

**ESTUDIO GRANULOMÉTRICO COMPARATIVO EN SUELO CAOLÍN  
AMARILLO USANDO LA NORMATIVIDAD INVÍAS Y UN EQUIPO DE ÚLTIMA  
GENERACIÓN**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**ELABORADO POR:**

**JENY YANETH HERNÁNDEZ LEÓN**

**CÓD.: 504815**

**RAFAEL RICARDO CARVAJAL MILLÁN**

**CÓD.: 504688**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2018**

**ESTUDIO GRANULOMÉTRICO COMPARATIVO EN SUELO CAOLÍN  
AMARILLO USANDO LA NORMATIVIDAD INVÍAS Y UN EQUIPO DE ÚLTIMA  
GENERACIÓN**

**ELABORADO POR:  
JENY YANETH HERNÁNDEZ LEÓN  
RAFAEL RICARDO CARVAJAL MILLÁN**

**CÓD.: 504815  
CÓD.: 504688**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director PhD. JUAN CARLOS RUGE  
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ  
2018**



## Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

**Nota de aceptación:**

El trabajo de grado titulado “Estudio granulométrico comparativo en suelo caolín amarillo, usando la normatividad INVÍAS y un equipo de última generación”, presentado por los estudiantes Rafael Ricardo Carvajal Millán y Jeny Yaneth Hernández León, en cumplimiento del requisito para optar al título de pregrado de “Ingeniería Civil” fue aprobado por el Director.

---

Dr. JUAN CARLOS RUGE

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, noviembre 20 de 2018

## **DEDICATORIA**

### **RAFAEL RICARDO CARVAJAL MILLÁN**

A Dios por ser parte fundamental de mi existencia, por darme fuerza y fortaleza para superar las dificultades que se presentan en el camino de la vida.

A mis padres, parte esencial en mi vida, quienes con su sabiduría y amor hicieron posible alcanzar esta meta.

A mi hermana Johana Carvajal Millán quien me acompaña día y noche en todos los momentos de adversidad y sobre todo por tener su actitud de ayuda sin importar las circunstancias.

## TABLA DE CONTENIDO

---

DEDICATORIA .....	5
GLOSARIO .....	12
RESUMEN.....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	14
2. GENERALIDADES.....	15
2.1. ANTECEDENTES.....	15
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	19
2.3. LIMITACIONES .....	20
2.3.1. Tiempo .....	21
2.3.2. Contenido.....	21
2.3.3. Alcance .....	21
3. OBJETIVOS .....	22
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
4. JUSTIFICACIÓN .....	23
5. MARCO DE REFERENCIA.....	25
5.1. MARCO TEÓRICO .....	25
5.2. MARCO CONCEPTUAL.....	28
5.3. MARCO LEGAL.....	32
5.4. ESTADO DEL ARTE.....	32
6. METODOLOGÍA.....	33
6.1. TIPO DE ESTUDIO.....	33
6.2. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	33
6.3. DISEÑO METODOLÓGICO .....	33
7. MONTAJE DEL ENSAYO .....	35
7.1. ENSAYO DE HIDRÓMETRO CONVENCIONAL PARA LA DETERMINACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS.....	35
7.1.1. Hidrómetro .....	35
7.1.2. Materiales.....	35
7.1.2.1. Caolín .....	36

7.1.2.2.	Defloculante.....	37
7.1.2.3.	Agua destilada.....	38
7.1.2.4.	Hidrómetro.....	38
7.1.3.	Procedimiento.....	38
7.2.	ENSAYO CON EQUIPO PARIO DE ÚLTIMA GENERACIÓN.....	42
7.2.1.	Equipo PARIO.....	42
7.2.2.	Materiales.....	42
7.2.2.1.	Caolín amarillo.....	42
7.2.2.2.	Dispositivo PARIO.....	43
7.2.2.3.	Condiciones de la muestra.....	43
7.2.3.	Descripción de ensayo.....	44
8.	RESULTADOS.....	48
8.1.	RESULTADOS HIDRÓMETRO 152 H – CAOLÍN AMARILLO.....	48
8.1.1.	Muestra 1: Caolín amarillo 1.....	49
8.1.2.	Muestra 2: Caolín amarillo 2.....	51
8.1.3.	Muestra 3: Caolín amarillo 3.....	52
8.1.4.	Muestra 4: Caolín amarillo 4.....	54
8.1.5.	Muestra 5: Caolín amarillo 5.....	55
8.1.6.	Comparativo de las 5 muestras (hidrómetro).....	57
8.2.	RESULTADOS SISTEMA PARIO – CAOLÍN AMARILLO.....	59
8.2.1.	Muestra 1: Caolín amarillo 1 (PARIO).....	59
8.2.1.1.	Distribución del suelo de la muestra 1 (PARIO).....	60
8.2.1.2.	Cálculo de la distribución de la muestra 1 (PARIO).....	61
8.2.2.	Muestra 2: Caolín amarillo 2 (PARIO).....	63
8.2.2.1.	Distribución del suelo de la muestra 2 (PARIO).....	63
8.2.2.2.	Cálculo de la distribución de la muestra 2 (PARIO).....	65
8.2.3.	Muestra 3: Caolín amarillo 3 (PARIO).....	67
8.2.3.1.	Distribución del suelo de la muestra 3.....	67
8.2.3.2.	Cálculo de la distribución de la muestra 3.....	68
8.2.4.	Muestra 4: Caolín amarillo 4 (PARIO).....	70
8.2.4.1.	Distribución del suelo de la muestra 4.....	71
8.2.4.2.	Cálculo de la distribución de la muestra 4.....	72
8.2.5.	Muestra 5: Caolín amarillo 5 (PARIO).....	74

8.2.5.1. Distribución del suelo de la muestra 5 .....	75
8.2.5.2. Cálculo de la distribución de la muestra 5 .....	76
8.2.6. Comparativo de las 5 muestras (PARIO) .....	79
9. HIDRÓMETRO vs. PARIO .....	81
10. CONCLUSIONES .....	83
11. RECOMENDACIONES .....	84
12. BIBLIOGRAFÍA .....	85
ANEXOS .....	88



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resultados de investigación MANNA, L. La, ROSTAGNO .....	16
Figura 2. Gráfica de correlación.....	19
Figura 3. Tamices de malla cuadrada.....	28
Figura 4. Muestra de caolín .....	37
Figura 5. Defloculante.....	37
Figura 6. Agua destilada .....	38
Figura 7. Hidrómetro .....	38
Figura 8. Preparación de la muestra.....	39
Figura 9. Agitador mecánico .....	39
Figura 10. Probeta con muestra de caolín amarillo.....	40
Figura 11. Agitación de muestra con agitador manual.....	40
Figura 12. Introducción del hidrómetro .....	41
Figura 13. Limpieza del hidrómetro.....	41
Figura 14. Caolín amarillo – Muestra equipo PARIO .....	43
Figura 15. Dispositivo PARIO .....	43
Figura 16. Preparación de suelo.....	44
Figura 17. Cilindro con agua destilada.....	45
Figura 18. Equipo PARIO estabilizado.....	45
Figura 19. Agitación de la muestra .....	46
Figura 20. Cambio de cilindro .....	46
Figura 21. Toma de datos.....	47

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco legal aplicable al proyecto .....	32
Tabla 2. Caracterización del caolín .....	36
Tabla 3. Parámetros de las muestras .....	48
Tabla 4. Resumen de pesos de las muestras (hidrómetro) .....	48
Tabla 5. Rangos de diámetro según normas .....	49
Tabla 6. Resultados de la muestra 1 (hidrómetro) .....	49
Tabla 7. Resultados de la muestra 2 (hidrómetro) .....	51
Tabla 8. Resultados de la muestra 3 (hidrómetro) .....	52
Tabla 9. Resultados de la muestra 4 (hidrómetro) .....	54
Tabla 10. Resultados de la muestra 5 (hidrómetro) .....	55
Tabla 11. Comparación de resultados de las cinco muestras (hidrómetro) .....	57
Tabla 12. Resumen de pesos de muestras (PARIO) .....	59
Tabla 13. Resultados de la muestra 1 (PARIO) .....	59
Tabla 14. Resultados del cálculo de la distribución de material en la muestra 1 ...	62
Tabla 15. Resultados de la muestra 2 (PARIO) .....	63
Tabla 16. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 2 .....	65
Tabla 17. Resultados de la muestra 3 (PARIO) .....	67
Tabla 18. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 3 .....	69
Tabla 19. Resultados de la muestra 4 (PARIO) .....	70
Tabla 20. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 4 .....	73
Tabla 21. Resultados de la muestra 5 (PARIO) .....	74
Tabla 22. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 5 .....	77
Tabla 23. Clasificación de partículas del suelo (S.U.C.S.) .....	82

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Escala logarítmica de la muestra 1 (hidrómetro) .....	50
Gráfica 2. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 1 .....	50
Gráfica 3. Escala logarítmica de la muestra 2 (hidrómetro) .....	51
Gráfica 4. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 2 .....	52
Gráfica 5. Escala logarítmica de la muestra 3 (hidrómetro) .....	53
Gráfica 6. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 3 .....	53
Gráfica 7. Escala logarítmica de la muestra 4 (hidrómetro) .....	54
Gráfica 8. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 4 .....	55
Gráfica 9. Escala logarítmica de la muestra 5 (hidrómetro) .....	56
Gráfica 10. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 5 .....	56
Gráfica 11. Escala logarítmica de las cinco muestras (hidrómetro) .....	58
Gráfica 12. Distribución del suelo de la muestra 1 (PARIO) .....	60
Gráfica 13. Escala logarítmica de la muestra 1 (PARIO) .....	60
Gráfica 14. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 1 (PARIO).....	62
Gráfica 15. Distribución del suelo de la muestra 2 (PARIO) .....	64
Gráfica 16. Escala logarítmica de la muestra 2 (PARIO) .....	64
Gráfica 17. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 2 (PARIO).....	66
Gráfica 18. Distribución del suelo de la muestra 3 (PARIO) .....	67
Gráfica 19. Escala logarítmica de la muestra 3 (PARIO) .....	68
Gráfica 20. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 3 (PARIO).....	70
Gráfica 21. Distribución del suelo de la muestra 4 (PARIO) .....	71
Gráfica 22. Escala logarítmica de la muestra 4 (PARIO) .....	72
Gráfica 23. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 4 (PARIO).....	74
Gráfica 24. Distribución del suelo de la muestra 5 (PARIO) .....	75
Gráfica 25. Escala logarítmica de la muestra 5 (PARIO) .....	76
Gráfica 26. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 5 (PARIO).....	78
Gráfica 27. Escala logarítmica de las 5 muestras (PARIO) .....	79
Gráfica 28. Comparativo de la distribución del suelo (PARIO) .....	80
Gráfica 29. Resultados del hidrómetro y el PARIO .....	81

## GLOSARIO

**Análisis granulométrico:** Según la norma INV-E-123-07, el análisis granulométrico “tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo”; permite determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices.

**Ensayo por hidrómetro:** Definido como el método de prueba que “cubre las determinaciones cuantitativas de la distribución de tamaño de las partículas de las fracciones finas de los suelos. La distribución de tamaños de partículas más grandes de 75  $\mu\text{m}$  (retenidas en el tamiz No 200) se determina por tamizado, en tanto que la distribución de las partículas más pequeñas que 75  $\mu\text{m}$  se determina por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro que asegure los datos necesarios” (INVIAS, 2007, pág. 1)

**Ensayo por pipeta:** (Flores & Alcalá, 2010) establecen que “este método cuantifica las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica, y se considera el más exacto en la determinación granulométrica”.

**Dispersantes:** En INV-E-123-07 se presenta como dispersante, “una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución”. Su función es separar las partículas de limo y arcilla.

**Suelos arcillosos:** La norma INV-E-102-07 define arcilla como: “Un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con un índice de plasticidad igual o mayor que 4, para el cual la coordenada que representa el índice plástico contra el límite líquido en la carta de plasticidad cae por encima de la línea A”.

**Análisis de tamaño de partícula automatizado:** PARIO calcula la distribución del tamaño de partícula según la ley de Stokes, con un rango de tamaños de partícula de 63 $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ . Permite el funcionamiento automatizado y sin supervisión, sin interferencias del personal del laboratorio. Simplemente se configura y revisa 6 horas después a una medición final con todos los datos que se necesita.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra los resultados obtenidos en un estudio comparativo de métodos para el análisis de suelos, con base en el material caolín amarillo, mostrando los pros y contras del uso del método del hidrómetro y del equipo de última tecnología Pario, en la determinación de materiales del suelo.

Para la ejecución de este estudio, se adquirió el equipo en mención y se realizó la capacitación correspondiente al uso del equipo Pario.

Posteriormente al proceso de consulta de antecedentes se realizaron los ensayos de laboratorio con caolín amarillo; cinco ensayos por medio del hidrómetro y cinco, con el uso del equipo anteriormente mencionado. Con base en dichos ensayos de laboratorio, se realizó el análisis comparativo que permitió identificar los factores que alteran los resultados de estudios centrados en la determinación de partículas finas en los suelos, permitiendo sustentar la idea de la importancia del uso de tecnología en las distintas etapas de los procesos constructivos.

Se finalizó con la sistematización de ensayos y el análisis de los resultados a la luz de la normatividad establecida, realizando comparaciones gráficas entre los datos obtenidos por los diferentes métodos trabajados y concluyendo en torno a las ventajas que con base en el estudio se encontraron.

Palabras clave: Caolín, Hidrómetro, Pario, automatizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el marco de estudio de los suelos, su caracterización, composición y propiedades, son aspectos fundamentales para la industria de la construcción pues con base en ello se determina el uso que desde la Ingeniería Civil se puede dar a determinado terreno.

Para el análisis de tamaño de partículas finas del suelo se cuenta con variados métodos, los cuales han sido motivo de estudio de diversos investigadores quienes han pretendido determinar cuál de ellos le ofrece al campo de la Ingeniería resultados más veraces y precisos. Entre ellos, el método de Bouyoucos presenta un uso extendido y relativamente aceptado para tal fin, sin embargo, múltiples errores que pueden darse durante los ensayos, han generado la necesidad de pensar en nuevas técnicas y/o tecnologías que demuestren avances en la misma medida que el mundo actual también lo hace.

Este método que hace uso de un hidrómetro convencional permite realizar una buena aproximación de la composición del suelo, pero sus condiciones de ejecución no han logrado limitar el margen de error de los resultados, por ello, en la actualidad es posible encontrar compañías que han venido incluyendo tecnologías de precisión en aparatos de última generación que proponen reducir a tan solo un 3% dicho margen.

En el presente documento, se muestran los resultados de un estudio comparativo entre el hidrómetro convencional (Hidrómetro 152 H) y el fabricado por la compañía Meter (Sistema Pario) para la determinación de tamaño de partícula en suelo caolín amarillo. Para ello, se presentan los resultados obtenidos con los dos instrumentos y se realiza el análisis correspondiente, determinando cuál de ellos atiende de mejor manera a las necesidades actuales, presentes en la industria de la construcción.

A continuación se muestran aspectos relacionados con la pregunta de investigación que orientó el presente estudio, se describen las metodologías de ensayos utilizados con base en la norma INVIAS-124-07 y en lo propuesto por la compañía Meter Environment, para el equipo Pario; también el marco teórico y conceptual comentando trabajos y/o resultados previos que investigadores en el área han publicado referentes al análisis de tamaño de partículas finas en suelos granulares, así como aquellos referentes al uso de equipos de granulometría de última generación a los que podemos acceder. Por último, se presentan los datos obtenidos en los procedimientos de laboratorio de los ensayos propuestos, la sistematización de resultados, su correspondiente análisis, consideraciones y conclusiones que frente al tema realizamos los autores del documento.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1. ANTECEDENTES

En el marco del estudio de la física de suelos, la determinación de tamaño de partícula ha sido uno de los análisis más relevantes y experimentados, bien sea con fines agronómicos o de ingeniería. Como bien describen (Bravo, García, Morales, & Ramírez, 2012):

“El análisis granulométrico se emplea de forma muy habitual. Es común para la identificación y caracterización de los materiales geológicos en la Ingeniería. También se usa para determinar si esa granulometría es conveniente para producir concreto o usarlo como relleno en una construcción civil”.

La necesidad de conocer las características y particularidades de los suelos en diferentes condiciones, ha generado que a lo largo de historia diversos investigadores busquen, propongan y experimenten métodos que sean cada vez más precisos y confiables, y que garanticen una comprensión detallada de las condiciones granulométricas. Muestra de ello son estudios como el de González, Castro y Valderrama (1980)<sup>1</sup> el cual destaca las propiedades físicas del suelo entre otros, que demuestran que desde hace décadas se precisan nuevas técnicas o tecnologías que minimicen el tiempo de operación y maximicen la confiabilidad de los resultados.

A continuación, se mencionan algunos estudios que abordan ciertos aspectos relacionados con nuestro proyecto:

#### **LUDMILA LA MANNA; CÉSAR MARIO ROSTAGNO; CARLOS GUILLERMO BUDUBA; JORGE IRISARRI & ANA NAVAS, (2016)<sup>2</sup>**

Este estudio muestra los resultados obtenidos en la determinación granulométrica en suelos volcánicos, realizando un estudio comparativo entre distintos métodos analíticos (hidrómetro, pipeta y difracción láser).

Los autores señalan que recientemente, se ha popularizado la implementación del método basado en la difracción laser puesto que los análisis granulométricos son clave en los estudios de suelos y, que la necesidad de encontrar resultados precisos hace que día a día la comunidad académica busque nuevos caminos que suplan

---

<sup>1</sup> GONZÁLEZ, A., CASTRO, D. y VALDERRAMA, H., 1980. Estudio granulométrico para el balance de los elementos nutritivos del suelo. , vol. 30.

<sup>2</sup> MANNA, L. La, ROSTAGNO, C.M., BUDUBA, C.G., IRISARRI, J. y NAVAS, A., 2016. Determinaciones de granulometría en suelos volcánicos: Comparación entre distintos métodos analíticos. Ciencia del Suelo, vol. 34, no. 2, pp. 355-364. ISSN 03263169.

las necesidades actuales; por ello, los autores determinaron y compararon las fracciones granulométricas en 59 muestras de suelos volcánicos determinando las fracciones granulométricas por medio del método del hidrómetro. En 35 muestras la determinación además por el método de la pipeta y en las restantes se usó difracción laser, efectuando el análisis de correlación de Pearson en la información colectada.

Tal y como los autores esperaban, los valores obtenidos de las distintas fracciones granulométricas variaron significativamente dependiendo del método utilizado, obteniendo que En el 92% de las muestras, los tenores de arena determinados por el método del hidrómetro fueron más elevados que los obtenidos por el método de la pipeta, con una diferencia media de 7,6%, mientras que en el 97% de las muestras, los tenores de limo determinados por el método del hidrómetro fueron más bajos que los obtenidos por el método de la pipeta, con una diferencia media de 10,2%.

A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos en tal investigación:

**Figura 1. Resultados de investigación MANNA, L. La, ROSTAGNO**

Método	Hidrómetro	Pipeta	Difracción Láser
Cantidad de muestra	42 g o 100 g si es arenoso	10 g o 20 g si es arenoso*	2g*
Eliminación de Materia orgánica	No	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en baño a 80 °C	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en baño a 80 °C
Dispersión con Hexametáfosfato de Sodio	Al 5%, 24 horas, con agitación periódica	Al 4%, 5 minutos, con agitación	Al 40%, 8 horas, con agitación
Dispersión por Ultrasonido	No	No	Sí
Determinación granulometría	Sedimentación en Probeta de 1 litro.  Agitación. Lectura de la densidad de la solución de sedimentación a los 40 segundos.  Reposo. Lectura de la densidad de la solución de sedimentación a los 120 minutos.	Sedimentación en probeta graduada.  Se toma alícuota a los 10 cm.  Se toma otra alícuota en tiempo y profundidad variable según temperatura.  Determinación de peso seco de alícuotas. Determinación de arenas por tamizado.	Equipo por difracción láser Beckman Coulter.

Fuente: 1 MANNA, L. La, ROSTAGNO, C.M., BUDUBA, C.G., IRISARRI, J. y NAVAS, A., 2016. Determinaciones de granulometría en suelos volcánicos: Comparación entre distintos métodos analíticos. Ciencia del Suelo.

Los autores señalan que en cuanto a las arcillas, los resultados fueron muy variables cuando se compararon los métodos pipeta e hidrómetro, y que aunque se considera que el método de la pipeta es más eficiente para muestras con bajos contenidos de



arcilla, y el del hidrómetro, para muestras con elevados contenidos de arcilla, se obtuvieron valores fuera de lo usual, lo que sugiere que los tiempos de lectura que implican los ensayos por hidrómetro y la existencia de variados tipos de material orgánico pueden modificar los resultados, mostrando así que el ensayo por hidrómetro parece no ser adecuado para todos los tipos de suelos.

La comparación entre el método de difracción laser e hidrómetro también arrojó inconsistencias pues se pudo concluir que el primer método tiende a subestimar la fracción de arcilla, probablemente debido a la morfología de las partículas. Por tanto, los investigadores pudieron concluir que, aunque los métodos presentan una adecuada correlación para las fracciones arena y limo, la baja correlación para la fracción de arcilla resta confiabilidad a los resultados.

### **VILLEGAS, AGUILERA, & FLORES, (1978)<sup>3</sup>**

Este artículo, es una muestra significativa de la preocupación que desde hace ya varias décadas aqueja al campo del análisis de suelos y del cómo se requiere innovar los métodos de análisis con el objetivo de obtener resultados cada vez más confiables.

En esta época, los autores emplearon Defloculante (oxalato de sodio, metasilicato y calgón) para medir la textura de los suelos, variando el método de agitación entre pipeta e hidrómetro. Su estudio, denominado como método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo, pretendió mostrar un procedimiento que se ajustase a las leyes de sedimentación y que mostrara concordancia entre los métodos de hidrómetro y pipeta; para ello, analizaron ocho muestras de suelo mientras realizaban variaciones en tiempo y Defloculante en paralelo con ambos métodos. A partir de lo anterior, los autores presentaron el siguiente método de hidrómetro:

“A suelo secado en la estufa a 110° C durante 24 horas, es necesario eliminarle la materia orgánica con agua oxigenada al 30% y las sales, sirviéndose de bujías de porcelana porosa y vacío; es necesario utilizar Defloculante tales como Calgón, oxalato de sodio o silicato de sodio. Se agita la suspensión durante 12 horas, se agrega agua hasta 1000 ml en una probeta de esa capacidad y se toman lecturas con hidrómetro (R) en un tiempo (t), de manera tal que oscile entre 40 segundos y 24 horas, a fin de utilizar, con estos datos, las fórmulas siguientes:

$$P = \frac{R\alpha}{W_0} 100 \text{ y } d = 5,57 \frac{\sqrt{98,5 - R}}{t}$$

---

<sup>3</sup> VILLEGAS, M., AGUILERA, N. y FLORES, L., 1978. Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. *Dialnet*, vol. 2, no. 2, pp. 168-193.

En donde:

P = Porcentaje de partículas en suspensión

$\alpha$  = Constante que se puede considerar igual a 1

W<sub>0</sub> = Peso en gramos de la muestra usada en el análisis

d = Diámetros máximos y mínimos de las partículas sedimentadas en micras.

R = Lectura del hidrómetro en gramos por litro de la suspensión del suelo.

t = Tiempo de reposo de la suspensión en minutos.

Con los datos obtenidos se elabora una gráfica colocando en las ordenadas los porcentajes de partículas en escala uniforme y en las abscisas los logaritmos de los diámetros. Según la investigación, la gráfica resultante permite determinar el porcentaje de arcilla, limos o cualquier otro lote.

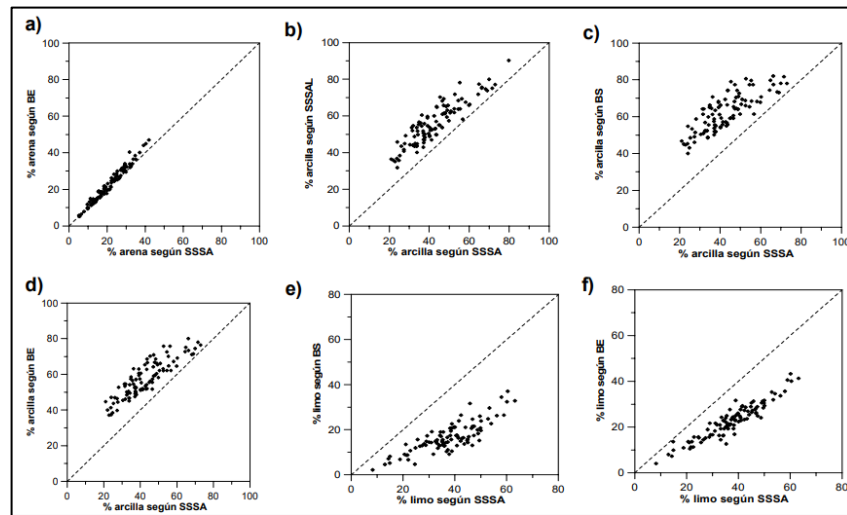
#### **GARCÍA, MEDINA Y NÚÑEZ (2008)<sup>4</sup>**

Con el objetivo de evaluar la influencia de los tiempos de lectura del hidrómetro para la determinación del tamaño de partículas, los autores realizaron 101 mediciones comparando tres metodologías (SSSAL, Estándar de Bouyoucos y Bouyoucos simplificada) con la establecida por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA). Los resultados de tal investigación, son presentados en las siguientes gráficas:

---

<sup>4</sup> GARCÍA, J., MEDINA, H. y NÚÑEZ, D., 2008. El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de la Habana. *Cultivos Tropicales*, vol. 29, no. 2, pp. 21-26.

Figura 2. Gráfica de correlación



Fuente: GARCÍA, J., MEDINA, H. y NÚÑEZ, D., 2008. El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de la Habana

A partir de la comparación realizada por los diferentes métodos, los autores concluyeron que la variabilidad de resultados puede deberse en gran medida a la limitación en el tiempo de lectura, que en varios casos genera que se hagan asociaciones erróneas entre las fracciones de arcillas y limos, tendiendo a considerar menos fracción de limos de la que realmente puede estar presente en un suelo determinado.

Con lo anterior, los autores resaltan la importancia de continuar profundizando respecto al tema pues es común que en ciertas partes del mundo se modifique el método estándar con el objetivo de disminuir el trabajo técnico que este tipo de análisis requiere, pero con ello variando los resultados entorno a la clasificación de partículas.

Los trabajos de investigación citados anteriormente, son muestra clara de que desde hace ya varias décadas se precisan nuevas técnicas o tecnologías que minimicen el tiempo de operación en los estudios granulométricos, mientras que de manera paralela permitan maximizar la confiabilidad de los resultados.

## 2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la determinación cuantitativa de la distribución de tamaño de las partículas de las fracciones finas de los suelos, se utiliza tradicionalmente el método de análisis

granulométrico por medio del hidrómetro, enmarcado en la norma de INVÍAS INV-E124. En este método es posible encontrarse con faltas que pueden causar determinaciones imprecisas en el análisis, afectando los resultados obtenidos durante el ensayo y reduciendo la confiabilidad requerida para tomar decisiones en un proyecto.

Con el fin de minimizar los errores y ampliar el grado de certidumbre de los resultados, han surgido variados métodos que prometen ser la solución requerida, pero como lo han demostrado diversos estudios, no siempre se obtienen los resultados esperados pues estos métodos, como lo consideran Beuselinck, Govers, Poesen, Degraer y Froyen (1998)<sup>5</sup> tienen algunas desventajas importantes referentes al consumo de tiempo, la dependientes de técnica de laboratorio y errores asociados a la operación. Por ello, vemos como autores como Andrade, Al-Qureshi y Hotza (2011)<sup>6</sup> plantea la utilización de métodos automatizados pues la industria, requiere métodos rápidos y de bajo costo los cuales manejan estándares y protocolos que ofrecen disminuir y en algunos casos eliminar los problemas que se puedan llegar a presentar durante la determinación del porcentaje de arcillas en una muestra de suelo.

Con base en lo anterior, se observa la necesidad de verificar la efectividad de los nuevos métodos (Equipo PARIO) en comparación con las técnicas tradicionales (específicamente la técnica del hidrómetro) en el análisis granulométrico de suelo caolín amarillo, para lo cual se procurará dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿El uso del equipo Pario de última generación en el estudio granulométrico en suelo caolín amarillo presenta ventajas con respecto al estudio granulométrico por medio del hidrómetro en el mismo suelo?

### 2.3. LIMITACIONES

En la práctica, la determinación de tamaño de partícula de un suelo genera la necesidad de contar con más de un instrumento de medición (hidrómetro) para agilizar la obtención de resultados. El costo de adquisición del equipo de última tecnología PARIO, se considera una limitante debido a que, en comparación con el promedio de costo del hidrómetro convencional, resulta ser muy elevado.

---

<sup>5</sup> BEUSELINCK, L., GOVERS, G., POESEN, J., DEGRAER, G. y FROYEN, L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: Comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, vol. 32, no. 3-4, pp. 193-208.

<sup>6</sup> ANDRADE, F.A., AL-QURESHI, H.A. y HOTZA, D., 2011. Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science* [en línea], vol. 51, no. 1-2, pp. 1-7. ISSN 01691317. DOI 10.1016/j.clay.2010.10.028. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>.

Por tratarse de un equipo electrónico, es necesario contar con una fuente constante de energía (el computador al que se conecta el sistema, sirve como fuente de alimentación) pues las fallas eléctricas retrasarían la toma de datos y por ende el análisis de los resultados.

### **2.3.1. Tiempo**

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio fue necesario contar con el tiempo establecido por la norma, en la cual se indica que un lapso de 24 horas es el periodo óptimo para la realización de los ensayos.

### **2.3.2. Contenido**

Dado que el uso de tecnología automatizada en los procesos de análisis de suelos no está actualmente difundido, no fue posible acceder a trabajos previos que específicamente compararan el uso de equipos con los métodos tradicionales.

### **2.3.3. Alcance**

En el presente proyecto de investigación, se realizarán los ensayos a través de los métodos por hidrómetro y equipo Pario en suelos arcillosos, en el marco de un estudio de análisis de tamaño de partículas finas de los suelos; dichas experimentaciones se llevarán a cabo en laboratorios que cuenten con las condiciones que establece la normatividad INVIAS. Se proyecta presentar la descripción de los estudios granulométricos obtenidos en un periodo académico, que permitirán comparar el grado de precisión de los resultados generados por los equipos en cotejo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio granulométrico comparativo en un suelo caolín amarillo usando la normatividad INVÍAS y el equipo PARIO de última generación.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar los ensayos de laboratorio, describiendo las condiciones, equipos y materiales utilizados en el ensayo granulométrico por el método convencional (hidrómetro) y el equipo de última tecnología (Pario).
- Determinar las fracciones granulométricas en suelo caolín amarillo aplicando el método convencional (hidrómetro) y el equipo de última tecnología (Pario).
- Analizar la factibilidad de emplear el equipo de última tecnología estableciendo pros y contras con respecto al ensayo granulométrico por medio del hidrómetro.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El análisis granulométrico según León (2001)<sup>7</sup> permite tener acceso a información cualitativa y cuantitativa, sobre otras propiedades físicas de los suelo permitiendo calcular datos como la humedad equivalente, el punto de saturación, el punto de marchitez permanente y la densidad aparente.

Para este análisis, se cuenta con una variedad de métodos; entre ellos se encuentran: el hidrómetro, la pipeta, sensor de presión, rayos x, y el de difracción de rayos láser, aunque como se comenta en Medina, García y Núñez, el más empleado en nuestro país es el del hidrómetro basado en la Ley de Stokes<sup>8</sup>; sin embargo, este método enmarcado en la norma de INVÍAS INV-E124, presenta una serie de situaciones en las que el estudio granulométrico puede presentar errores y ampliar el rango de confianza de los resultados obtenidos; una de ellas es la referente a la determinación de la fracción de arena pues diversos estudios como el realizado por Norambuena, Luzio y Vera (2002)<sup>9</sup> quienes realizando un análisis comparativo entre el método del hidrómetro y el de pipeta, encontraron que aun cuando los resultados entre ambos métodos son similares, los porcentajes de los separados texturales difieren, incluso para suelos con bajos contenidos de carbono orgánico y baja salinidad.

Con el objetivo de mejorar la precisión de la clasificación textural, hoy por hoy se plantea el uso de nuevas tecnologías, con métodos automatizados, uno de ellos es el propuesto por la compañía METER, que utilizando el equipo PARIO, plantea una reducción significativa de tiempo y una mejora en la precisión de los resultados.

Con base en lo anterior, el presente trabajo de grado, pretende realizar una comparación entre el método del hidrómetro, definido según el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, establecido en la norma INV-E124 de dicha entidad y el equipo de

---

<sup>7</sup> LEÓN ARTETA, R., 2001. Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos. *Terra*, vol. 19, no. 3, pp. 219-225.

<sup>8</sup> GONZÁLEZ, H.M., GARCÍA, J. y NÚÑEZ, D., 2007. El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo The hydrometer method : theoretical basis for its employment in determining the soil particle-size distribution. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 16, no. 3, pp. 19-25. ISSN 1010-2760.

<sup>9</sup> NORAMBUENA V., P., LUZIO L., W. y VERA E, W., 2002. Comparación Entre Los Métodos De La Pipeta Y Bouyoucos Y Su Relación Con La Retención De Agua En Ocho Suelos De La Zona Altiplánica De La Provincia De Parinacota, Chile. *Agricultura Técnica [en línea]*, vol. 62, no. 1. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S036528072002000100015&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036528072002000100015&lng=en&nrm=iso&tlng=en).

última generación, Pario, determinando ventajas y/o desventajas de su implementación en un estudio granulométrico en suelos arcillosos.



## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. MARCO TEÓRICO

La granulometría del suelo según Gabriels y Lobo<sup>10</sup> es un parámetro, una propiedad del suelo relacionada con su comportamiento y con propiedades físicas y químicas de gran importancia. Entre ellas, y concerniente a nuestra investigación, encontramos el análisis textural del suelo, el cual permite ajustar sus prácticas de manejo y programar los usos que este permite; por ejemplo, Ingaramo (2006)<sup>11</sup> nos muestra que, desde la granulometría, podemos observar la relación entre la textura del suelo y el crecimiento de raíces en determinadas especies vegetales. Así, son variados los estudios tanto agropecuarios como de ingeniería que precisan del conocimiento de tales propiedades y es por ello que es de esperar que la tecnología creciente del siglo XXI nos proponga alternativas entorno a tal análisis. Mientras esto sucede, es habitual evidenciar que los métodos convencionales siguen siendo frecuentemente utilizados; entre ellos tenemos el análisis por hidrómetro, que según se establece en la norma I.N.V.E -124-07, se determina como un “método de prueba para determinaciones cuantitativas de la distribución del tamaño de las partículas más finas de los suelos”<sup>12</sup>. Este tipo de análisis es uno de los mayormente extendidos en el mundo, sin embargo, hoy por hoy se siguen encontrando factores que afectan los cálculos y por ende los resultados obtenidos por este método basado en la ley de Stokes. Inclusive, la norma INVÍAS realiza una serie de observaciones que pueden causar determinaciones imprecisas referentes a dicho ensayo:

- Suelo secado al horno antes del ensayo – Excepto para el caso de suelos inorgánicos de resistencia seca baja, el secado al horno puede causar cambios permanentes en el tamaño de las partículas.
- Agente dispersante no satisfactorio o en cantidad insuficiente – Siempre y cuando se vayan a ensayar suelos nuevos o no usuales, es necesario realizar tanteos para determinar el tipo y la cantidad de compuesto químico que producirá la dispersión y defloculación más efectivas.

---

<sup>10</sup> GABRIELS, D. y LOBO L., D., 2003. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venezuelos*, pp. 37-48.

<sup>11</sup> INGARAMO, O., 2003. Indicadores físicos de la degradación de suelo. S.I.: Universidad de Coruña.

<sup>12</sup> INVÍAS, 2007. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. I.N.V.E-123-07. [en línea], no. 200, pp. 2-7. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>.

- Dispersión incompleta del suelo en la suspensión. - Agitación insuficiente de la suspensión en el cilindro al comienzo del ensayo.
- Demasiado suelo en suspensión. - Los resultados del análisis hidrométrico serán afectados si el tamaño de la muestra excede las cantidades recomendadas.
- Perturbación de la suspensión cuando se introduce o se remueve el hidrómetro. Tal perturbación es muy corriente que ocurra cuando el hidrómetro se extrae rápido después de una lectura.
- El hidrómetro no está suficientemente limpio. La presencia de polvo o grasa en el vástago del hidrómetro puede impedir el desarrollo de un menisco uniforme.
- Calentamiento no uniforme de la suspensión. Variación excesiva de la temperatura de la suspensión durante el ensayo.
- Pérdida de material después del ensayo. Si la masa del suelo secado al horno se obtiene después del ensayo, toda la suspensión debe ser lavada cuidadosamente del cilindro.<sup>13</sup>

Diversos autores trabajan en torno al tema, estudiando factores, métodos y materiales en pro del mejoramiento del análisis de suelos como herramienta fundamental de estudios geotécnicos, pues tal como lo consideran Di Stefano, Ferro y Mirabile<sup>14</sup>, los métodos de clasificación textural consumen mucho tiempo, además de presentar otras cuantas limitaciones. Con el objetivo de investigar al respecto y buscar mejoras ante esta situación, García, Medina y Núñez<sup>15</sup>, realizaron un estudio comparativo entre el método de pipeta y el método del hidrómetro concluyendo que, aunque el primero garantiza mayor precisión, se observan falencias relacionadas con tiempos y montajes, mientras que con algunas versiones metodológicas del método del hidrómetro, se observan condiciones favorables que permiten obtener mediciones rápidas pero que no resultan ser lo suficientemente precisas en cuanto a la clasificación textural. De manera similar, en búsqueda de eficiencia en estudios granulométricos, otros investigadores abordan el tema a través de propuestas con métodos químicos, que garanticen uniformidad en la interpretación de datos; este

---

<sup>13</sup> INVÍAS, 2007. Norma Invias E-124: 07 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. [En línea] 2007. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>. , no. 10, pp. 1-12.

<sup>14</sup> DI STEFANO, C., FERRO, V. y MIRABILE, S., 2010. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering*, vol. 106, no. 2, pp. 205-215. ISSN 15375110.

<sup>15</sup> GARCÍA, J., MEDINA, H. y NÚÑEZ, D., 2008. El método del hidrómetro: influencia de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de la Habana. *Cultivos Tropicales*, vol. 29, no. 2, pp. 21-26.

es el caso de Borja, Mercado y Combatt<sup>16</sup> quienes presentan una propuesta basada en el uso de dos dispersantes, los cuales aplicados en pruebas con los métodos de pipeta e hidrómetro arrojaron mediciones fluctuantes al final de las lecturas de cada ensayo, en donde se resalta que diversos factores poseen similitudes, pero otros, cómo el tiempo, no arrojan resultados semejantes respecto a su debida comparación, coincidiendo con lo descrito por Karkanis y Schaalje (1991)<sup>17</sup> quienes resaltan la variabilidad de resultados dependiendo del tiempo de lectura.

Se observa que “la determinación del tamaño de partículas es un análisis clave en los estudios de suelo y se requiere de información precisa de esta variable”<sup>18</sup> y que el hecho de que las distintas metodologías discrepen en los resultados preocupa a la comunidad científica del campo de la física de suelos; muestra de ello son artículos como el de León (2001), en el que se evidencian comparaciones entre diversos métodos, tratamientos y suelos que, a través de análisis detallados, pretenden categorizar aquellas metodologías que establecen mayor precisión y que permiten identificar los factores preponderantes en estos análisis. También se encuentran publicaciones más recientes que abordan la misma problemática y que tal como lo referencian Centeri, Jakab, Szabó, Farsang, Barta, Szalai y Biró<sup>19</sup> encuentran que las diferentes metodologías de análisis pueden llegar a proporcionar diferencias considerables en la medición de tamaño de partículas en los suelos.

Se observa cómo, aunque el método de Bouyoucos es de los más utilizados en estudios granulométricos, continúan evidenciándose agentes que interfieren en la toma de muestras y análisis de resultados, razón por la cual, diferentes autores manifiestan en distintos artículos las falencias de este ensayo, motivo por el que se espera que las nuevas tecnologías minimicen la complejidad de este tipo de métodos y optimicen los resultados tanto en tiempo como en precisión de lecturas.

---

<sup>16</sup> BORJA, K., MERCADO, J. y ENRIQUE COMBATT, 2015. Dispersantes químicos y cuantificación de fracciones texturales por los métodos Bouyoucos y pipeta. *Acta Agronómica*, vol. 64, no. 4, pp. 308-314. ISSN 01202812. DOI 10.15446/acag.v64n4.45722.

<sup>17</sup> KARKANIS, P.G. y SCHAALJE, G.B., 1991. Comparison of 4 Measurement Schedules for Determination of Soil Particle-Size Distribution by the Hydrometer Method. *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 211-215.

<sup>18</sup> MANNA, L. La, ROSTAGNO, C.M., BUDUBA, C.G., IRISARRI, J. y NAVAS, A., 2016. Determinaciones de granulometría en suelos volcánicos: Comparación entre distintos métodos analíticos. *Ciencia del Suelo*, vol. 34, no. 2, pp. 355-364. ISSN 03263169.

<sup>19</sup> CENTERI, C., JAKAB, G., SZABÓ, S., FARSANG, A., BARTA, K., SZALAI, Z. y BÍRÓ, Z., 2015. Comparison of Particle-Size Analyzing Laboratory Methods. , vol. 14, no. 5, pp. 1125-1135.

## 5.2. MARCO CONCEPTUAL

En torno al estudio granulométrico en suelos arcillosos, es necesario referenciar los siguientes conceptos:

- Análisis granulométrico: Según la norma I.N.V.E-123-07, el análisis granulométrico “tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo”<sup>20</sup>; permite determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices. El tamaño de partícula en relación al tamiz utilizado se presenta en la siguiente ilustración.

**Figura 3. Tamices de malla cuadrada**

*Tamices de malla cuadrada:*

75 mm (3")	2.00 mm (No.10)
50 mm (2")	850 µm (No.20)
37.5 mm(1-1/2")	425 µm (No.40)
25 mm (1")	250 µm (No.60)
19.0 mm (3/4")	106 µm (No.140)
9.5 mm (3/8")	75 µm (No.200)
4.75 mm (No.4)	

FUENTE: 2 I.N.V.E-124-07, 2007, P.1

Para la realización del ensayo de análisis granulométrico se hace necesario contar con los siguientes instrumentos:

### **EQUIPO:**

- Dos balanzas. Una con sensibilidad de 0.01 g para pesar material que pase el tamiz de 2 mm (No.10). Otra con sensibilidad 0.1 % del peso de la muestra, para pesar los materiales retenidos en el tamiz de 2 mm (No.10).
- Tamices de malla cuadrada.
- Horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta de 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F).
- Envases, adecuados para el manejo y secado de las muestras.
- Cepillo y brocha, para limpiar las mallas de los tamices.

---

<sup>20</sup> INVÍAS, 2007. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. I.N.V.E-123-07. [en línea], no. 200, pp. 2-7. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>.

Para este método, se establece que:

La velocidad de caída de las partículas pequeñas, en un medio líquido, es directamente proporcional a su tamaño, según la siguiente relación:

$$V = \frac{2(Dr - \delta)gr^2}{9\xi}$$

Donde:

V: Velocidad de caída en  $cm\ s^{-1}$

Dr: Densidad de partículas en  $g\ cm^{-3}$

$\delta$ : Densidad del líquido en  $g\ cm^{-3}$

g: Aceleración de la gravedad en  $cm\ s^{-2}$

r: Radio de la partícula en  $cm$

$\xi$ : Viscosidad del líquido en  $g\ cm^{-1}\ s^{-1}$ .<sup>21</sup>

- Ensayo por hidrómetro: Definido como el método de prueba que “cubre las determinaciones cuantitativas de la distribución de tamaño de las partículas de las fracciones finas de los suelos. La distribución de tamaños de partículas más grandes de 75  $\mu m$  (retenidas en el tamiz No 200) se determina por tamizado, en tanto que la distribución de las partículas más pequeñas que 75  $\mu m$  se determina por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro que asegure los datos necesarios” (I.N.V.E-124-07, 2007, P.1).

Este ensayo está basado en la ley de Stokes, la cual plantea que:

$$v = \frac{\tau_s - \tau_f}{1800 \eta} \times D^2$$

Donde:

V: Velocidad de la esfera (cm/s)

$\tau_s$ : Densidad de la esfera ( $g/cm^3$ )

$\tau_f$ : Densidad del fluido ( $g/cm^3$ )

$\eta$ : Viscosidad del fluido ( $g \cdot s/cm^2$ )

---

<sup>21</sup>JARAMILLO, D.F., 2002. *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

D= Diámetro de la esfera (mm)

Para la ejecución del ensayo de análisis por hidrómetro se hace necesario contar con los siguientes instrumentos:

#### **EQUIPO:**

- Tres (3) Balanzas, de sensibilidades 0.01 g, 0.1 g y 1 g.
- Tamices, de 2.0 mm (No.10) y de 75  $\mu$ m (No.200)
- Tamizador mecánico.
- Aparato agitador, mecánico o neumático, con su vaso (Figuras. No. 1 y No. 2).
- Hidrómetro. -Graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión o los gramos por litro de Suspensión. En el primer caso, la escala tiene valores de peso específico que van de 0.995 a 1.038 y estará calibrado para leer 1.00 en agua destilada a 20 °C (68°F). Este Hidrómetro se identifica como 151 H. En el otro caso la escala tiene valores de gramos de suelo por litro (g/l) que van de -5 á+ 60. Se identifica como 152 H y está calibrado para el supuesto que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20 °C (68 °F) y que el suelo en suspensión tiene un peso específico de 2.65. Las dimensiones de estos hidrómetros son las mismas; sólo varían las escalas.
- Cilindro de vidrio para sedimentación, de unos 457 mm (18") de alto, y 63.5 mm (2.5") de diámetro y marcado para un volumen de 1000 ml a 20 °C (68°F).
- Termómetro de inmersión, con apreciación de 0.5 °C (0.9 °F).
- Cronómetro o reloj.
- Horno, capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta 110  $\pm$  5 °C (230  $\pm$  9 °F).
- Estufa o plancha de calentamiento.
- Utensilios de uso general. - Envases apropiados para el manejo y secado de las muestras y un par de guantes de asbesto o caucho.
- Agente Dispersante. - Una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.
- Las soluciones de esta sal deberán ser preparadas frecuentemente (al menos una vez al mes) o ajustar su pH de 8 a 9 por medio de carbonato de sodio. Las botellas que contienen soluciones deberán tener la fecha de preparación marcada.
- Agua. - Toda agua utilizada deberá ser destilada o desmineralizada. El agua para el ensayo con hidrómetro deberá llevarse hasta la temperatura que prevalecerá durante el ensayo; así, si el cilindro de sedimentación se va a E - 124 - 3 colocar en baño de agua, la temperatura del agua destilada o

desmineralizada que va a utilizarse se llevará a la temperatura de dicho baño. Si el cilindro de sedimentación se coloca a la temperatura ambiente del laboratorio, el agua deberá tener dicha temperatura. La temperatura normal de ensayo es la de 20°C (68 °F). Sin embargo, variaciones de temperatura pequeñas, no implicarán el uso de las correcciones previstas.<sup>22</sup>

- Ensayo por pipeta: Flórez y Alcalá<sup>23</sup> establecen que “este método cuantifica las partículas minerales del suelo en forma gravimétrica, y se considera el más exacto en la determinación granulométrica”.
- Dispersantes: En I.N.V.E-123-07 se presenta como dispersante, “una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución”. Su función es separar las partículas de limo y arcilla.
- Suelos arcillosos: En la norma I.N.V. E – 102 – 07 define arcilla como “un suelo de grano fino, o la porción fina de un suelo con un índice de plasticidad igual o mayor que 4, para el cual la coordenada que representa el índice plástico contra el límite líquido en la carta de plasticidad cae por encima de la línea A”.
- Análisis de tamaño de partícula automatizado: PARIO calcula la distribución del tamaño de partícula según la ley de Stokes, con un rango de tamaños de partícula de 63µm a 1 µm. Permite el funcionamiento automatizado y sin supervisión, sin interferencias del personal del laboratorio. Simplemente se configura y revisa 6 horas después a una medición final con todos los datos que se necesita.<sup>24</sup>

---

<sup>22</sup> INVÍAS, 2007. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. I.N.V.E-123-07. [en línea], no. 200, pp. 2-7. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>.

<sup>23</sup> FLORES, L., ALCALÁ, J.R., RENÉ, T.J. y MARTÍNEZ, A., 2010. Manual de Procedimientos Analíticos. *Laboratorio de Física de Suelos* [en línea], pp. 56. Disponible en: [http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL\\_DELABORATORIO\\_DE\\_FISICA\\_DE\\_SUELOS1.pdf](http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL_DELABORATORIO_DE_FISICA_DE_SUELOS1.pdf).

<sup>24</sup> GROUP, M., 2017. User manual PARIO. S.I.:

### 5.3. MARCO LEGAL

Tabla 1. Marco legal aplicable al proyecto

<b>NORMATIVA</b>	<b>TITULO</b>	<b>ALCANCE</b>
I.N.V.E-124-01	Análisis granulométrico por Medio del hidrómetro	Plantea los aspectos necesarios para llevar a cabo un análisis granulométrico usando el hidrómetro convencional. Se especifican materiales, procedimiento, corrección de lecturas y fórmulas de cálculo.
I.N.V.E-123-07	Análisis Granulométrico De Suelos Por Tamizado	Específica el método que se utiliza para calcular los porcentajes de suelo que pasan por los diferentes tamices en un ensayo. En esta se describe el análisis para los distintos tamices y los cálculos correspondientes.
I.N.V.E-102-07	Descripción e identificación de suelos (procedimiento visual y manual)	Describe el procedimiento para identificar suelos con base en el sistema de clasificación unificada.

FUENTE: Los Autores

### 5.4. ESTADO DEL ARTE

Debido a que el equipo PARIO está en el mercado solamente desde el año 2017, no ha sido posible encontrar investigaciones previas que relacionen el uso de tal equipo en contraste con el método del hidrómetro ni con ningún otro tipo de técnica de medición para la determinación de partículas del suelo.



## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1. TIPO DE ESTUDIO**

El presente documento fue construido con base en un estudio de tipo comparativo entre dos instrumentos de medición para el análisis granulométrico de caolín amarillo.

A partir de los resultados de laboratorio, se realizó la sistematización de los datos y las gráficas de relación entre el diámetro de las partículas y el porcentaje de masa retenida acumulado. Con esta información se llevó a cabo el análisis de las ventajas y desventajas del uso del equipo Pario de última tecnología en correspondencia con el uso del hidrómetro convencional.

### **6.2. FUENTES DE INFORMACIÓN**

Los resultados obtenidos son producto de la realización de 10 ensayos de laboratorio (5 por medio del hidrómetro convencional y 5 por medio del hidrómetro electrónico.) utilizando los correspondientes equipos de laboratorio requeridos para el método del hidrómetro a la luz de la normatividad vigente (norma INV E 124-07).

Los textos consultados correspondieron en su mayoría a artículos de investigación, libros de consulta para el análisis de suelos y las normas de carácter técnico que rigen este tipo de procesos.

### **6.3. DISEÑO METODOLÓGICO**

El presente trabajo de grado se realizó gracias a una metodología experimental y analítica, que pretendió determinar el grado de certidumbre de los resultados de ensayos granulométricos con hidrómetros convencionales y automáticos, para determinar la favorabilidad o no del uso de los métodos comparados.

Para dar respuesta a la pregunta formulada en el presente trabajo de investigación, se plantean las siguientes fases metodológicas:

- Consulta bibliográfica de información: Se consultaron diversas fuentes bibliográficas (revistas, congresos, libros, tesis, nomas, etc...) que abordaron temas relacionados con ensayos de granulometría en suelos arcillosos.
- Ensayos de laboratorio: Se realizaron los ensayos a través del hidrómetro tradicional y el automatizado.
- Sistematización de datos: Se organizó un documento estructurado que muestra los resultados obtenidos.

- Análisis e interpretación de los resultados: A partir de los resultados obtenidos y con base en la revisión teórica realizada, se analizaron las ventajas y/o desventajas del uso del equipo Pario
- Socialización de resultados: Entrega final, física y oral del trabajo de investigación realizado.

## 7. MONTAJE DEL ENSAYO

### 7.1. ENSAYO DE HIDRÓMETRO CONVENCIONAL PARA LA DETERMINACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

#### 7.1.1. Hidrómetro

Como se explicó anteriormente, el método del hidrómetro, es comúnmente usado para determinar los tamaños de partículas de la fracción fina del suelo ( $< 50 \mu\text{m}$ , para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [USDA], y  $75 \mu\text{m}$  para la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, ASTM); este instrumento permite medir la densidad del medio, mientras este varía dependiendo de la cantidad de partículas en suspensión. La dispersión química se consigue con el uso de hexametafosfato de sodio y la dispersión física es alcanzada mediante agitación mecánica.

Como lo señalan Gabriels y Lobo (2003)<sup>25</sup> y Beretta, Silbermann, Paladino, Torres, Bassahun, Musselli, and García-Lamohte (2014)<sup>26</sup> los dos métodos más usados son el propuesto por la ASTM (ASTM, 2000) y el publicado por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo pues son considerados técnicas sencillas que no requiere pre-tratamientos.

Para la realización del presente de investigación, los datos se obtuvieron a partir de la realización de ensayos de laboratorio. Los materiales y procedimientos utilizados se describen a continuación:

#### 7.1.2. Materiales

El material requerido para la realización de los ensayos es resumido a continuación:

---

<sup>25</sup> GABRIELS, D. y LOBO L., D., 2003. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venezuelos*, pp. 37-48.

<sup>26</sup> BERETTA, A.N., SILBERMANN, A. V., PALADINO, L., TORRES, D., BASSAHUN, D., MUSSELLI, R. y GARCÍA-LAMOHTÉ, A., 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e investigación agraria* [en línea], vol. 41, no. 2, pp. 25-26.

### 7.1.2.1. Caolín

El presente trabajo de grado tomó como muestra fundamental el caolín amarillo, pues con base en este se planteó la comparación que atañe al presente trabajo. Soto (2016)<sup>27</sup> define el caolín como un mineral arcilloso mayormente encontrado en los primeros diez metros de corteza continental. Se considera caolín a toda roca masiva con un porcentaje variable de minerales de la arcilla; las principales características del caolín son resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 2. Caracterización del caolín

COLOR	BLANCO, GRIS, AMARILLO
ASPECTO	UNTEOSO AL TACTO
BRILLO	TERRODO MATE O NACARADO CUANDO ES CRISTALINO
RAYA	BLANCA
DENSIDAD	2,40-2,64 g/cm <sup>3</sup>
DUREZA	2-2,5

FUENTE: SOTO, J., 2016. *Estimación objetiva de la dispersividad en suelos arcillosos en el ensayo de Pinhole basada en una carta de colores y valores cuantitativos de turbidez*. S.l.: Universidad Católica de Colombia.

El caolín es usado en múltiples actividades debido a que sus características de blancura, ausencia de toxicidad, tamaño de partícula, refractariedad y adherencia resultan apropiadas para la elaboración de acabados de papel, ladrillos, bloques, cerámica, pinturas, plásticos, vidrios entre otros.

---

<sup>27</sup> SOTO, J., 2016. *Estimación objetiva de la dispersividad en suelos arcillosos en el ensayo de Pinhole basada en una carta de colores y valores cuantitativos de turbidez*. S.l.: Universidad Católica de Colombia.

**Figura 4. Muestra de caolín**



FUENTE: Los Autores

#### **7.1.2.2. Defloculante**

El Defloculante utilizado para los ensayos fue hexametáfosfato de sodio cuya presentación corresponde a un polvo blanco soluble en agua utilizado como dispersante para el ensayo de laboratorio de análisis de tamaño de partículas en suelos.

**Figura 5. Defloculante**



FUENTE: Los Autores

### **7.1.2.3. Agua destilada**

**Figura 6. Agua destilada**



FUENTE. Los Autores

### **7.1.2.4. Hidrómetro**

Para la ejecución de los ensayos, contamos con un hidrómetro 152 H en concordancia con la normatividad utilizada.

**Figura 7. Hidrómetro**



FUENTE: Los Autores

### **7.1.3. Procedimiento**

El ensayo fue realizado a través de 6 pasos teniendo en cuenta lo establecido en la norma INV-E 124-07, así:

- Paso 1: Un día antes de realizar el ensayo, se prepara la muestra del material (Caolín amarillo) sumergiéndola en agua destilada con dispersante y guardando las proporciones que estipula la norma (125 ml de solución de hexametáfosfato de sodio).

**Figura 8. Preparación de la muestra**



FUENTE: Los Autores

- Paso 2: Culminado el tiempo requerido para el paso anterior, se realiza la transferencia de la muestra al agitador mecánico, donde se regula un minuto de agitación.

**Figura 9. Agitador mecánico**



FUENTE: Los Autores

- Paso 3: Se procedió a verter la muestra en una probeta de sedimentación de 1.000 ml.

**Figura 10. Probeta con muestra de caolín amarillo**



FUENTE: Los Autores

- Paso 4: Luego de vaciar la muestra en la probeta, se continúa con el proceso de agitación que establece la norma, la cual indica que es necesario realizar nuevamente una agitación en la muestra por aproximadamente un minuto y al finalizar tal agitación, se completa el volumen de la probeta con agua destilada.

**Figura 11. Agitación de muestra con agitador manual**



FUENTE: Los Autores

- Paso 5: Seguidamente, se introduce el hidrómetro en la probeta y se registra la primera lectura.



**Figura 12. Introducción del hidrómetro**



FUENTE: Los Autores

- Paso 6: Se procede a retirar el hidrómetro de la probeta y sumergirlo en otra con agua limpia.

**Figura 13. Limpieza del hidrómetro**



FUENTE: Los Autores

- A partir de la lectura anterior y conforme lo señala la normatividad, se registran lecturas cada 2, 5, 15, 30, 60, 120, 240 y 1440 minutos, teniendo en cuenta que dichas lecturas deben realizarse a tope del menisco, de no ser así se realizan las correcciones correspondientes.

## **7.2. ENSAYO CON EQUIPO PARIO DE ÚLTIMA GENERACIÓN**

### **7.2.1. Equipo PARIO**

El dispositivo PARIO está compuesto por un sensor de presión en la punta de un eje que se encuentra sumergido en suspensión con las partículas en sedimentación y que se conecta a un dispositivo de medición.

Junto al transductor del sensor de presión se encuentra un sensor de temperatura. Las señales de presión y temperatura se procesan en un dispositivo de medición sobre la sedimentación y son transferidas en formato digital a través de una conexión USB a una PC.

En cuanto al muestreo de datos, el equipo registra cada 10 segundos los datos correspondientes a tiempo, presión y temperatura de la muestra, enviando las lecturas directamente al computador.

Los materiales y procedimientos utilizados para los ensayos en el dispositivo Pario se describen a continuación:

### **7.2.2. Materiales**

Por tratarse de un estudio comparativo entre dos equipos de medición, los materiales requeridos para los ensayos son muy similares, salvo por el instrumento particular utilizado en la medición (Dispositivo Pario vs Hidrómetro 152 H). Los materiales utilizados en los ensayos con el equipo Pario se presentan a continuación:

#### **7.2.2.1. Caolín amarillo**

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, obtenido de la composición de roca feldespática, caracterizado por su gran capacidad de absorber agua y por su baja viscosidad. Sus principales usos se encuentran ligados a la industria de la construcción, donde se destaca como elemento para la producción de pinturas, cauchos, plásticos y cerámicos entre otros.

**Figura 14. Caolín amarillo – Muestra equipo PARIO**

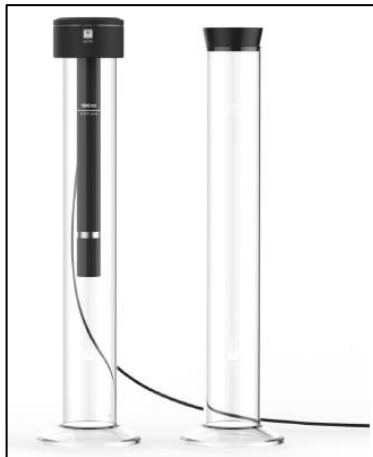


FUENTE: Los Autores

#### **7.2.2.2. Dispositivo PARIO**

Compuesto por un sensor de presión, sensor de temperatura, cabeza de medición, conexión vía USB y dos cilindros de sedimentación.

**Figura 15. Dispositivo PARIO**



FUENTE: Manual de usuario equipo Pario

#### **7.2.2.3. Condiciones de la muestra**

La muestra de suelo debe tener una masa entre los 25 y 40 gr.

Dependiendo de la cantidad de arenas que tenga la muestra, será necesario contar con una mayor cantidad de masa (sin sobrepasar los 40 gr), para que el equipo

pueda hacer una medición acertada. En caso contrario, si se observa que la muestra presenta mayor cantidad de arcillas, deberá usarse una masa cercana a los 25 gr.

El volumen de la suspensión debe ser de 1.000 ml que corresponde con lo estipulado en la normatividad.

Previo a su funcionamiento, el sistema Pario requiere que se lleve a cabo un análisis de proporción de arenas (Pasa Tamiz 200), pues con base en tal proporción de arena, el equipo realiza el análisis de las demás partículas de la muestra.

Para garantizar la eficiencia del equipo se deben garantizar dos condiciones mínimas; la primera, la temperatura, la cual deberá mantenerse constante con una desviación máxima de tres grados y la segunda, contar con una superficie libre de vibraciones.

### **7.2.3. Descripción de ensayo**

El ensayo fue realizado a través de 6 pasos, así:

- Paso 1: Preparación de la muestra: Se preparó el ensayo de sedimentación en un cilindro de la misma manera como se realiza generalmente para un análisis de hidrómetro.

**Figura 16. Preparación de suelo**



FUENTE: Los Autores

- Paso 2: Se llenó el segundo cilindro con agua destilada hasta alcanzar el volumen de 1l.

**Figura 17. Cilindro con agua destilada**



FUENTE: Los Autores

- Paso 3: Estabilización del sistema: Se debe procurar que tanto el equipo, como los materiales se encuentren a una misma temperatura para evitar errores de cálculo. Para ello, se necesitan colocar un cilindro con la muestra de suelo preparada y la otra con agua destilada e insertar el PARIO en ella para equilibrar la temperatura y conectarlo al computador.

**Figura 18. Equipo PARIO estabilizado**



FUENTE: Los Autores

- Paso 4: Agitación de la mezcla: Para empezar con el proceso de agitación, se seleccionó la opción del software que muestra un conteo de 60 segundos durante el cual se puede girar continuamente boca abajo el cilindro previamente cubierto con un tapón hermético o por agitación vertical con el elemento adecuado.

**Figura 19. Agitación de la muestra**



FUENTE: Los Autores

- Paso 5: Se realizó la extracción del equipo Pario de cilindro con agua y la inserción del mismo en el cilindro de suspensión.

**Figura 20. Cambio de cilindro**



FUENTE: Los Autores

- Paso 6: Proceso de medición: Al finalizar el paso anterior, el sistema detectó las primeras medidas, las registró y presentó en el computador, repitiendo este proceso cada 10 segundos hasta el final del ensayo.

**Figura 21. Toma de datos**



FUENTE: Los Autores

## 8. RESULTADOS

### 8.1. RESULTADOS HIDRÓMETRO 152 H – CAOLÍN AMARILLO

A continuación, se muestra una tabla resumen de los parámetros a tener en cuenta en el ensayo de hidrometría:

Tabla 3. Parámetros de las muestras

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Tipo de suelo	Caolín amarillo 1	Caolín amarillo 2	Caolín amarillo 3	Caolín amarillo 4	Caolín amarillo 5
Recipiente #	12	121	2	39	14
Hidrómetro	152H	152H	152H	152H	152H
Defloculante	Hexametáfosfato de sodio				
Cilindro	1000ml	1000ml	1000ml	1000ml	1000ml

FUENTE: Los Autores

Según la norma INV-E-124, el tamaño de la muestra que se debe usar para el análisis en suelos arcillosos, es de 50 a 60 g (peso seco). Para este estudio de caso, se tomaron cinco (5) muestras de suelo, y se hizo el procedimiento establecido en la norma INV-E-124-2007<sup>28</sup>. Dichos datos son presentados a continuación:

Tabla 4. Resumen de pesos de las muestras (hidrómetro)

PESO (g)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Recipiente	102,51	112,22	102,53	119,90	105,22
Recipiente + suelo	150,84	165,92	156,46	173,97	158,99
Suelo seco + solución	48,33	53,70	53,93	54,07	53,77
Suelo seco $W_0$	43,33	48,70	48,93	49,07	48,77

FUENTE: Los Autores

Los resultados de los ensayos se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica. La fracción gruesa tendrá denominaciones, según el sistema:

- **AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation Official.
- **ASTM:** American Society for Testing and Materials.
- **BRITÁNICO:** BS – 5930:1981

---

<sup>28</sup> INVÍAS, 2007. Norma Invías E-124: 07 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. S.I.:



- **S.U.C.S:** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Tabla 5. Rangos de diámetro según normas

	<b>AASHTO (mm)</b>	<b>ASTM (mm)</b>	<b>BRITÁNICO (mm)</b>	<b>S.U.C.S (mm)</b>
Grava	75 – 2	> 2	60 – 2	75 – 4,75
Arena	2 – 0,05	2 – 0,075	2 – 0,06	4,75 – 0,075
Limo	0,05 – 0,002	0,075 – 0,005	0,06 – 0,002	< 0,075 FINOS
Arcilla	< 0,002	< 0,005	< 0,002	-

FUENTE: Los Autores

Los rangos de diámetro que se usaron para el análisis, fueron los definidos en la norma INV-E-124, que son los de la ASTM.

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos en cada una de las muestras:

### 8.1.1. Muestra 1: Caolín amarillo 1

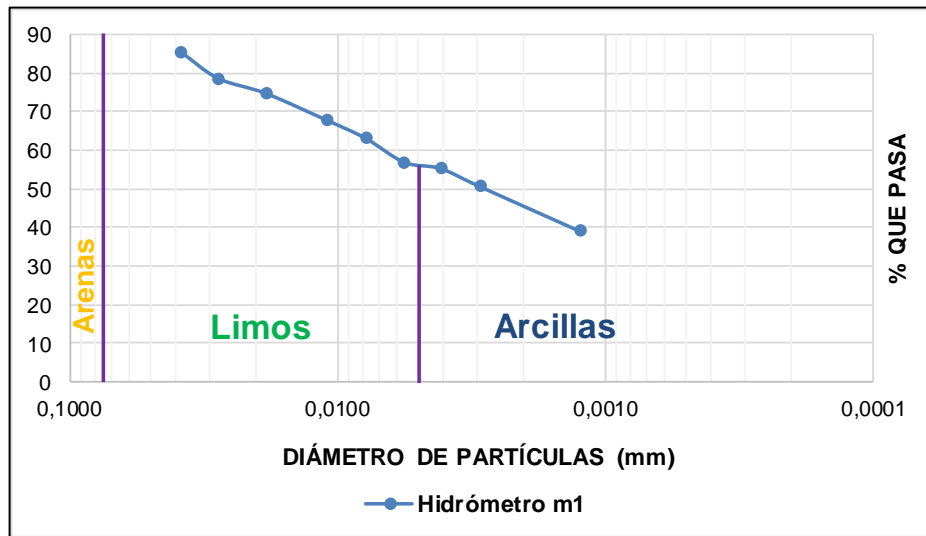
Tabla 6. Resultados de la muestra 1 (hidrómetro)

TIEMPO (min)	TEMP (°C)	R´ (g/L)	T´ (g/L)	Ct (g/L)	Cd (g/L)	R (g/L)	L (cm)	K	Ø (mm)	PASA (%)
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100
1	23	46	8	0,9	9,9	37,1	8,80	0,01297	0,0385	85,62
2	23	43	8	0,9	9,9	34,1	9,20	0,01297	0,0278	78,70
5	22	41	8	0,6	9,6	32,4	9,60	0,01328	0,0184	74,77
15	22	38	8	0,6	9,6	29,4	10,10	0,01328	0,0109	67,85
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	63,24
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	57,00
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	55,39
240	20	30	8	0	9	22	11,40	0,01344	0,0029	50,77
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	39,23

FUENTE: Los Autores

Se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 1, en relación del diámetro de la partícula y el porcentaje que pasa:

Gráfica 1. Escala logarítmica de la muestra 1 (hidrómetro)

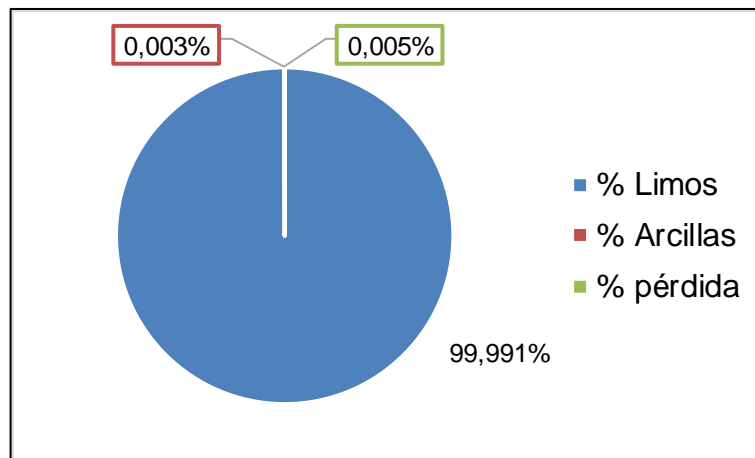


FUENTE: Los Autores

De la gráfica anterior, se determinó el porcentaje de limos y arcillas de la muestra 1.

A continuación, se muestra la gráfica:

Gráfica 2. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 1



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se puede observar que, el porcentaje de limos presentes en la muestra 1 es de 99,991%, equivalentes a 43,3263g; por otro lado, el porcentaje de arcillas presentes en la muestra 1 es de 0,003%, equivalentes a 0,0015g. De igual forma, se obtiene una pérdida de material del 0,005%, equivalente a 0,0023g.

### 8.1.2. Muestra 2: Caolín amarillo 2

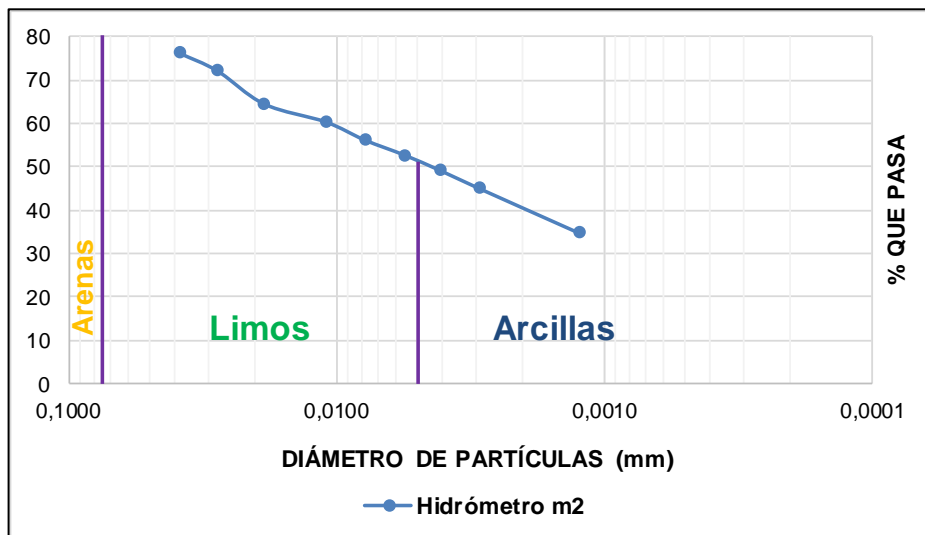
Tabla 7. Resultados de la muestra 2 (hidrómetro)

TIEMPO Min	TEMP °C	R´ g/L	T´ g/L	Ct g/L	Cd g/L	R g/L	L Cm	K	D mm	PASA %
0										100
1	23	46	8	0,9	9,9	37,1	8,80	0,01297	0,0385	76,18
2	23	44	8	0,9	9,9	35,1	9,10	0,01297	0,0277	72,07
5	22	40	8	0,6	9,6	31,4	9,70	0,01328	0,0185	64,48
15	22	38	8	0,6	9,6	29,4	10,10	0,01328	0,0109	60,37
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	56,26
60	21	34	8	0,3	9,3	25,7	10,70	0,01312	0,0055	52,77
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	49,28
240	20	30	8	0	9	22	11,40	0,01344	0,0029	45,17
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	34,91

FUENTE: Los Autores

A continuación, se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 2, en relación del diámetro de la partícula y el porcentaje que pasa:

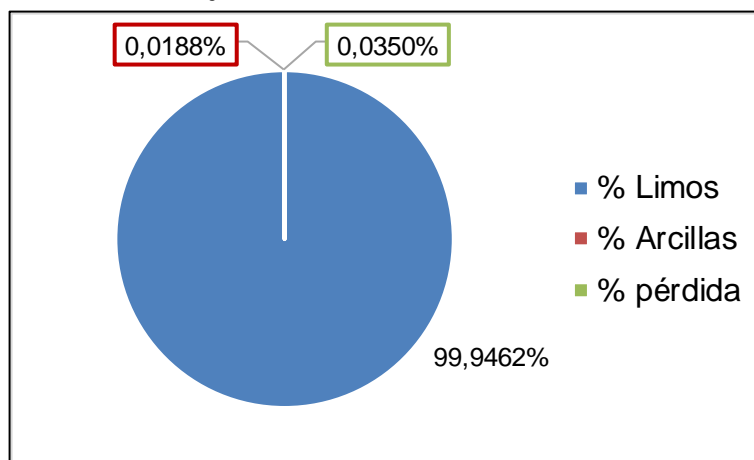
Gráfica 3. Escala logarítmica de la muestra 2 (hidrómetro)



FUENTE. Los Autores

De la gráfica anterior, se determinó el porcentaje de limos y arcillas de la muestra 2. A continuación, se muestra la gráfica:

Gráfica 4. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 2



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se observa que el porcentaje de limos presentes en la muestra 2 es de 99,9462%, equivalentes a 48,6738g; por otro lado, el porcentaje de arcillas presentes en la muestra 2 es de 0,0188%, equivalentes a 0,0091g. De igual forma, se obtiene una pérdida de material del 0,0350%, equivalente a 0,0171g.

### 8.1.3. Muestra 3: Caolín amarillo 3

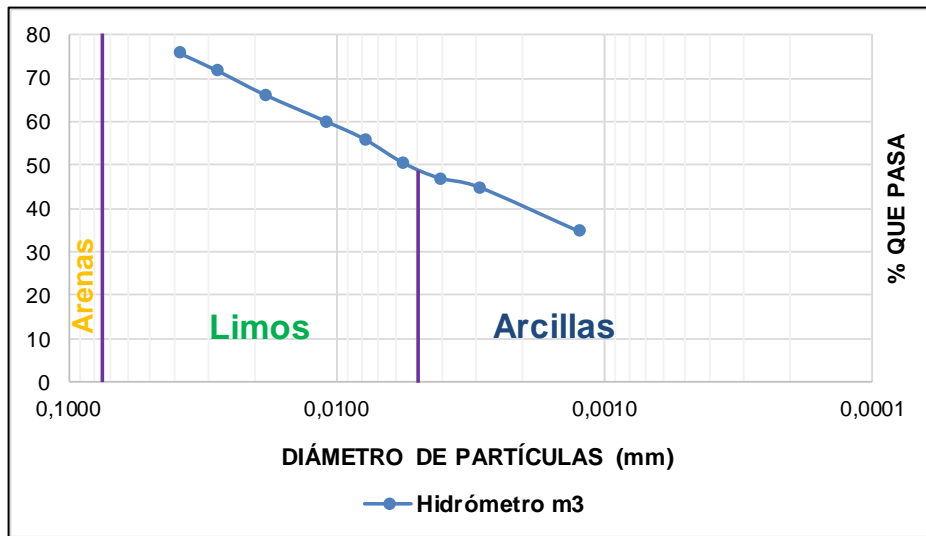
Tabla 8. Resultados de la muestra 3 (hidrómetro)

TIEMPO	TEMP	R´	T´	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	cm		mm	%
0										100
1	23	46	8	0,9	9,9	37,1	8,80	0,01297	0,0385	75,82
2	23	44	8	0,9	9,9	35,1	9,10	0,01297	0,0277	71,74
5	22	41	8	0,6	9,6	32,4	9,60	0,01328	0,0184	66,22
15	22	38	8	0,6	9,6	29,4	10,10	0,01328	0,0109	60,09
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	56,00
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	50,48
120	20	31	8	0	9	23	11,20	0,01344	0,0041	47,01
240	20	30	8	0	9	22	11,40	0,01344	0,0029	44,96
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	34,74

FUENTE: Los Autores

A continuación, se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 3, en relación del diámetro de la partícula y el porcentaje que pasa:

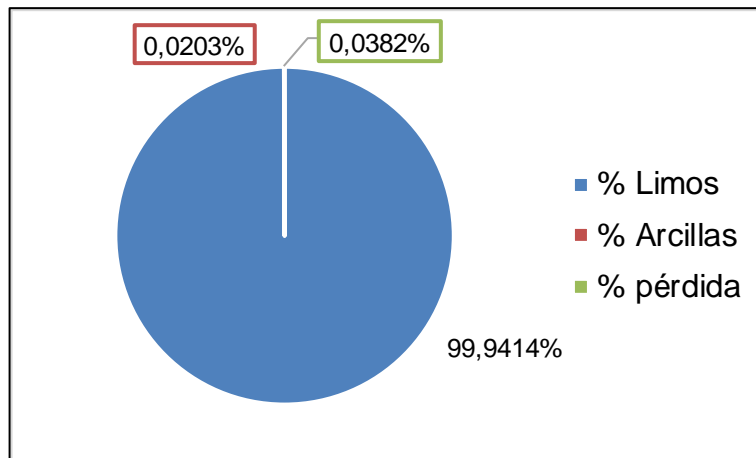
Gráfica 5. Escala logarítmica de la muestra 3 (hidrómetro)



FUENTE: Los Autores

De la gráfica anterior, se determina el porcentaje de limos y arcillas de la muestra 3. A continuación, se muestra la gráfica:

Gráfica 6. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 3



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se identifica que el porcentaje de limos presentes en la muestra 3 es de 99,9414%, equivalentes a 48,9013g; por otro lado, el porcentaje de arcillas presentes en la muestra 3 es de 0,0203%, equivalentes a 0,0100g. De igual forma, se puede observar una pérdida de material del 0,0382%, equivalente a 0,0187g.

### 8.1.4. Muestra 4: Caolín amarillo 4

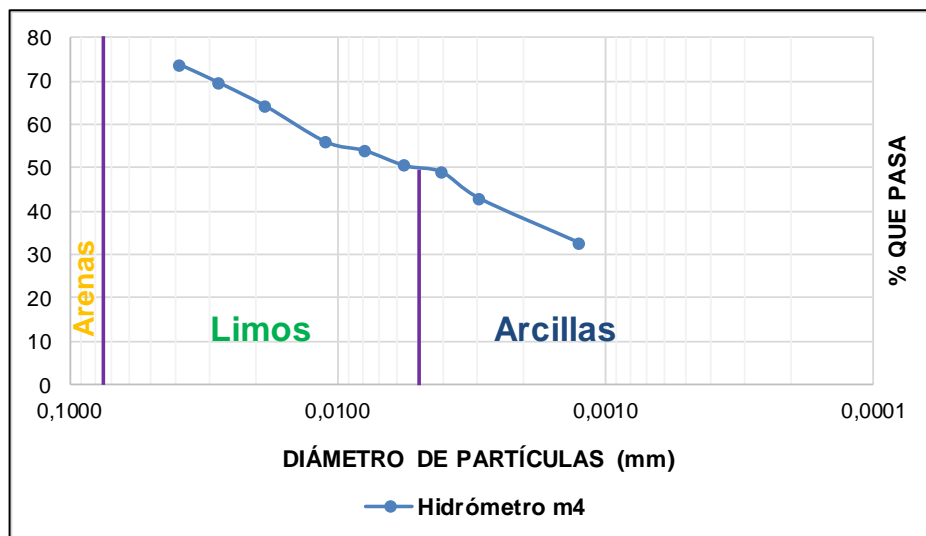
Tabla 9. Resultados de la muestra 4 (hidrómetro)

TIEMPO	TEMP	R´	T´	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	cm		mm	%
0										100
1	23	45	8	0,9	9,9	36,1	8,90	0,01297	0,0387	73,57
2	23	43	8	0,9	9,9	34,1	9,20	0,01297	0,0278	69,49
5	22	40	8	0,6	9,6	31,4	9,70	0,01328	0,0185	63,99
15	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0111	55,84
30	22	35	8	0,6	9,6	26,4	10,60	0,01328	0,0079	53,80
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	50,34
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	48,91
240	20	29	8	0	9	21	11,50	0,01344	0,0029	42,80
1440	20	24	8	0	9	16	12,40	0,01344	0,0012	32,61

FUENTE: Los Autores

Se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 4, en relación del diámetro de la partícula y el porcentaje que pasa de cada diámetro:

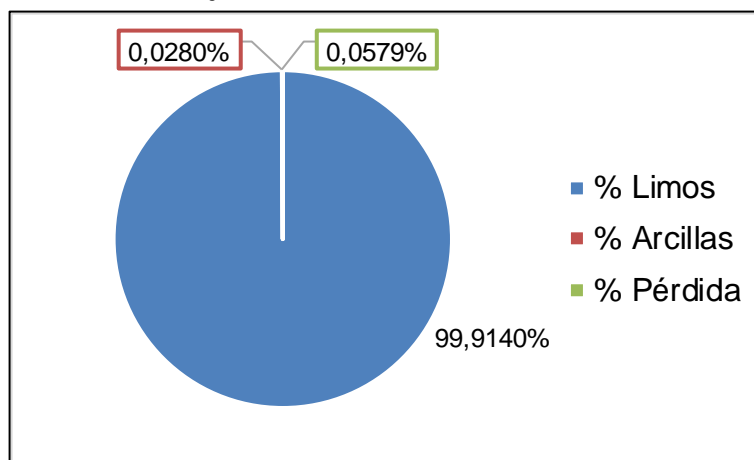
Gráfica 7. Escala logarítmica de la muestra 4 (hidrómetro)



FUENTE: Los Autores

De la gráfica anterior, se determinó el porcentaje de limos y arcillas de la muestra 4. A continuación, se muestra la gráfica:

Gráfica 8. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 4



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se observa que el porcentaje de limos presentes en la muestra 4 es de 99,9140%, equivalentes a 49,0278g; por otro lado, el porcentaje de arcillas presentes en la muestra 4 es de 0,0280%, equivalentes a 0,0138g. De igual forma, se obtiene una pérdida de material del 0,0579%, equivalente a 0,0284.

#### 8.1.5. Muestra 5: Caolín amarillo 5

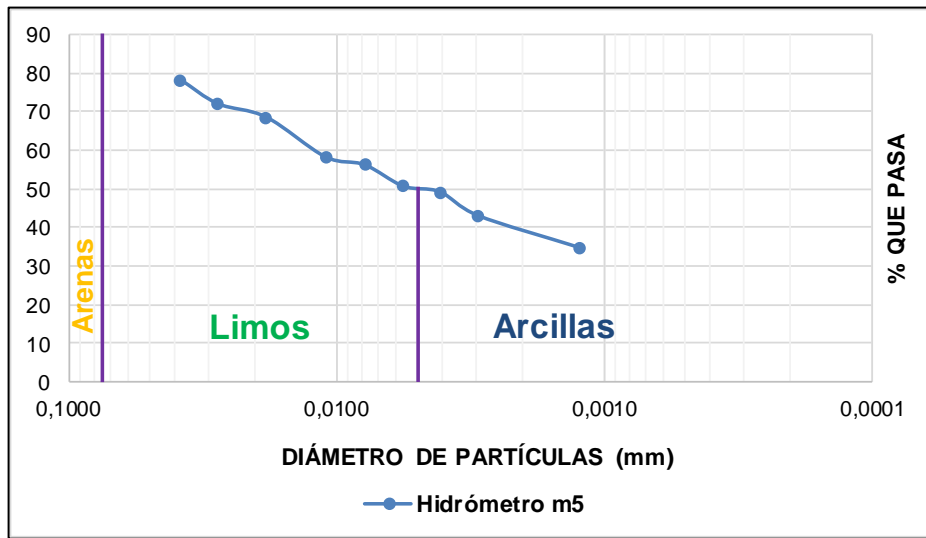
Tabla 10. Resultados de la muestra 5 (hidrómetro)

TIEMPO	TEMP	R´	T´	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
Min	°C	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	cm		mm	%
0										100
1	23	47	8	0,9	9,9	38,1	8,60	0,01297	0,0380	78,12
2	23	44	8	0,9	9,9	35,1	9,10	0,01297	0,0277	71,97
5	22	42	8	0,6	9,6	33,4	9,40	0,01328	0,0182	68,48
15	22	37	8	0,6	9,6	28,4	10,20	0,01328	0,0110	58,23
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	56,18
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	50,65
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	49,21
240	20	29	8	0	9	21	11,50	0,01344	0,0029	43,06
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	34,86

FUENTE: Los Autores

Se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 5, en relación del diámetro de la partícula y el porcentaje que pasa:

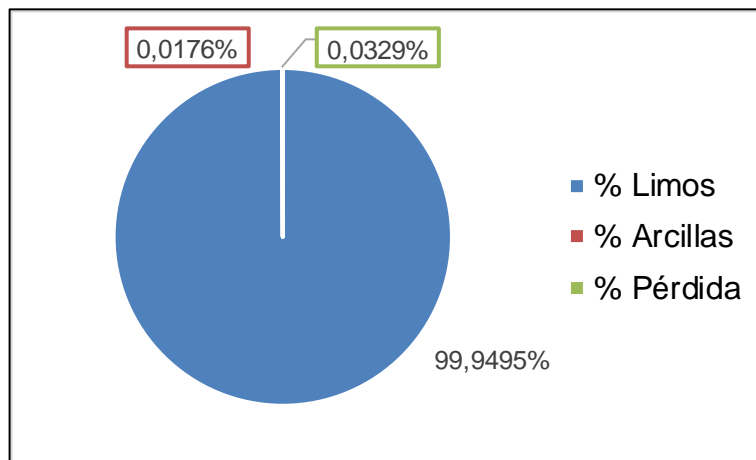
**Gráfica 9. Escala logarítmica de la muestra 5 (hidrómetro)**



FUENTE: Los Autores

De la gráfica anterior, se determinó el porcentaje de limos y arcillas de la muestra 5. A continuación, se muestra la gráfica:

**Gráfica 10. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 5**



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se puede observar que el porcentaje de limos presentes en la muestra 5 es de 99,9495%, equivalentes a 48,7454g; por otro lado, el porcentaje de arcillas presentes en la muestra 5 es de 0,0176%, equivalentes a 0,0086g. De igual forma, se puede observar una pérdida de material del 0,039%, equivalente a 0,0160g.



### 8.1.6. Comparativo de las 5 muestras (hidrómetro)

Seguidamente, se relacionan los resultados obtenidos en las 5 muestras de suelo, identificando el tiempo en minutos, el diámetro en mm, y el porcentaje de material que pasa en %.

Tabla 11. Comparación de resultados de las cinco muestras (hidrómetro)

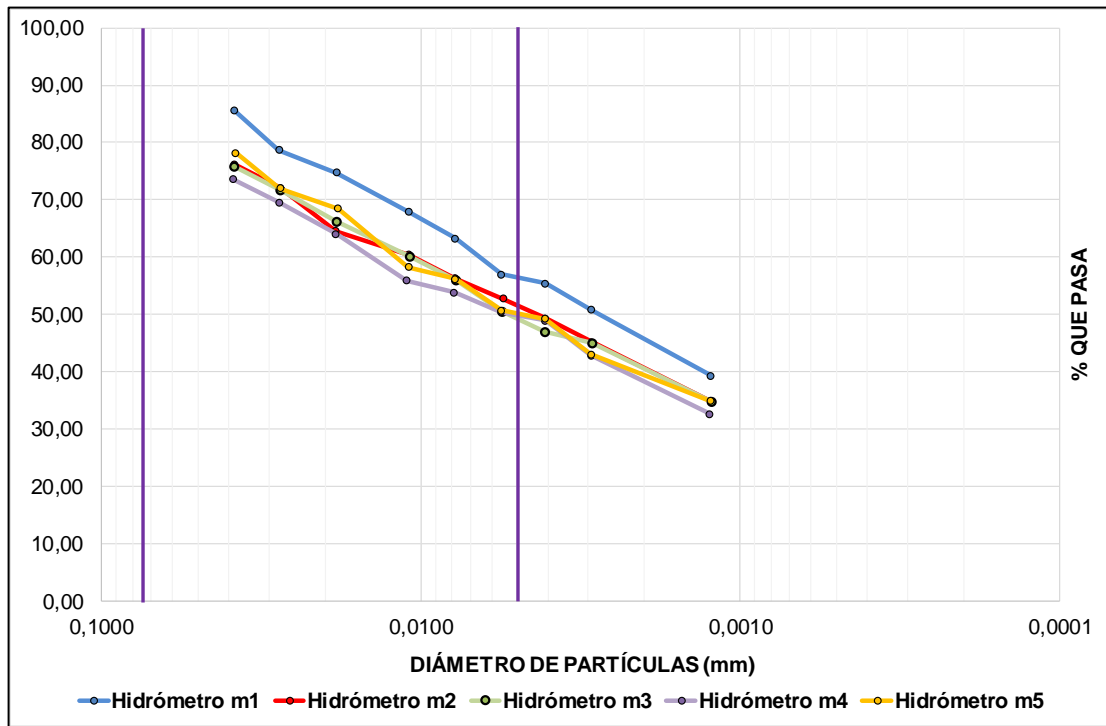
TIEMPO (min)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
	Ø (mm)	PASA (%)	Ø (mm)	PASA (%)	Ø (mm)	PASA (%)	Ø (mm)	PASA (%)	Ø (mm)	PASA (%)
0	--	100	--	100	--	100	--	100	--	100
1	0,0385	85,62	0,0385	76,18	0,0385	75,82	0,0387	73,57	0,0380	78,12
2	0,0278	78,70	0,0277	72,07	0,0277	71,74	0,0278	69,49	0,0277	71,97
5	0,0184	74,77	0,0185	64,48	0,0184	66,22	0,0185	63,99	0,0182	68,48
15	0,0109	67,85	0,0109	60,37	0,0109	60,09	0,0111	55,84	0,0110	58,23
30	0,0078	63,24	0,0078	56,26	0,0078	56,00	0,0079	53,80	0,0078	56,18
60	0,0056	57,00	0,0055	52,77	0,0056	50,48	0,0056	50,34	0,0056	50,65
120	0,0041	55,39	0,0041	49,28	0,0041	47,01	0,0041	48,91	0,0041	49,21
240	0,0029	50,77	0,0029	45,17	0,0029	44,96	0,0029	42,80	0,0029	43,06
1440	0,0012	39,23	0,0012	34,91	0,0012	34,74	0,0012	32,61	0,0012	34,86

FUENTE: Los Autores

El diámetro equivalente mayor de la muestra fina corresponde a la muestra 5, que tiene un valor de 0,0387mm, menor al de 0,075mm que divide el tamiz No. 200, lo cual permite tener la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante los cálculos respectivos, dicho valor corresponde al rango para los limos; por otro lado, el diámetro equivalente menor de la muestra fina corresponde a 0,00124mm, lo que corresponde al rango de clasificación de las arcillas; así mismo cabe resaltar que se obtuvo un 16% de contenido de arena retenido en el tamiz N°200.

A continuación, se muestra la gráfica de las 5 muestras de suelo tomadas y analizadas con el hidrómetro 152H:

Gráfica 11. Escala logarítmica de las cinco muestras (hidrómetro)



FUENTE: Los Autores

Analizando los valores extremos referentes a los tamaños de partícula obtenidos por el hidrómetro, se observa que en ninguno de los ensayos se obtiene registro para tamaños inferiores a 0,0012 mm ni superiores a 0,0380 mm de diámetro.

## 8.2. RESULTADOS SISTEMA PARIO – CAOLÍN AMARILLO

Según el método propuesto por METER GROUP AG en el manual del equipo PARIO, el tamaño de la muestra de suelo debe ser entre 25g (material sin arena) y 50g (material con mucha arena). En caso de no saber el contenido de arena se recomienda utilizar 30g de muestra (peso en seco). Para este estudio de caso, se tomaron cinco (5) muestras de suelo, de la siguiente forma:

**Tabla 12. Resumen de pesos de muestras (PARIO)**

PESO (g)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5*
Suelo	30,0	25,0	25,0	25,0	<b>25,0</b>
Solución	5,0	5,0	5,0	5,0	<b>5,0</b>
Suelo + solución	35,0	30,0	30,0	35,0	35,0

FUENTE: Los Autores

Cada muestra de suelo se analizó en el equipo PARIO durante 18 horas, en las cuales el equipo realizó mediciones cada 10 segundos.

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos en cada una de las muestras:

### 8.2.1. Muestra 1: Caolín amarillo 1 (PARIO)

**Tabla 13. Resultados de la muestra 1 (PARIO)**

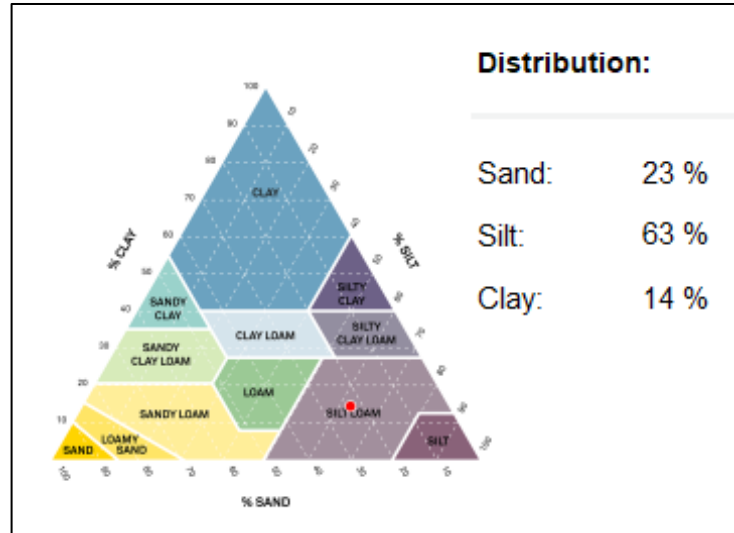
FRACCIÓN	DP [µm]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
ARCILLA	<2.0	14.4%	3.9%	24.9%	21.0%
LIMO FINO	2.0-6.3	18.4%	17.9%	19.0%	1.1%
LIMO MEDIO	43896	15.6%	15.1%	16.1%	1.0%
LIMO GRUESO	20-63	28.6%	26.9%	30.3%	3.4%
ARENA FINA	63-200	23.0%	13.8%	32.2%	18.4%
ARENA MEDIA	200-630	0.0%	-0.3%	0.3%	0.6%
ARENA GRUESA	630-2000	0.0%	-0.2%	0.2%	0.4%
ARCILLA	<2.0	14.4%	3.9%	24.9%	-
LIMO	2.0-63	62.6%	61.0%	64.2%	-
ARENA	63-2000	23.0%	13.8%	32.2%	-
Arcilla	< 2.0	14.4%	-	-	-
Limo	2.0 - 63.0	62.6%	-	-	-
Arena	63.0 -- 2000	23.0%	-	-	-

FUENTE: METER Pario CONTROL

### 8.2.1.1. Distribución del suelo de la muestra 1 (PARIO)

En la gráfica a seguir, se muestra la distribución del suelo de la muestra 1, según los resultados arrojados por el equipo PARIO:

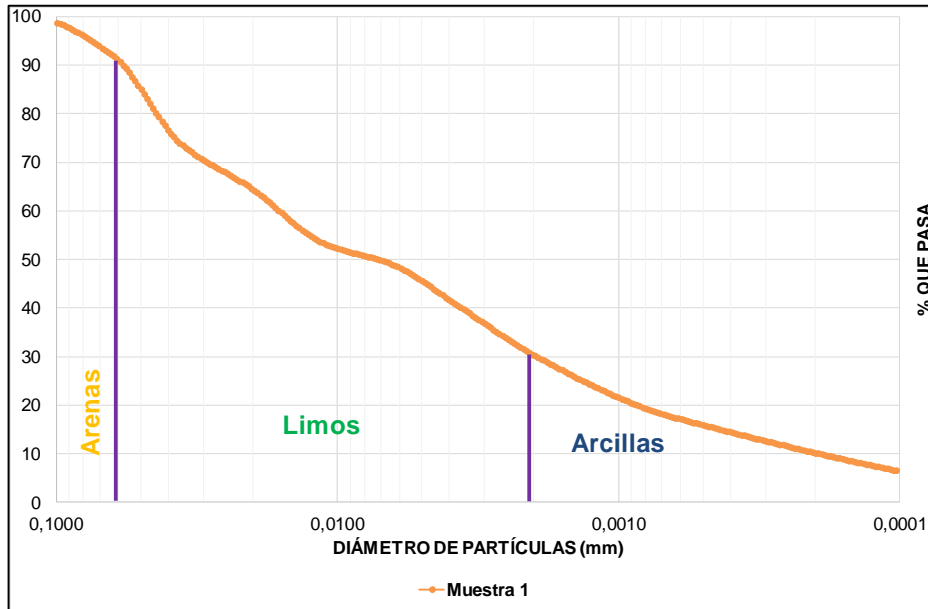
Gráfica 12. Distribución del suelo de la muestra 1 (PARIO)



FUENTE: METER Pario CONTROL

Se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 1, en relación del diámetro de la partícula (eje X) y el porcentaje que pasa (eje Y):

Gráfica 13. Escala logarítmica de la muestra 1 (PARIO)



FUENTE: Los Autores

Basados en la gráfica anterior, se determinó que la mayor distribución de partículas del suelo, se encuentra en el rango de los limos.

### **8.2.1.2. Cálculo de la distribución de la muestra 1 (PARIO)**

Para hallar el porcentaje de distribución de cada muestra, se tuvieron en cuenta los valores del diámetro de la partícula DP (mm) y la densidad relativa acumulada MAX-LIKELI. Se tomaron los valores límites de MAX-LIKELI según los valores límites del rango de cada partícula, de la siguiente forma:

#### **Arena:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite infeior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arena} = 100 - 75,6384$$

$$\%_{Arena} = \mathbf{24,36}$$

#### **Limo:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite infeior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Limo} = 74,7616 - 14,5301$$

$$\%_{Limo} = \mathbf{60,23}$$

#### **Arcillas:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite infeior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arcilla} = 14,2001 - 0,00004$$

$$\%_{Arcilla} = \mathbf{14,2}$$

#### **Pérdida:**

$$\%_{Pérdida} = \text{Porcentaje total de material} - \sum \% \text{ Arenas, Limos, Arcillas}$$

$$\%_{Pérdida} = 100 - 98,79$$

$$\%_{Pérdida} = \mathbf{1,21}$$

A continuación, se muestran los resultados tabulados para su análisis:

Tabla 14. Resultados del cálculo de la distribución de material en la muestra 1

Valores en %				
	Arena	Limos	Arcillas	Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (%)</b>	24,36	60,23	14,20	1,21
<b>Peso inicial (%)</b>	100,00			
<b>Peso final (%)</b>	98,79			
<b>Pérdida (%)</b>	1,21			

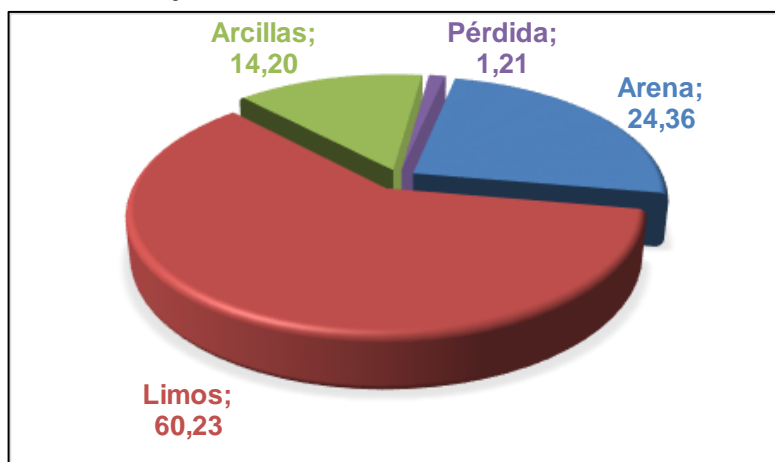
  

Valores en g				
	Arena	Limos	Arcillas	g Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (g)</b>	8,53	21,08	4,97	0,42
<b>Peso inicial (g)</b>	35,00			
<b>Peso final (g)</b>	34,58			
<b>Pérdida (g)</b>	0,42			

FUENTE: Los Autores

A continuación, se muestra el porcentaje de distribución de arenas, limos y arcillas de la muestra 1, conforme al análisis de los resultados obtenidos:

Gráfica 14. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 1 (PARIO)



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se observa que el porcentaje de arenas presentes en la muestra 1 es del 24,36%, equivalentes a 8,53g; el porcentaje de limos es del 60,23%, equivalentes a 21,08g; finalmente se encuentran las arcillas con un porcentaje de 14,20%, equivalentes a 4,97g. De igual forma, se observa una pérdida de material del 1,21%,

equivalente a 0,42g, esta pérdida se presume por la falta de experiencia en el uso del equipo PARIO.

### 8.2.2. Muestra 2: Caolín amarillo 2 (PARIO)

Tabla 15. Resultados de la muestra 2 (PARIO)

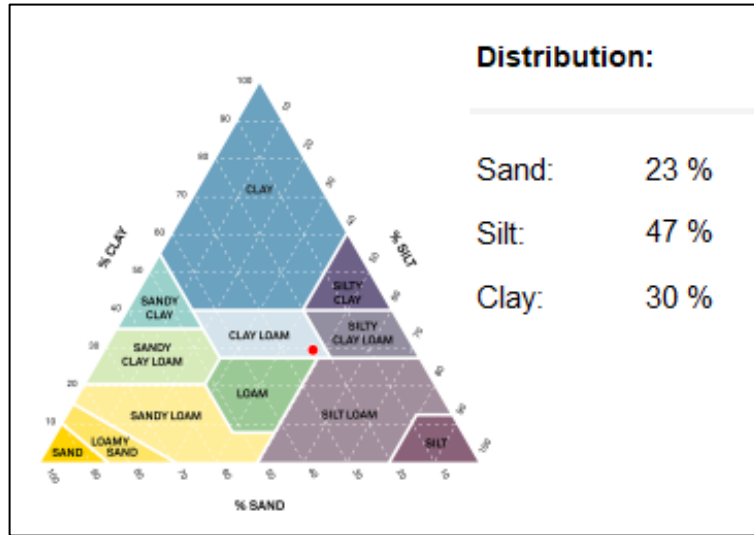
FRACCIÓN	DP [mum]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
ARCILLA	<2.0	29,6%	-10,5%	69,8%	80,3%
LIMO FINO	2.0-6.3	14,0%	13,1%	14,8%	1,7%
LIMO MEDIO	43896	6,9%	6,1%	7,7%	1,5%
LIMO GRUESO	20-63	26,5%	18,2%	34,9%	16,7%
ARENA FINA	63-200	23,0%	-9,4%	55,3%	64,7%
ARENA MEDIA	200-630	0,0%	-0,3%	0,4%	0,7%
ARENA GRUESA	630-2000	0,0%	-0,2%	0,3%	0,5%
ARCILLA	<2.0	29,6%	-10,5%	69,8%	-
LIMO	2.0-63	47,4%	39,3%	55,4%	-
ARENA	63-2000	23,0%	-9,3%	55,3%	-
Arcilla	< 2.0	29,6%	-	-	-
Limo	2.0 - 63.0	47,4%	-	-	-
Arena	63.0 -- 2000	23,0%	-	-	-

FUENTE: METER Pario CONTROL

#### 8.2.2.1. Distribución del suelo de la muestra 2 (PARIO)

En la gráfica a seguir, se muestra la distribución del suelo de la muestra 2, según los resultados arrojados por el equipo PARIO:

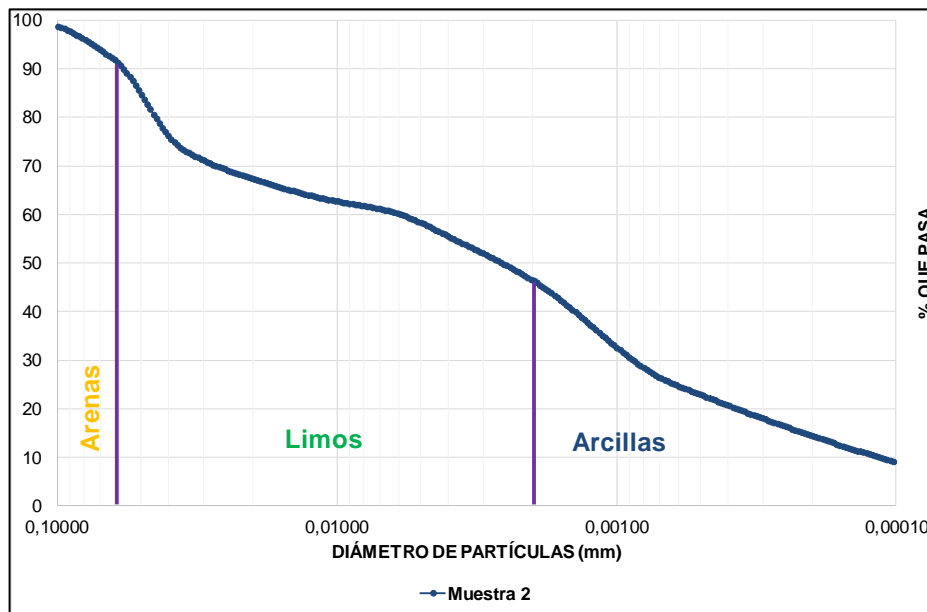
**Gráfica 15. Distribución del suelo de la muestra 2 (PARIO)**



FUENTE: METER Pario CONTROL

A continuación, se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 2, en relación del diámetro de la partícula (eje X) y el porcentaje que pasa (eje Y):

**Gráfica 16. Escala logarítmica de la muestra 2 (PARIO)**



FUENTE: Los Autores



### 8.2.2.2. Cálculo de la distribución de la muestra 2 (PARIO)

Para hallar el porcentaje de distribución de cada muestra, se tuvieron en cuenta los valores del diámetro de la partícula DP (mm) y la densidad relativa acumulada MAX-LIKELI. Se tomaron los valores límites de MAX-LIKELI según los valores límites del rango de cada partícula, de la siguiente forma:

#### Arena:

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arena} = 100 - 75,5520$$

$$\%_{Arena} = \mathbf{24,45}$$

#### Limo:

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Limo} = 74,6081 - 29,7757$$

$$\%_{Limo} = \mathbf{44,83}$$

#### Arcillas:

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arcilla} = 29,4061 - 0,00026$$

$$\%_{Arcilla} = \mathbf{29,41}$$

#### Pérdida:

$$\%_{Pérdida} = \text{Porcentaje total de material} - \sum \% \text{ Arenas, Limos, Arcillas}$$

$$\%_{Pérdida} = 100 - 98,69$$

$$\%_{Pérdida} = \mathbf{1,31}$$

Seguidamente, se muestran los resultados tabulados para su análisis:

**Tabla 16. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 2**

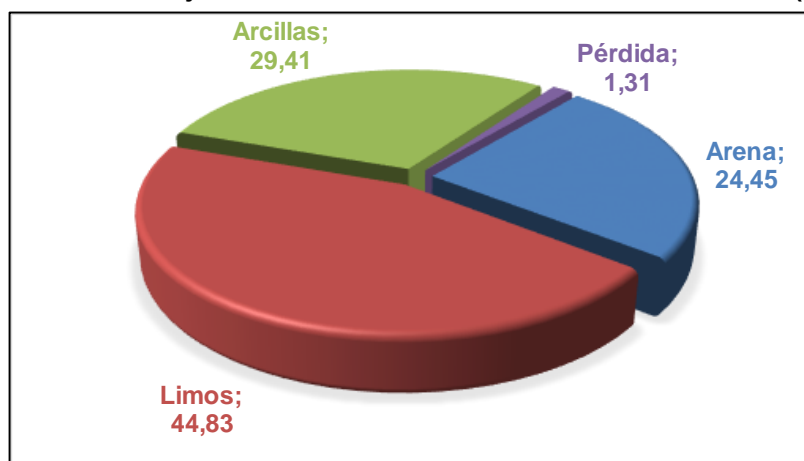
Valores en %				
	Arena	Limos	Arcillas	Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (%)</b>	24,45	44,83	29,41	1,31
<b>Peso inicial (%)</b>	100,00			
<b>Peso final (%)</b>	98,69			
<b>Pérdida (%)</b>	1,31			

Valores en g				
	Arena	Limos	Arcillas	g Pérdida
Rango (mm)	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
Concentración (g)	7,33	13,45	8,82	0,39
Peso inicial (g)	30,00			
Peso final (g)	29,61			
Pérdida (g)	0,39			

FUENTE: Los Autores

A continuación, se muestra el porcentaje de distribución de arenas, limos y arcillas de la muestra 2, conforme al análisis de los resultados obtenidos:

**Gráfica 17. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 2 (PARIO)**



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se observa que el porcentaje de arenas presentes en la muestra 2 es del 24,45%, equivalentes a 7,33g; el porcentaje de limos es del 44,83%, equivalentes a 13,45g; finalmente se encuentran las arcillas con un porcentaje de 29,41%, equivalentes a 8,82g. De igual forma, se obtuvo una pérdida de material del 1,31%, equivalente a 0,39g, esta pérdida se presume por la falta de experiencia en el uso del equipo PARIO.

### 8.2.3. Muestra 3: Caolín amarillo 3 (PARIO)

Tabla 17. Resultados de la muestra 3 (PARIO)

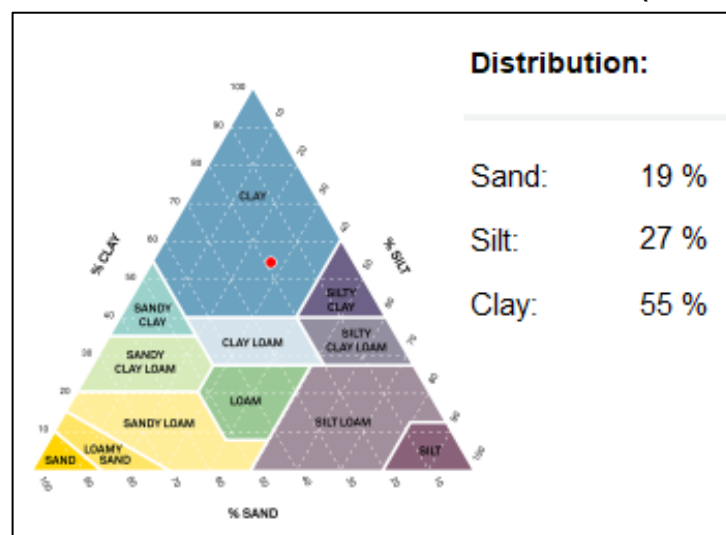
FRACCIÓN	DP [µm]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
ARCILLA	<2.0	54,6%	54,0%	55,2%	1,1%
LIMO FINO	2.0-6.3	12,8%	12,3%	13,3%	1,0%
LIMO MEDIO	43896	4,4%	4,0%	4,8%	0,8%
LIMO GRUESO	20-63	9,5%	9,1%	10,0%	0,9%
ARENA FINA	63-200	18,6%	18,3%	18,9%	0,6%
ARENA MEDIA	200-630	0,0%	-0,2%	0,2%	0,4%
ARENA GRUESA	630-2000	0,0%	-0,1%	0,1%	0,3%
ARCILLA	<2.0	54,6%	54,0%	55,2%	-
LIMO	2.0-63	26,8%	26,1%	27,4%	-
ARENA	63-2000	18,6%	18,4%	18,9%	-
Arcilla	< 2.0	54,6%	-	-	-
Limo	2.0 - 63.0	26,8%	-	-	-
Arena	63.0 -- 2000	18,6%	-	-	-

FUENTE: METER Pario CONTROL

#### 8.2.3.1. Distribución del suelo de la muestra 3

En la gráfica a seguir, se muestra la distribución del suelo de la muestra 3, según los resultados arrojados por el equipo PARIO:

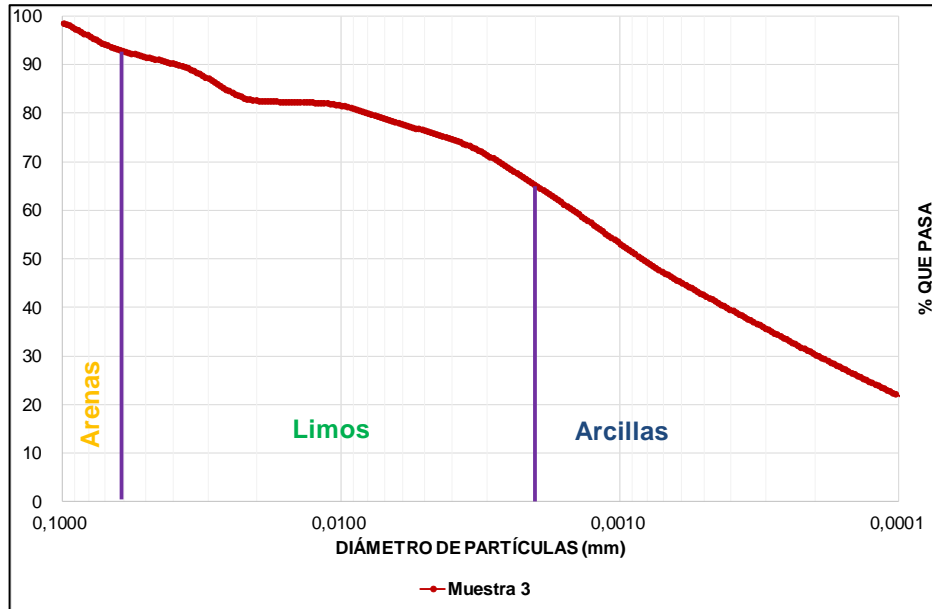
Gráfica 18. Distribución del suelo de la muestra 3 (PARIO)



FUENTE: METER Pario CONTROL

Se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 3, en relación del diámetro de la partícula (eje X) y el porcentaje que pasa (eje Y):

**Gráfica 19. Escala logarítmica de la muestra 3 (PARIO)**



FUENTE: Los Autores

### 8.2.3.2. Cálculo de la distribución de la muestra 3

Para hallar el porcentaje de distribución de cada muestra, se tuvieron en cuenta los valores del diámetro de la partícula DP (mm) y la densidad relativa acumulada MAX-LIKELI. Se tomaron los valores límites de MAX-LIKELI según los valores límites del rango de cada partícula, de la siguiente forma:

**Arena:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arena} = 100 - 81,1440$$

$$\%_{Arena} = \mathbf{18,86}$$

**Limo:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Limo} = 81,0229 - 54,7688$$

$$\%_{Limo} = \mathbf{26,25}$$

**Arcillas:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arcilla} = 54,3898 - 0,05394$$

$$\%_{\text{Arcilla}} = 54,39$$

**Pérdida:**

$$\%_{\text{Pérdida}} = \text{Porcentaje total de material} - \sum \% \text{ Arenas, Limos, Arcillas}$$

$$\%_{\text{Pérdida}} = 100 - 99,50$$

$$\%_{\text{Pérdida}} = 0,50$$

A continuación, se muestran los resultados tabulados para su análisis:

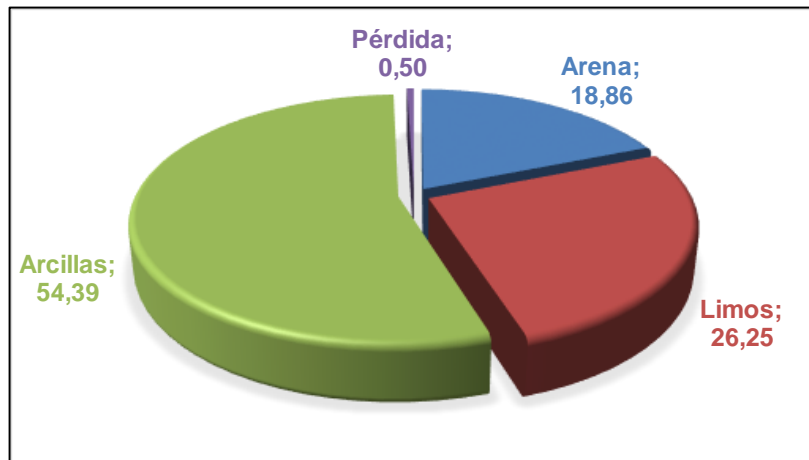
**Tabla 18. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 3**

Valores en %				
	Arena	Limos	Arcillas	Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (%)</b>	18,86	26,25	54,39	0,50
<b>Peso inicial (%)</b>	100,00			
<b>Peso final (%)</b>	99,50			
<b>Pérdida (%)</b>	0,50			
Valores en g				
	Arena	Limos	Arcillas	g Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (g)</b>	5,66	7,88	16,32	0,15
<b>Peso inicial (g)</b>	30,00			
<b>Peso final (g)</b>	29,85			
<b>Pérdida (g)</b>	0,15			

FUENTE: Los Autores

A continuación, se muestra el porcentaje de distribución de arenas, limos y arcillas de la muestra 3, conforme al análisis de los resultados obtenidos:

Gráfica 20. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 3 (PARIO)



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se analiza que, el porcentaje de arenas presentes en la muestra 3 es del 18,86%, equivalentes a 5,66g; el porcentaje de limos es del 26,25%, equivalentes a 7,88g; finalmente se encuentran las arcillas con un porcentaje de 54,39%, equivalentes a 16,32g. De igual forma, se obtiene una pérdida de material del 0,50%, equivalente a 0,15g, esta pérdida se presume por la falta de experiencia en el uso del equipo PARIO.

#### 8.2.4. Muestra 4: Caolín amarillo 4 (PARIO)

Tabla 19. Resultados de la muestra 4 (PARIO)

FRACCIÓN	DP[mum]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
CLAY	<2.0	33,8%	-128,0%	195,7%	323,7%
FINE-SILT	2.0-6.3	10,0%	9,4%	10,6%	1,2%
MIDDLE-SILT	43896	7,7%	7,3%	8,2%	0,8%
COARSE-SILT	20-63	27,6%	-20,5%	75,6%	96,0%
FINE-SAND	63-200	20,9%	-93,6%	135,3%	228,9%
MIDDLE-SAND	200-630	0,0%	-0,2%	0,2%	0,4%
COARSE-SAND	630-2000	0,0%	-0,1%	0,1%	0,3%
CLAY	<2.0	33,8%	-128,0%	195,7%	-
SILT	2.0-63	45,3%	-2,2%	92,8%	-
SAND	63-2000	20,9%	-93,6%	135,3%	-
Clay	< 2.0	33,8%	-	-	-
Silt	2.0 - 63.0	45,3%	-	-	-

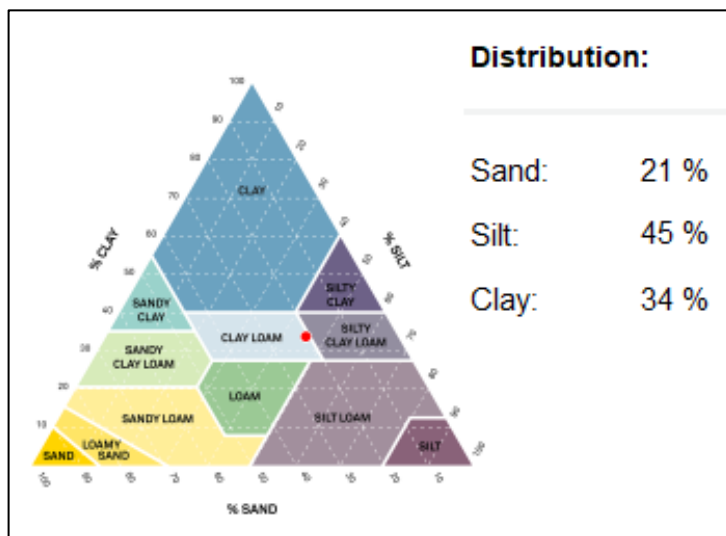
FRACCIÓN	DP[mum]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
Sand	63.0 -- 2000	20,9%	-	-	-

FUENTE: METER Pario CONTROL

#### 8.2.4.1. Distribución del suelo de la muestra 4

En la gráfica a seguir, se muestra la distribución del suelo de la muestra 4, según los resultados arrojados por el equipo PARIO:

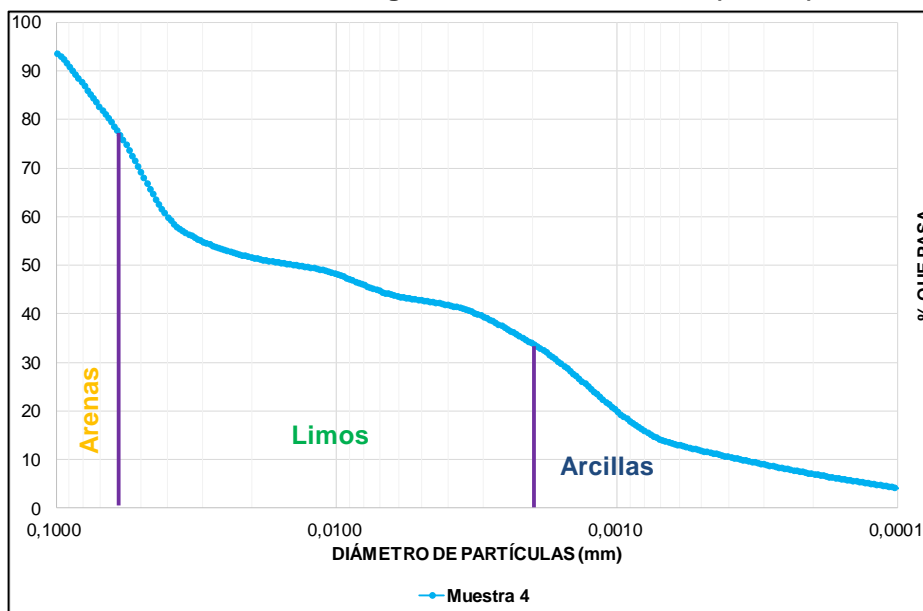
Gráfica 21. Distribución del suelo de la muestra 4 (PARIO)



FUENTE: METER Pario CONTROL

A continuación, se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 3, en relación del diámetro de la partícula (eje X) y el porcentaje que pasa (eje Y):

Gráfica 22. Escala logarítmica de la muestra 4 (PARIO)



FUENTE: Los Autores

#### 8.2.4.2. Cálculo de la distribución de la muestra 4

Para hallar el porcentaje de distribución de cada muestra, se tuvieron en cuenta los valores del diámetro de la partícula DP (mm) y la densidad relativa acumulada MAX-LIKELI. Se tomaron los valores límites de MAX-LIKELI según los valores límites del rango de cada partícula, de la siguiente forma:

**Arena:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arena} = 100 - 77,7163$$

$$\%_{Arena} = \mathbf{22,28}$$

**Limo:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Limo} = 76,7789 - 33,9480$$

$$\%_{Limo} = \mathbf{42,83}$$

**Arcillas:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arcilla} = 33,5922 - 0,00048$$

$$\%_{Arcilla} = \mathbf{33,59}$$

**Pérdida:**



$$\%_{P\acute{e}rdida} = \text{Porcentaje total de material} - \sum \% \text{ Arenas, Limos, Arcillas}$$

$$\%_{P\acute{e}rdida} = 100 - 98,71$$

$$\%_{P\acute{e}rdida} = 1,29$$

A continuación, se muestran los resultados tabulados para su análisis:

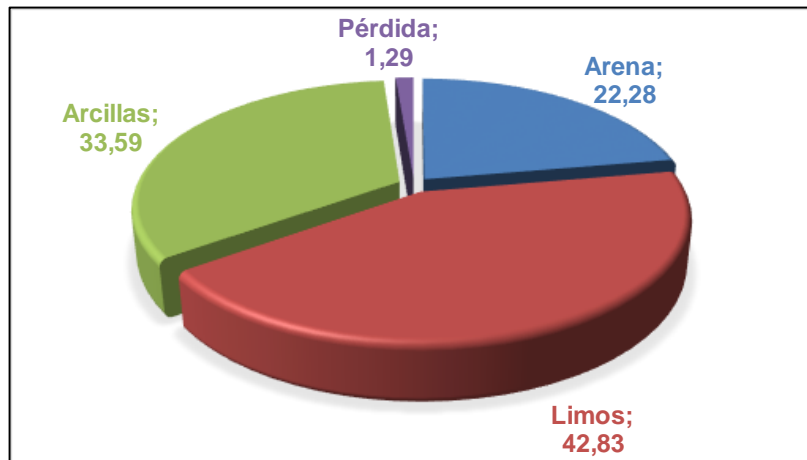
**Tabla 20. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 4**

<b>Valores en %</b>				
	<b>Arena</b>	<b>Limos</b>	<b>Arcillas</b>	<b>Pérdida</b>
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (%)</b>	22,28	42,83	33,59	1,29
<b>Peso inicial (%)</b>	100,00			
<b>Peso final (%)</b>	98,71			
<b>Pérdida (%)</b>	1,29			
<b>Valores en g</b>				
	<b>Arena</b>	<b>Limos</b>	<b>Arcillas</b>	<b>g Pérdida</b>
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (g)</b>	6,69	12,85	10,08	0,39
<b>Peso inicial (g)</b>	30,00			
<b>Peso final (g)</b>	29,61			
<b>Pérdida (g)</b>	0,39			

FUENTE: Los Autores

A continuación, se muestra el porcentaje de distribución de arenas, limos y arcillas de la muestra 4, conforme al análisis de los resultados obtenidos:

Gráfica 23. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 4 (PARIO)



FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se observa que el porcentaje de arenas presentes en la muestra 4 es del 22,28%, equivalentes a 6,69g; el porcentaje de limos es del 42,83%, equivalentes a 12,85g; finalmente se encuentran las arcillas con un porcentaje de 33,59%, equivalentes a 10,08g. De igual forma, se obtuvo una pérdida de material del 1,29%, equivalente a 0,39g, esta pérdida se presume por la falta de experiencia en el uso del equipo PARIO.

### 8.2.5. Muestra 5: Caolín amarillo 5 (PARIO)

Tabla 21. Resultados de la muestra 5 (PARIO)

FRACCIÓN	DP[mum]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
CLAY	<2.0	17.4%	-194.5%	229.3%	423.8%
FINE-SILT	2.0-6.3	9.8%	9.1%	10.6%	1.5%
MIDDLE-SILT	43896	8.0%	7.4%	8.7%	1.2%
COARSE-SILT	20-63	47.4%	-62.2%	157.1%	219.3%
FINE-SAND	63-200	17.3%	-86.1%	120.7%	206.9%
MIDDLE-SAND	200-630	0.0%	-0.2%	0.2%	0.3%
COARSE-SAND	630-2000	0.0%	-0.1%	0.1%	0.2%
CLAY	<2.0	17.4%	-194.5%	229.3%	-
SILT	2.0-63	65.3%	-43.2%	173.8%	-
SAND	63-2000	17.3%	-86.1%	120.8%	-
Clay	< 2.0	17.4%	-	-	-

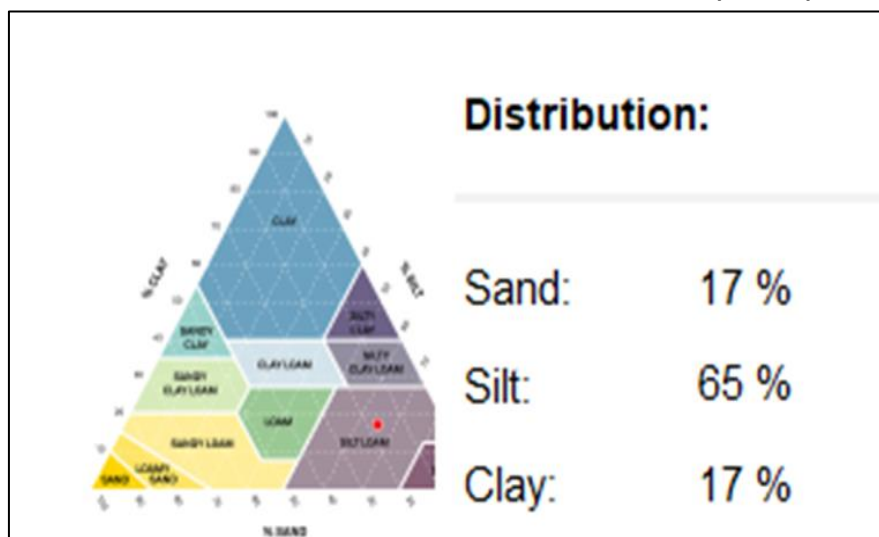
FRACCIÓN	DP[mum]	MAX-LIKELI	P2.5	P97.5	P97.5-P2.5
Silt	2.0 - 63.0	65.3%	-	-	-
Sand	63.0 -- 2000	17.3%	-	-	-

FUENTE: METER Pario CONTROL

### 8.2.5.1. Distribución del suelo de la muestra 5

En la gráfica a seguir, se muestra la distribución del suelo de la muestra 5, según los resultados arrojados por el equipo PARIO:

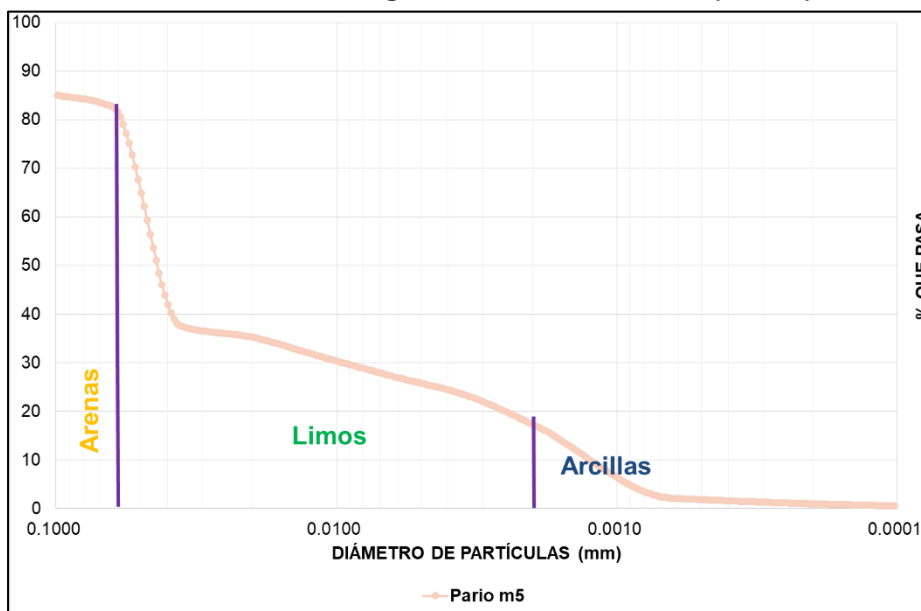
Gráfica 24. Distribución del suelo de la muestra 5 (PARIO)



FUENTE: METER Pario CONTROL

A continuación, se presenta la gráfica en escala logarítmica de la muestra 5, en relación del diámetro de la partícula (eje X) y el porcentaje que pasa (eje Y):

Gráfica 25. Escala logarítmica de la muestra 5 (PARIO)



FUENTE: Los Autores

### 8.2.5.2. Cálculo de la distribución de la muestra 5

Para hallar el porcentaje de distribución de cada muestra, se tuvieron en cuenta los valores del diámetro de la partícula  $DP$  (mm) y la densidad relativa acumulada MAX-LIKELI. Se tomaron los valores límites de MAX-LIKELI según los valores límites del rango de cada partícula, de la siguiente forma:

**Arena:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arena} = 100 - 81,6649$$

$$\%_{Arena} = \mathbf{18,34}$$

**Limo:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Limo} = 80,5215 - 17,4899$$

$$\%_{Limo} = \mathbf{63,03}$$

**Arcillas:**

$$\%_{Material} = \text{Límite superior}_{DP} - \text{Límite inferior}_{DP} \text{ (según el rango)}$$

$$\%_{Arcilla} = 17,2010 - 0,0000$$

$$\%_{Arcilla} = \mathbf{17,20}$$

**Pérdida:**

$$\%_{P\acute{e}rdida} = \text{Porcentaje total de material} - \sum \% \text{ Arenas, Limos, Arcillas}$$

$$\%_{P\acute{e}rdida} = 100 - 98,57$$

$$\%_{P\acute{e}rdida} = 1,43$$

A continuación, se muestran los resultados tabulados para su análisis:

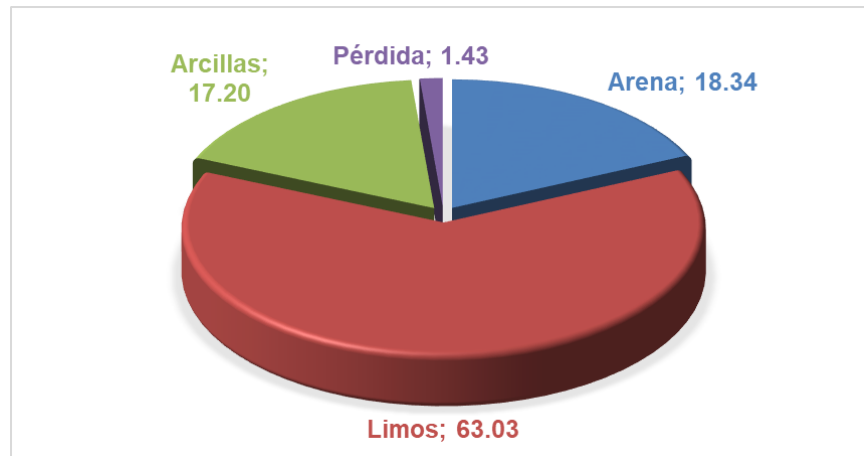
**Tabla 22. Resultados del cálculo de la distribución del suelo en la muestra 5**

Valores en %				
	Arena	Limos	Arcillas	Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (%)</b>	18,34	63,03	17,20	1,43
<b>Peso inicial (%)</b>	100,00			
<b>Peso final (%)</b>	98,57			
<b>Pérdida (%)</b>	1,43			
Valores en g				
	Arena	Limos	Arcillas	g Pérdida
<b>Rango (mm)</b>	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	-
<b>Concentración (g)</b>	4,58	15,76	4,30	0,36
<b>Peso inicial (g)</b>	25,00			
<b>Peso final (g)</b>	24,64			
<b>Pérdida (g)</b>	0,36			

FUENTE: Los Autores

A continuación, se muestra el porcentaje de distribución de arenas, limos y arcillas de la muestra 5, conforme al análisis de los resultados obtenidos:

Gráfica 26. Porcentaje de distribución de materiales de la muestra 5 (PARIO)

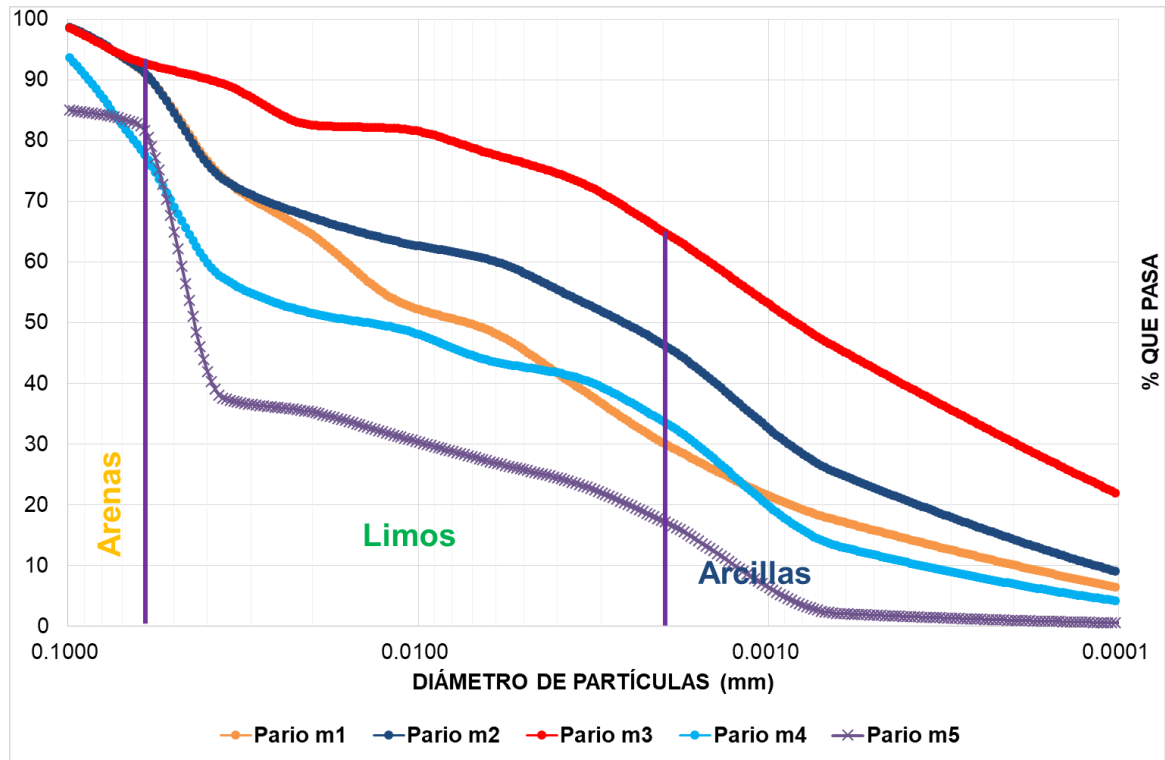


FUENTE: Los Autores

**Análisis:** Se observa que el porcentaje de arenas presentes en la muestra 5 es del 18,34%, equivalentes a 4,58 g de la muestra total; el porcentaje de limos es del 63,03%, equivalentes a 15,76 g; finalmente se encuentran las arcillas con un porcentaje de 17,20%, equivalentes a 4,30 g. De igual forma, se obtuvo una pérdida de material del 1,43%, equivalente a 0,36 g del total de la muestra.

### 8.2.6. Comparativo de las 5 muestras (PARIO)

Gráfica 27. Escala logarítmica de las 5 muestras (PARIO)

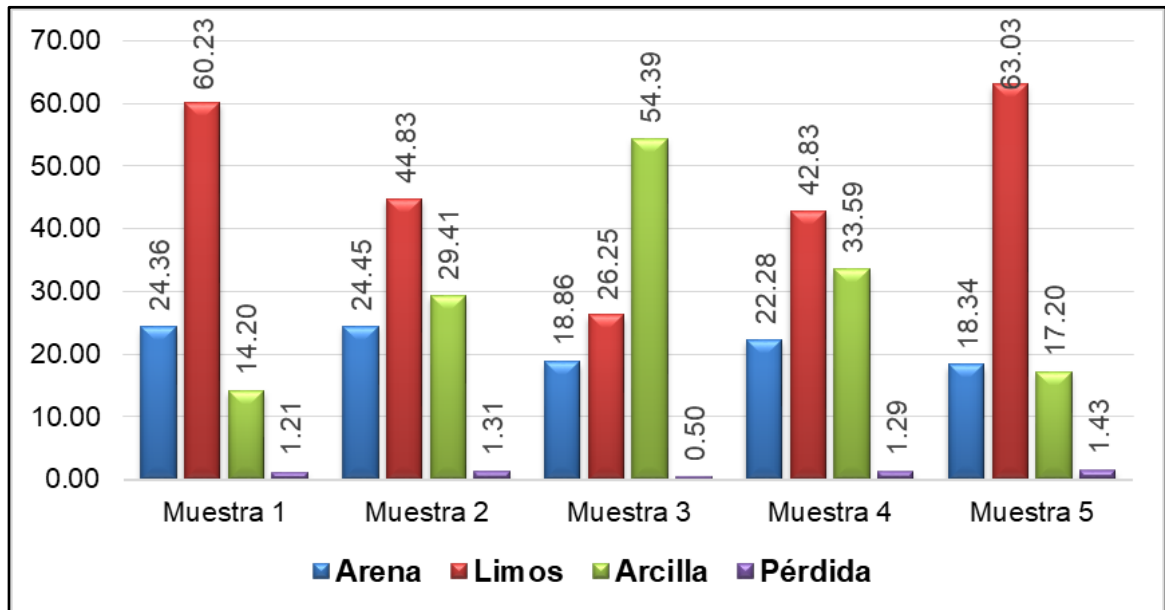


FUENTE: Los Autores

En la Gráfica 27, se observa que las muestras analizadas con el dispositivo PARIO, presentan variedad en su composición y distribución del suelo, lo que permite realizar un ensayo de laboratorio dinámico y variado.

Al ser el Caolín Amarillo un material no uniforme en su distribución de agregados, este es usado como material de construcción, por tanto las distribuciones para cada muestra son diferentes e irregulares ya que no se tiene 100% certeza del porcentaje de cada agregado para este material a diferencia del caolín blanco, ya que en su distribución de materiales es muy similar entre ellos.

**Gráfica 28. Comparativo de la distribución del suelo (PARIO)**



FUENTE: Los Autores

En la Gráfica 28 se puede observar que la distribución del suelo de las cinco (5) muestras analizadas con el dispositivo PARIO es variada, como se mencionó anteriormente esto se debe a que el Caolín Amarillo no tiene una distribución uniforme de agregados; siendo este el motivo por el cual los porcentajes o distribuciones son muy variados. Las muestras tienen mayor porcentaje de suelos finos, lo que permite evidenciar que los ensayos se hicieron correctamente. En todas las muestras hubo una pérdida de material no mayor al 1,43%, esta cifra es poco significativa, ya que no afecta los resultados obtenidos durante el ensayo.

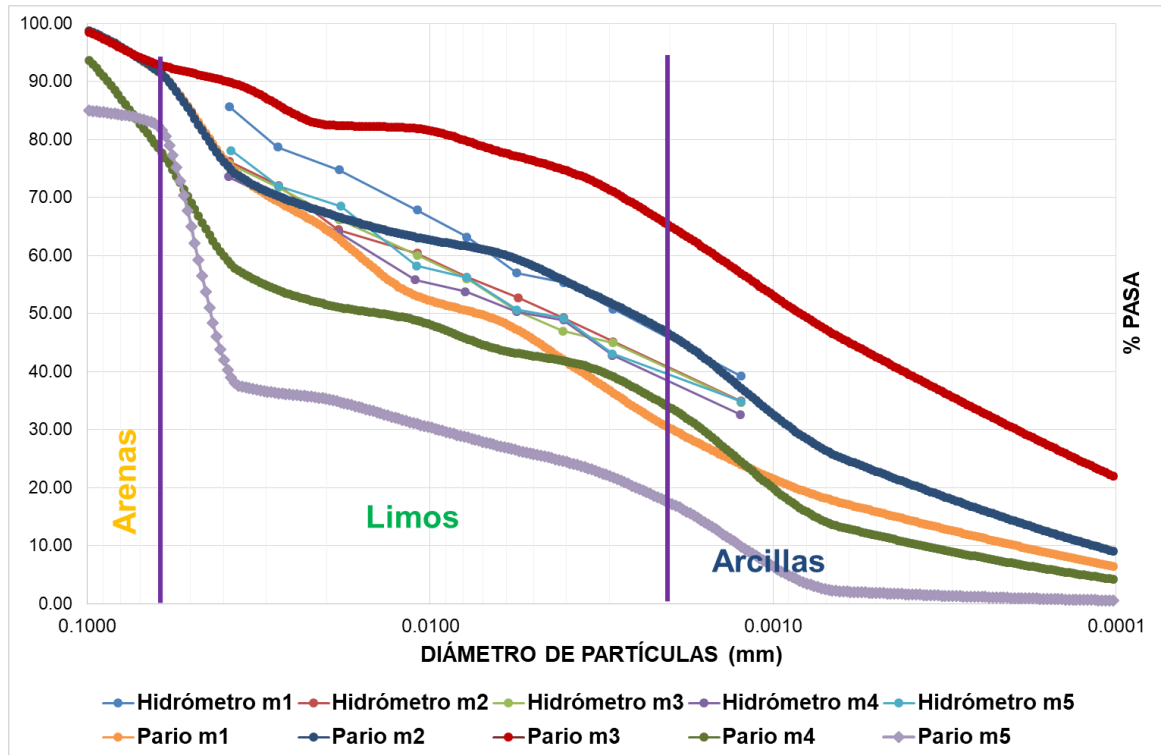


## 9. HIDRÓMETRO vs. PARIO

Teniendo los resultados del estudio de granulometría de las 5 muestras, realizado con el hidrómetro y con el equipo PARIO, se procedió a comparar y analizar los resultados obtenidos.

A continuación, se muestra la gráfica en escala logarítmica donde se relacionan los resultados obtenidos por cada método de análisis:

Gráfica 29. Resultados del hidrómetro y el PARIO



FUENTE: Los Autores

La Gráfica 29 permite contemplar la diferencia de los resultados obtenidos en el estudio granulométrico de 10 muestras de suelo, 5 realizadas con el hidrómetro y 5 realizadas con el dispositivo PARIO. Se puede apreciar que el hidrómetro no arroja lecturas de partículas con un diámetro inferior 0,0012mm, situación en la cual el dispositivo PARIO tiene ventaja, ya que este último puede analizar el porcentaje de partículas que pasan con un diámetro 0,0001mm.

El dispositivo PARIO es ideal para analizar muestras de suelo con alto contenido de arcillas, ya que éstas, según los estándares británicos, tienen un diámetro <0.002mm, y pueden ser estimadas con este dispositivo, mientras que el hidrómetro tiene limitantes para determinar partículas con este diámetro tan pequeño.

Los cálculos realizados para la clasificación de partículas finas de las muestras tomadas con el hidrómetro están basados en los lineamientos de la norma INVIAS 124-07 la cual plantea el uso de la fórmula:

**Ecuación 1 % más fino para Hidrómetro 152-H**

$$\% \text{ más fino} = \frac{R_{\text{corregida}} \times \alpha}{W_o} \times 100$$

$$\alpha = \frac{2.6500 - 1.000}{2.6500} \times \frac{G_s}{G_s - 1.000}$$

Autor: INVIAS 124-07

Donde:

$G_s$  = gravedad específica de los sólidos (norma INV E – 222<sup>29</sup>),

$W_o$  = masa de la muestra de suelo secado al horno que se empleó para el Análisis del hidrómetro, y

$a$  = Factor de corrección por gravedad específica y el tamaño de partículas según la clasificación basada en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S):

**Tabla 23. Clasificación de partículas del suelo (S.U.C.S.)**

	<b>Tamaño mínimo (mm)</b>	<b>Tamaño máximo (mm)</b>
<b>Fragmentos</b>	300	-
<b>Guijarros</b>	75	300
<b>Grava</b>	4,76	75
<b>Arena</b>	0,075	4,76
<b>Limo</b>	0,002	0,075
<b>Arcilla</b>	-	0,002

FUENTE: S.U.C.S

---

<sup>29</sup> INVÍAS, 2007. Gravedad específica y absorción de agregados finos. I.N.V. E - 222 - 07. [en línea], pp. 1-8. Disponible en: [http://www.invias.gov.co/index.php/hechos-de-transparencia/informacion-financiera-y-contable/cat\\_view/11-documentos-tecnicos/68-especificaciones-generales-de-construccion-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras](http://www.invias.gov.co/index.php/hechos-de-transparencia/informacion-financiera-y-contable/cat_view/11-documentos-tecnicos/68-especificaciones-generales-de-construccion-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras).

## 10. CONCLUSIONES

El análisis realizado entre el Sistema Pario y el Hidrómetro 152 H muestra una correlación entre la clasificación del tamaño de partículas en cuanto a los limos, pero poca similitud para lo referente a la clasificación de las arcillas. Dicha disparidad debido a que los tiempos de lectura del hidrómetro resultan insuficientes para las partículas de rápida o lenta sedimentación mientras que el Sistema Pario, con su registro estandarizado de 10 segundos, ofrece condiciones de alta precisión.

El uso del Sistema Pario permite una operación automatizada, sin interferencia humana disminuyendo los errores operacionales que influyen directamente en los resultados del análisis por medio del hidrómetro.

Los ensayos realizados con el hidrómetro para la determinación de partículas finas del suelo están avalados por sistemas nacionales e internacionales, sin embargo, su limitado registro de datos nos plantea la necesidad de incluir herramientas tecnológicas que ofrezcan resultados más precisos y coherentes.

En caso de requerir información sobre partículas de tamaño inferior a 0,001 mm por medio del hidrómetro convencional, se requiere extender el tiempo de lectura a un mínimo de 2.880 minutos mientras que los ensayos de laboratorio realizados con el Sistema Automatizado Pario nos permitieron clasificar coloides en menos de 1080 minutos de lectura.

El Sistema Pario permite obtener los registros y resultados directamente en formato digital lo cual facilita su manipulación y ahorra tiempo en la sistematización de datos.

El método de clasificación de partículas por medio del Hidrómetro ha sido usado con porcentajes relativamente exitosos desde hace décadas pues su fundamento teórico está correctamente sustentado. El sistema Pario, basado en el mismo principio garantiza confiabilidad de resultados e incluye mejoras referentes a la precisión en la clasificación textural de los suelos.

## **11. RECOMENDACIONES**

La ejecución de los ensayos realizados con el Sistema Pario nos permitió identificar ciertos factores que pueden alterar los resultados:

Se debe garantizar que la superficie donde se realizará el ensayo esté libre de vibraciones pues cualquier desestabilización del equipo es registrada por los sensores alterando las lecturas.

Para que el Sistema Pario funcione debe contar con una fuente de alimentación de energía constante. El computador al que es conectado cumple tal función, pero debe garantizarse que este no hiberne ni se suspenda durante el ensayo pues el equipo Pario dejará de tomar las lecturas en cualquiera de esas circunstancias.

Al tratarse de un aparato altamente sensible, se deben garantizar las condiciones térmicas que establece la normatividad.

El almacenamiento del equipo Pario debe hacerse en seco, retirando las partículas sobrantes del ensayo con agua destilada y procurando nunca tocar el sensor de presión, que está blindado en la punta del eje.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, F.A., AL-QURESHI, H.A. y HOTZA, D., 2011. Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science* [en línea], vol. 51, no. 1-2, pp. 1-7. ISSN 01691317. DOI 10.1016/j.clay.2010.10.028. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>.
- BERETTA, A.N., SILBERMANN, A. V., PALADINO, L., TORRES, D., BASSAHUN, D., MUSSELLI, R. y GARCÍA-LAMOHE, A., 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e investigación agraria* [en línea], vol. 41, no. 2, pp. 25-26. ISSN 0718-1620. DOI 10.4067/S0718-16202014000200013. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-16202014000200013&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-16202014000200013&lng=en&nrm=iso&tlng=en).
- BEUSELINCK, L., GOVERS, G., POESEN, J., DEGRAER, G. y FROYEN, L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: Comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, vol. 32, no. 3-4, pp. 193-208.
- BORJA, K., MERCADO, J. y ENRIQUE COMBATT, 2015. Dispersantes químicos y cuantificación de fracciones texturales por los métodos Bouyoucos y pipeta. *Acta Agronomica*, vol. 64, no. 4, pp. 308-314. ISSN 01202812. DOI 10.15446/acag.v64n4.45722.
- CENTERI, C., JAKAB, G., SZABÓ, S., FARSANG, A., BARTA, K., SZALAI, Z. y BÍRÓ, Z., 2015. Comparison of Particle-Size Analyzing Laboratory Methods. , vol. 14, no. 5, pp. 1125-1135.
- DI STEFANO, C., FERRO, V. y MIRABILE, S., 2010. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering*, vol. 106, no. 2, pp. 205-215. ISSN 15375110.
- FERRO, V. y MIRABILE, S., 2009. Comparing particle size distribution analysis by sedimentation and laser diffraction method. *Journal of Agricultural Engineering* [en línea], vol. 40, no. 2, pp. 35. ISSN 2239-6268. DOI 10.4081/jae.2009.2.35. Disponible en: <http://www.agroengineering.org/index.php/jae/article/view/jae.2009.2.35>.
- FLORES, L., ALCALÁ, J.R., RENÉ, T.J. y MARTÍNEZ, A., 2010. Manual de Procedimientos Analíticos. *Laboratorio de Física de Suelos* [en línea], pp. 56. Disponible en: [http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL\\_DEL\\_LABORATORIO\\_DE\\_FISICA\\_DE\\_SUELOS1.pdf](http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL_DEL_LABORATORIO_DE_FISICA_DE_SUELOS1.pdf).
- GABRIELS, D. y LOBO L., D., 2003. Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, pp. 37-48.
- GARCÍA, J., MEDINA, H. y NÚÑEZ, D., 2008. El método del hidrómetro: influencia

de los tiempos de lecturas en el cálculo de la distribución del tamaño de partículas en suelos de la Habana. *Cultivos Tropicales*, vol. 29, no. 2, pp. 21-26.

GONZÁLEZ, A., CASTRO, D. y VALDERRAMA, H., 1980. Estudio granulométrico para el balance de los elementos nutritivos del suelo. , vol. 30.

GONZÁLEZ, H.M., GARCÍA, J. y NÚÑEZ, D., 2007. El método del hidrómetro : base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo The hydrometer method: theoretical basis for its employment in determining the soil particle-size distribution. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 16, no. 3, pp. 19-25. ISSN 1010-2760.

GROUP, M., 2017. User manual PARIO. . S.I.:

INGARAMO, O., 2003. *Indicadores físicos de la degradación de suelo*. S.I.: Universidad de Coruña.

INVÍAS, 2007a. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. I.N.V.E-123-07. [en línea], no. 200, pp. 2-7. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos>.

INVÍAS, 2007b. Norma Invias E-124: 07 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. [En línea] 2007. <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1>. , no. 10, pp. 1-12.

JARAMILLO, D.F., 2002. *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

KARKANIS, P.G. y SCHAALJE, G.B., 1991. Comparison of 4 Measurement Schedules for Determination of Soil Particle-Size Distribution by the Hydrometer Method. *Canadian Agricultural Engineering*, vol. 33, no. 2, pp. 211-215.

LEÓN ARTETA, R., 2001. Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos. *Terra*, vol. 19, no. 3, pp. 219-225.

MANNA, L. La, ROSTAGNO, C.M., BUDUBA, C.G., IRISARRI, J. y NAVAS, A., 2016. Determinaciones de granulometría en suelos volcánicos: Comparación entre distintos métodos analíticos. *Ciencia del Suelo*, vol. 34, no. 2, pp. 355-364. ISSN 03263169.

NORAMBUENA V., P., LUZIO L., W. y VERA E, W., 2002. Comparación Entre Los Métodos De La Pipeta Y Bouyoucos Y Su Relación Con La Retención De Agua En Ocho Suelos De La Zona Altiplánica De La Provincia De Parinacota, Chile. *Agricultura Técnica* [en línea], vol. 62, no. 1. ISSN 0365-2807. DOI 10.4067/S0365-28072002000100015. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0365-](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0365-)

28072002000100015&lng=en&nrm=iso&tlng=en.

SOTO, J., 2016. *Estimación objetiva de la dispersividad en suelos arcillosos en el ensayo de Pinhole basada en una carya de colores y valores cuantitativos de turbidez*. S.l.: Universidad Católica de Colombia.

VILLEGAS, M., AGUILERA, N. y FLORES, L., 1978. Método simplificado de análisis para la clasificación granulométrica de los minerales del suelo. *Dialnet*, vol. 2, no. 2, pp. 168-193.

## **ANEXOS**

Anexo A – Registros de laboratorio Hidrómetro 152 H.

Anexo B – Registros de 1 laboratorio dispositivo Pario (muestra 1)



# **ANEXO A**

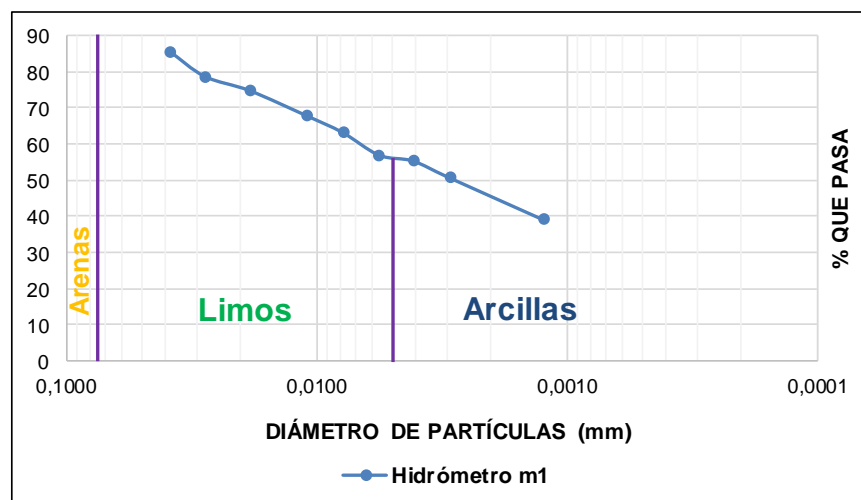
## ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA	CAOLIN AMARILLO1
HIDROMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOFATO DE SODIO
TAMAÑO MAXIMO	
CILINDRO	1000ml

RECIPIENTE #	12
PESO RECIPIENTE (g)	102,51
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	150,84
PESO SUELO SECO + SOLUCION	48,33
PESO SUELO SECO W0	43,33

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	23	46	8	0,9	9,9	37,1	8,80	0,01297	0,0385	85,62
2	23	43	8	0,9	9,9	34,1	9,20	0,01297	0,0278	78,70
5	22	41	8	0,6	9,6	32,4	9,60	0,01328	0,0184	74,77
15	22	38	8	0,6	9,6	29,4	10,10	0,01328	0,0109	67,85
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	63,24
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	57,00
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	55,39
240	20	30	8	0	9	22	11,40	0,01344	0,0029	50,77
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	39,23

Cm	1
Gs	2,63
ALFA	1,000
W0	43,33



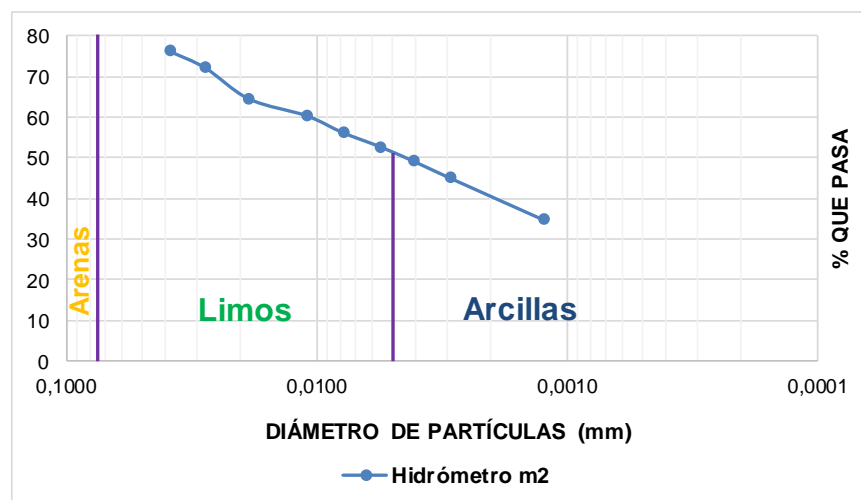
## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA	CAOLIN AMARILLO2
HIDROMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOFATO DE SODIO
TAMAÑO MÁXIMO	
CILINDRO	1000ml

RECIPIENTE #	121
PESO RECIPIENTE (g)	112,22
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	165,92
PESO SUELO SECO + SOLUCION	53,70
PESO SUELO SECO W0	48,70

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	cm		mm	%
0										100
1	23	46	8	0,9	9,9	37,1	8,80	0,01297	0,0385	76,18
2	23	44	8	0,9	9,9	35,1	9,10	0,01297	0,0277	72,07
5	22	40	8	0,6	9,6	31,4	9,70	0,01328	0,0185	64,48
15	22	38	8	0,6	9,6	29,4	10,10	0,01328	0,0109	60,37
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	56,26
60	21	34	8	0,3	9,3	25,7	10,70	0,01312	0,0055	52,77
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	49,28
240	20	30	8	0	9	22	11,40	0,01344	0,0029	45,17
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	34,91

Cm	1
Gs	2,63
ALFA	1,000
W0	48,7



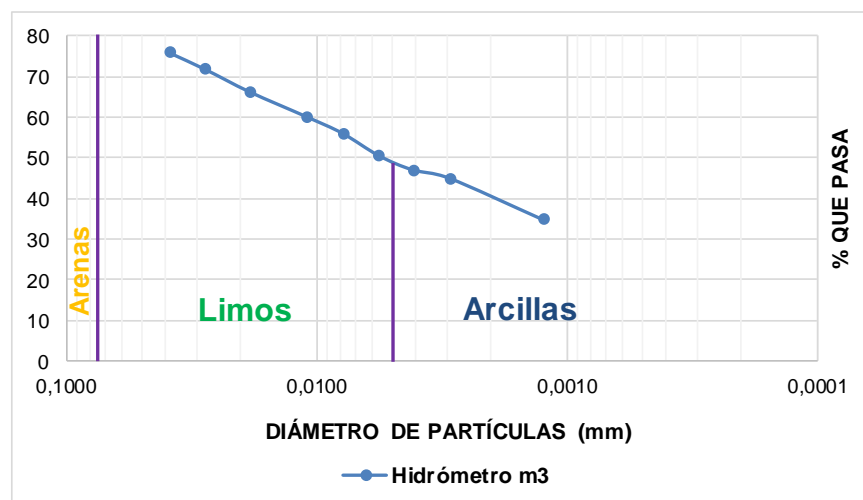
## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA	CAOLIN AMARILLO3
HIDROMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOFATO DE SODIO
TAMAÑO MÁXIMO	
CILINDRO	1000ml

RECIPIENTE #	2
PESO RECIPIENTE (g)	102,53
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	156,46
PESO SUELO SECO + SOLUCION	53,93
PESO SUELO SECO W0	48,93

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	cm		mm	%
0										100
1	23	46	8	0,9	9,9	37,1	8,80	0,01297	0,0385	75,82
2	23	44	8	0,9	9,9	35,1	9,10	0,01297	0,0277	71,74
5	22	41	8	0,6	9,6	32,4	9,60	0,01328	0,0184	66,22
15	22	38	8	0,6	9,6	29,4	10,10	0,01328	0,0109	60,09
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	56,00
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	50,48
120	20	31	8	0	9	23	11,20	0,01344	0,0041	47,01
240	20	30	8	0	9	22	11,40	0,01344	0,0029	44,96
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	34,74

Cm	1
Gs	2,63
ALFA	1,000
W0	48,93



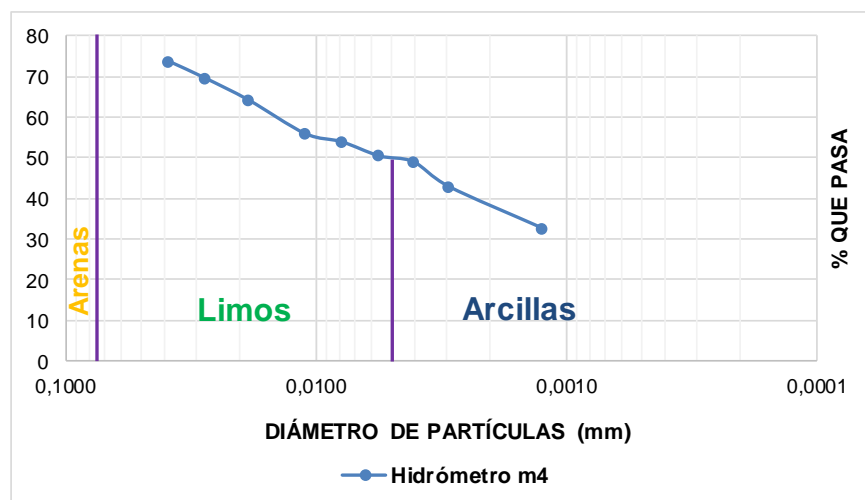
## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA	CAOLIN AMARILLO4
HIDROMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO
TAMAÑO MÁXIMO	
CILINDRO	1000ml

RECIPIENTE #	39
PESO RECIPIENTE (g)	119,90
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	173,97
PESO SUELO SECO + SOLUCION	54,07
PESO SUELO SECO W0	49,07

TIEMPO min	TEMP °C	R' g/L	T' g/L	Ct g/L	Cd g/L	R g/L	L cm	K	D mm	PASA %
0										100
1	23	45	8	0,9	9,9	36,1	8,90	0,01297	0,0387	73,57
2	23	43	8	0,9	9,9	34,1	9,20	0,01297	0,0278	69,49
5	22	40	8	0,6	9,6	31,4	9,70	0,01328	0,0185	63,99
15	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0111	55,84
30	22	35	8	0,6	9,6	26,4	10,60	0,01328	0,0079	53,80
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	50,34
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	48,91
240	20	29	8	0	9	21	11,50	0,01344	0,0029	42,80
1440	20	24	8	0	9	16	12,40	0,01344	0,0012	32,61

Cm	1
Gs	2,63
ALFA	1,000
W0	49,07



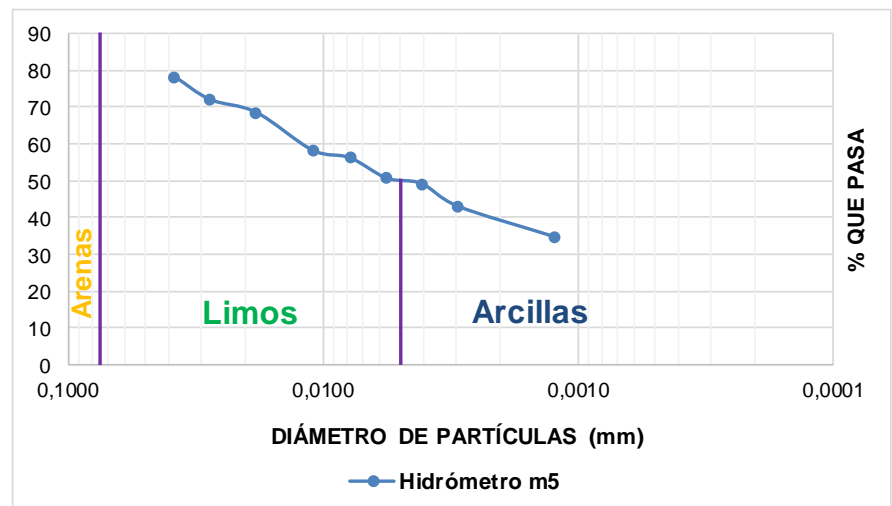
## ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE SUELOS POR HIDRÓMETRO NORMA I-N-V-E-123

MUESTRA	CAOLIN AMARILLO5
HIDROMETRO	152 H
DEFLOCULANTE	HEXAMETAFOSFATO DE SODIO
TAMAÑO MAXIMO	
CILINDRO	1000ml

RECIPIENTE #	14
PESO RECIPIENTE (g)	105,22
PESO RECIPIENTE + SUELO SECO	158,99
PESO SUELO SECO + SOLUCION	53,77
PESO SUELO SECO W0	48,77

TIEMPO	TEMP	R'	T'	Ct	Cd	R	L	K	D	PASA
min	°C	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	cm		mm	%
0										100
1	23	47	8	0,9	9,9	38,1	8,60	0,01297	0,0380	78,12
2	23	44	8	0,9	9,9	35,1	9,10	0,01297	0,0277	71,97
5	22	42	8	0,6	9,6	33,4	9,40	0,01328	0,0182	68,48
15	22	37	8	0,6	9,6	28,4	10,20	0,01328	0,0110	58,23
30	22	36	8	0,6	9,6	27,4	10,40	0,01328	0,0078	56,18
60	21	33	8	0,3	9,3	24,7	10,90	0,01312	0,0056	50,65
120	20	32	8	0	9	24	11,10	0,01344	0,0041	49,21
240	20	29	8	0	9	21	11,50	0,01344	0,0029	43,06
1440	20	25	8	0	9	17	12,20	0,01344	0,0012	34,86

Cm	1
Gs	2,63
ALFA	1,000
W0	48,77



# **ANEXO B**

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
0,01	-2,00E+00	0,00E+00	0,00001	0,0000	-8,52E-02	0,00E+00
0,0102476	-1,99E+00	4,18E-07	0,00001	0,00004	-8,52E-02	5,13E-06
0,0105014	-1,98E+00	1,68E-06	0,00001	0,0002	-8,52E-02	2,05E-05
0,0107614	-1,97E+00	3,79E-06	0,00001	0,0004	-8,52E-02	4,61E-05
0,0110279	-1,96E+00	6,75E-06	0,00001	0,0007	-8,52E-02	8,19E-05
0,011301	-1,95E+00	1,06E-05	0,00001	0,0011	-8,52E-02	1,28E-04
0,0115808	-1,94E+00	1,53E-05	0,00001	0,0015	-8,52E-02	1,84E-04
0,0118676	-1,93E+00	2,09E-05	0,00001	0,0021	-8,52E-02	2,50E-04
0,0121615	-1,92E+00	2,73E-05	0,00001	0,0027	-8,52E-02	3,26E-04
0,0124626	-1,90E+00	3,47E-05	0,00001	0,0035	-8,52E-02	4,12E-04
0,0127712	-1,89E+00	4,29E-05	0,00001	0,0043	-8,52E-02	5,08E-04
0,0130875	-1,88E+00	5,21E-05	0,00001	0,0052	-8,52E-02	6,15E-04
0,0134116	-1,87E+00	6,22E-05	0,00001	0,0062	-8,52E-02	7,31E-04
0,0137437	-1,86E+00	7,32E-05	0,00001	0,0073	-8,52E-02	8,57E-04
0,014084	-1,85E+00	8,51E-05	0,00001	0,0085	-8,52E-02	9,92E-04
0,0144328	-1,84E+00	9,79E-05	0,00001	0,0098	-8,52E-02	1,14E-03
0,0147902	-1,83E+00	1,12E-04	0,00001	0,0112	-8,52E-02	1,29E-03
0,0151564	-1,82E+00	1,26E-04	0,00002	0,0126	-8,52E-02	1,46E-03
0,0155317	-1,81E+00	1,42E-04	0,00002	0,0142	-8,52E-02	1,63E-03
0,0159163	-1,80E+00	1,59E-04	0,00002	0,0159	-8,52E-02	1,82E-03
0,0163105	-1,79E+00	1,77E-04	0,00002	0,0177	-8,52E-02	2,01E-03
0,0167143	-1,78E+00	1,95E-04	0,00002	0,0195	-8,52E-02	2,22E-03
0,0171282	-1,77E+00	2,15E-04	0,00002	0,0215	-8,52E-02	2,43E-03
0,0175524	-1,76E+00	2,35E-04	0,00002	0,0235	-8,52E-02	2,65E-03
0,017987	-1,75E+00	2,57E-04	0,00002	0,0257	-8,52E-02	2,88E-03
0,0184324	-1,73E+00	2,80E-04	0,00002	0,0280	-8,52E-02	3,13E-03
0,0188889	-1,72E+00	3,03E-04	0,00002	0,0303	-8,52E-02	3,38E-03
0,0193566	-1,71E+00	3,28E-04	0,00002	0,0328	-8,52E-02	3,64E-03
0,0198359	-1,70E+00	3,54E-04	0,00002	0,0354	-8,52E-02	3,91E-03
0,0203271	-1,69E+00	3,80E-04	0,00002	0,0380	-8,52E-02	4,19E-03
0,0208305	-1,68E+00	4,08E-04	0,00002	0,0408	-8,52E-02	4,48E-03
0,0213463	-1,67E+00	4,37E-04	0,00002	0,0437	-8,52E-02	4,78E-03
0,0218749	-1,66E+00	4,67E-04	0,00002	0,0467	-8,52E-02	5,08E-03
0,0224166	-1,65E+00	4,98E-04	0,00002	0,0498	-8,52E-02	5,40E-03
0,0229717	-1,64E+00	5,30E-04	0,00002	0,0530	-8,52E-02	5,73E-03
0,0235405	-1,63E+00	5,63E-04	0,00002	0,0563	-8,52E-02	6,06E-03
0,0241234	-1,62E+00	5,97E-04	0,00002	0,0597	-8,52E-02	6,40E-03
0,0247208	-1,61E+00	6,32E-04	0,00002	0,0632	-8,52E-02	6,76E-03
0,0253329	-1,60E+00	6,69E-04	0,00003	0,0669	-8,52E-02	7,12E-03
0,0259603	-1,59E+00	7,06E-04	0,00003	0,0706	-8,52E-02	7,49E-03
0,0266031	-1,58E+00	7,45E-04	0,00003	0,0745	-8,52E-02	7,87E-03
0,0272619	-1,56E+00	7,84E-04	0,00003	0,0784	-8,52E-02	8,26E-03
0,0279369	-1,55E+00	8,25E-04	0,00003	0,0825	-8,52E-02	8,66E-03
0,0286287	-1,54E+00	8,67E-04	0,00003	0,0867	-8,52E-02	9,07E-03



DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
0,0293377	-1,53E+00	9,10E-04	0,00003	0,0910	-8,52E-02	9,48E-03
0,0300641	-1,52E+00	9,55E-04	0,00003	0,0955	-8,52E-02	9,91E-03
0,0308086	-1,51E+00	1,00E-03	0,00003	0,1000	-8,52E-02	1,03E-02
0,0315715	-1,50E+00	1,05E-03	0,00003	0,1047	-8,52E-02	1,08E-02
0,0323533	-1,49E+00	1,09E-03	0,00003	0,1095	-8,52E-02	1,12E-02
0,0331545	-1,48E+00	1,14E-03	0,00003	0,1144	-8,52E-02	1,17E-02
0,0339755	-1,47E+00	1,19E-03	0,00003	0,1194	-8,52E-02	1,22E-02
0,0348168	-1,46E+00	1,25E-03	0,00003	0,1245	-8,52E-02	1,26E-02
0,0356789	-1,45E+00	1,30E-03	0,00004	0,1298	-8,52E-02	1,31E-02
0,0365624	-1,44E+00	1,35E-03	0,00004	0,1351	-8,52E-02	1,36E-02
0,0374678	-1,43E+00	1,41E-03	0,00004	0,1406	-8,52E-02	1,41E-02
0,0383956	-1,42E+00	1,46E-03	0,00004	0,1463	-8,52E-02	1,46E-02
0,0393464	-1,41E+00	1,52E-03	0,00004	0,1520	-8,52E-02	1,52E-02
0,0403207	-1,39E+00	1,58E-03	0,00004	0,1579	-8,52E-02	1,57E-02
0,0413192	-1,38E+00	1,64E-03	0,00004	0,1639	-8,52E-02	1,62E-02
0,0423424	-1,37E+00	1,70E-03	0,00004	0,1700	-8,52E-02	1,68E-02
0,0433909	-1,36E+00	1,76E-03	0,00004	0,1762	-8,52E-02	1,73E-02
0,0444653	-1,35E+00	1,83E-03	0,00004	0,1826	-8,52E-02	1,79E-02
0,0455664	-1,34E+00	1,89E-03	0,00005	0,1891	-8,52E-02	1,84E-02
0,0466948	-1,33E+00	1,96E-03	0,00005	0,1957	-8,52E-02	1,90E-02
0,0478511	-1,32E+00	2,02E-03	0,00005	0,2025	-8,52E-02	1,96E-02
0,049036	-1,31E+00	2,09E-03	0,00005	0,2094	-8,52E-02	2,02E-02
0,0502502	-1,30E+00	2,16E-03	0,0001	0,2164	-8,52E-02	2,08E-02
0,0514946	-1,29E+00	2,24E-03	0,0001	0,2236	-8,52E-02	2,14E-02
0,0527697	-1,28E+00	2,31E-03	0,0001	0,2308	-8,52E-02	2,20E-02
0,0540764	-1,27E+00	2,38E-03	0,0001	0,2382	-8,52E-02	2,27E-02
0,0554155	-1,26E+00	2,46E-03	0,0001	0,2458	-8,52E-02	2,33E-02
0,0567878	-1,25E+00	2,53E-03	0,0001	0,2535	-8,52E-02	2,39E-02
0,058194	-1,24E+00	2,61E-03	0,0001	0,2613	-8,52E-02	2,46E-02
0,059635	-1,22E+00	2,69E-03	0,0001	0,2692	-8,52E-02	2,53E-02
0,0611117	-1,21E+00	2,77E-03	0,0001	0,2773	-8,52E-02	2,59E-02
0,062625	-1,20E+00	2,86E-03	0,0001	0,2856	-8,52E-02	2,66E-02
0,0641758	-1,19E+00	2,94E-03	0,0001	0,2939	-8,52E-02	2,73E-02
0,065765	-1,18E+00	3,02E-03	0,0001	0,3024	-8,52E-02	2,80E-02
0,0673935	-1,17E+00	3,11E-03	0,0001	0,3111	-8,52E-02	2,87E-02
0,0690623	-1,16E+00	3,20E-03	0,0001	0,3198	-8,52E-02	2,94E-02
0,0707725	-1,15E+00	3,29E-03	0,0001	0,3288	-8,52E-02	3,01E-02
0,072525	-1,14E+00	3,38E-03	0,0001	0,3378	-8,52E-02	3,08E-02
0,0743209	-1,13E+00	3,47E-03	0,0001	0,3470	-8,52E-02	3,15E-02
0,0761613	-1,12E+00	3,56E-03	0,0001	0,3564	-8,52E-02	3,23E-02
0,0780473	-1,11E+00	3,66E-03	0,0001	0,3659	-8,52E-02	3,30E-02
0,0799799	-1,10E+00	3,75E-03	0,0001	0,3755	-8,52E-02	3,38E-02
0,0819605	-1,09E+00	3,85E-03	0,0001	0,3853	-8,52E-02	3,45E-02
0,08399	-1,08E+00	3,95E-03	0,0001	0,3952	-8,52E-02	3,53E-02
0,0860698	-1,07E+00	4,05E-03	0,0001	0,4053	-8,52E-02	3,61E-02
0,0882012	-1,05E+00	4,15E-03	0,0001	0,4155	-8,52E-02	3,68E-02

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
0,0903853	-1,04E+00	4,26E-03	0,0001	0,4259	-8,52E-02	3,76E-02
0,0926234	-1,03E+00	4,36E-03	0,0001	0,4364	-8,52E-02	3,84E-02
0,094917	-1,02E+00	4,47E-03	0,0001	0,4470	-8,52E-02	3,92E-02
0,0972674	-1,01E+00	4,58E-03	0,0001	0,4578	-8,52E-02	4,00E-02
0,099676	-1,00E+00	4,69E-03	0,0001	0,4688	-8,52E-02	4,09E-02
0,102144	-9,91E-01	4,80E-03	0,0001	0,4799	-8,52E-02	4,17E-02
0,104674	-9,80E-01	4,91E-03	0,0001	0,4912	-8,52E-02	4,25E-02
0,107266	-9,70E-01	5,03E-03	0,0001	0,5026	-8,52E-02	4,34E-02
0,109922	-9,59E-01	5,14E-03	0,0001	0,5142	-8,52E-02	4,42E-02
0,112644	-9,48E-01	5,26E-03	0,0001	0,5259	-8,52E-02	4,51E-02
0,115433	-0,937669	0,00537808	0,0001	0,5378	-0,0851584	0,0459145
0,118292	-0,927046	0,00549849	0,0001	0,5498	-0,0851584	0,0467815
0,121221	-0,916423	0,00562046	0,0001	0,5620	-0,0851584	0,0476555
0,124223	-0,905799	0,005744	0,0001	0,5744	-0,0851584	0,0485363
0,127299	-0,895176	0,00586912	0,0001	0,5869	-0,0851584	0,0494241
0,130451	-0,884553	0,00599583	0,0001	0,5996	-0,0851584	0,0503187
0,133681	-0,87393	0,00612413	0,0001	0,6124	-0,0851584	0,0512202
0,136992	-0,863306	0,00625404	0,0001	0,6254	-0,0851584	0,0521285
0,140384	-0,852683	0,00638555	0,0001	0,6386	-0,0851584	0,0530435
0,14386	-0,84206	0,00651868	0,0001	0,6519	-0,0851584	0,0539652
0,147422	-0,831436	0,00665344	0,0001	0,6653	-0,0851584	0,0548937
0,151073	-0,820813	0,00678982	0,0002	0,6790	-0,0851584	0,0558288
0,154814	-0,81019	0,00692784	0,0002	0,6928	-0,0851584	0,0567705
0,158648	-0,799566	0,00706751	0,0002	0,7068	-0,0851584	0,0577188
0,162576	-0,788943	0,00720883	0,0002	0,7209	-0,0851584	0,0586737
0,166602	-0,77832	0,00735181	0,0002	0,7352	-0,0851584	0,0596352
0,170728	-0,767696	0,00749645	0,0002	0,7496	-0,0851584	0,0606031
0,174955	-0,757073	0,00764277	0,0002	0,7643	-0,0851584	0,0615775
0,179288	-0,74645	0,00779077	0,0002	0,7791	-0,0851584	0,0625583
0,183727	-0,735827	0,00794046	0,0002	0,7940	-0,0851584	0,0635455
0,188277	-0,725203	0,00809184	0,0002	0,8092	-0,0851584	0,0645391
0,192939	-0,71458	0,00824493	0,0002	0,8245	-0,0851584	0,065539
0,197717	-0,703957	0,00839972	0,0002	0,8400	-0,0851584	0,0665452
0,202613	-0,693333	0,00855624	0,0002	0,8556	-0,0851584	0,0675577
0,20763	-0,68271	0,00871448	0,0002	0,8714	-0,0851584	0,0685765
0,212771	-0,672087	0,00887445	0,0002	0,8874	-0,0851584	0,0696014
0,21804	-0,661463	0,00903616	0,0002	0,9036	-0,0851584	0,0706325
0,223439	-0,65084	0,00919961	0,0002	0,9200	-0,0851584	0,0716697
0,228972	-0,640217	0,00936482	0,0002	0,9365	-0,0851584	0,0727131
0,234642	-0,629593	0,00953179	0,0002	0,9532	-0,0851584	0,0737625
0,240453	-0,61897	0,00970053	0,0002	0,9701	-0,0851584	0,0748179
0,246407	-0,608347	0,00987105	0,0002	0,9871	-0,0851584	0,0758794
0,252509	-0,597724	0,0100433	0,0003	1,0043	-0,0851584	0,0769468
0,258762	-0,5871	0,0102174	0,0003	1,0217	-0,0851584	0,0780202
0,265169	-0,576477	0,0103933	0,0003	1,0393	-0,0851584	0,0790995
0,271735	-0,565854	0,010571	0,0003	1,0571	-0,0851584	0,0801846

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
0,278464	-0,55523	0,0107505	0,0003	1,0751	-0,0851584	0,0812756
0,28536	-0,544607	0,0109318	0,0003	1,0932	-0,0851584	0,0823724
0,292426	-0,533984	0,0111115	0,0003	1,1115	-0,0851584	0,083475
0,299667	-0,52336	0,0112999	0,0003	1,1300	-0,0851584	0,0845833
0,307088	-0,512737	0,0114867	0,0003	1,1487	-0,0851584	0,0856973
0,314692	-0,502114	0,0116754	0,0003	1,1675	-0,0851584	0,086817
0,322485	-0,49149	0,0118659	0,0003	1,1866	-0,0851584	0,0879424
0,330471	-0,480867	0,0120583	0,0003	1,2058	-0,0851584	0,0890733
0,338654	-0,470244	0,0122526	0,0003	1,2253	-0,0851584	0,0902099
0,34704	-0,459621	0,0124487	0,0003	1,2449	-0,0851584	0,091352
0,355634	-0,448997	0,0126467	0,0004	1,2647	-0,0851584	0,0924996
0,36444	-0,438374	0,0128466	0,0004	1,2847	-0,0851584	0,0936526
0,373465	-0,427751	0,0130484	0,0004	1,3048	-0,0851584	0,0948111
0,382713	-0,417127	0,0132521	0,0004	1,3252	-0,0851584	0,0959751
0,39219	-0,406504	0,0134577	0,0004	1,3458	-0,0851584	0,0971444
0,401901	-0,395881	0,0136653	0,0004	1,3665	-0,0851584	0,0983191
0,411853	-0,385257	0,0138747	0,0004	1,3875	-0,0851584	0,099499
0,422052	-0,374634	0,0140861	0,0004	1,4086	-0,0851584	0,100684
0,432503	-0,364011	0,0142995	0,0004	1,4300	-0,0851584	0,101875
0,443213	-0,353387	0,0145148	0,0004	1,4515	-0,0851584	0,103071
0,454188	-0,342764	0,014732	0,0005	1,4732	-0,0851584	0,104271
0,465435	-0,332141	0,0149512	0,0005	1,4951	-0,0851584	0,105477
0,476961	-0,321518	0,0151724	0,0005	1,5172	-0,0851584	0,106689
0,488771	-0,310894	0,0153956	0,0005	1,5396	-0,0851584	0,107905
0,500875	-0,300271	0,0156207	0,0005	1,5621	-0,0851584	0,109126
0,513278	-0,289648	0,0158478	0,0005	1,5848	-0,0851584	0,110353
0,525988	-0,279024	0,016077	0,0005	1,6077	-0,0851584	0,111584
0,539013	-0,268401	0,0163081	0,0005	1,6308	-0,0851584	0,11282
0,55236	-0,257778	0,0165413	0,0006	1,6541	-0,0851584	0,114061
0,566038	-0,247154	0,0167765	0,0006	1,6777	-0,0851584	0,115307
0,580055	-0,236531	0,0170137	0,0006	1,7014	-0,0851584	0,116558
0,594418	-0,225908	0,0172529	0,0006	1,7253	-0,0851584	0,117814
0,609138	-0,215285	0,0174942	0,0006	1,7494	-0,0851584	0,119075
0,624222	-0,204661	0,0177375	0,0006	1,7738	-0,0851584	0,12034
0,639679	-0,194038	0,0180172	0,0006	1,8017	-0,0851205	0,121628
0,655519	-0,183415	0,0184609	0,0007	1,8461	-0,0849039	0,123005
0,671752	-0,172791	0,0190764	0,0007	1,9076	-0,0845	0,124476
0,688386	-0,162168	0,0198588	0,0007	1,9859	-0,0839141	0,126038
0,705432	-0,151545	0,0208031	0,0007	2,0803	-0,0831517	0,12769
0,722901	-0,140921	0,0219045	0,0007	2,1905	-0,0822181	0,129428
0,740802	-0,130298	0,0231582	0,0007	2,3158	-0,0811188	0,13125
0,759146	-0,119675	0,0245592	0,0008	2,4559	-0,0798592	0,133155
0,777944	-0,109051	0,0261026	0,0008	2,6103	-0,0784446	0,135139
0,797208	-0,0984281	0,0277835	0,0008	2,7784	-0,0768804	0,137202
0,816949	-0,0878048	0,0295971	0,0008	2,9597	-0,0751721	0,139339
0,837179	-0,0771815	0,0315385	0,0008	3,1539	-0,073325	0,14155

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
0,85791	-0,0665582	0,0336028	0,0009	3,3603	-0,0713445	0,143831
0,879154	-0,0559349	0,035785	0,0009	3,5785	-0,0692361	0,146181
0,900924	-0,0453116	0,0380804	0,0009	3,8080	-0,067005	0,148597
0,923234	-0,0346883	0,040484	0,0009	4,0484	-0,0646568	0,151077
0,946096	-0,024065	0,0429909	0,0009	4,2991	-0,0621967	0,153619
0,969523	-0,0134417	0,0455963	0,0010	4,5596	-0,0596302	0,156219
0,993531	-0,00281839	0,0482952	0,0010	4,8295	-0,0569628	0,158877
1,01813	0,00780492	0,0510827	0,0010	5,1083	-0,0541997	0,16159
1,04335	0,0184282	0,0539541	0,0010	5,3954	-0,0513464	0,164355
1,06918	0,0290515	0,0569043	0,0011	5,6904	-0,0484082	0,16717
1,09566	0,0396748	0,0599286	0,0011	5,9929	-0,0453906	0,170034
1,12279	0,0502981	0,0630219	0,0011	6,3022	-0,042299	0,172942
1,15059	0,0609215	0,0661795	0,0012	6,6180	-0,0391387	0,175894
1,17908	0,0715448	0,0693964	0,0012	6,9396	-0,0359152	0,178888
1,20828	0,0821681	0,0726678	0,0012	7,2668	-0,0326338	0,181919
1,2382	0,0927914	0,0759887	0,0012	7,5989	-0,0292999	0,184988
1,26886	0,103415	0,0793543	0,0013	7,9354	-0,025919	0,18809
1,30028	0,114038	0,0827597	0,0013	8,2760	-0,0224964	0,191225
1,33248	0,124661	0,0861999	0,0013	8,6200	-0,0190375	0,194389
1,36548	0,135285	0,0896702	0,0014	8,9670	-0,0155477	0,19758
1,39929	0,145908	0,0931656	0,0014	9,3166	-0,0120324	0,200796
1,43394	0,156531	0,0966812	0,0014	9,6681	-0,00849706	0,204035
1,46945	0,167155	0,100212	0,0015	10,0212	-0,00494698	0,207295
1,50584	0,177778	0,103754	0,0015	10,3754	-0,00138759	0,210572
1,54313	0,188401	0,107301	0,0015	10,7301	0,00217572	0,213866
1,58134	0,199024	0,110848	0,0016	11,0848	0,00573755	0,217173
1,6205	0,209648	0,114392	0,0016	11,4392	0,00929252	0,220491
1,66062	0,220271	0,117926	0,0017	11,7926	0,0128352	0,223819
1,70174	0,230894	0,121446	0,0017	12,1446	0,0163603	0,227153
1,74388	0,241518	0,124948	0,0017	12,4948	0,0198622	0,230492
1,78707	0,252141	0,128426	0,0018	12,8426	0,0233358	0,233832
1,83132	0,262764	0,131875	0,0018	13,1875	0,0267755	0,237173
1,87667	0,273388	0,13529	0,0019	13,5290	0,0301759	0,240511
1,92314	0,284011	0,138667	0,0019	13,8667	0,0335318	0,243845
1,97076	0,294634	0,142001	0,00197	14,2001	0,0368376	0,247171
2,01956	0,305258	0,145301	0,00202	14,5301	0,0401032	0,250499
2,06957	0,315881	0,148695	0,0021	14,8695	0,0434646	0,253925
2,12082	0,326504	0,152207	0,0021	15,2207	0,046948	0,257466
2,17334	0,337127	0,155829	0,0022	15,5829	0,0505446	0,261113
2,22716	0,347751	0,159552	0,0022	15,9552	0,0542454	0,264858
2,28231	0,358374	0,163368	0,0023	16,3368	0,0580415	0,268692
2,33882	0,368997	0,167267	0,0023	16,7267	0,0619242	0,272608
2,39674	0,379621	0,171241	0,0024	17,1241	0,0658845	0,276597
2,45609	0,390244	0,175283	0,0025	17,5283	0,0699135	0,28065
2,51691	0,400867	0,179382	0,0025	17,9382	0,0740023	0,28476
2,57923	0,411491	0,18353	0,0026	18,3530	0,0781422	0,288917

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
2,6431	0,422114	0,187719	0,0026	18,7719	0,0823241	0,293114
2,70855	0,432737	0,191941	0,0027	19,1941	0,0865393	0,297341
2,77562	0,44336	0,196186	0,0028	19,6186	0,0907788	0,301592
2,84435	0,453984	0,200445	0,0028	20,0445	0,0950338	0,305856
2,91479	0,464607	0,204711	0,0029	20,4711	0,0992954	0,310127
2,98697	0,47523	0,208975	0,0030	20,8975	0,103555	0,314395
3,06093	0,485854	0,213228	0,0031	21,3228	0,107803	0,318652
3,13673	0,496477	0,217461	0,0031	21,7461	0,112031	0,32289
3,2144	0,5071	0,221665	0,0032	22,1665	0,11623	0,327101
3,294	0,517724	0,225833	0,0033	22,5833	0,120391	0,331275
3,37557	0,528347	0,229956	0,0034	22,9956	0,124506	0,335406
3,45916	0,53897	0,234024	0,0035	23,4024	0,128565	0,339483
3,54481	0,549594	0,23803	0,0035	23,8030	0,132559	0,3435
3,63259	0,560217	0,241975	0,0036	24,1975	0,136492	0,347459
3,72255	0,57084	0,245974	0,0037	24,5974	0,140476	0,351473
3,81473	0,581463	0,250047	0,0038	25,0047	0,144531	0,355564
3,90919	0,592087	0,254182	0,0039	25,4182	0,148646	0,359717
4,00599	0,60271	0,258364	0,0040	25,8364	0,152807	0,36392
4,10519	0,613333	0,262581	0,0041	26,2581	0,157002	0,368159
4,20685	0,623957	0,266819	0,0042	26,6819	0,161218	0,372421
4,31102	0,63458	0,271067	0,0043	27,1067	0,165443	0,376692
4,41777	0,645203	0,27531	0,0044	27,5310	0,169662	0,380959
4,52717	0,655827	0,279536	0,0045	27,9536	0,173865	0,385208
4,63927	0,66645	0,283732	0,0046	28,3732	0,178038	0,389427
4,75415	0,677073	0,287884	0,0048	28,7884	0,182168	0,393601
4,87188	0,687697	0,29198	0,0049	29,1980	0,186243	0,397718
4,99252	0,69832	0,296006	0,0050	29,6006	0,19025	0,401763
5,11615	0,708943	0,29995	0,0051	29,9950	0,194176	0,405724
5,24284	0,719566	0,303798	0,0052	30,3798	0,198008	0,409588
5,37266	0,73019	0,307537	0,0054	30,7537	0,201735	0,41334
5,50571	0,740813	0,311154	0,0055	31,1154	0,205342	0,416967
5,64204	0,751436	0,314637	0,0056	31,4637	0,208817	0,420457
5,78175	0,76206	0,317971	0,0058	31,7971	0,212149	0,423795
5,92493	0,772683	0,321145	0,0059	32,1145	0,215323	0,426968
6,07164	0,783306	0,324145	0,0061	32,4145	0,218327	0,429963
6,22199	0,79393	0,326957	0,0062	32,6957	0,221148	0,432766
6,37607	0,804553	0,329574	0,0064	32,9574	0,223779	0,43537
6,53396	0,815176	0,332021	0,0065	33,2021	0,226241	0,4378
6,69575	0,8258	0,334315	0,0067	33,4315	0,228553	0,440077
6,86156	0,836423	0,336474	0,0069	33,6474	0,230731	0,442216
7,03147	0,847046	0,338511	0,0070	33,8511	0,232788	0,444233
7,20559	0,857669	0,340441	0,0072	34,0441	0,234741	0,446142
7,38402	0,868293	0,342281	0,0074	34,2281	0,236603	0,447959
7,56687	0,878916	0,344045	0,0076	34,4045	0,238391	0,449699
7,75424	0,889539	0,345748	0,0078	34,5748	0,240118	0,451378
7,94626	0,900163	0,347406	0,0079	34,7406	0,241801	0,453011

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
8,14303	0,910786	0,349033	0,0081	34,9033	0,243453	0,454614
8,34467	0,921409	0,350645	0,0083	35,0645	0,24509	0,456202
8,55131	0,932033	0,352257	0,0086	35,2257	0,246726	0,45779
8,76306	0,942656	0,353885	0,0088	35,3885	0,248378	0,459393
8,98006	0,953279	0,355542	0,0090	35,5542	0,250059	0,461027
9,20243	0,963903	0,357246	0,0092	35,7246	0,251785	0,462708
9,43031	0,974526	0,359009	0,0094	35,9009	0,253571	0,46445
9,66383	0,985149	0,360849	0,0097	36,0849	0,255431	0,46627
9,90313	0,995772	0,36278	0,0099	36,2780	0,257381	0,468182
10,1484	1,0064	0,364817	0,0101	36,4817	0,259435	0,470201
10,3997	1,01702	0,366976	0,0104	36,6976	0,261609	0,472344
10,6572	1,02764	0,369271	0,0107	36,9271	0,263918	0,474625
10,9211	1,03827	0,371718	0,0109	37,1718	0,266376	0,477061
11,1915	1,04889	0,374331	0,0112	37,4331	0,268998	0,479665
11,4686	1,05951	0,377156	0,0115	37,7156	0,271825	0,482487
11,7526	1,07014	0,380307	0,0118	38,0307	0,274956	0,485658
12,0437	1,08076	0,383773	0,0120	38,3773	0,278381	0,489165
12,3419	1,09138	0,387529	0,0123	38,7529	0,282077	0,492982
12,6475	1,10201	0,39155	0,0126	39,1550	0,286022	0,49708
12,9607	1,11263	0,395811	0,0130	39,5811	0,290192	0,501434
13,2817	1,12325	0,400287	0,0133	40,0287	0,294567	0,506014
13,6105	1,13388	0,404954	0,0136	40,4954	0,299122	0,510795
13,9476	1,1445	0,409787	0,0139	40,9787	0,303836	0,515749
14,293	1,15512	0,41476	0,0143	41,4760	0,308686	0,520848
14,6469	1,16575	0,41985	0,0146	41,9850	0,31365	0,526066
15,0096	1,17637	0,425031	0,0150	42,5031	0,318705	0,531375
15,3813	1,18699	0,430278	0,0154	43,0278	0,323828	0,536748
15,7621	1,19762	0,435567	0,0158	43,5567	0,328997	0,542157
16,1525	1,20824	0,440872	0,0162	44,0872	0,33419	0,547576
16,5524	1,21886	0,44617	0,0166	44,6170	0,339384	0,552978
16,9623	1,22949	0,451434	0,0170	45,1434	0,344557	0,558334
17,3823	1,24011	0,456641	0,0174	45,6641	0,349685	0,563617
17,8128	1,25073	0,461764	0,0178	46,1764	0,354748	0,568801
18,2539	1,26136	0,466781	0,0183	46,6781	0,359721	0,573858
18,7059	1,27198	0,471665	0,0187	47,1665	0,364582	0,578761
19,1691	1,2826	0,476392	0,0192	47,6392	0,36931	0,583483
19,6438	1,29323	0,480936	0,0196	48,0936	0,373881	0,587996
20,1302	1,30385	0,485276	0,0201	48,5276	0,378275	0,592276
20,6287	1,31447	0,489438	0,0206	48,9438	0,382505	0,596363
21,1395	1,32509	0,49345	0,0211	49,3450	0,386595	0,600292
21,663	1,33572	0,497332	0,0217	49,7332	0,390564	0,604083
22,1994	1,34634	0,501101	0,0222	50,1101	0,39443	0,607752
22,7491	1,35696	0,504775	0,0227	50,4775	0,398211	0,611318
23,3125	1,36759	0,508373	0,0233	50,8373	0,401924	0,6148
23,8897	1,37821	0,511913	0,0239	51,1913	0,405588	0,618216
24,4813	1,38883	0,515413	0,0245	51,5413	0,40922	0,621583

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
25,0875	1,39946	0,518891	0,0251	51,8891	0,412839	0,624921
25,7088	1,41008	0,522365	0,0257	52,2365	0,416462	0,628246
26,3454	1,4207	0,525853	0,0263	52,5853	0,420108	0,631579
26,9978	1,43133	0,529374	0,0270	52,9374	0,423794	0,634935
27,6663	1,44195	0,532945	0,0277	53,2945	0,427539	0,638335
28,3514	1,45257	0,536585	0,0284	53,6585	0,43136	0,641796
29,0535	1,4632	0,540312	0,0291	54,0312	0,435275	0,645336
29,7729	1,47382	0,544143	0,0298	54,4143	0,439303	0,648974
30,5102	1,48444	0,548098	0,0305	54,8098	0,443462	0,652728
31,2657	1,49507	0,552194	0,0313	55,2194	0,447769	0,656615
32,0399	1,50569	0,55645	0,0320	55,6450	0,452242	0,660655
32,8333	1,51631	0,560883	0,0328	56,0883	0,456899	0,664865
33,6463	1,52694	0,565511	0,0336	56,5511	0,461759	0,669264
34,4795	1,53756	0,570354	0,0345	57,0354	0,466838	0,673869
35,3333	1,54818	0,575428	0,0353	57,5428	0,472157	0,6787
36,2083	1,55881	0,580759	0,0362	58,0759	0,477749	0,683775
37,1049	1,56943	0,586525	0,0371	58,6525	0,484051	0,689136
38,0237	1,58005	0,59277	0,0380	59,2770	0,491177	0,69479
38,9653	1,59068	0,599459	0,0390	59,9459	0,499041	0,700728
39,9301	1,6013	0,606558	0,0399	60,6558	0,507559	0,706942
40,9189	1,61192	0,614032	0,0409	61,4032	0,516645	0,713423
41,9322	1,62255	0,621847	0,0419	62,1847	0,526213	0,720163
42,9705	1,63317	0,629967	0,0430	62,9967	0,536177	0,727152
44,0346	1,64379	0,638359	0,0440	63,8359	0,546453	0,734382
45,125	1,65442	0,646987	0,0451	64,6987	0,556955	0,741844
46,2424	1,66504	0,655817	0,0462	65,5817	0,567598	0,74953
47,3875	1,67566	0,664815	0,0474	66,4815	0,578295	0,757431
48,561	1,68629	0,673946	0,0486	67,3946	0,588962	0,765537
49,7635	1,69691	0,683175	0,0498	68,3175	0,599513	0,773842
50,9957	1,70753	0,692467	0,0510	69,2467	0,609863	0,782335
52,2585	1,71816	0,701788	0,0523	70,1788	0,619925	0,791009
53,5526	1,72878	0,711104	0,0536	71,1104	0,629616	0,799854
54,8787	1,7394	0,720379	0,0549	72,0379	0,638848	0,808862
56,2377	1,75003	0,729579	0,0562	72,9579	0,647537	0,818024
57,6302	1,76065	0,73867	0,0576	73,8670	0,655598	0,827332
59,0573	1,77127	0,747616	0,0591	74,7616	0,662944	0,836776
60,5197	1,7819	0,756384	0,0605	75,6384	0,669491	0,846349
62,0184	1,79252	0,764938	0,0620	76,4938	0,675152	0,856041
63,5541	1,80314	0,773298	0,0636	77,3298	0,679886	0,86593
65,1279	1,81377	0,782035	0,0651	78,2035	0,684134	0,876954
66,7406	1,82439	0,791261	0,0667	79,1261	0,688053	0,889267
68,3933	1,83501	0,800914	0,0684	80,0914	0,691671	0,902742
70,0869	1,84564	0,810933	0,0701	81,0933	0,695016	0,917247
71,8225	1,85626	0,821256	0,0718	82,1256	0,698114	0,932653
73,601	1,86688	0,83182	0,0736	83,1820	0,700993	0,948831
75,4235	1,87751	0,842563	0,0754	84,2563	0,70368	0,96565

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
77,2912	1,88813	0,853424	0,0773	85,3424	0,706202	0,982981
79,2052	1,89875	0,86434	0,0792	86,4340	0,708587	1
81,1665	1,90938	0,875249	0,0812	87,5249	0,710861	1
83,1764	1,92	0,88609	0,0832	88,6090	0,713052	1
85,2361	1,93062	0,8968	0,0852	89,6800	0,715188	1
87,3467	1,94125	0,907317	0,0873	90,7317	0,717295	1
89,5097	1,95187	0,91758	0,0895	91,7580	0,7194	1
91,7262	1,96249	0,927525	0,0917	92,7525	0,721531	1
93,9976	1,97312	0,937092	0,0940	93,7092	0,723716	1
96,3252	1,98374	0,946218	0,0963	94,6218	0,725981	1
98,7105	1,99436	0,954841	0,0987	95,4841	0,728353	1
101,155	2,00499	0,962899	0,1012	96,2899	0,73086	1
103,66	2,01561	0,970331	0,1037	97,0331	0,73353	1
106,227	2,02623	0,977073	0,1062	97,7073	0,736388	1
108,857	2,03686	0,983064	0,1089	98,3064	0,739463	1
111,553	2,04748	0,988242	0,1116	98,8242	0,742782	1
114,315	2,0581	0,992546	0,1143	99,2546	0,746372	1
117,146	2,06873	0,995912	0,1171	99,5912	0,75026	1
120,047	2,07935	0,998279	0,1200	99,8279	0,754474	1
123,019	2,08997	0,999585	0,1230	99,9585	0,75904	1
126,066	2,1006	0,999838	0,1261	99,9838	0,764128	1
129,187	2,11122	0,999846	0,1292	99,9846	0,771369	1
132,386	2,12184	0,999853	0,1324	99,9853	0,78097	1
135,664	2,13247	0,99986	0,1357	99,9860	0,792615	1
139,024	2,14309	0,999867	0,1390	99,9867	0,805986	1
142,467	2,15371	0,999873	0,1425	99,9873	0,820767	1
145,994	2,16434	0,999878	0,1460	99,9878	0,836638	1
149,61	2,17496	0,999884	0,1496	99,9884	0,853284	1
153,314	2,18558	0,999889	0,1533	99,9889	0,870387	1
157,111	2,19621	0,999893	0,1571	99,9893	0,887629	1
161,001	2,20683	0,999897	0,1610	99,9897	0,904693	1
164,988	2,21745	0,999901	0,1650	99,9901	0,921262	1
169,074	2,22808	0,999904	0,1691	99,9904	0,937018	1
173,26	2,2387	0,999907	0,1733	99,9907	0,951645	1
177,551	2,24932	0,99991	0,1776	99,9910	0,964824	1
181,947	2,25995	0,999912	0,1819	99,9912	0,976238	1
186,453	2,27057	0,999914	0,1865	99,9914	0,98557	1
191,07	2,28119	0,999916	0,1911	99,9916	0,992503	1
195,801	2,29182	0,999917	0,1958	99,9917	0,996719	1
200,65	2,30244	0,999918	0,2007	99,9918	0,99793	1
205,619	2,31306	0,999918	0,2056	99,9918	0,997931	1
210,71	2,32369	0,999919	0,2107	99,9919	0,997932	1
215,928	2,33431	0,99992	0,2159	99,9920	0,997932	1
221,275	2,34493	0,99992	0,2213	99,9920	0,997933	1
226,754	2,35556	0,999921	0,2268	99,9921	0,997934	1
232,369	2,36618	0,999921	0,2324	99,9921	0,997934	1



DP[µm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
238,124	2,3768	0,999922	0,2381	99,9922	0,997935	1
244,02	2,38743	0,999922	0,2440	99,9922	0,997935	1
250,063	2,39805	0,999923	0,2501	99,9923	0,997935	1
256,255	2,40867	0,999923	0,2563	99,9923	0,997936	1
262,6	2,4193	0,999923	0,2626	99,9923	0,997936	1
269,103	2,42992	0,999924	0,2691	99,9924	0,997937	1
275,767	2,44054	0,999924	0,2758	99,9924	0,997937	1
282,596	2,45117	0,999924	0,2826	99,9924	0,997937	1
289,593	2,46179	0,999925	0,2896	99,9925	0,997937	1
296,765	2,47241	0,999925	0,2968	99,9925	0,997938	1
304,113	2,48304	0,999925	0,3041	99,9925	0,997938	1
311,644	2,49366	0,999925	0,3116	99,9925	0,997938	1
319,361	2,50428	0,999926	0,3194	99,9926	0,997938	1
327,269	2,51491	0,999926	0,3273	99,9926	0,997938	1
335,373	2,52553	0,999926	0,3354	99,9926	0,997938	1
343,678	2,53615	0,999926	0,3437	99,9926	0,997939	1
352,188	2,54678	0,999927	0,3522	99,9927	0,997939	1
360,91	2,5574	0,999927	0,3609	99,9927	0,997939	1
369,847	2,56802	0,999927	0,3698	99,9927	0,997939	1
379,005	2,57865	0,999927	0,3790	99,9927	0,997939	1
388,39	2,58927	0,999927	0,3884	99,9927	0,997939	1
398,008	2,59989	0,999928	0,3980	99,9928	0,99794	1
407,864	2,61052	0,999928	0,4079	99,9928	0,99794	1
417,963	2,62114	0,999928	0,4180	99,9928	0,99794	1
428,313	2,63176	0,999928	0,4283	99,9928	0,99794	1
438,92	2,64238	0,999928	0,4389	99,9928	0,99794	1
449,788	2,65301	0,999929	0,4498	99,9929	0,99794	1
460,926	2,66363	0,999929	0,4609	99,9929	0,997941	1
472,34	2,67425	0,999929	0,4723	99,9929	0,997941	1
484,037	2,68488	0,999929	0,4840	99,9929	0,997941	1
496,023	2,6955	0,99993	0,4960	99,9930	0,997941	1
508,305	2,70612	0,99993	0,5083	99,9930	0,997942	1
520,892	2,71675	0,99993	0,5209	99,9930	0,997942	1
533,791	2,72737	0,999931	0,5338	99,9931	0,997943	1
547,009	2,73799	0,999931	0,5470	99,9931	0,997943	1
560,555	2,74862	0,999931	0,5606	99,9931	0,997943	1
574,436	2,75924	0,999932	0,5744	99,9932	0,997944	1
588,66	2,76986	0,999932	0,5887	99,9932	0,997944	1
603,237	2,78049	0,999933	0,6032	99,9933	0,997945	1
618,175	2,79111	0,999933	0,6182	99,9933	0,997946	1
633,482	2,80173	0,999934	0,6335	99,9934	0,997946	1
649,169	2,81236	0,999934	0,6492	99,9934	0,997949	1
665,244	2,82298	0,999935	0,6652	99,9935	0,997954	1
681,717	2,8336	0,999936	0,6817	99,9936	0,997962	1
698,599	2,84423	0,999936	0,6986	99,9936	0,997972	1
715,898	2,85485	0,999937	0,7159	99,9937	0,997985	1

DP[μm]	LOG10(DP)	MAX-LIKELI	DP (mm)	MAX-LIKELI (X 100)	P2.5	P97.5
733,625	2,86547	0,999938	0,7336	99,9938	0,998001	1
751,792	2,8761	0,999939	0,7518	99,9939	0,998018	1
770,408	2,88672	0,99994	0,7704	99,9940	0,998038	1
789,486	2,89734	0,999941	0,7895	99,9941	0,99806	1
809,036	2,90797	0,999942	0,8090	99,9942	0,998085	1
829,069	2,91859	0,999943	0,8291	99,9943	0,998111	1
849,599	2,92921	0,999944	0,8496	99,9944	0,99814	1
870,638	2,93984	0,999945	0,8706	99,9945	0,99817	1
892,197	2,95046	0,999946	0,8922	99,9946	0,998203	1
914,29	2,96108	0,999947	0,9143	99,9947	0,998237	1
936,931	2,97171	0,999948	0,9369	99,9948	0,998273	1
960,132	2,98233	0,99995	0,9601	99,9950	0,998311	1
983,907	2,99295	0,999951	0,9839	99,9951	0,998351	1
1008,27	3,00358	0,999952	1,0083	99,9952	0,998392	1
1033,24	3,0142	0,999954	1,0332	99,9954	0,998435	1
1058,82	3,02482	0,999955	1,0588	99,9955	0,99848	1
1085,04	3,03545	0,999957	1,0850	99,9957	0,998526	1
1111,91	3,04607	0,999958	1,1119	99,9958	0,998574	1
1139,45	3,05669	0,99996	1,1395	99,9960	0,998623	1
1167,66	3,06732	0,999961	1,1677	99,9961	0,998673	1
1196,58	3,07794	0,999963	1,1966	99,9963	0,998724	1
1226,21	3,08856	0,999964	1,2262	99,9964	0,998777	1
1256,57	3,09919	0,999966	1,2566	99,9966	0,998831	1
1287,69	3,10981	0,999967	1,2877	99,9967	0,998886	1
1319,57	3,12043	0,999969	1,3196	99,9969	0,998942	1
1352,25	3,13106	0,999971	1,3523	99,9971	0,998999	1
1385,74	3,14168	0,999972	1,3857	99,9972	0,999057	1
1420,05	3,1523	0,999974	1,4201	99,9974	0,999116	1
1455,21	3,16293	0,999976	1,4552	99,9976	0,999176	1
1491,25	3,17355	0,999978	1,4913	99,9978	0,999236	1
1528,18	3,18417	0,999979	1,5282	99,9979	0,999297	1
1566,02	3,1948	0,999981	1,5660	99,9981	0,999359	1
1604,8	3,20542	0,999983	1,6048	99,9983	0,999421	1
1644,54	3,21604	0,999985	1,6445	99,9985	0,999484	1
1685,26	3,22667	0,999987	1,6853	99,9987	0,999548	1
1726,99	3,23729	0,999989	1,7270	99,9989	0,999612	1
1769,76	3,24791	0,99999	1,7698	99,9990	0,999676	1
1813,58	3,25854	0,999992	1,8136	99,9992	0,99974	1
1858,49	3,26916	0,999994	1,8585	99,9994	0,999805	1
1904,51	3,27978	0,999996	1,9045	99,9996	0,99987	1
1951,67	3,29041	0,999998	1,9517	99,9998	0,999935	1
2000	3,30103	1	2,0000	100,0000	1	1