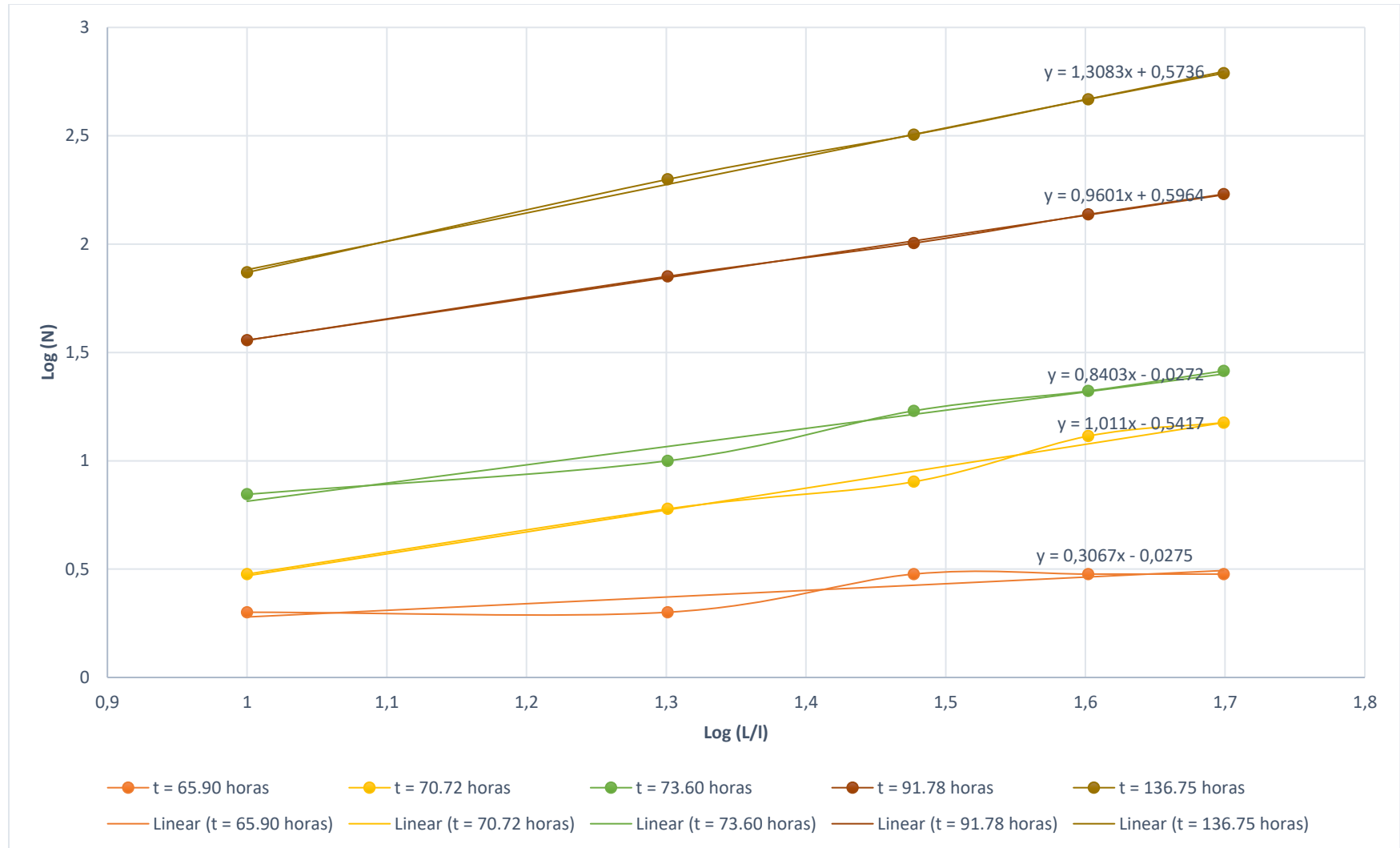
TRABAJO DIRIGIDO

La tabla de resultados se encuentra que contiene la cantidad de cajas sombreadas en cada una de las muestras en los distintos tiempos se puede ver en los anexos Tabla 32. Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la Log (L/l) y Log (N) para el molde D y a las graficas se presentan a continuación con sus respectivas líneas de tendencia.

De acuerdo con la Gráfica 12 Relación entre L/l y N para cada uno de los tiempos en el molde D, la dimensión fractal para la muestra D en el tiempo $t = 65.90$ horas es de 0.3067, en el tiempo $t = 70.72$ horas es de 1.011, en el tiempo $t = 73.60$ horas es de 0.8403, en el tiempo $t = 91.85$ horas es de 0.9601 y para el tiempo $t = 136.75$ horas es de 1.3083.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO



Gráfica 12 Relación entre L/I y N para cada uno de los tiempos en el molde D

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Etapa 8: Análisis de las dimensiones fractales encontradas.

A continuación, se presenta una tabla con los valores de las dimensiones fractales obtenidas para los tiempos evaluados

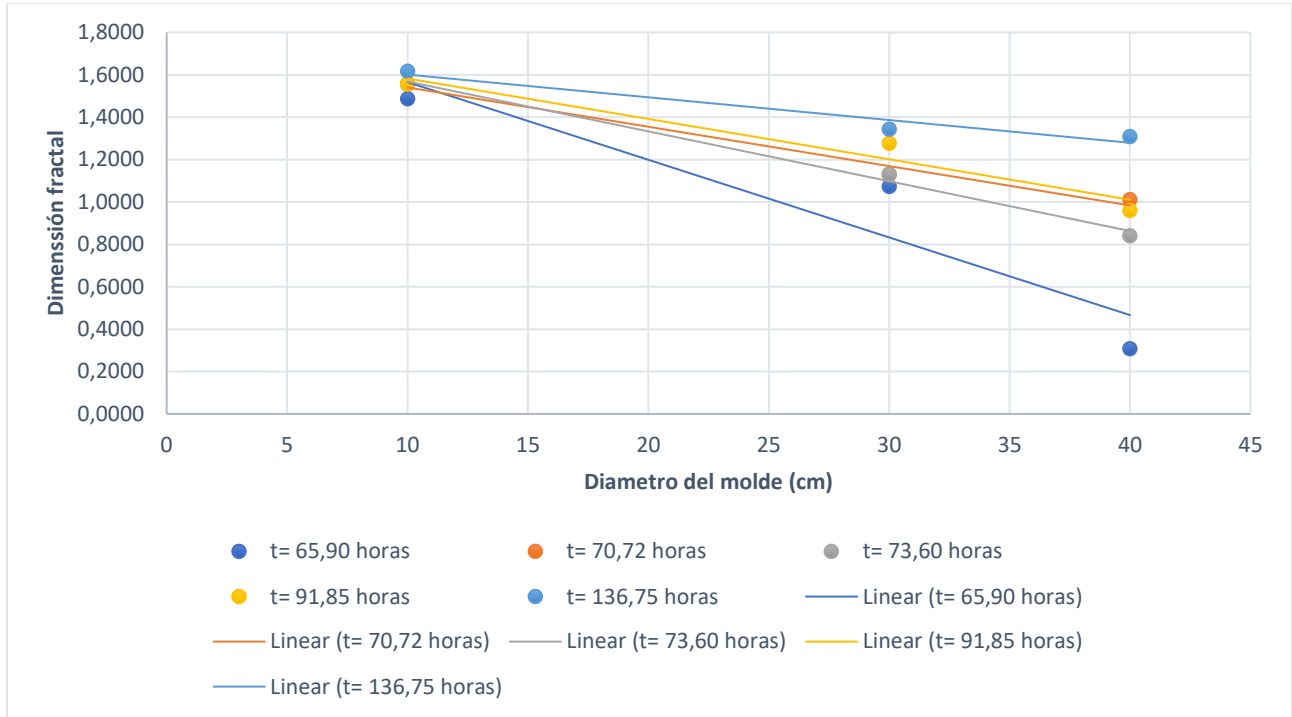
Tabla 29 Resumen de las dimensiones fractales encontradas en cada tiempo y en cada molde con su ajuste

Tiempo	Diámetro Molde (cm)	Dimensión fractal	R ² Ajuste
t= 65,90 horas	10	1,4857	0,9978
	30	1,0722	0,9881
	40	0,3067	0,7701
t= 70,72 horas	10	1,5542	0,9997
	30	1,1286	0,991
	40	1,0110	0,9881
t= 73,60 horas	10	1,5569	0,9984
	30	1,1323	0,9933
	40	0,8403	0,9734
t= 91,85 horas	10	1,5573	0,9980
	30	1,277	0,9985
	40	0,9601	0,9995
t= 136,75 horas	10	1,6155	0,9928
	30	1,3433	0,9973
	40	1,3083	0,9985

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

La siguiente gráfica muestra la relación entre la dimensión fractal y el tamaño del molde en todos los tiempos.



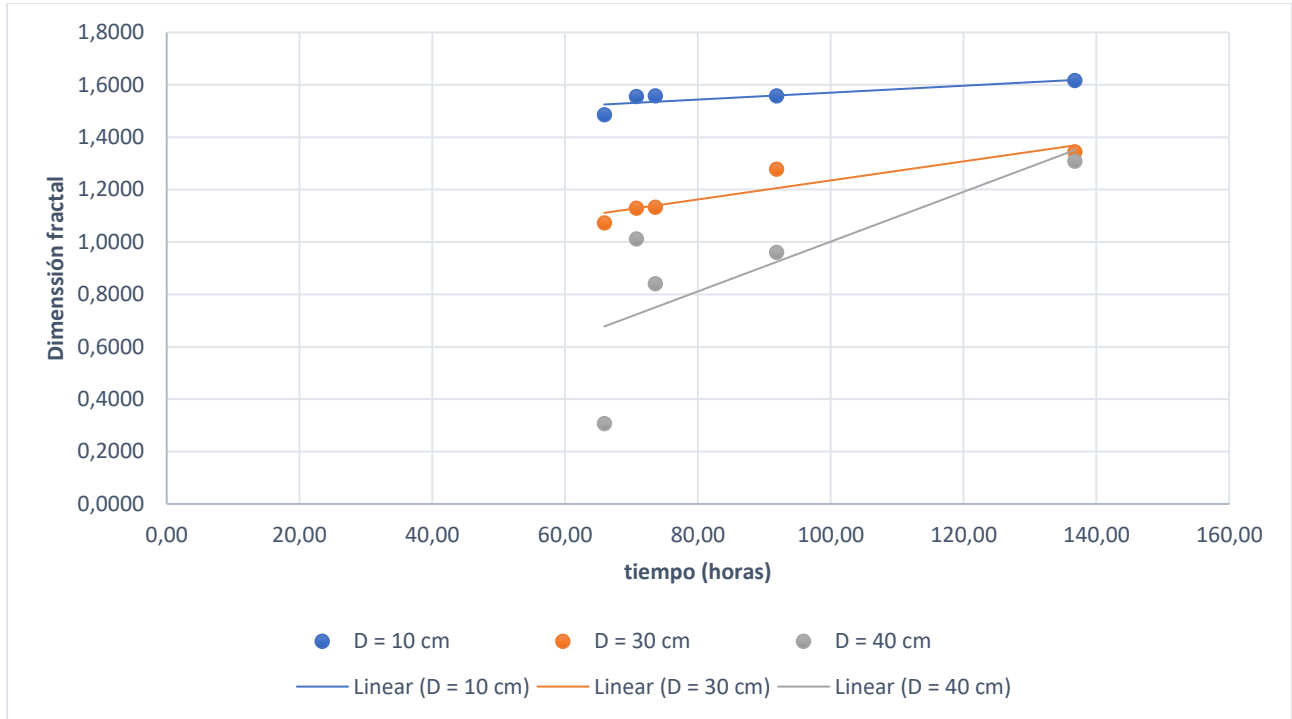
Gráfica 13. Relación de la dimensión fractal y el tamaño del molde en todos los tiempos

De acuerdo con la Tabla 29 Resumen de las dimensiones fractales encontradas en cada tiempo y en cada molde con su ajuste, se puede notar que al aumentar el tamaño del molde la dimensión fractal disminuye, adicionalmente se puede ver que la relación se adapta muy bien a una relación lineal, teniendo unos coeficientes de determinación mayores a 0,85. También de acuerdo con la Gráfica 13. Relación de la dimensión fractal y el tamaño del molde en todos los tiempos, se puede ver una tendencia a ir disminuyendo la pendiente con la que cambia la dimensión fractal a través del tamaño de los moldes, a medida que se aumenta el tiempo. Lo que puede indicar que para moldes pequeños la dimensión fractal, de forma independiente del tiempo que ha transcurrido, puede llegar a ser muy similar y tender a un valor, mientras que para moldes de mayor tamaño la diferencia es más grande en las dimensiones fractales.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Haciendo un análisis de los datos de la dimensión fractal con el tiempo en cada uno de los moldes, se obtienen la siguiente gráfica:



Gráfica 14. Relación de la dimensión fractal y el tiempo en cada uno de los moldes

Teniendo en cuenta la Tabla 29 Resumen de las dimensiones fractales encontradas en cada tiempo y en cada molde con su ajuste, se puede notar que el tiempo y la dimensión fractal tiene una relación directamente proporcional, es decir entre mayor tiempo la dimensión fractal aumenta, se puede notar que para tiempos pequeños las diferencias entre las dimensiones fractales son mayores, mientras que en los tiempos más grandes se ve como se reducen las diferencias entre estos. También se puede notar que entre menor el tamaño del molde la pendiente de la gráfica disminuye, por lo que la dimensión fractal aumenta de forma más lenta.

Conclusiones

Etapa 9: Conclusión de acuerdo con los resultados obtenidos.

- De acuerdo con el análisis de las imágenes y su comparación con el tiempo de aparición de las primeras fisuras se puede observar que el tamaño del molde sobre el cual se realizó en el ensayo influye, mayor diámetro de la muestra, el tiempo de aparición de la primera fisura es más grande, es claro que la relación que se halló no tiene una correlación estricta, debido a que los tiempos a los cuales se asociaron la aparición de las fisuras son de los controles y no corresponde exactamente al momento inicial de fisuración, sino horas más tarde.
- La relación entre la dimensión fractal y el molde de la muestra es inversamente proporcional y se aproxima a una relación lineal.
- En relación con la dimensión fractal para cada tiempo, se observa una relación directamente proporcional, entre más tiempo de fisuración mayor es la dimensión fractal.
- Entre los tiempos donde no se generan más fisuras o estas permanecen en el mismo estado, la dimensión fractal permanece aproximadamente igual para estos tiempos.
- A medida que el tiempo aumenta los cambios en la dimensión fractal a través del tamaño del molde se hace más pequeños, y de forma similar a medida que el tamaño del molde disminuye los cambios en la dimensión fractal a través del tiempo son más pequeños
- Al tener menores tamaños de molde la dimensión fractal parece tender a un valor, por lo que las relaciones podrían cambiar al acercarse a estos puntos.
- Es necesario para establecer una relación repetir este experimento y su análisis fractal, de esta forma descartar o confirmar las relaciones que se han identificado.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

ANEXOS

Tabla 30 Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la Log (L/l) y Log (N) para el molde A

Muestra A (D = 10 cm)					
Escala de la malla (L/l)	Área subrayada (cm²)	lado (cm)	# cuadros	X = log(L/l)	Y = log(N)
Para un Tiempo = 65,9 horas					
10	3	0,71	6	1	0,78
20	1,9999	0,35	16	1,301	1,2
30	1,6111	0,24	29	1,477	1,46
40	1,375	0,18	44	1,602	1,64
50	1,3602	0,14	68	1,699	1,83
Para un Tiempo = 70,72 horas					
10	2,5	0,71	5	1	0,7
20	1,8748	0,35	15	1,301	1,18
30	1,5	0,24	27	1,477	1,43
40	1,3749	0,18	44	1,602	1,64
50	1,2201	0,14	61	1,699	1,79
Para un Tiempo = 73,6 horas					
10	3	0,71	6	1	0,78
20	1,9999	0,35	16	1,301	1,2
30	1,7778	0,24	32	1,477	1,51
40	1,5624	0,18	50	1,602	1,7
50	1,46	0,14	73	1,699	1,86
Para un Tiempo = 91,78 horas					
10	4	0,71	8	1	0,9
20	2,8751	0,35	23	1,301	1,36
30	2,2778	0,24	41	1,477	1,61
40	2,0625	0,18	66	1,602	1,82
50	2,0398	0,14	102	1,699	2,01
Para un Tiempo = 136,75 horas					
10	4,5	0,71	9	1	0,95
20	2,8751	0,35	23	1,301	1,36
30	2,5	0,24	45	1,477	1,65
40	2,5627	0,18	82	1,602	1,91
50	2,3797	0,14	119	1,699	2,08

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 31. Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la Log (L/l) y Log (N) para el molde C

Muestra C (d= 30 cm)					
Escala de la malla (L/l)	Área subrayada (cm²)	lado (cm)	# cuadros	X = log(L/l)	Y = log(N)
Para un Tiempo = 65,9 horas					
10	22,4898	2,12	5	1	0,7
20	10,1257	1,06	9	1,301	0,95
30	8,4998	0,71	17	1,477	1,23
40	5,9056	0,53	21	1,602	1,32
50	4,8608	0,42	27	1,699	1,43
Para un Tiempo = 70,72 horas					
10	49,4997	2,12	11	1	1,04
20	25,8768	1,06	23	1,301	1,36
30	21,4996	0,71	43	1,477	1,63
40	14,3421	0,53	51	1,602	1,71
50	11,882	0,42	66	1,699	1,82
Para un Tiempo = 73,6 horas					
10	76,4997	2,12	17	1	1,23
20	37,1261	1,06	33	1,301	1,52
30	26,9996	0,71	54	1,477	1,73
40	21,3739	0,53	76	1,602	1,88
50	19,2625	0,42	107	1,699	2,03
Para un Tiempo = 91,78 horas					
10	157,4989	2,12	35	1	1,54
20	93,9734	1,06	84	1,301	1,92
30	66,4989	0,71	133	1,477	2,12
40	58,2147	0,53	207	1,602	2,32
50	49,5046	0,42	275	1,699	2,44
Para un Tiempo = 136,75 horas					
10	260,9995	2,12	58	1	1,76
20	162,0015	1,06	144	1,301	2,16
30	137,9979	0,71	276	1,477	2,44
40	102,9348	0,53	366	1,602	2,56
50	89,4637	0,42	497	1,699	2,70

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Tabla 32. Tabla Resumen de los cuadros obtenidos y resultado de la Log (L/l) y Log (N) para el molde D

Muestra D (d= 40 cm)					
Escala de la malla (L/l)	Área subrayada (cm²)	lado (cm)	# cuadros	X = log(L/l)	Y = log(N)
Para un Tiempo = 65,9 horas					
10	16	2,828	2	1	0,301
20	4	1,414	2	1,301	0,301
30	2,67	0,943	3	1,477	0,477
40	1,5	0,707	3	1,602	0,477
50	0,96	0,566	3	1,699	0,477
Para un Tiempo = 70,72 horas					
10	24	2,828	3	1	0,477
20	12	1,414	6	1,301	0,778
30	7,11	0,943	8	1,477	0,903
40	6,5	0,707	13	1,602	1,114
50	4,8	0,566	15	1,699	1,176
Para un Tiempo = 73,6 horas					
10	56	2,828	7	1	0,845
20	20	1,414	10	1,301	1
30	15,11	0,943	17	1,477	1,23
40	10,5	0,707	21	1,602	1,322
50	8,32	0,566	26	1,699	1,415
Para un Tiempo = 91,78 horas					
10	288	2,828	36	1	1,556
20	142	1,414	71	1,301	1,851
30	89,78	0,943	101	1,477	2,004
40	68,5	0,707	137	1,602	2,137
50	54,4	0,566	170	1,699	2,23
Para un Tiempo = 136,75 horas					
10	592	2,828	74	1	1,869
20	398	1,414	199	1,301	2,299
30	284,44	0,943	320	1,477	2,505
40	233	0,707	466	1,602	2,668
50	196,48	0,566	614	1,699	2,788

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Bibliografía

(2010). *Conceptos básicos de la mecánica de fractura*.

Protokimica. (2020). Obtenido de <https://www.protokimica.com/producto/bentonita/>

Rodríguez, J. A. (2019). *Mecánica de suelos: Naturaleza y Propiedades*. Ciudad de México: Trillas.

Gustavo, R. (2000). El concepto de fractal. In *FRACTALES para Profanos* (1st ed., p. 116).

Rodríguez, J., Mariño, M., Ávila, N., & Echeverri, D. (2002). Medidas fractales de arterias coronarias en un modelo experimental de reestenosis. Armonía matemática intrínseca de la estructura arterial. *Rev. Colomb. Cardiol*, December 2015, 65–72.

Cuadrado, A. (2013). *Detección de grietas por desecación en arcillas mediante GPR*. 133. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/17275>

Ávila Álvarez, G. E. (2004). Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá. In *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. aplicación a la arcilla de Bogotá*. <https://doi.org/B.19330-2005>

Básicos, C., & Mecánica, D. E. L. a. (2010). *Conceptos básicos de la mecánica de fractura*. 1–15.

DGPM. (2007). *Perfil del Mercado de Caolín*. 1, 48.

Garza, M. A. (1988). Los sistemas de clasificación. *Manual de Técnicas de Investigación Para Estudiantes de Ciencias Sociales*, 85–163.

SEMILLERO DE GEOTECNIA

TRABAJO DIRIGIDO

Vallejo, L. E. (2009). Fractal analysis of temperature-induced cracking in clays and rocks.

Geotechnique, 59(3), 283–286. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.283>

Rodríguez, G. (2017). *Cálculo de la dimensión Fractal objetos 3D*. 85.

https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/67830/1/Calculo_de_la_dimension_fractal_sobre_objetos_3D_IVORRA_RODRIGUEZ_GACEL.pdf

Díaz-Rodríguez, J. A. (2019). *MECÁNICA DE SUELOS Naturaleza y propiedades* (Trillas (ed.); segunda).