

**MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN O POTENCIAL HÍDRICO EN DIFERENTES
MUESTRAS DE SUELOS NO SATURADOS CON WP4C**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

ELABORADO POR:

STEPHANIA BORDA LEÓN: 505978
CARLOS ANDRÉS GALVIS: 505573

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019

**MEDICIÓN DE LA SUCCIÓN O POTENCIAL HÍDRICO EN DIFERENTES
MUESTRAS DE SUELOS NO SATURADOS CON WP4C**

ELABORADO POR:

**STEPHANIA BORDA LEÓN: 505978
CARLOS ANDRÉS GALVIS: 505573**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

DIRECTOR:

**JUAN CARLOS RUGE CÁRDENAS
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/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.

DEDICATORIA

“Deja en manos de Dios todo lo que haces, y tus proyectos se harán realidad”

Proverbios 16:3

A nuestros padres por darnos un apoyo incondicional y por creer en nosotros siempre, donde el amor y paciencia prevalecieron en todos estos años de aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

Tus esfuerzos son impresionantes y tu amor es para mí invaluable. Junto con mi padre me has educado, me has proporcionado todo y cada cosa que he necesitado. Tus enseñanzas las aplico cada día; de verdad que tengo mucho por agradecerte.

Tus ayudas fueron fundamentales para la culminación de mi tesis.

Te doy gracias, madre.

Stephania Borda León

Agradezco a Dios por guiar mis pasos día a día.

Al Ing. Juan Carlos Ruge Cárdenas director de tesis por enseñarme este proceso maravilloso.

Agradezco a mis padres por apoyarme y brindarme su confianza todos estos años de estudio y formación.

Carlos Andrés Galvis Santamaría

Nota de Aceptación:

El trabajo de grado titulado “**Medición de la Succión o Potencial Hídrico en diferentes muestras de Suelos No Saturados con WP4C**”. Presentado por los estudiantes Stephania Borda León y Carlos Andrés Galvis Santamaría. Cumpliendo el requisito para optar al título de pregrado “Ingeniería Civil” fue aprobada por el director Juan Carlos Ruge Cárdenas.

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. mayo 19 de 2019

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
1. GENERALIDADES	13
1.1.ALTERNATIVA.....	13
1.2.LINEA DE INVESTIGACIÓN	13
1.3.EJE TEMÁTICO	13
2. INTRODUCCIÓN.....	14
3. ANTECEDENTES.....	15
4. JUSTIFICACIÓN.....	19
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	20
6. MARCO TEÓRICO	23
7. ESTADO DEL ARTE	36
8. OBJETIVOS	40
8.1. OBJETIVO GENERAL.....	40
8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	40
9. LIMITACIONES.....	41
10. METODOLOGÍA	42
11. ESPECIFICACIONES DE LAS MUESTRAS	44
12. PREÁMBULO EQUIPO WP4C.....	46
13. ENSAYOS DE LABORATORIO	48
14. ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
CONCLUSIONES.....	66
RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS	68
ANEXOS	71

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Curvas características para suelos con diferentes texturas.....	27
Figura 2. Curva característica de succión en el suelo	28
Figura 3. Curva de retención de humedad de la zona no saturada del suelo	30
Figura 4. Rangos de instrumentos de potencial de agua	35
Figura 5. Rangos de instrumentos de potencial de agua	35
Figura 6. Toma de datos WP4C - Diferencia de temperatura	48
Figura 7. Toma de Datos WP4C - Resultado Potencial Hídrico.....	48
Figura 8. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 100%.....	53
Figura 9. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 95% + Diatomeas 5%.....	54
Figura 10. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 90% + Diatomeas 10%	55
Figura 11. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 80% + Diatomeas 20%	56
Figura 12. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 60% + Diatomeas 40%	57
Figura 13. Gráfica Humedad vs. Succión de las 5 Muestras	58
Figura 14. Curvas características de retención de agua en el suelo	59
Figura 15. Regiones típicas de la curva de succión	61
Figura 16. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 100%.....	61
Figura 17. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 95% + Diatomeas 5%.....	62
Figura 18. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 90% + Diatomeas 10%	62
Figura 19. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 80% + Diatomeas 20%	63
Figura 20. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 60% + Diatomeas 40%	63
Figura 21. Gráfica Humedad vs. Succión de las 5 Muestras	64
Figura 22. <i>Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 0% Humedad</i>	71
Figura 23. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 0% Humedad.....	71
Figura 24. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 1% Humedad.....	72
Figura 25. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 1% Humedad.....	72
Figura 26. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 2% Humedad.....	73
Figura 27. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 2% Humedad.....	73
Figura 28. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 3% Humedad.....	74
Figura 29. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 3% Humedad.....	74
Figura 30. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 4% Humedad.....	75
Figura 31. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 4% Humedad.....	75
Figura 32. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 0% Humedad.....	76
Figura 33. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 0% Humedad.....	76
Figura 34. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 1% Humedad.....	77

Figura 35. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	77
Figura 36. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	78
Figura 37. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	78
Figura 38. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	79
Figura 39. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	79
Figura 40. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	80
Figura 41. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	80
Figura 42. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 0%	
Humedad.....	81
Figura 43. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 0%	
Humedad.....	81
Figura 44. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	82
Figura 45. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	82
Figura 46. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	83
Figura 47. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	83
Figura 48. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	84
Figura 49. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	84
Figura 50. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	85
Figura 51. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	85
Figura 52. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 0%	
Humedad.....	86
Figura 53. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 0%	
Humedad.....	86
Figura 54. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	87

Figura 55. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	87
Figura 56. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	88
Figura 57. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	88
Figura 58. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	89
Figura 59. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	89
Figura 60. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	90
Figura 61. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	90
Figura 62. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 0%	
Humedad.....	91
Figura 63. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 0%	
Humedad.....	91
Figura 64. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	92
Figura 65. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 1%	
Humedad.....	92
Figura 66. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	93
Figura 67. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 2%	
Humedad.....	93
Figura 68. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	94
Figura 69. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 3%	
Humedad.....	94
Figura 70. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	95
Figura 71. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 4%	
Humedad.....	95

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Compilación de Datos Ensayos de Laboratorio	49
Tabla 2. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 100%.....	52
Tabla 3. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 95% + Diatomeas 5%.....	53
Tabla 4. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 90% + Diatomeas 10%	54
Tabla 5. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 80% + Diatomeas 20%	55
Tabla 6. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 60% + Diatomeas 40%	56
Tabla 7. Datos Humedad y Succión de Todas las 5 Muestras.....	57

RESUMEN

El trabajo de investigación presenta el análisis y los ensayos correspondientes que se le realizó al material caolín mezclado con determinados porcentajes de diatomeas, los cuales se ejecutaron con el higrómetro de punto de rocío (WP4C), con el fin de determinar la curva de succión de este material y analizar el comportamiento de cada muestra realizada con determinadas características según la cantidad de humedad y de diatomeas en cada una.

El equipo WP4C aún no se encuentra en tantas universidades de Colombia debido a que su diseño fue desarrollado hace muy poco tiempo en Estados Unidos.

Las muestras se analizaron bajo condiciones de laboratorio en donde los escenarios del lugar cuentan con control de temperatura y humedad relativa constante, lo que permitió tener resultados con condiciones idóneas y disminuyendo el margen de error.

Finalmente se entregan los resultados con la demostración de los ensayos realizados y la guía de uso del equipo correctamente, con el propósito que en un futuro implemente nuevos laboratorios a la rama de suelos en la Universidad Católica de Colombia.

1. GENERALIDADES

1.1. ALTERNATIVA

Teniendo en cuenta el acuerdo 171 de la Universidad Católica de Colombia, donde se establecen las alternativas de trabajo de grado en los programas de pregrado para la facultad de ingeniería; se ha optado por la alternativa de trabajo de investigación, en el cual se midió la succión de los suelos no saturados con el equipo WP4C, donde se obtuvo la curva de retención de agua de una manera más rápida y precisa que con los métodos tradicionales.

1.2. LINEA DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de grado está enmarcado dentro de la línea de investigación aprobada por la Universidad Católica de Colombia, denominada Materiales la cual nos permitió medir el potencial hídrico y analizar las características de los suelos no saturados.

1.3. EJE TEMÁTICO

El eje central dentro del cual se desarrolló el trabajo de grado corresponde al análisis de las curvas de retención de agua y al potencial hidráulico del suelo mediante la realización de ensayos con el WP4C.

2. INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos más importantes para los ingenieros debido que es la base sobre la cual se sostiene cualquier estructura y su estudio permite conocer las características más importantes.

Una de esas características es la succión, la cual tiene una implicación importante al momento de determinar la resistencia del suelo, sobre todo en suelos parcialmente saturados y no saturados ya que según el resultado de la succión es capaz de aumentar los esfuerzos efectivos brindándole de esta manera al suelo una mayor resistencia. Para la realización de cualquier ensayo que se refiera a determinar la succión se debe tener en cuenta que el resultado cambia si se varia la humedad o la presión atmosférica.

Es por esto que la presente investigación se realizó con el fin de calcular la succión en suelos no saturados por medio de un método tecnológico diferente a los métodos convencionales (como el papel filtro o placa succión), adicional brinda mediciones rápidas de 10 a 20 min, este equipo es conocido como WP4C un higrómetro de punto de rocío que se utiliza para todo tipo de muestras porosas (suelos, substratos, semillas, plantas y soluciones salinas).

La mezcla de la muestra se eligió con el fin de simular un suelo arcilloso que presenta baja resistencia como es característica principal de estos tipos de suelos, pero con la diferencia de un agregado fino que está catalogado como un grupo de algas unicelulares microscópicas que en este proyecto se implementó con el fin de usar un suelo compuesto para determinar el comportamiento de la curva de succión con variación en porcentajes mínimos de humedad.

3. ANTECEDENTES

El índice de humedad disponible en el suelo se puede determinar mediante las curvas de retención de humedad, así se han establecido varios métodos de diseño, uno de los estudios proporcionados son la determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. (Garcia, 2008)

❖ **MÉTODOS DE SECADO DE SUELOS EN LABORATORIO:**

- **Secado Ambiente:** Este método pretende que las muestras de suelo vayan perdiendo humedad al dejarse expuestas a temperatura ambiente en un cuarto donde la temperatura este controlada. (Díaz, 2015)
- **Secado Horno Convencional:** Consiste en que una muestra de suelo sea sometida a una temperatura de 110° C por 24 horas, logrando así que con el nivel de estrés térmico la muestra pierda toda su humedad. (Díaz, 2015)
- **Secado Lámparas Halógenas:** Consiste en colocar una muestra de suelo bajo lámparas halógenas que irradian calor, para así lograr que la muestra pierda toda su humedad en un tiempo que depende del tipo de material expuesto y el contenido de agua. (Díaz, 2015)

Este método no tiene una norma estipulada. Se procede a afinar y calibrar para determinar su rendimiento y debe realizarse en varias muestras en diferentes tiempos de exposición a las lámparas. (Díaz, 2015)

- **Secado Horno Microondas:** Consiste en que una muestra de suelo sea sometida a una potencia entre 350 W a 700 W, esta dependerá del horno utilizado. Las muestras se deben dejar en el horno bajo este estrés térmico hasta que se logre la pérdida total de humedad. (Díaz, 2015)

Al utilizar este método, comparado con el secado en horno convencional, se obtiene como ventaja un menor consumo de energía eléctrica y una mayor eficiencia respecto al tiempo. Los resultados de estudios donde se compara la eficiencia entre el secado con horno convencional y horno microondas, demuestran mayor confiabilidad en el horno convencional. (Díaz, 2015)

Se requiere para realizar este método minimizar el sobrecalentamiento del suelo, de modo que se debe hacer uso de un vaso con agua dentro del horno microondas con el fin de reducir el calor dentro del mismo, y que sirva como indicador de sobrecalentamiento. (Díaz, 2015)

Se utiliza el contenido de humedad de un suelo en prácticas de ingeniería tanto en laboratorio como en campo. La utilización del método de ensayo INV E 122 o ASTM D 2216-98 para la determinación del contenido de agua en hornos convencionales requiere de 24 horas y de un alto consumo de energía, por lo que en la actualidad se reconoce la necesidad de métodos más rápidos. La utilización de hornos microondas es una alternativa posible. (Método para la determinación de la humedad en suelos granulares utilizando horno microondas, 2008)

- **Secado Cámara Térmica:** Es un equipo que es utilizado en el laboratorio de rocas para contener muestras a una temperatura constante. No se tiene una norma estipula para el método de secado con cámara térmica. Para hallar el rendimiento se debe proceder a afinar y calibrar el método de secado utilizando varias muestras en diferentes tiempos de almacenamiento. (Díaz, 2015)

Se describe este secado como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido es decir, en la microestructura del mismo. (Navas, 2006)

Los métodos de secado que más se han utilizado son los de secado por horno convencional y horno microondas, una desventaja de estos métodos es el proceso

tan lento que lleva a cabo, ya que el horno convencional se demora en secar una muestra alrededor de 24 horas y la energía eléctrica que se debe consumir es alta, a diferencia del horno microondas no se gasta tanta energía y disminuye el tiempo de secado pero también es cuestión de horas según la muestra, a su vez tiene una mayor eficiencia en los resultados de contenido de humedad como ventaja del horno convencional.

❖ **MÉTODOS PARA MEDICIÓN DE SUCCIÓN:**

- **Método Papel Filtro:** Se debe establecer el procedimiento para determinar la succión y potencial total de muestras inalteradas. Estos papeles filtro se utilizan como sensores pasivos. Con el fin de describir el estado y la energía del agua y el suelo, este procedimiento se estipula a partir de la norma INV E-157. (INVÍAS, 2013)

Es basada la técnica del papel filtro en obtener el equilibrio de un papel filtro con el potencial mátrico del agua en el suelo. La muestra de suelo intercambiará agua con el papel filtro, hasta que el potencial mátrico en ambos se equilibre. Este método es sencillo y económico para determinar el potencial mátrico del agua en el suelo, siempre que los cambios sean muy lentos. Permite obtener lecturas entre -0.05 y -0.1 MPa. (Mañas, 2005)

- **Método Placa de Succión:** Se mide la succión a partir de un dispositivo del laboratorio denominado “placa de succión” que consiste en colocar la muestra de suelo en contacto con la parte superior plana de un disco de vidrio saturado. Mediante una placa de vacío se aplica una succión determinada. (Garrido, 2004)

La suma de la altura de la columna de mercurio más la altura de la columna de agua será el valor de dicha succión, cuando se establezca el equilibrio se extrae el suelo y se obtiene su humedad, el procedimiento se debe repetir con varias succiones hasta obtener una curva confiable de succión para ese suelo en particular. (Garrido, 2004)

Se utilizan normalmente estas placas de succión para hacer curvas características de humedad del suelo. Después que las muestras de suelo alcanzan un potencial de agua específico bajo presión, la persona puede extraer la muestra de la placa y secarla para medir su contenido de agua. Se sugiere producir una curva característica de humedad del suelo realizando estas mediciones a diferentes presiones en el aparato de la placa de presión. (METER Group, 2018)

Estas placas de presión pueden tener suficiente precisión en el rango de humedad (0 a -0.5 MPa) para algunas aplicaciones, pero otros métodos pueden proporcionar una mejor precisión, se debe tener en cuenta en el momento de usar los datos para el modelado o la calibración. (METER Group, 2018)

- **Método del potenciómetro para determinar el punto de rocío:** Este método utiliza la técnica de medir el punto de rocío en un espejo enfriado previamente. Consiste en enfriar un espejo (por efecto Peltier) que hay en el interior del bloque de medida hasta que una célula fotoeléctrica detecta la formación de rocío. En este instante, un termistor mide la temperatura del espejo (que es la temperatura de rocío), y un sensor de infrarrojos mide la temperatura de la muestra de suelo. (Turner, 2006)

4. JUSTIFICACIÓN

Los métodos tradicionales usados en Colombia como los de papel filtro y placa de succión, son procedimientos que son muy demorados en el momento de obtener la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo o lo que conocemos como succión total, es por esto que se busca por medio de metodologías modernas (WP4C) obtener de una manera más rápida y exacta la curva de retención de agua, lo que nos permitirá determinar el índice de humedad disponible en el suelo que se va a trabajar.

Este trabajo de investigación permitió obtener por medio del WP4C el potencial hídrico y así mismo poder analizar por medio de la curva de succión el comportamiento del suelo con las características que se le determino a cada muestra, adicional a esto en los ensayos se pudo comprobar que por medio de este equipo novedoso se obtienen resultados de una manera consistente y en solo unos minutos.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Realizar la medición del potencial hídrico del suelo nunca ha sido fácil, ya que los instrumentos requieren calibración constante y no miden en rango seco y otros sensores suelen ser muy inexactos. A pesar de estos inconvenientes el WP4C se ha convertido en un experto general para medir el potencial hídrico y la succión del suelo, obteniendo de este equipo una precisión consistente, adicional a esto es un instrumento diseñado para que su uso sea fácil y demore solo unos minutos en registrar las mediciones. (METER Group, 2018)

El WP4C es el único instrumento que mide los cuatro componentes del potencial hídrico utilizando una termodinámica fundamental y una calibración finamente ajustada.

Este equipo mide el potencial de agua al determinar la humedad relativa del aire sobre una muestra en una cámara sellada. En el momento que la muestra entra en equilibrio con el vapor, la humedad relativa se determina usando el método del espejo refrigerado. Esto se refiere que se debe enfriar un pequeño espejo hasta que el rocío comience a formarse. Así en el punto de rocío, el WP4C mide la temperatura del espejo y la muestra dentro de 0.001 °C, permitiendo una precisión en el rango de -0.1 MPa a -300 MPa generando plena confianza en las lecturas de los resultados de la muestra. (METER Group, 2018)

En Colombia se utilizan principalmente dos métodos los cuales son: el papel filtro que aunque es económico y simple de hacer no es tan preciso, y el de placa succión que aunque se puede utilizar para hacer curvas características de la humedad del suelo, no proporciona suficiente precisión en el rango de 0 a -5 MPa, característica que logra el WP4C, es por esto que con esta investigación se demuestra que el higrómetro de punto de rocío es un método eficiente a la hora de analizar las características hidráulicas del suelo.

El principal actor para la definición del problema fue los suelos no saturados los cuales en la mecánica de suelos no han tenido mucho protagonismo porque siempre predominó el estudio de los suelos saturados, sin embargo, a través del tiempo se fueron dando cuenta que este tipo de suelos se empezaba a presentar en muchas zonas con gran importancia, para entender algo de la reseña histórica de la mecánica de los suelos no saturados se debe tener en cuenta este seguimiento:

La evolución de la mecánica de los suelos no saturados puede dividirse en tres periodos. En el primer periodo, antes de 1965, muchas de las investigaciones llevadas a cabo en los suelos no saturados fueron realizadas para investigar la validez del concepto de los esfuerzos efectivos para los suelos no saturados. Durante este periodo el concepto de los esfuerzos efectivos fue modificado con la finalidad de analizar el comportamiento de los suelos no saturados. (Bucio, y otros, 2002)

En el segundo periodo, de 1965 a 1987, muchas de las investigaciones se realizaron con la finalidad de investigar la posibilidad de usar dos variables de estado de esfuerzos en lugar de una. El esfuerzo “esfuerzo neto” (esfuerzo total menos presión de aire de poros) y “succión” (presión de aire de poros menos presión de agua de poros) se trataron como las dos variables de estado de esfuerzo. Durante este periodo se desarrollaron estructuras independientes para modelar comportamientos en el cambio de volumen y de corte en los suelos no saturados en términos de las dos variables de estado esfuerzo. Sin embargo, el comportamiento del cambio de volumen y de corte se trató por separado. (Bucio, y otros, 2002)

En el tercer periodo, desde 1987, varios investigadores han estudiado el comportamiento de los suelos no saturados en términos del concepto del estado crítico y tratando de investigar el límite elástico de los suelos no saturados cuando el suelo es sometido a un ciclo de carga y descarga. (Bucio, y otros, 2002)

Para determinar una de las características de los suelos no saturados (la succión) se empleó el equipo Higrómetro de Punto de Roció (WP4C), teniendo como ventaja su fácil procedimiento en el momento de llevar a cabo la realización del

ensayo y a su vez la optimización en el tiempo de entrega de resultados para el debido análisis del potencial hídrico de cada muestra.

La intención de la elección de estos materiales (caolín y diatomeas) se hizo con el fin de generar un comportamiento de un suelo arcilloso mejorado, debido al efecto del porcentaje de diatomeas añadidas en cada muestra, como se ha podido observar en los resultados de algunos ensayos realizados a través de los años en diferentes ciudades del mundo. La principal guía a seguir fue Bogotá, ya que debido a unos organismos microscópicos que se encuentran en algunas partes del suelo de esta ciudad se pudo concluir que actuaba como un mejoramiento del suelo proporcionándole una mejor resistencia a pesar de ser un suelo de tipo arcilloso.

Cuando los resultados de las mediciones del WP4C estuvieron listos en el tiempo requerido se realizó una caracterización del tipo de resultado señalando ventajas y desventajas del equipo utilizado y a su vez se comparó con resultados de todas las muestras que se utilizaron para encontrar un punto de comparación de la curva de retención de agua entre estas. A partir de esto se generó la pregunta:

¿Cuál es el efecto sobre la succión al adicionar suelos diatomáceos a materiales caoliníticos usando un higrómetro de rocío?

6. MARCO TEÓRICO

- **Succión del suelo:**

La succión del suelo es una medida de la energía libre del agua de poros en un suelo. La aspiración del suelo en términos prácticos es una medida de la afinidad del suelo por retener agua y puede proporcionar información sobre los parámetros del suelo que están influenciados por el agua en este; por ejemplo, las características de cambio de volumen, deformación y resistencia del suelo. (D5298-16, 2016)

La succión del suelo está relacionada con el contenido de agua del suelo a través de las curvas características de retención de agua.

Este concepto de succión del suelo fue desarrollado en la física del suelo a principios de los años 1900s, relacionado con el sistema agua-suelo-plantas (Buckingham, 1907). Dentro del estudio del comportamiento mecánico del suelo parcialmente saturado, el concepto de succión fue introducido en Inglaterra en los años 50s (Croney y Coleman, 1948), dentro de un contexto termodinámico. Tales conceptos y definiciones han sido aceptados y utilizados en la mecánica de suelos y la geotecnia. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

Con los datos de succión se le da un uso principal que es la determinación del perfil de humedad de equilibrio. La humedad de equilibrio que se obtiene mucho tiempo después de construida una estructura, como resultado del movimiento del agua del suelo de zonas de baja succión a zonas de alta succión. La medición de la succión en una arcilla parcialmente saturada permite la predicción de dicho perfil de equilibrio. (Humedad de Equilibrio y Succión en, 1987).

- **Medición de la Succión:**

Existen diversas técnicas para medir la succión total, matricial y osmótica del suelo, las cuales se pueden dividir en métodos directos o indirectos. En la mecánica de suelos y la ingeniería geotécnica, es importante hacer mediciones de la succión matricial y succión total. Los métodos directos, miden la presión negativa del agua en los poros del suelo o controlan las presiones del agua y del aire en los poros, para obtener la succión. Los métodos indirectos determinan la succión basados en la condición de equilibrio de humedad del suelo, con medidas de: presión de vapor, contenido de humedad o propiedades físicas (conductividad térmica o eléctrica) de un medio poroso en equilibrio con el suelo. (M.D. Fredlund, 2002)

- **Potencial Hídrico:**

El agua en estado líquido es un fluido cuyas moléculas se hallan en constante movimiento. La capacidad de estas moléculas de agua para moverse en un sistema en particular depende de su energía libre. La magnitud más empleada para expresar y medir el estado del agua es el potencial hídrico. El potencial hídrico puede expresarse en unidades de energía por unidades de masa o volumen, la unidad de uso más frecuente es el mega pascal (MPa = 10 bares) aunque en el pasado reciente también se han utilizado la atmósfera y el bar (1 bar= 0.987 atm). (Graff)

El potencial hídrico tiene 4 componentes principales, los cuales son:

- **Ψ_p , potencial presión:** Aumento de la capacidad de realizar trabajo por la presión que ejerce el agua sobre una superficie al ingresar.
- **Ψ_s , potencial osmótico:** disminución de la capacidad de realizar trabajo debido a la presencia de solutos.

- **Ψ_m , potencial matricial:** disminución de la capacidad de realizar trabajo debido al grado de retención del agua a las matrices sólidas o coloidales.
- **Ψ_g , potencial gravedad:** aumento de la capacidad de realizar trabajo debido al efecto de la gravedad. Aumenta en 0,01MPa por metro de altura.

El potencial mátrico (Ψ_m) adquiere fundamental importancia en el proceso de imbibición, en el cual las sustancias coloidales cargadas eléctricamente fijan agua o iones en su superficie. Los Ψ_p y Ψ_s tienen importancia en la absorción y pérdida de agua por parte del suelo. (Arntzen, 2014)

- **Medición del Potencial Hídrico:**

Si se relaciona el potencial de agua en la muestra de suelo con la presión de vapor de aire en la cámara del WP4C, se puede determinar el potencial hídrico, ya sea que la muestra se encuentre en estado líquido o sólido.

Es una medida del estado de energía del agua en un sistema el cual indica cuán apretado está el agua, estructuralmente o químicamente, dentro de una sustancia. El potencial de agua se puede calcular de la presión de vapor del aire en equilibrio con una muestra en una cámara de medición sellada. (Inc, 2018)

El equipo WP4C se encarga de medir el potencial de agua al equilibrar el agua de la muestra con agua en fase de vapor en el espacio de la cámara cerrada, luego mide la presión de vapor de ese espacio de la cámara.

En el equipo se coloca la muestra ya sea en una copa plástica o metálica y se sella la cámara para que este empiece a funcionar.

Adentro de esta cámara hay 4 componentes los cuales son, un ventilador, un sensor de punto de rocío, un sensor de temperatura y un termómetro infrarrojo. El

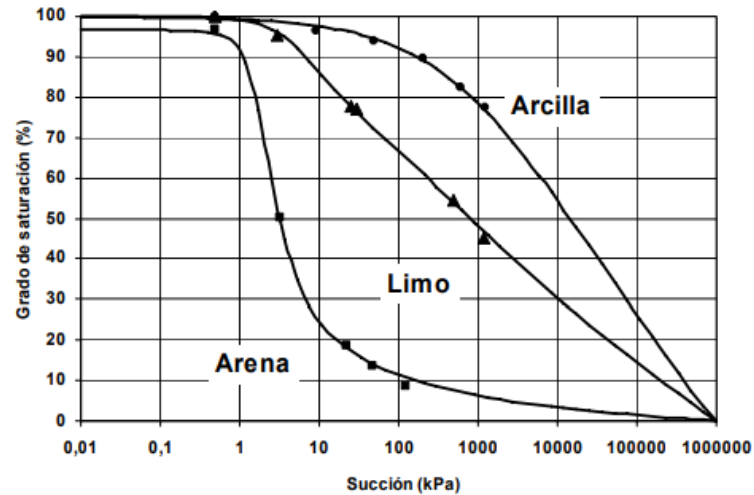
ventilador se encarga de equilibrar la temperatura de la cámara y la muestra de una manera más rápida, el sensor de punto de rocío mide la temperatura del punto de rocío del aire, el sensor de temperatura es el que permite saber el valor de la temperatura de la muestra y el termómetro infrarrojo mide la diferencia de temperatura entre la muestra y la cámara.

- **Curva de Succión (SWCC):**

La curva característica es la relación que existe entre el contenido de agua del suelo (grado de saturación, contenido de agua volumétrico) y la succión (tensión del agua) del suelo. Esta relación también se llama curva de retención del suelo, curva de succión, etc., dependiendo del área de aplicación. Para cuestiones de ingeniería geotécnica, la mayor parte de la literatura hace referencia a la curva característica del suelo. (García, 2008)

La naturaleza de la curva característica está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo; por tanto, la relación puede variar para diferentes tipos de suelos, como se puede observar en la siguiente figura. Nótese que para el caso de suelos finos (arcillas), estos se desaturan en forma gradual; mientras que para suelos granulares, la pérdida de agua ocurre en forma muy rápida. (García, 2008).

Figura 1. Curvas características para suelos con diferentes texturas.

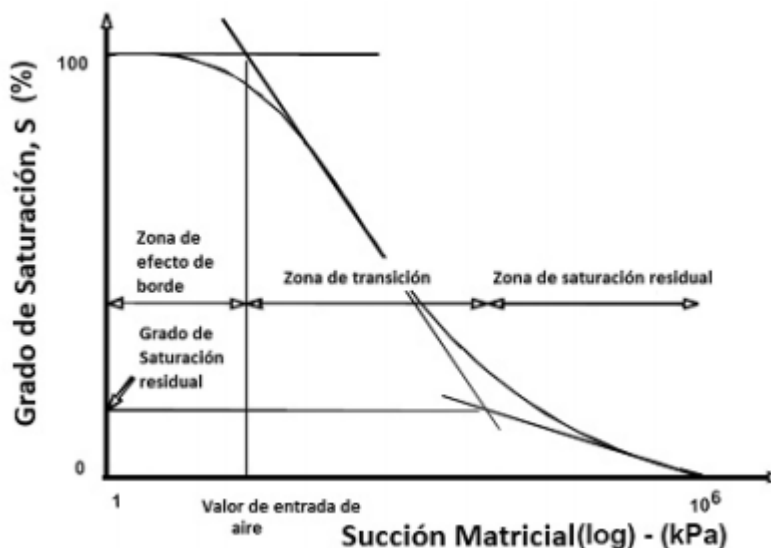


Fuente: Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión

Se puede decir entonces que la curva característica es la representación de la capacidad de un suelo para retener agua, bajo cierto valor de succión que se le aplique.

En la SWCC en términos del grado de saturación existen tres zonas claramente identificables, como se muestra en la Figura 1, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, y existen dos puntos característicos que marcan el límite entre cada etapa, el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

Figura 2. Curva característica de succión en el suelo



Fuente: Suelos Parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria

En la zona de efecto de borde, la gráfica es inicialmente horizontal, es decir, el suelo permanece saturado. El valor de entrada de aire, es la succión requerida para que el aire entre a los poros más grandes del suelo y se inicia la desaturación o pérdida de la saturación. En este punto se inicia la zona de transición, en la cual existe una interfase aire-agua, pero el agua se encuentra de manera continua. Finalmente, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual, donde se inicia la zona desaturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

- **Medición de la SWCC:**

La curva característica de succión en el suelo se puede obtener de mediciones en laboratorio o se puede estimar a partir de otras propiedades del suelo como la granulometría o la plasticidad. (M.D. Fredlund, 2002)

Para obtener la SWCC de laboratorio, se requiere hacer mediciones de succión a muestras de suelos para diferentes contenidos de agua. Las mediciones de

succión se pueden hacer por diversas técnicas que fueron desarrolladas por la ciencia del suelo. No obstante, es importante tener claro que la SWCC no puede utilizarse para estimar la succión “in situ”, dado que las condiciones de la muestra durante el ensayo de laboratorio no representan exactamente dichas condiciones. (M.D. Fredlund, 2002)

- **Temperatura en el Potencial Hídrico:**

La temperatura juega un papel importante a la hora de determinar el potencial hídrico de cualquier muestra suelo, tanto es así que el proceso para calcular la diferencia de temperatura entre la muestra y la cámara del equipo se considera como el más crítico. Esto debido a que por cada 1°C de diferencia de temperatura entre estos 2, se genera un error de 8Mpa en el resultado arrojado por la pantalla del WP4C.

Como se mencionó anteriormente en la medición del potencial hídrico, el termómetro infrarrojo del WP4C es el que permite medir la diferencia de temperatura existente entre la muestra y la cámara. Este debe ser calibrado para minimizar errores a la hora de hacer mediciones, sin embargo, mientras más sea la diferencia de temperaturas entre la cámara y la muestra, es más difícil que el equipo arroje un valor exacto en poco tiempo. Es por esto que se obtiene una mayor precisión cuando la temperatura de la muestra es cercana a la de la cámara.

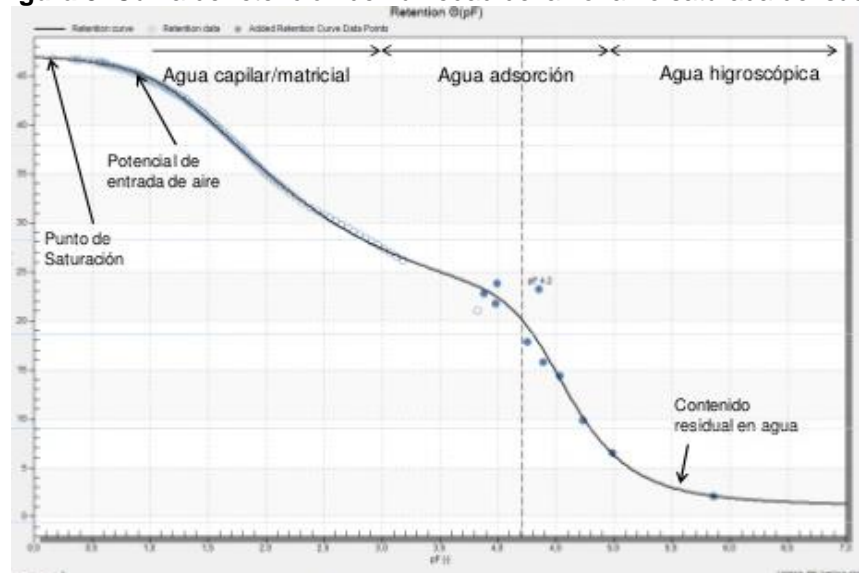
- **Relación contenido de agua y succión en el suelo:**

La relación existente entre el contenido de agua y la succión en un suelo, se define mediante la Curva Característica de Succión en el Suelo (SWCC, Soil Water Characteristic Curve). Esta relación también es conocida en la ciencia del suelo como curva de retención de agua. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

Es muy importante el concepto e interpretación de la SWCC para el entendimiento de la mecánica de suelos parcialmente saturados. Debido a esto, el enfoque de algunas investigaciones ha sido encontrar la relación entre la SWCC de un suelo con sus propiedades físicas. La relación contenido de agua-succión y por tanto, la forma de la SWCC, se ve influenciada por la distribución de los tamaños de poros, la distribución de tamaños de partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012).

A continuación, se muestra una curva característica de succión de un suelo no saturado:

Figura 3. Curva de retención de humedad de la zona no saturada del suelo



Fuente: Lab Ferrer

- **Suelos No Saturados:**

Teniendo en cuenta su origen, los suelos parcialmente saturados pueden ser naturales o artificiales.

Gran parte de los suelos sedimentarios se han depositado en ambientes acuosos, quedando inicialmente saturados y posteriormente desecados debido a las

circunstancias ambientales. Estos suelos abundan en lugares de clima árido y semi-árido, en que las estaciones son muy marcadas con periodos secos prolongados. Según diversos autores, estos lugares ocupan cerca del 30 % de la superficie de la Tierra. Respecto a los suelos residuales, su formación está asociada a los agentes de meteorización y el tipo de roca matriz. Los suelos tropicales lateríticos y saprolíticos, frecuentemente están en estado no saturado, debido a sus características de alta permeabilidad y las condiciones climáticas en las cuales se encuentran (Vaughan, 1985). (Bucio, y otros, 2002)

Los fenómenos más característicos del comportamiento del suelo no saturado se relacionan con sus deformaciones volumétricas al modificar el grado de saturación. Estas deformaciones pueden ser tanto positivas, en cuyo caso se produce un colapso, como negativas, en cuyo caso se produce un hinchamiento. Tanto el colapso como el hinchamiento pueden ser considerados como procesos de inestabilidad estructural, debido a que inducen discontinuidades en el comportamiento deformacional del suelo al variar las condiciones ambientales, sin modificación del estado tensional exterior. (Bucio, y otros, 2002)

- **Succión en Suelos No Saturados:**

La diferencia entre presión de agua y presión de aire, ambas en los poros se puede determinar como la succión matricial. El valor de la succión matricial depende en gran medida de la tensión superficial y del radio de curvatura del menisco. Cuando el grado de saturación baja, el menisco se contrae en áreas de poros pequeñas donde el radio de curvatura del menisco disminuye y es en ese momento, en que la succión matricial aumenta. A causa de los poros diminutos, se crean succiones matriciales más elevadas en suelos arcillosos que en los suelos granulares. (Bucio, y otros, 2002)

- **WP4C:**

El WP4C es distribuido y comercializado al público por la compañía Metergroup, anteriormente conocida como Decagon Devices, este a diferencia de otros

equipos no requiere calibración constante, siempre y cuando se mantenga en un mismo lugar.

Está diseñado para realizar ensayos con sus respectivos resultados en muy poco tiempo con una alta precisión. Mide en rango seco y para succiones entre -0,1 a -300Mpa.

Es el único equipo diseñado hasta ahora que mide los cuatro componentes principales del potencial hídrico (Ψ_p , Ψ_s , Ψ_m , Ψ_g).

El WP4C se puede utilizar para medir el potencial hídrico de cualquier material poroso. Normalmente se usa para analizar suelo, sustratos sin suelo, material vegetal y semillas, pero se ha utilizado para medir una variedad de cosas inusuales, como manzanas, ladrillos, aceite y caparazones de insectos. (INTERNATIONAL, 2018)

Adicional a lo mencionado anteriormente con este equipo se puede calcular el área de superficie específica de una muestra de suelo, que se entiende como el área de superficie total contenida en una masa unitaria de suelo. Los suelos con altas superficies específicas tienen una alta capacidad de retención de agua, más absorción de contaminantes y mayores potenciales de hinchamiento. La superficie específica es por lo tanto un parámetro importante. (Campbell, 1992).

- **Funcionamiento WP4C:**

El higrómetro de punto de rocío WP4C es un equipo que mide muestras de suelo en rango seco y su principio de funcionamiento es el siguiente:

- Aunque es un equipo que puede registrar valores de succión de 0Mpa, para valores inferiores (entre 0 y -1Mpa) el porcentaje de error en la medición aumenta.

- Para Valores entre 0 y -1Mpa se recomienda utilizar el Hyprop.
- Si se va a medir el comportamiento de un mismo tipo de suelo a diferentes humedades, se espera que el valor de succión más alto que se registre sea a la menor humedad y a medida que el porcentaje de humedad en la muestra sea mayor se espera que el valor de succión disminuya.

- **Punto de Rocío:**

El punto de rocío está relacionado con la humedad absoluta y define la temperatura a la cual el aire está saturado con vapor de agua. A diferencia de la humedad relativa, que es la medida de que tan cercano está el aire para ser saturado, la temperatura del punto de rocío es una medida de su contenido de humedad real. (Torres, 2005)

Es una de las mediciones de humedad más ampliamente usadas ya que la temperatura del punto de rocío está directamente relacionada a la cantidad de vapor de agua en el aire, y que es fácil de determinarlo. Como el punto de rocío es la temperatura a la cual ocurre la saturación, puede concluirse que altas temperaturas de punto de rocío se equiparan a aire húmedo, y bajas temperaturas de punto de rocío indican aire seco. (Torres, 2005)

Se ha considerado que en la mecánica de suelos la resistencia cortante de los suelos finos se incrementa con la succión; sin embargo, esto no es el caso para todos los tipos de suelos. Existen algunos suelos cuya resistencia alcanza un máximo para cierta succión y luego se reduce para valores mayores de succión, no obstante, tales casos aún no han sido completamente documentados y analizados. (Estimation of Effective Stress From Bishop's Parameter χ for a Silty Sand, 2013)

- **Comparación de los rangos de instrumentos potenciales de agua:**

Es la medida más fundamental y esencial en la física del suelo porque describe la fuerza que impulsa el movimiento del agua. Para hacer buenas mediciones del potencial hídrico se debe elegir el instrumento adecuado y usarlo con habilidad. (METER Group, 2018)

Sería perfecto que existiera un instrumento que mide el potencial de agua de manera simple y precisa en todo su rango, desde húmedo a seco. Pero en realidad, hay una variedad de instrumentos, cada uno con un proceso único, ventajas y desventajas. Cada equipo tiene un rango definido. (METER Group, 2018)

A continuación, se muestra una comparación de los instrumentos potenciales de agua y los rangos que miden:

Figura 4. Rangos de instrumentos de potencial de agua

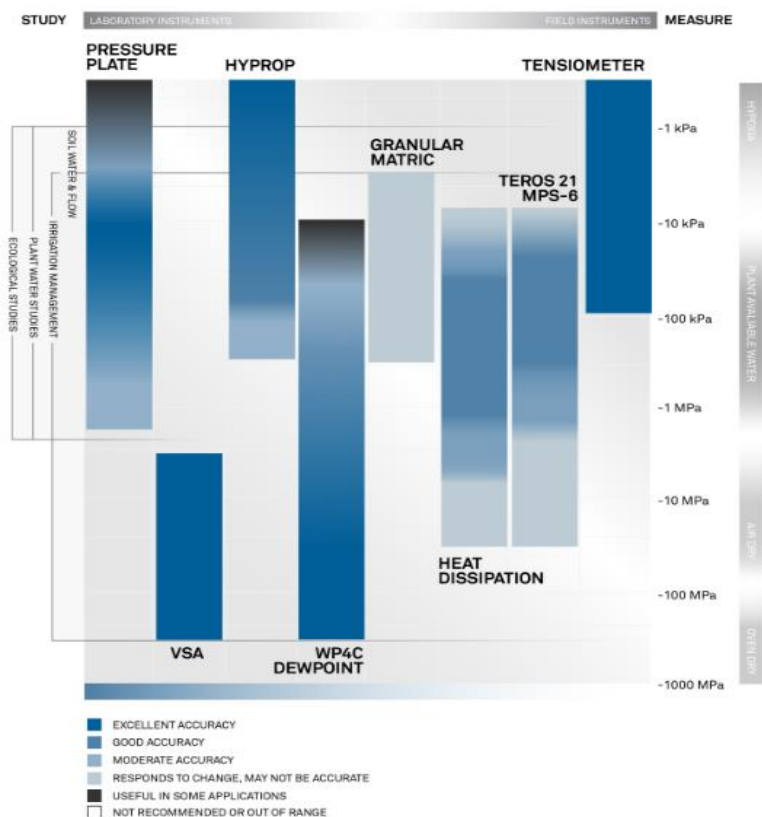


Figura 5. Rangos de instrumentos de potencial de agua

Fuente: (www.metergroup.com,2018)

Como podemos observar en la anterior imagen el WP4C mide en un rango que va desde los -10Kpa hasta los -500Kpa, lo que quiere decir que este equipo funciona prácticamente con todos los rangos del potencial hídrico a excepción de muestras con Hipoxia.

7. ESTADO DEL ARTE

El estudio del suelo en estado de saturación parcial inicia en la década de los años 60s, como respuesta a la necesidad de entender el comportamiento de algunos suelos “problemas”, que en países como Estados Unidos y Canadá ocasionan al año pérdidas millonarias por afectación de las estructuras que se asientan sobre ellos. Los suelos expansivos o suelos activos, hacen parte de los llamados suelos “problemas”, y son suelos arcillosos que cambian de volumen debido a cambios en el contenido de humedad, originando la formación de fisuras y grietas en estructuras livianas como pavimentos, viviendas de 1 y 2 pisos, andenes, redes de servicio (alcantarillado y acueducto), etc. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

El estudio del comportamiento de los suelos expansivos, requiere tener en cuenta la variabilidad en el estado de esfuerzos del suelo, puesto que el potencial expansivo del suelo no se desarrolla si el suelo se encuentra saturado, sino cuando se dan cambios en el contenido de humedad, y el suelo se encuentra en el rango de parcialmente saturado. La aplicación de la mecánica de suelos clásica no da respuesta a este fenómeno y por eso se originaron una serie de conferencias internacionales para ayudar a resolver los problemas de los suelos expansivos, como son las Conferencias Internacionales de Suelos Expansivos en Texas (1965 y 1969), Israel (1973), Denver (1980), Australia (1984), Nueva Delhi (1987), etc. Adicionalmente a los suelos expansivos, nace la necesidad de estudiar otras condiciones del suelo en estado de saturación parcial, como la compactación de suelos, suelos colapsibles y suelos residuales. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

La década de los 70s, se constituye como el período donde se desarrollan las formulaciones de los conceptos y las teorías fundamentales del suelo parcialmente saturado (variables de estados y leyes constitutivas). Una vez establecida la base teórica, durante la década de los 80s se intenta dar solución directa a los problemas geotécnicos relacionados con los suelos no saturados, sin embargo, se demostró que, para esta condición, las propiedades del suelo no son constantes sino variables (Fredlund, Rahardjo y Gan, 1987; Gan, Fredlund, y Rahardjo, 1988) y por tanto, se requiere de la utilización de modelos numéricos para dar solución a

los problemas planteados. Una vez perfeccionado el fundamento teórico, en los años 90s se dirigieron los esfuerzos en implementar los conceptos y modelos matemáticos propuestos, sin embargo, la implementación ha sido difícil, principalmente por la dificultad (en tiempo y en costo) de medir las propiedades del suelo parcialmente saturado. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

La investigación continúa hoy en día con avances relacionados con aspectos técnicos de la medición de las propiedades del suelo, de la incorporación de medición de succión en los equipos de corte directo y de compresión triaxial, medición de succión en campo y laboratorio, entre otros. (Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria, 2012)

Además de los estudios mencionados anteriormente se tienen registros de otros tipos de ensayos como los que se exponen a continuación:

- **Un nuevo modelo teórico que representa la película de flujo en medios porosos insaturado:**

Comúnmente observamos que modelos que dan cuenta de las fuerzas capilares a menudo no funcionan bien cuando el flujo de agua se produce en películas líquidas delgadas en medios porosos insaturados. (A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated, 2013)

Un nuevo modelo de curva de retención de agua del suelo teórico fue formulado a base de la función de espesor de película que da cuenta de potencial matricial. El acoplamiento de este nuevo modelo con un modelo Tokunaga modificado que considera la conductividad hidráulica se obtiene un modelo hidráulico suelo teórico y matemáticamente simple que representa la película de flujo en medios porosos insaturados. El modelado inverso de un experimento de evaporación mostró que el nuevo modelo ofrece una buena descripción de flujo de agua a bajos contenidos de agua. (A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated, 2013)

La combinación de modelo de van Genuchten con el modelo Tokunaga modificado realiza mejor el modelado inverso; sin embargo, los parámetros equipados no describieron el flujo de agua en condiciones más secas debido a la mayor conductividad hidráulica y el gradiente de potencial de agua más agudo cuando el contenido de agua se acercó al contenido de agua residual, lo que causó sobreestimación grave de pérdida de agua. (A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated, 2013).

- **Caracterización de las propiedades de retención de agua, compresibilidad de una mezcla de polvo de bentonita.**

Las propiedades de retención de agua y compresibilidad de una mezcla de polvo de bentonita se investigaron en un laboratorio de Paris, Francia.

La capacidad de retención de agua se determinó en condiciones de volumen constante utilizando una celda especialmente diseñada que permite el intercambio de vapor en todas las direcciones; Se realizaron pruebas con un edómetro controlado para la investigación de compresibilidad; Se aplicaron métodos de consolidación y de volumen constante para la determinación de la presión del suelo. (Characterization of water retention, compressibility and swelling properties of a pellet/powder bentonite mixture, January 2019)

La técnica de equilibrio de vapor se utilizó para el control de succión, se encontraron resultados comparables para la capacidad de retención de agua de la mezcla de polvo de bentonita determinada en condiciones de volumen constante para succiones superiores a 4 MPa, lo que sugiere que la succión fue controlada principalmente por los micro poros dentro de las partículas de arcilla y fue acomodado por los macro poros existentes. (Characterization of water retention, compressibility and swelling properties of a pellet/powder bentonite mixture, January 2019)

Por el contrario, en succiones más bajas, las condiciones de volumen constante dieron lugar a una capacidad de retención de agua más baja para la mezcla, lo que indica el aumento de tamaño de las partículas de arcilla después del llenado de los macro poros existentes. (Characterization of water retention, compressibility and swelling properties of a pellet/powder bentonite mixture, January 2019)

Las curvas de compresión del edómetro revelaron un comportamiento diferente para las succiones bajas y altas: en las succiones altas, el cambio de volumen se regía por la reorganización de las partículas combinadas con una posible trituración de estas, por el contrario, a bajas succiones, la mezcla perdió su estructura granular inicial durante la disminución de la succión; por lo tanto, el comportamiento de cambio de volumen se volvió similar al de la bentonita compactada. (Characterization of water retention, compressibility and swelling properties of a pellet/powder bentonite mixture, January 2019)

En comparación con la bentonita compactada, la mezcla de polvo mostró una tensión de rendimiento menor. Se encontró un valor más bajo de presión con el método de volumen constante, lo que confirma la limitación del método de consolidación para determinar la presión del suelo. (Characterization of water retention, compressibility and swelling properties of a pellet/powder bentonite mixture, January 2019)

- **Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada**

Esta investigación realizada en España trato del estudio de los cambios de volumen de las arcillas expansivas debidos a modificaciones de humedad y a variaciones de presiones en el suelo, se realizó mediante ensayos edométricos con succión controlada. En el estudio experimental se consideraron distintas condiciones del estado inicial del suelo, diferentes trayectorias de tensión y de humectación, así como la repetición de ciclos de humedad-sequedad. El objetivo principal de este trabajo fue conocer mejor el desarrollo y evolución de la expansividad de las arcillas en consecuencia de los cambios de volumen espontáneos propios de las zonas de clima árido o semiárido, donde se presentaron ciclos de humedad-sequedad bien definidos. (Presa, 1982)

En Colombia se encuentran pocos registros de investigaciones o ensayos realizados con el WP4C debido a que en primer lugar este es un aparato un poco costoso y en segundo lugar hay más métodos con los cuales se puede obtener el potencial hidráulico de los suelos y hallar las curvas de retención de agua, aunque cabe resaltar que dichos métodos no son tan efectivos y se demoran más en entregar resultados.

8. OBJETIVOS

8.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la succión matricial en un suelo compuesto parcialmente saturado mediante un potenciómetro de punto de rocío (WP4C)

8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el comportamiento de la succión que tienen los suelos arcillosos (caolín) al agregarle determinados porcentajes de diatomeas.
- Caracterizar y preparar las muestras objeto de la investigación.
- Encontrar las curvas de retención de agua por medio del WP4C con los valores de succión cercanos al rango húmedo de la curva.

9. LIMITACIONES

Con respecto a las limitaciones de la realización de este proyecto después de la evaluación y la aprobación del anteproyecto el tiempo empieza a correr para continuar con la metodología propuesta y para alcanzar los objetivos que se quieren llevar a cabo, partiendo de un tiempo estimado alrededor de 5 meses, se deberá realizar los ensayos de laboratorio y sus respectivos análisis e investigación que requiera.

La realización de estos ensayos está limitada a la ciudad de Bogotá y en un laboratorio de la Universidad Católica de Colombia el cual tendrá ventaja ya que no generará ningún costo la realización de los ensayos porque se cuenta con el equipo requerido y el espacio.

Una de las limitaciones principales del proyecto fue el tipo de muestra que se utilizó, en un mayor porcentaje se usó el caolín y se le fue agregando determinados porcentajes de diatomeas, con el fin de simular un suelo arcilloso con alguna similitud al de Bogotá, el cual en unos ensayos hechos por profesionales se determinó que a pesar que el suelo estaba clasificado como suelo arcilloso y que de antemano se supone que su capacidad portante es baja, presento un resultado asombroso en el cual indicaba que a pesar de las características del suelo su capacidad de soportar era buena para lo que se esperaba, cuando se realizó el análisis a más profundidad se encontró un tipo de material que actuaba como un suelo granular en menor magnitud proporcionándole a los suelos de Bogotá mejor resistencia. A partir de esta investigación se limitó el tipo de muestra que se seleccionó para el proyecto, con la expectativa de encontrar resultados similares.

De igual manera para analizar los resultados se tuvo como limitante los escasos o nulas investigaciones referentes a este tipo de muestras caoliníticas con diatomeas, lo cual lleva a descubrir diferentes comportamientos en este tipo de suelos por sus diferentes porcentajes de material, es limitado porque no hay una base o una curva determinada que simule el comportamiento exacto de estos materiales mezclados. De esta manera se determina el análisis según las características de contenido de material y el resultado arrojado de la succión.

10. METODOLOGÍA

FASE 1: Capacitación Equipo WP4C

Como primera medida se realizó una capacitación por parte de la empresa patrocinadora del equipo, donde se tuvo en cuenta estrategias de aprendizaje como filmar el procedimiento y tomar apuntes para saber con claridad cada paso a realizar en el momento de realizar los ensayos del proyecto.

FASE 2: Prácticas de Laboratorio

Con el debido conocimiento del uso del equipo que se obtuvo en la capacitación durante 3 sesiones, se llevó a cabo la realización de los ensayos con las muestras seleccionadas.

Este procedimiento se hizo días posteriores a la entrega del anteproyecto para no perder la habilidad del manejo del equipo y avanzar en la parte práctica del trabajo para alcanzar a analizar los resultados y poder concluir el proyecto a su debido tiempo.

FASE 3: Revisión de Resultados Obtenidos y Compilación de Documentos

Para no perder la sintonía del trabajo realizado se revisó que los resultados hayan dado una buena respuesta, es decir, que sean consistentes al ensayo practicado ya que en cualquier momento puede llegar a generar errores por mal manejo en el uso del equipo.

Se reunió todos los documentos e información que fueron pertinentes o necesarios para la fase siguiente en donde se comenzó con el análisis de los resultados.

FASE 4: Análisis de los Resultados

Con la información adquirida y organizada anteriormente se llevó a cabo la fase de análisis de los resultados obtenidos, y bajo la capacitación ya realizada

anteriormente, se hizo la comparación de los resultados de cada tipo de muestra que se utilizó para el proyecto.

Este proyecto se basó en otros ensayos que se han realizado acá en Colombia como guía del análisis, esta información se obtuvo en la fase anterior ya que en esta fue cuestión de leer y entender los resultados únicamente.

FASE 5: Redacción del Trabajo Final

Esta fase fue la más larga, donde se definió la totalidad del trabajo para la fase final, se completó el trabajo escrito y se anexo las fotografías tomadas de cada ensayo realizado.

FASE 6: Realización de la Presentación de Power Point

Esta fase es el complemento para terminar el proyecto, ya que se definirá la presentación que se va a realizar a partir del trabajo escrito ya terminado anteriormente y de los resultados de los ensayos de las muestras. Este se presentará en Power Point el día de la sustentación del Proyecto de Grado.

A partir de la experiencia vivida con el manejo del equipo, se requirió realizar y entregar un manual de manejo del equipo WP4C, donde se especificó cada paso a seguir para el desarrollo de un ensayo con suelos no saturados, representado por fotografías que se obtuvieron en el momento de realizar alguno de los ensayos del proyecto

11. ESPECIFICACIONES DE LAS MUESTRAS

Las características principales de las muestras son: contenido de caolín con adiciones de diatomeas o también llamados suelos diatomáceos en diferentes porcentajes (5, 10, 20 y 40%).

Se realizó una curva de retención con el WP4C por cada adición con varios puntos en cada una de las curvas, es decir se realizó alrededor de 25 ensayos.

CAOLÍN:

Un caolín es una roca la cuál es comprendida por una proporción de minerales que pueden ser extraídos para su uso comercial. Se trata de una arcilla compuesta que no tiene la necesidad de un proceso y se hace uso tal cual se encuentre. El caolín es un mineral básico para la fabricación de la porcelana sanitaria y otros materiales cerámicos de construcción tales como baldosas, tejas y sus correspondientes esmaltes (Viñas, y otros). (BREIDY JULIETH PARRADO MORERA, 2017)

Es usado además como material en la realización de vidrio y como terraplén en obras de contención de tierras. En aeropuertos y en mezclas para cementos resistentes a los ácidos. En ladrillos usados en pisos y para sellamiento de mezclas. (BREIDY JULIETH PARRADO MORERA, 2017)

En el concreto se usa para aumentar su vida útil, mejorar la porosidad y la adhesión entre el cemento, la arena y la grava. Además de muchos otros usos industriales.

DIATOMEAS:

Es una roca sedimentaria formada por micro-fósiles de diatomeas. Este material es usado como medio de filtración ya que su granulometría es ideal para esto. También son usadas como fertilizantes, insecticidas y desparasitantes para animales.

Tienen relación con la mecánica de suelos y la geotecnia debido a que hay tipos de suelos que contienen diatomeas y aunque poseen propiedades similares o se comportan como arcillas, no se encuentran en la literatura muchos ensayos realizados a estos tipos de suelos.

¿POR QUÉ CAOLÍN Y DIATOMEAS?

Para el proyecto de investigación se trabajó con caolín buscando simular suelos arcillosos (como los de Bogotá), los cuales al ser partículas tan pequeñas con pocos espacios de poros tienden a retener más agua que los suelos arenosos o cualquier otro tipo de suelo, lo que hace que su resistencia con respecto a los otros suelos sea menor.

Es por esto que se agregó diatomeas en diferentes proporciones para simular suelos granulares con la intención de mejorar su resistencia y poder observar cómo se comporta el suelo a diferentes porcentajes de humedad y con distintas cantidades de diatomeas.

12. PREÁMBULO EQUIPO WP4C

- **Elegir una Ubicación:**

Para asegurarse de que su WP4C funciona correctamente y de manera consistente, coloque el equipo en una superficie nivelada. Esto reduce la posibilidad de que el material de la muestra se derrame y contamine el interior del instrumento.

Proteja los componentes eléctricos internos y para evitar lecturas inexactas coloque su WP4C en un lugar donde la temperatura se mantenga bastante estable.

Esta ubicación debe estar bien lejos del aire acondicionado y ventiladores de calefacción, ventanas abiertas, puertas exteriores, escapes de refrigeradores, u otros elementos que pueden causar una rápida fluctuación de la temperatura. (METER Group, 2018)

- **Preparación del WP4C para la operación:**

Después de encontrar una buena ubicación para su WP4C, enchufe el cable de alimentación en la parte posterior de la unidad. Antes de encenderlo, abra la muestra cajón (gire la perilla a la posición ABRIR / CARGAR).

El interruptor ON / OFF se encuentra en la parte inferior derecha esquina del panel posterior WP4C, aparecerá en la pantalla LCD. Este es el menú principal, que muestra el potencial de agua en Mega Pascales (MPa) y pF, y la temperatura de la muestra en grados centígrados °C.

Con el fin de proporcionar las lecturas más precisas, debería permitirse un período de calentamiento de 15 a 30 minutos después de encenderlo. Cuando inserte una muestra en el cajón de la cámara y gire la perilla del cajón a la posición LEER, el instrumento comenzará el ciclo de lectura para medir el potencial hídrico de su muestra. (METER Group, 2018)

- **Menú principal con modo continuo habilitado:**

El modo preciso asegura un valor preciso del potencial de agua al repetir mediciones en una muestra. Los tiempos de lectura típicos están entre 10 y 15 minutos. El LED verde parpadea y pita hasta que encienda el cajón. La posición ABIERTO / CARGA.

El modo continuo mide el potencial de agua de su muestra continuamente hasta que gire la perilla del cajón a la posición OPEN / LOAD esto puede ser útil para hacer un seguimiento a largo plazo de las muestras. Toman un tiempo especialmente largo para llegar al equilibrio de vapor, tales como muestras de plantas y muestras de suelo húmedo con potencial de agua > -0.5 MPa. En este modo, el WP4C medirá la muestra, se detendrá para medir el potencial del agua y la temperatura de la muestra, luego comienza otro ciclo de lectura. Se le indicará con el LED verde. (METER Group, 2018)

13. ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, se muestra una imagen de cada dato que se registró con el WP4C, relacionados con el porcentaje de caolín y diatomeas usados para cada uno a diferentes humedades. La primera imagen muestra la temperatura de la cámara interna del equipo y la diferencia de temperatura entre esta y la muestra, la segunda imagen arroja el valor de la succión matricial en MPa y Pf, así como la temperatura a la que el equipo realizó la medición.

Figura 6. Toma de datos WP4C - Diferencia de temperatura



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Toma de Datos WP4C - Resultado Potencial Hídrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Compilación de Datos Ensayos de Laboratorio

SUCCIÓN MATRICIAL (MPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (pF)	TEMPERATURA (°C)
CAOLÍN 100%		
64,7	5,83	19,9
40,37	5,62	19,8
15,56	5,21	19,8
8,56	4,95	19,8
6,86	4,85	19,8
CAOLÍN 95%, DIATOMEAS 5%		
86,54	5,95	19,8
32,25	5,52	19,8
24,61	5,41	19,8
10,72	5,05	19,8
7,75	4,9	19,8
CAOLÍN 90%, DIATOMEAS 10%		
71,88	5,07	19,8
32,57	5,53	19,8
15,46	5,2	19,7
9,6	5	19,8
6,07	4,8	19,7
CAOLÍN 80%, DIATOMEAS 20%		
36,86	5,58	19,9
23,07	5,38	19,8
15	5,18	19,9
11,51	5,08	19,9
5,73	4,77	19,9
CAOLÍN 60%, DIATOMEAS 40%		
40,17	5,62	19,9
24,59	5,41	19,8
11,96	5,09	19,8
9,34	4,99	19,9
6,74	6,74	19,9

Fuente: Elaboración propia

14. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la realización de este proyecto se tuvo en cuenta muestras de materiales que se caracterizan por ser de tipo arcilloso con el fin de comprobar que mezclando este material con uno de tipo granular o que lo asemeja como las diatomeas, mantendría una succión alta y de esta manera sus esfuerzos efectivos podrían aumentar, dándole una caracterización a este tipo de suelo mejor que la que normalmente tendría una arcilla para usos en la ingeniería civil.

Dos de las principales propiedades hidráulicas de los suelos son la capilaridad y la conductividad hidráulica o succión. La *capilaridad* en suelos se entiende como el movimiento ascendente del agua en un tubo capilar por encima del nivel freático, este movimiento se genera contrario al de la gravedad. La *succión* es referida como la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener el agua, así pues, esta energía requerida se utiliza para remover una molécula de agua de la matriz del suelo por medio de la Evaporación.

El suelo tiene tubos capilares de pequeño diámetro en una escala próxima a $10E-9$ metros (nano), los cuales permiten que el agua suba por este.

Cuando el suelo se encuentra en esta zona capilar las partículas tienden a estar unas más cerca de las otras, lo que disminuye los vacíos y hace que se genere una tensión entre ellas; pero lo verdaderamente importante es que va haber más esfuerzos entre partículas, es decir se va a generar un aumento de los esfuerzos efectivos.

Esto mencionado anteriormente se analiza en términos de presión de poros, es decir si se tiene un nivel freático y se quiere graficar la presión de poros, normalmente esta es positiva, pero encima del nivel freático va a ser negativa sobre todo si el suelo está saturado.

Cuando ocurre una succión y el suelo está saturado por capilaridad se le llama presión de poros negativa, en ese caso sigue siendo válido el principio de

Terzaghi, el cual nos dice que el esfuerzo efectivo es igual al esfuerzo total menos la presión de poros:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Cuando la presión de poros es negativa debido a que esta encima del nivel freático, los esfuerzos efectivos van a aumentar porque dicha presión negativa pasa a estar sumando.

Este concepto es el más importante de la succión y de los suelos no saturados en geotecnia porque genera un incremento en los esfuerzos efectivos y estos son los que hacen referencia a la resistencia que tiene el suelo.

Esa es la esencia, entonces ¿cómo se puede medir esa succión del suelo?, hay muchas maneras, pero la más importante es la curva de retención de agua, la cual fue la que se generó a partir de los valores de succión arrojados por el WP4C, estas graficas contienen en el eje Y la humedad volumétrica y en el eje X la succión matricial.

Dichas graficas tienen un comportamiento de la siguiente manera:

- Cuando la muestra presenta mayor porcentaje de humedad la succión disminuye, a su vez cuando se mezcla con un porcentaje de diatomeas mayor al 20% la succión arrojada por el equipo es mucho menor.
- Cuando la muestra esta seca o su porcentaje de humedad es mínima la succión aumenta, de igual manera para las mezclas de suelos con diatomeas menor al 20% de contenido, la succión se mantiene alta (cuando la succión es alta aumentan los esfuerzos efectivos).

Se podría decir entonces, que la humedad es inversamente proporcional a la succión, es decir cuando una aumenta la otra disminuye y viceversa.

Para este caso se analizaron suelos casi secos, con porcentajes de humedad del 1, 2, 3, y 4%, debido a que el equipo con el que estamos trabajando (WP4C) mide en rango seco.

A continuación, se encuentran relacionados en tablas y con sus respectivas gráficas, los datos de los ensayos que se mencionaron en el capítulo 16. Estos datos fueron organizados según su porcentaje de caolín y diatomeas y su contenido de humedad (desde 0% hasta 4%).

1. CAOLÍN 100%

La primer muestra de suelo con la que se trabajó, estaba constituida por el 100% de caolín, la cual arrojó los siguientes resultados:

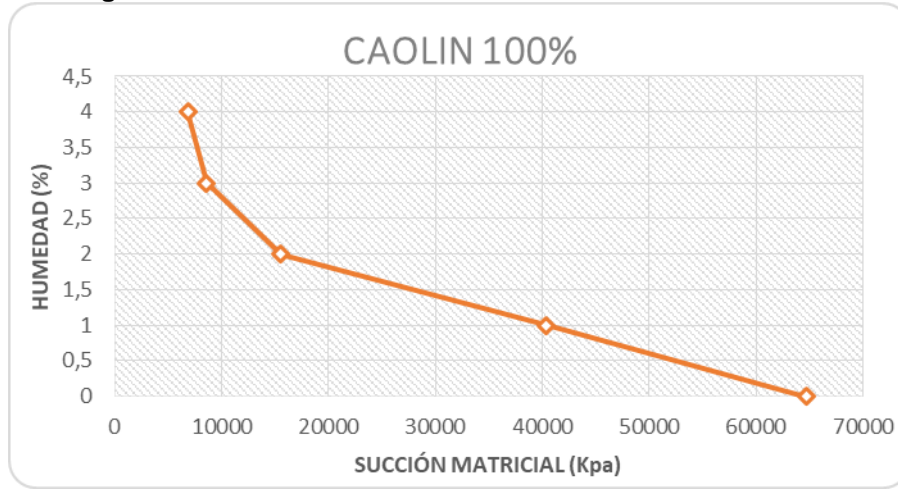
Tabla 2. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 100%

CAOLÍN 100%		
HUMEDAD (%)	SUCCIÓN MATRICIAL (MPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)
0	64,7	64700
1	40,37	40370
2	15,56	15560
3	8,56	8560
4	6,86	6860

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la anterior tabla, a medida que la humedad (%) aumenta, la succión matricial disminuye, lo que es un comportamiento normal del suelo y lo cual se va a ver también evidenciado en las demás muestras de suelo.

Figura 8. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 100%



Fuente: Elaboración propia

Además, si se mira el valor de succión para una humedad de 4%, el cual es de 6,86Mpa, se puede llegar a la conclusión que esa es la máxima humedad a la que el WP4C nos va arrojar valores verdaderos, debido a que como se mencionó anteriormente este es un equipo que mide en rago seco y para valores de succión mayores a 5Mpa.

2. CAOLÍN 95%, DIATOMEAS 5%

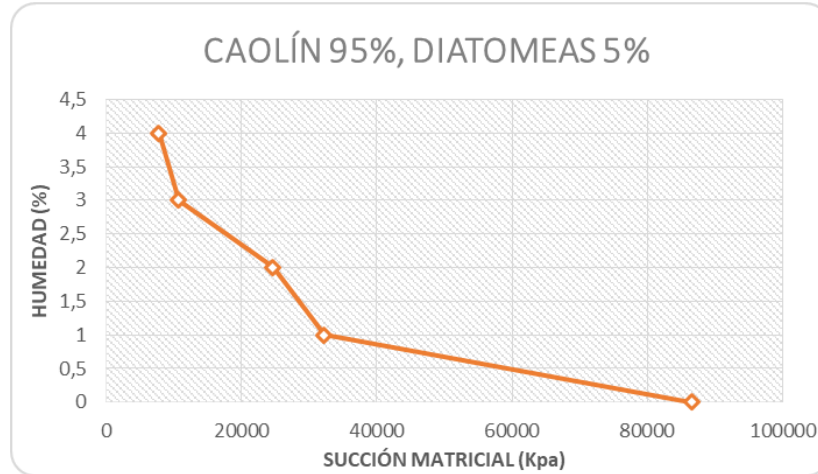
La segunda muestra que se preparo correspondio a 95% de caolín con 5% de diatomeas, para los cuales se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 3. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 95% + Diatomeas 5%

CAOLÍN 95%, DIATOMEAS 5%		
HUMEDAD (%)	SUCCIÓN MATRICIAL (MPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)
0	86,54	86540
1	32,25	32250
2	24,61	24610
3	10,72	10720
4	7,75	7750

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 95% + Diatomeas 5%



Fuente: Elaboración propia

Con esta muestra se registró el valor más alto de succión el cual fue de 86,54Mpa, estando seco (0% humedad).

La preparación de la muestra se realizó teniendo como base 10g de material, es decir entonces para este caso se utilizaron 9,5g de caolín y 0,5g de diatomeas.

3. CAOLÍN 90%, DIATOMEAS 10%

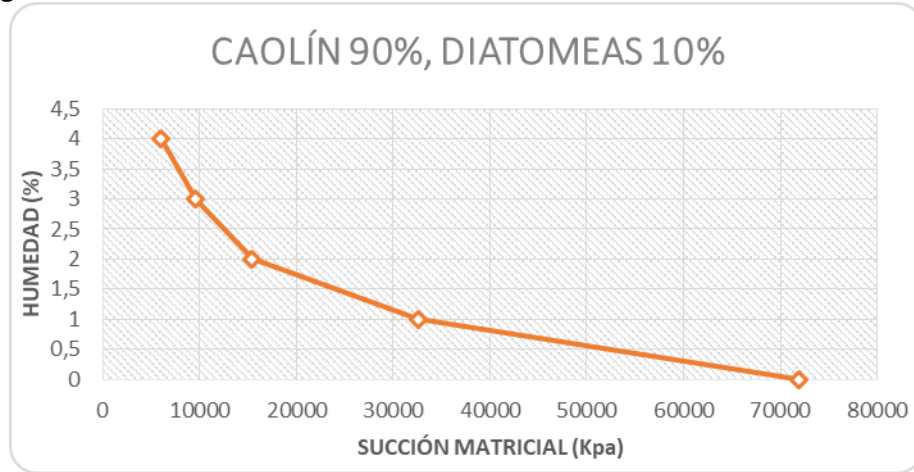
La tercera muestra a la que se le realizó ensayos correspondió a la conformada por un 95% de caolín con un 5% de diatomeas, para la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 90% + Diatomeas 10%

CAOLÍN 90%, DIATOMEAS 10%		
HUMEDAD (%)	SUCCIÓN MATRICIAL (MPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)
0	71,88	71880
1	32,57	32570
2	15,46	15460
3	9,6	9600
4	6,07	6070

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 90% + Diatomeas 10%



Fuente: Elaboración propia

La preparación de la muestra se realizó teniendo como referencia 10g de material, para los cuales en este caso se tomaron 9g de caolín con 1g de diatomeas.

4. CAOLÍN 80%, DIATOMEAS 20%

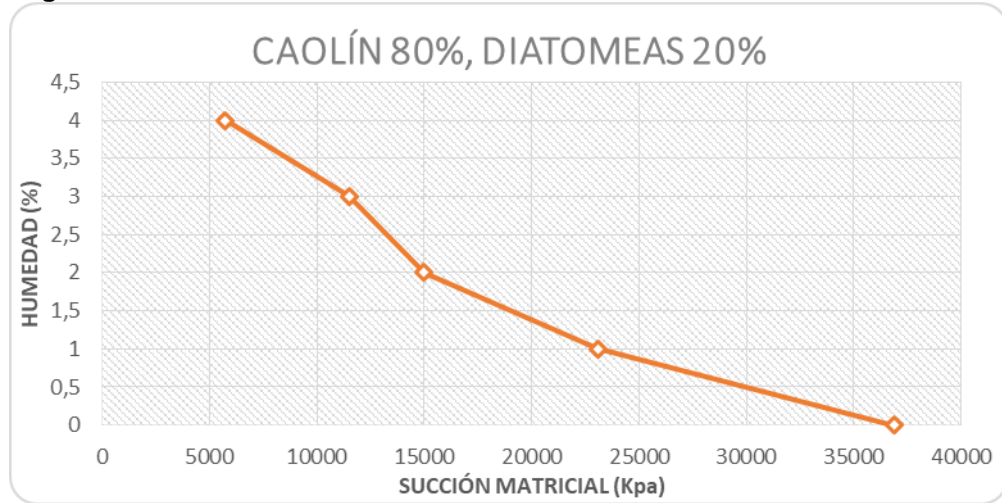
Para la muestra número 4 se tomó un 80% de caolín con un 20% de diatomeas, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 80% + Diatomeas 20%

CAOLÍN 80%, DIATOMEAS 20%		
HUMEDAD (%)	SUCCIÓN MATRICIAL (MPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)
0	36,86	36860
1	23,07	23070
2	15	15000
3	11,51	11510
4	5,73	5730

Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 80% + Diatomeas 20%



Fuente: Elaboración propia

Con este porcentaje de caolín y diatomeas se obtuvo el menor valor de succión, para una humedad del 4%, el cual fue de 5,73Mpa.

La preparación de la muestra se realizó teniendo como referencia 10g de material, para los cuales se tomaron 8g de caolín y 2g de diatomeas.

5. CAOLÍN 60%, DIATOMEAS 40%

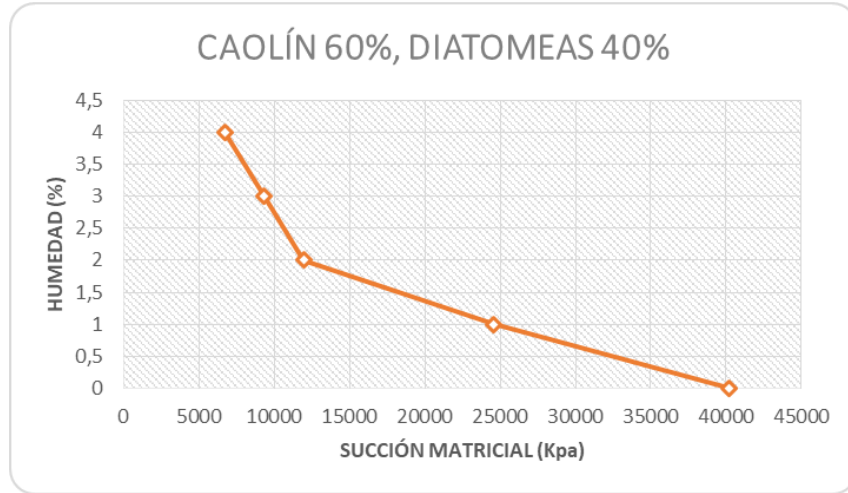
La muestra número 5 se realizó tomando un 60% de caolín y un 40% de diatomeas, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6. Datos Humedad y Succión – Muestra: Caolín 60% + Diatomeas 40%

CAOLÍN 60%, DIATOMEAS 40%		
HUMEDAD (%)	SUCCIÓN MATRICIAL (MPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)
0	40,17	40170
1	24,59	24590
2	11,96	11960
3	9,34	9340
4	6,74	6740

Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 60% + Diatomeas 40%



Fuente: Elaboración propia

Con esta muestra y la anterior, el valor máximo de succión, correspondiente cuando el suelo está seco, es bajo comparado con las 3 primeras muestras, y se evidencia que los valores son casi la mitad de los resultados de las primeras muestras.

La preparación de la muestra se realizó teniendo como referencia 10g de material, para los cuales se tomaron 6 g de caolín y 4 g de diatomeas.

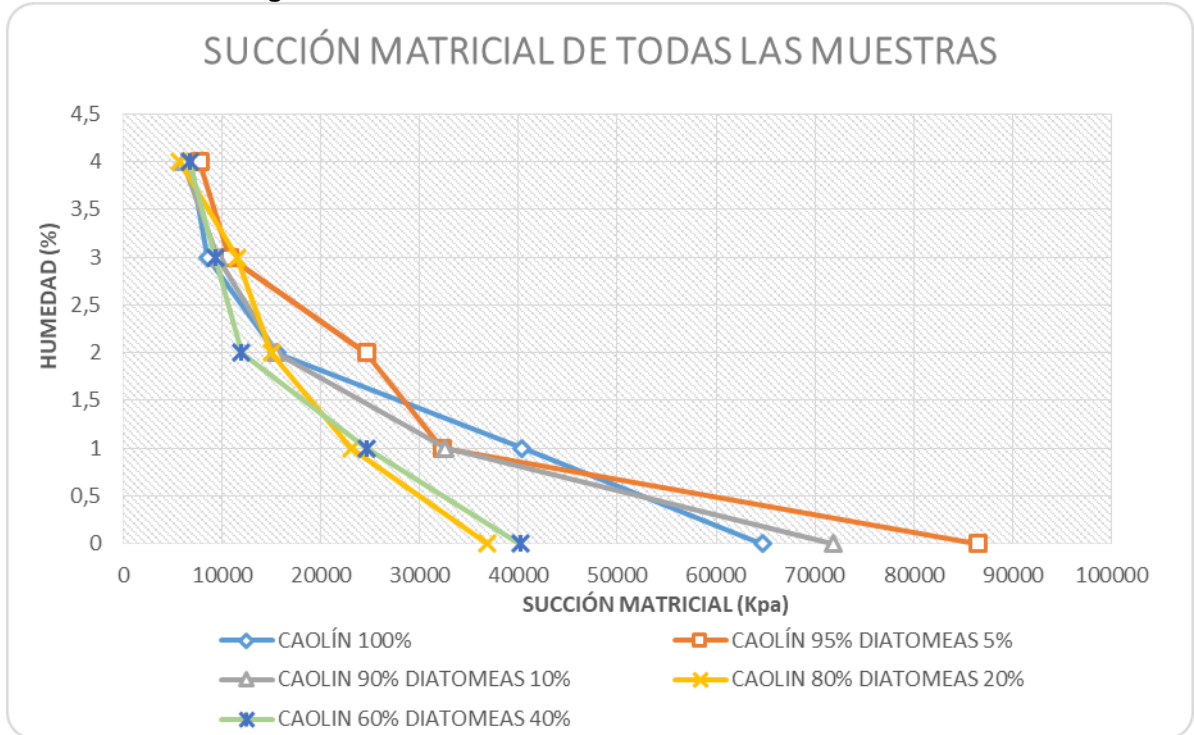
Para finalizar se hizo una comparación de todos los ensayos realizados se buscó hacer una equiparación de cómo se comporta el suelo con diferentes cantidades de diatomeas, la cual encontramos a continuación:

Tabla 7. Datos Humedad y Succión de Todas las 5 Muestras

SUCCIÓN MATRICIAL DE TODAS LAS 5 MUESTRAS					
HUMEDAD (%)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)	SUCCIÓN MATRICIAL (kPa)
0	64700	86540	71880	36860	40170
1	40370	32250	32570	23070	24590
2	15560	24610	15460	15000	11960
3	8560	10720	9600	11510	9340
4	6860	7750	6070	5730	6740

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Gráfica Humedad vs. Succión de las 5 Muestras



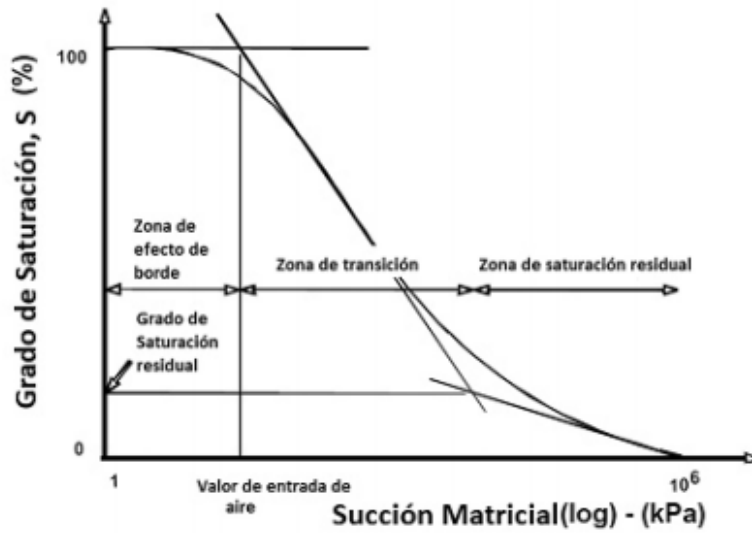
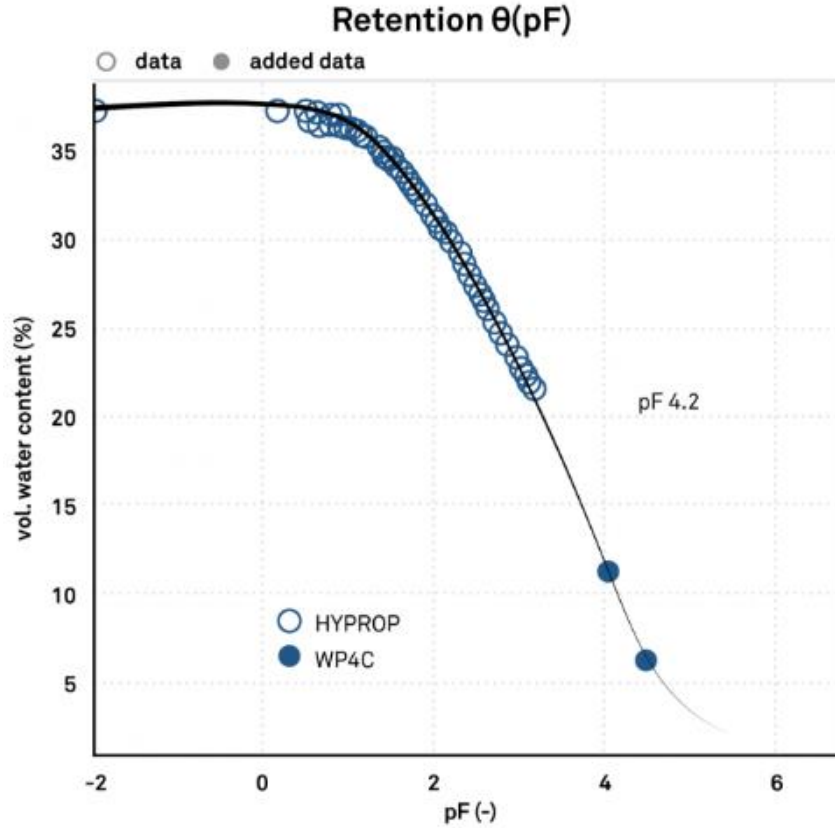
Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se puede observar que todas las muestras tienen un comportamiento similar, sin embargo y como se mencionó anteriormente, las correspondientes a 100% caolín, 95% caolín y 5% diatomeas, 90% caolín y 10% diatomeas, son las que presentan un valor mayor de succión si se compara con los dos restantes.

Se debe tener en cuenta que estas gráficas no comprenden todo el comportamiento de este tipo de suelo, ya que el WP4C es un equipo que mide en rango seco y para un suelo con estas características solo llega a arrojar valores cuando se tiene una humedad máxima de 4%.

- Comparación de las curvas de succión del modelo genérico vs proyecto de grado

Figura 14. Curvas características de retención de agua en el suelo



Fuente: Decagon Devices

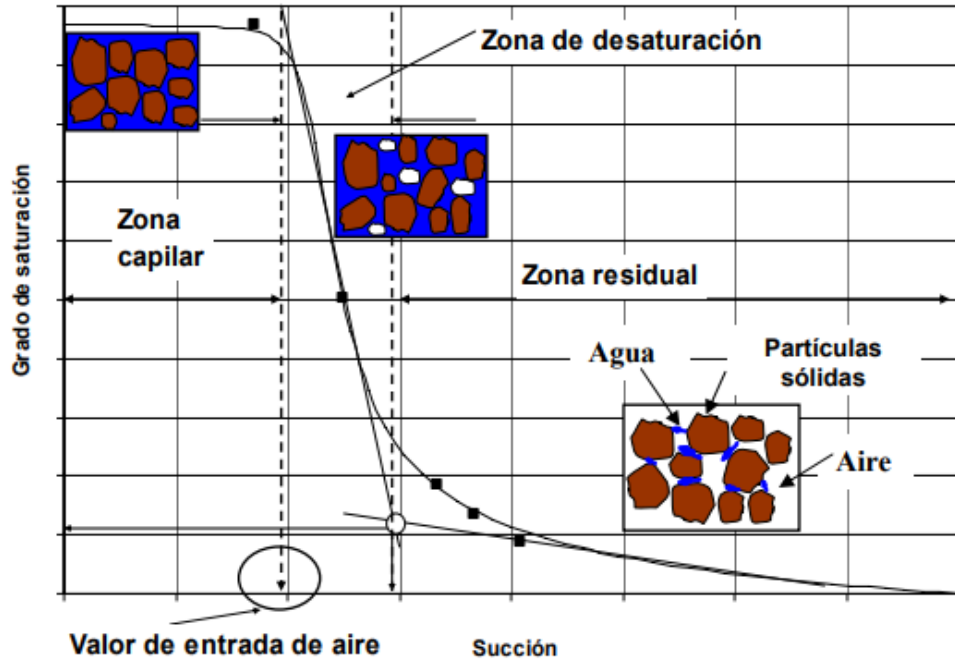
En la figura anterior se observa la curva de retención total de agua de un suelo tipo, la cual muestra además el rango de succión que alcanza a tomar el WP4C.

Debido a que el proyecto se realizó con la intención de medir la succión en rango seco de diferentes muestras de suelos con unas características determinadas, como lo fue una mezcla que garantizara un aumento de succión y a su vez el aumento de los esfuerzos efectivos para mejorar la resistencia de este tipo de suelos arcillosos. El componente que cumplía esta función era las diatomeas, y aunque no haya ensayos guía de este tipo de muestras para observar su comportamiento se predijo lo que quizás podía ocurrir, sin embargo, los resultados fueron diferentes a lo inicialmente pensado.

Como se puede observar en la **Figura 12**. La curva de succión característica de los suelos tiene 3 zonas identificables, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, la primera de estas es cuando el suelo permanece saturado es decir que no pierde humedad, la segunda ocurre cuando existe una interfase aire-agua, estando esta última de manera continua y la tercera hace referencia a cuando el contenido de agua deja de ser continuo y los poros se encuentran en su mayoría ocupados principalmente por aire.

Se comparó la curva de succión que se compuso a través de los datos que se recogieron de los ensayos con un modelo de curva del comportamiento típico de la succión. Según la **Figura 12** la parte de la curva que se realiza con el equipo WP4C es denominada “**Zona de Saturación Residual**” y hace referencia a que en esa zona predomina más el contenido de aire y el contenido de agua es mínimo, como ya se pudo comprobar en la realización de los ensayos.

Figura 15. Regiones típicas de la curva de succión

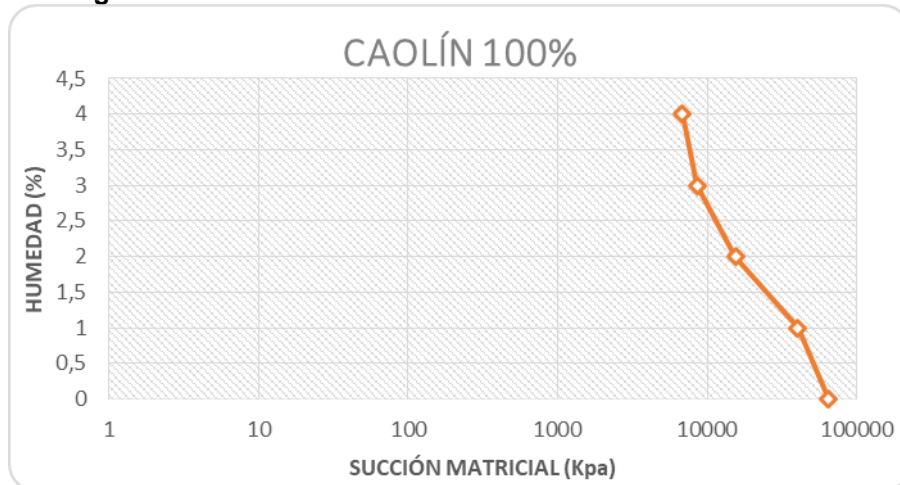


Fuente: Determinación de curvas características en suelos no saturados, Universidad Estatal de Arizona

- Gráficas de los resultados de ensayo en el laboratorio

1. CAOLÍN 100%

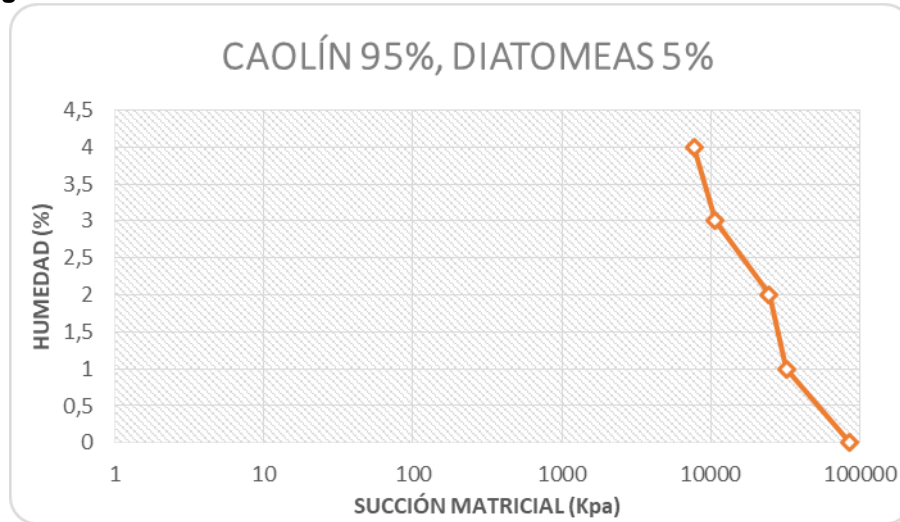
Figura 16. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 100%



Fuente: Elaboración propia.

2. CAOLÍN 95%, DIATOMEAS 5%

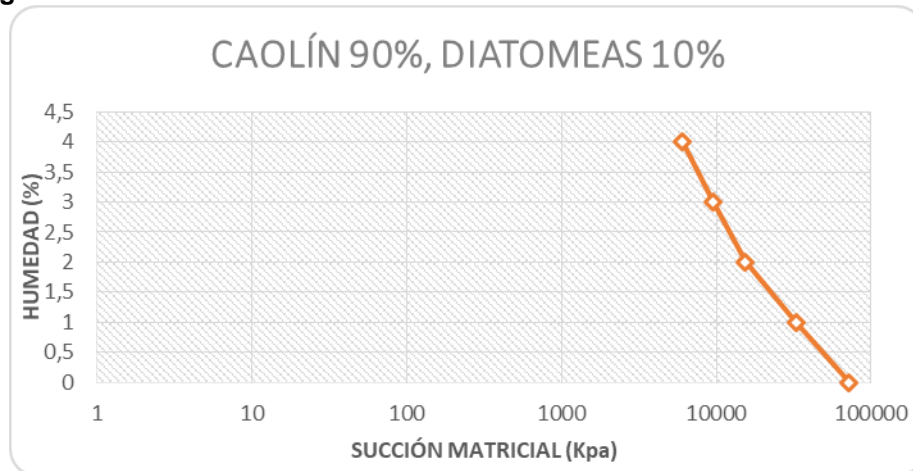
Figura 17. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 95% + Diatomeas 5%



Fuente: Elaboración propia

3. CAOLÍN 90%, DIATOMEAS 10%

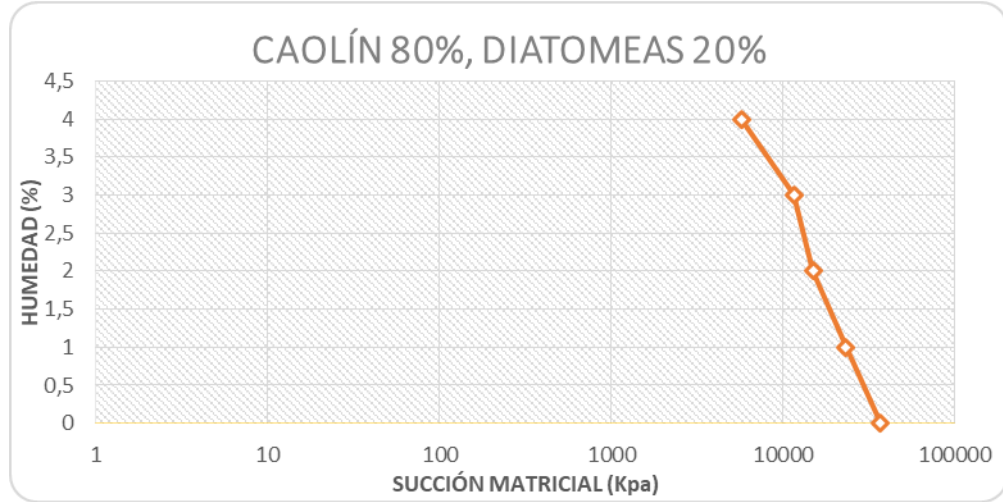
Figura 18. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 90% + Diatomeas 10%



Fuente: Elaboración propia

4. CAOLÍN 80%, DIATOMEAS 20%

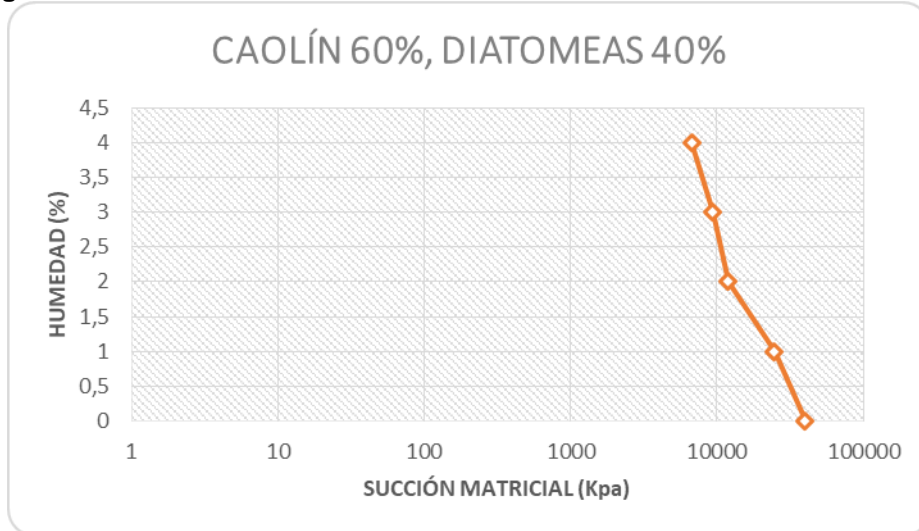
Figura 19. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 80% + Diatomeas 20%



Fuente: Elaboración propia

5. CAOLÍN 60%, DIATOMEAS 40%

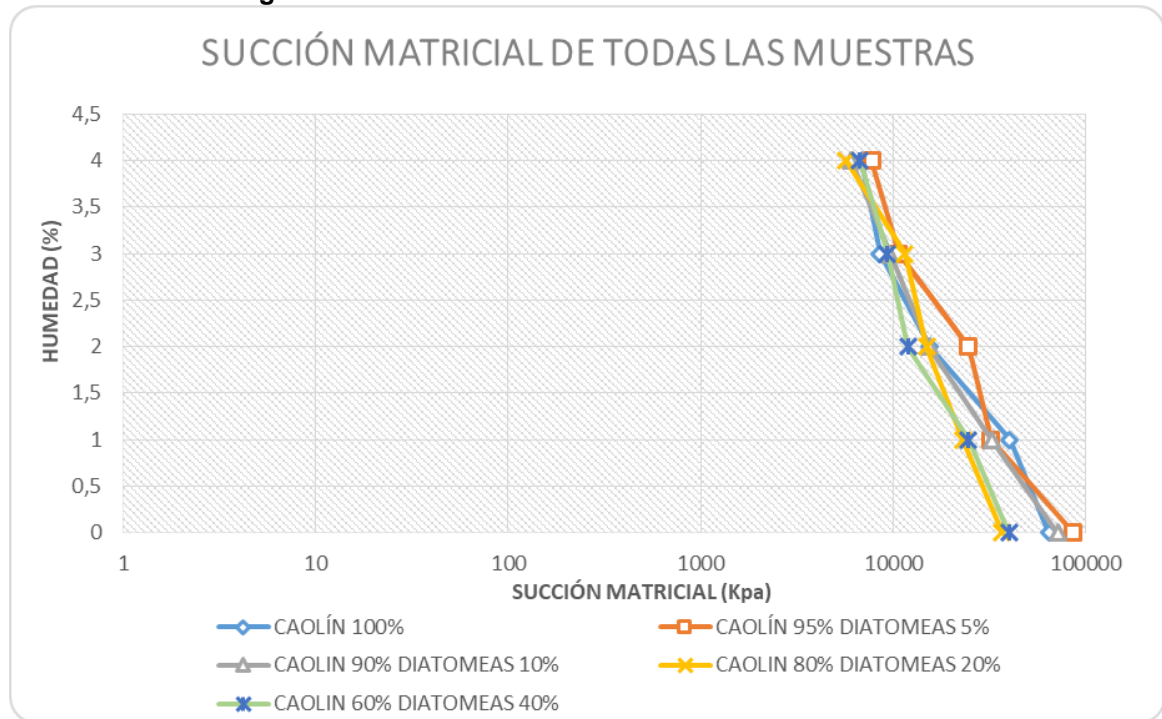
Figura 20. Gráfica Humedad vs. Succión – Muestra: Caolín 60% + Diatomeas 40%



Fuente: Elaboración propia

6. TODAS LAS MUESTRAS

Figura 21. Gráfica Humedad vs. Succión de las 5 Muestras



Fuente: Elaboración propia.

Estas gráficas muestran las mayores succiones posibles para este tipo de suelo, con las humedades más bajas.

Se puede llegar entonces a la conclusión que las curvas de succión que se obtuvieron con las muestras trabajadas, son coherentes con el modelo clásico de una curva de succión, por lo que se asume que dichos ensayos se realizaron de una manera correcta y sin ninguna anomalía.

Hay que tener en cuenta, además, que es posible obtener estos datos faltantes (de humedades mayores al 4%) en donde la succión del suelo se encuentra en la zona de efecto de borde y en parte de la zona de transición, con el Hyprop, equipo con el que también cuenta la universidad y con el cual se están realizando ensayos para este tipo de suelo, en un trabajo de investigación paralelo a este.

Al finalizar el proceso de análisis de resultados con las tablas y gráficas realizadas con cada ensayo, se llega a la conclusión surgida de la pregunta del planteamiento del problema:

¿Cuál es el efecto sobre la succión al adicionar suelos diatomáceos a materiales caoliníticos usando un higrómetro de rocío?

Al parecer al realizar este ensayo en el higrómetro de punto de rocío WP4C con las muestras utilizadas, se puede concluir que al adicionar porcentajes mayores o iguales al 20% de suelo diatomáceo al suelo caolinítico, la succión se ve afectada en el resultado del ensayo disminuyendo, por tal razón se recomienda usar este material en porcentajes menores del 20% para mantener un resultado de succión alta y a su vez aumentar los esfuerzos efectivos como se explicó anteriormente.

CONCLUSIONES

- La succión es una característica muy importante de los suelos, ya que, al tener un resultado alto de succión los esfuerzos efectivos logran aumentarse y de esta manera mejorar la resistencia del suelo, lo cual es una ventaja sobre todo para los suelos de tipo arcilla.
- El trabajo se realizó con el fin de obtener mejores resultados de succión en cuanto más porcentaje tenía de material diatomáceo, pero los resultados que arrojó el equipo se evidenció que la succión disminuye significativamente para los suelos con un contenido mayor al 20% de diatomeas.
- El higrómetro de punto de rocío WP4C es un método tecnológico diferente y mejor a los métodos convencionales, ya que entrega resultados en poco tiempo (10 a 20 minutos) con una mayor precisión, siempre y cuando el suelo no este saturado.
- Para obtener la curva de succión completa de la muestra de suelo, es necesario realizar ensayos con el Hyprop y con el WP4C.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar ensayos con el WP4C y la misma mezcla de suelo con un porcentaje de diatomeas desde el 11% hasta el 19% para definir el límite donde se pierde el buen comportamiento de la succión con dicho material.
- Al realizar un ensayo con el equipo WP4C se recomienda calibrarlo antes de usarlo y comprobar la temperatura ambiente en la que se encuentra para ingresar ese mismo valor al equipo y de esta manera de resultados rápidos y coherentes.
- No utilizar porcentajes de humedad (agua en la muestra) mayores al 4% ya que el equipo mide en rango seco y al colocar la muestra a leer, el equipo no va a arrojar un resultado entre los -0.1 MPa y -300 MPa.

REFERENCIAS

A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated. **Yunquan Wang, Jinzhu Ma, Yali Zhang, Menzhu Zhao and W. Mike Edmunds. 2013.** 5021–5028, s.l. : WATER RESOURCES RESEARCH, 2013, Vol. 49.

Advanced Soil Hydrological Studies in Different Scales for Sustainable Agriculture. **Uwe Schindlera, Lothar Muellera, Georg von Unoldb, Frank Eulensteina, Wolfgang, Durner, Johann Fank. 2016.** Muencheberg, Alemania : Procedia, 2016.

Arntzen, Daniela. 2014. <http://exa.unne.edu.ar>. [Online] 2014. [Cited: mayo 15, 2019.] <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/guiadeestudio-Impdelaguaymedpotencialhidrico.pdf>.

Biochemistry & Molecular Biology of Plants. **B. Buchanan, W. Gruissem, R. Jones. 2000.** s.l. : American Association of Plant Physiologists, 2000.

BREIDY JULIETH PARRADO MORERA, JULIETH TATIANA TOLOZA CALDERÓN. 2017. *DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA EN SUELOS CAOLINÍTICOS Y BENTONÍTICOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ADSORCIÓN DE AGUA DESTILADA APLICANDO DIFERENTES GRADIENTES TÉRMICOS.* BOGOTÁ D.C. : s.n., 2017.

Bucio, Mauricio Barrera and Anguas, Paul Garnica. 2002. *INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS NO SATURADOS EN VÍAS TERRESTRES.* México : Sanfandila, Qro, 2002.

Campbell, GS y S. Shiozawa. 1992. *“Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data.” Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils.* . Riverside : University of California, 1992.

D5298-16, ASTM. 2016. *Método de prueba estándar para la medición del potencial del suelo (succión) utilizando papel de filtro.* West Conshohocken : ASTM, 2016.

Díaz, Laura Karina Sánchez. 2015. *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE HUMEDAD EN GEO-MATERIALES INTERMEDIOS SOMETIDOS A DIFERENTES NIVELES DE ESTRÉS TÉRMICO.* Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana, 2015.

Estimation of Effective Stress From Bishop's Parameter χ for a Silty Sand. **Julio César Leal Vaca, Gustavo Gallegos Fonseca, Eduardo Rojas González. 2013.** s.l. : Ingeniería, Investigación y Tecnología, 2013, Vol. 14.

Garcia, N Perez. 2008. *Determinacion de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión.* s.l. : Publicación Técnica, 2008.

García, Natalia Pérez. 2008. *DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN SUELOS NO SATURADOS CON CELDAS DE PRESIÓN.* Arizona : SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE , 2008.

Garrido, José Alfredo Zepeda. 2004. *Mecánica de suelos no saturados.* s.l. : Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2004.

Graff, Pamela. agro.uba.ar. [Online] [Cited: mayo 15, 2019.]
<https://www.agro.uba.ar/users/batista/EE/papers/potencial%20hidrico.pdf>.

Humedad de Equilibrio y Succión en. **CORONADO J., ROA C. Y RUIZ G. 1987.** BOGOTA : Universidad Nacional de Colombia, 1987.

Inc, Meter Group. 2018. Decagon. [Online] 04 16, 2018. [Cited: 04 19, 2018.]
http://manuals.decagon.com/Manuals/13588_WP4C_Web.pdf.

INTERNATIONAL, ICT. 2018. ictinternational.com. [Online] 04 16, 2018. [Cited: 09 19, 2018.]
<http://www.ictinternational.com/products/wp4c/wp4c-water-potential-meter/>.

INVÍAS. 2013. *Determinacion de la succion de un suelo con el metodo del papel filtro.* s.l. : INVE E-159, 2013.

M.D. Fredlund, G.W. Wilson. 2002. *Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve.* s.l. : Canadian Geotechnical Journal, 2002.

Mañas. 2005. *Agua y agronomía.* s.l. : Mundi-Prensa Libros, 2005.

METER Group, Inc. 2018. *WP4C Dew Point PotentiaMeter.* Pullman WA : Operator's Manual, 2018.

Método para la determinación de la humedad en suelos granulares utilizando horno microondas.

Fernando Alberto Nieto Castañeda, Claudia Patricia Gámez Camargo, Diana Lorena Hilarión Plazas. 2008. 23-31, Bogotá : Revista Épsilon, 2008, Vol. 10.

Método para la determinación de los periodos de riego en el cultivo del sorgo. **V., GERMAN MENDOZA R. HENRY AVILA G. EDGAR FIGUEROA. 1991.** s.l. : Ingenieria agricola, 1991.

Navas, Juan Sebastian Ramirez. 2006. *Liofilización.* Cali : Universidad del Valle, 2006.

Soil water improvements with the long-term use of a winter rye covercrop. **Andrea RE. Basche, Thomas C. Kaspar , Sotirios V. Archontoulis, Dan B. Jaynes, Thomas J, Timoteo B. Parkin, Fernando E. Miguez. 2016.** Iowa : Agricultural Water Management, 2016.

Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria. **Ochoa, Victoria Elena Meza. 2012.** s.l. : bdigital PORTAL DE REVISTAS UN, 2012.

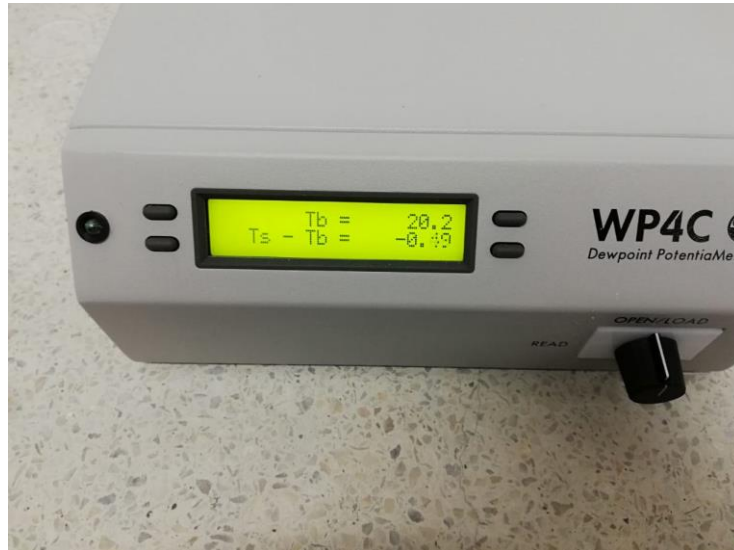
Torres, Jorge Ernesto Arias. 2005. *Analisis del Desempeño Térmico de un Colector de Rocío Atmosférico.* México D.F : Instituto Politécnico Nacional, 2005.

Turner, J. P. 2006. *Rock-socketed shafts for highway structure foundations.* s.l. : Transportation Research Board, 2006.

ANEXOS

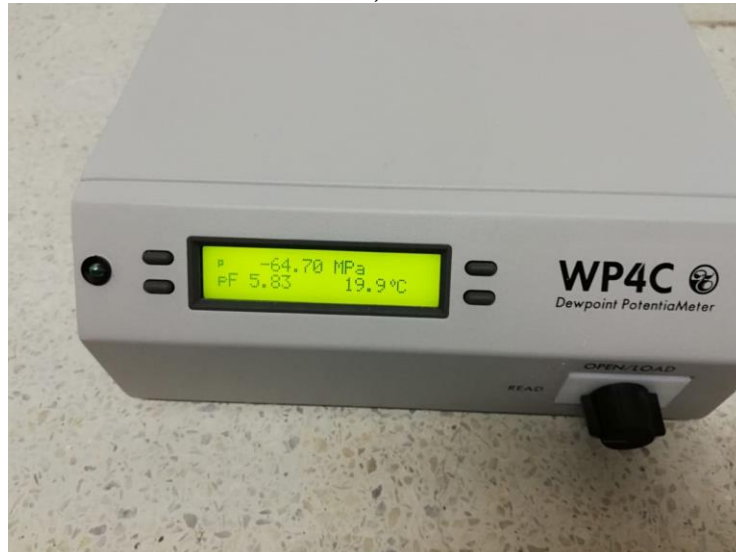
- **CAOLÍN 100%:**

Figura 22. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 0% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 0% Humedad



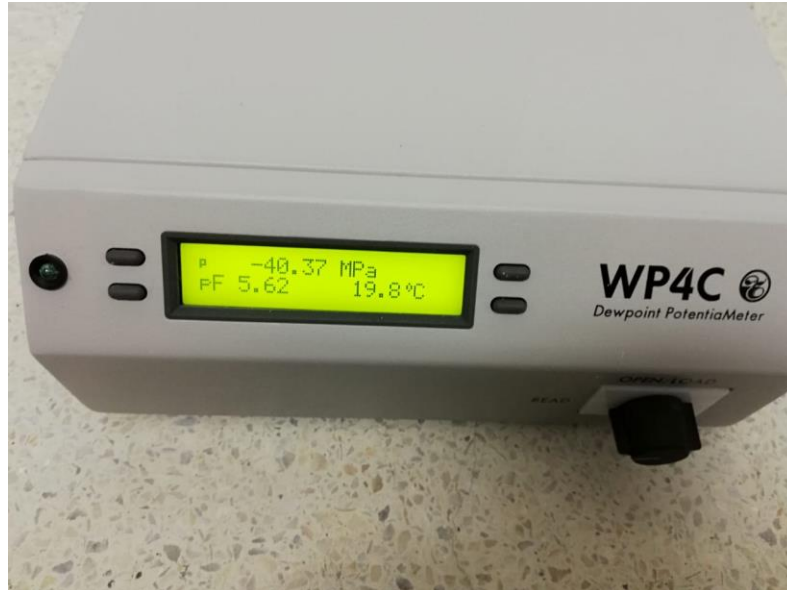
Fuente: Elaboración propia

Figura 24. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 1% Humedad



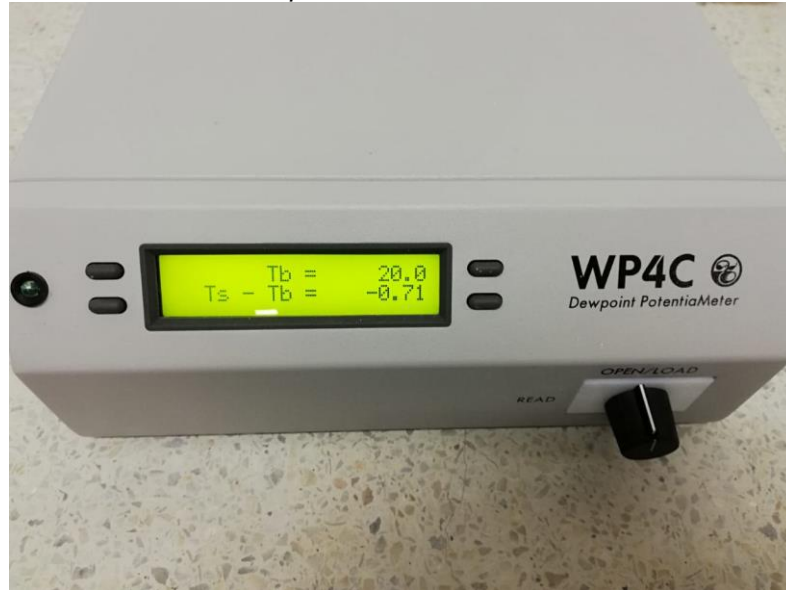
Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 1% Humedad



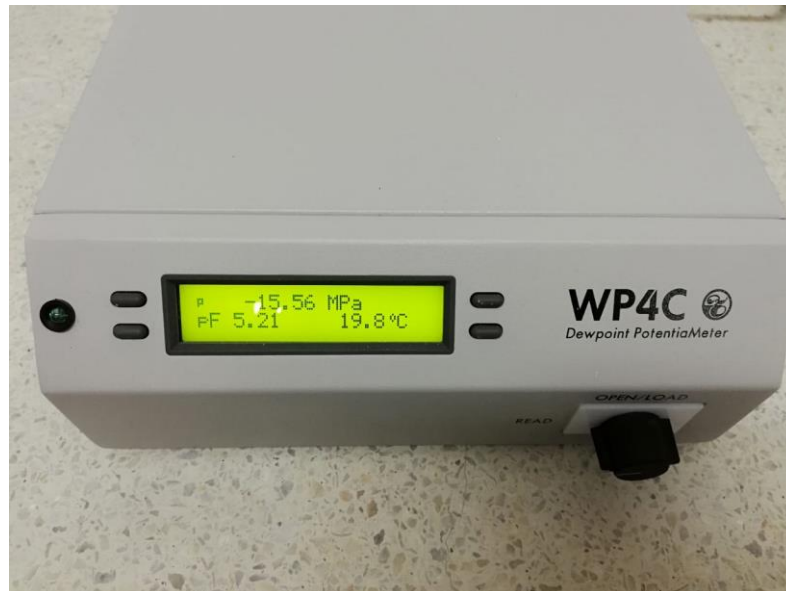
Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 2% Humedad



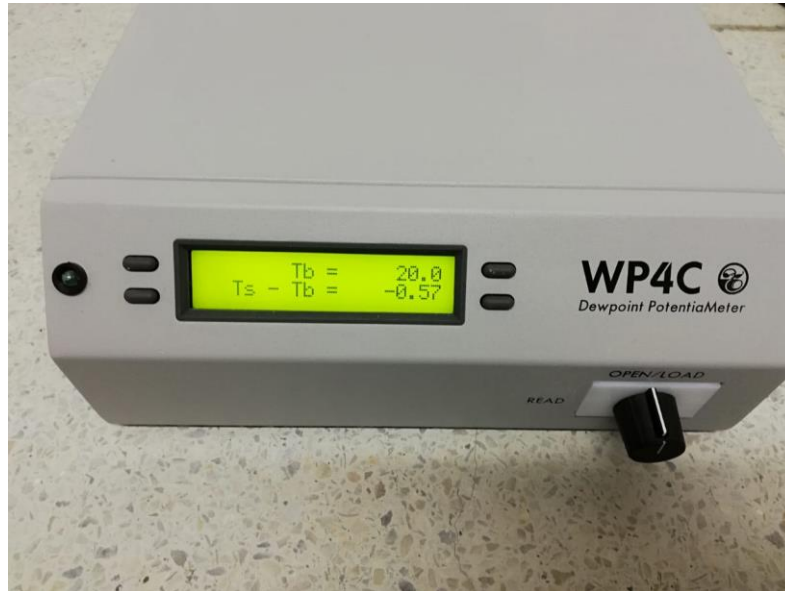
Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 2% Humedad



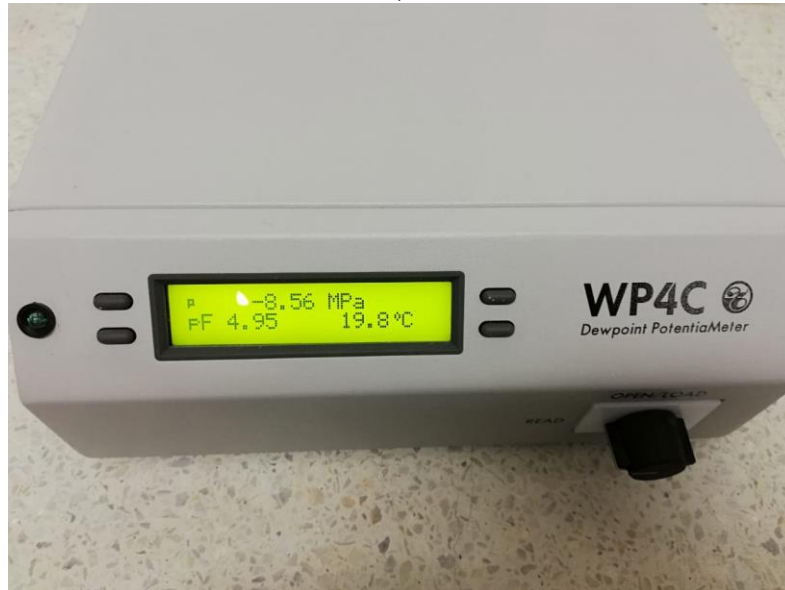
Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 3% Humedad



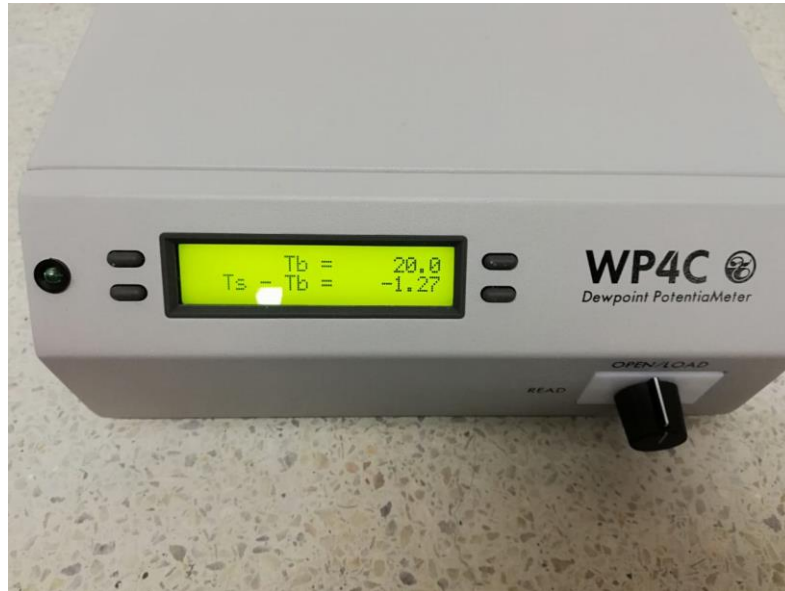
Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 3% Humedad



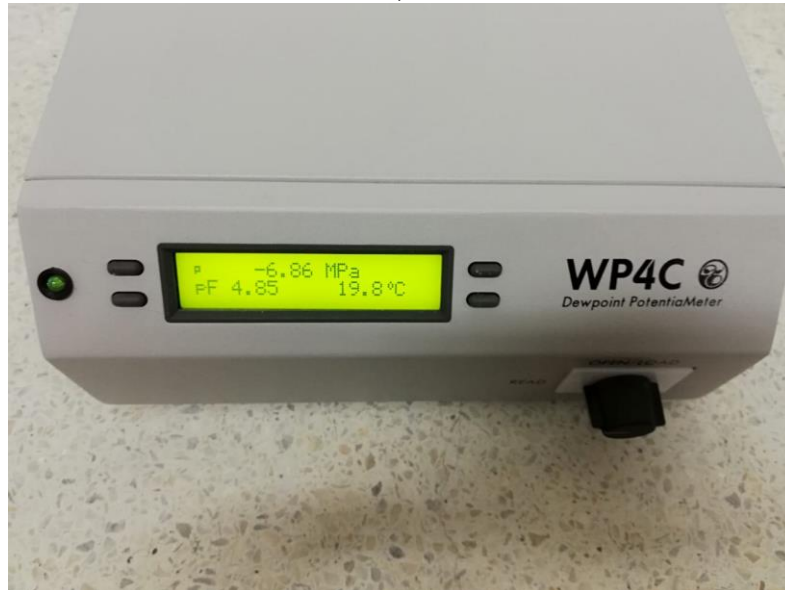
Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Diferencia de temperatura, Muestra: 100% Caolín + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

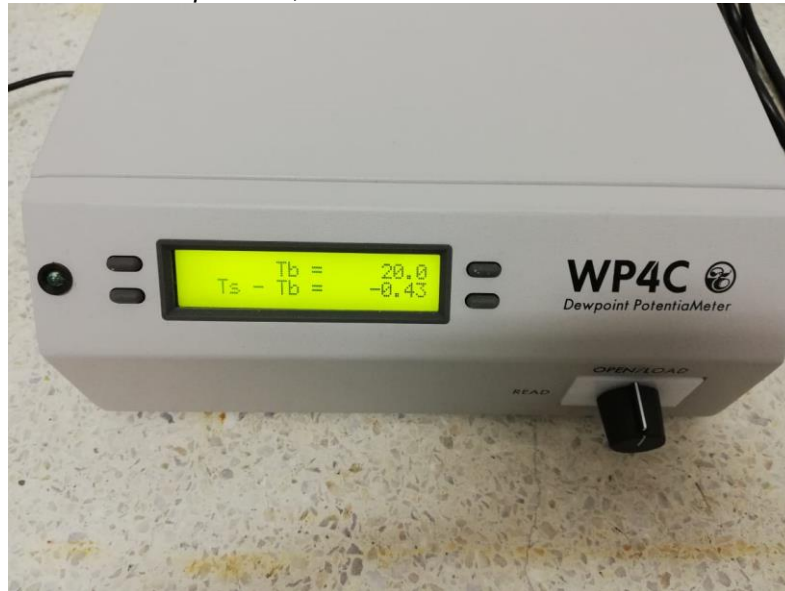
Figura 31. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 100% Caolín + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

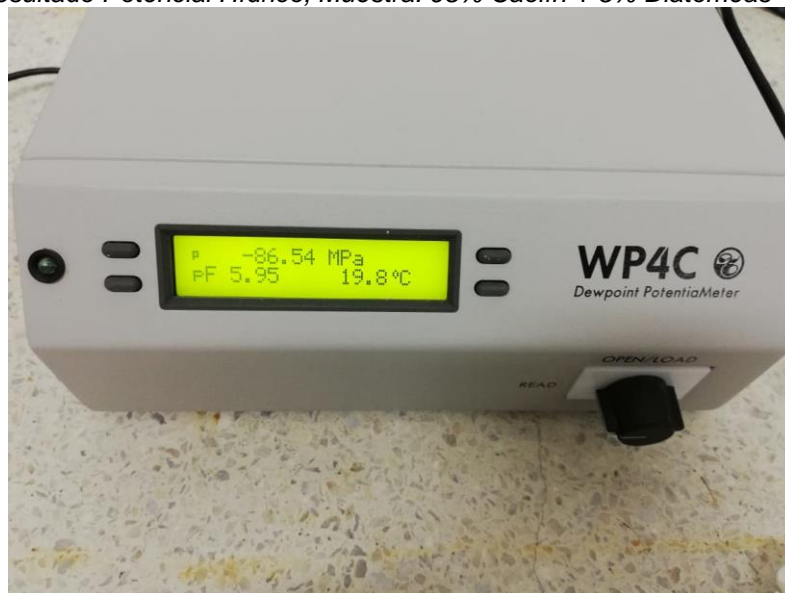
- **CAOLÍN 95%, DIATOMEAS 5%**

Figura 32. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 0% Humedad



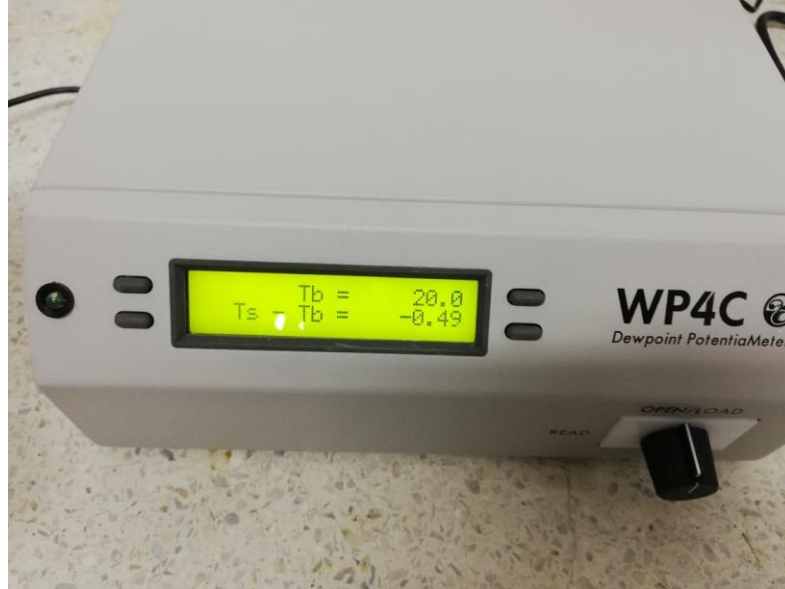
Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 0% Humedad



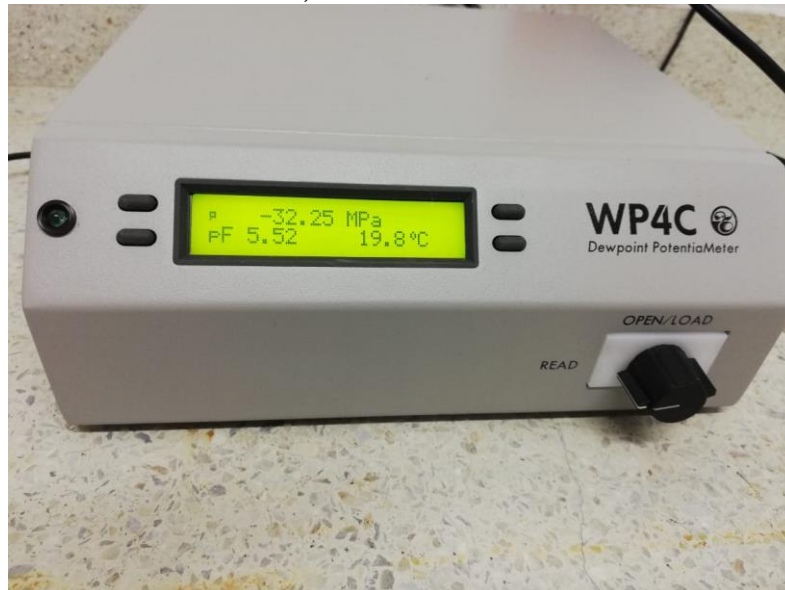
Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 1% Humedad



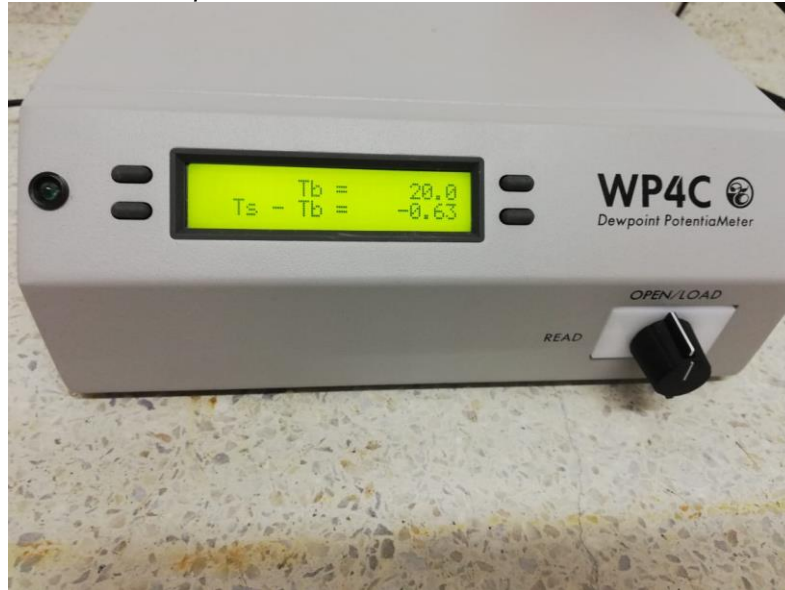
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 1% Humedad



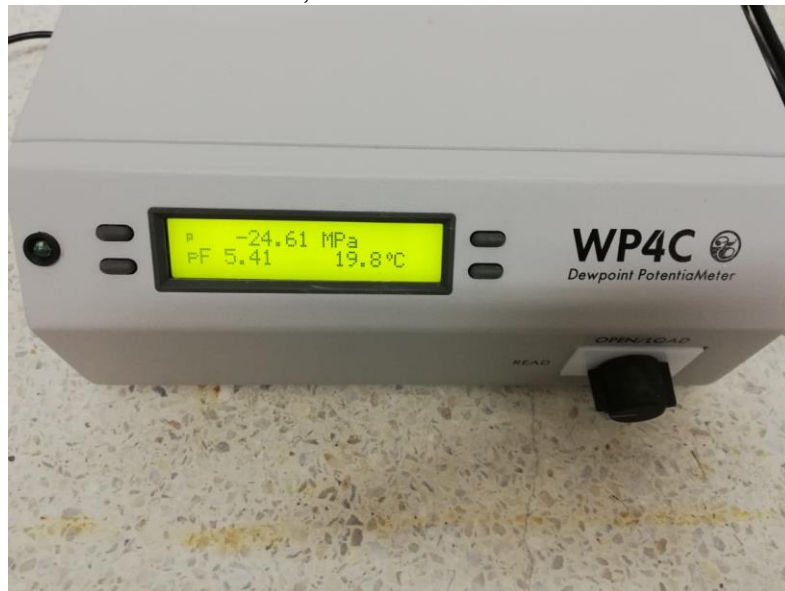
Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 2% Humedad



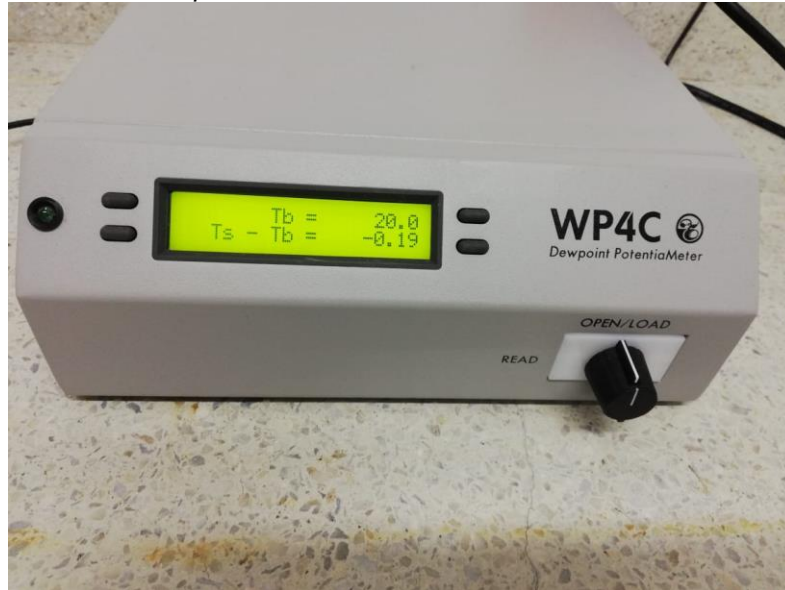
Fuente: Elaboración propia

Figura 37. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 2% Humedad



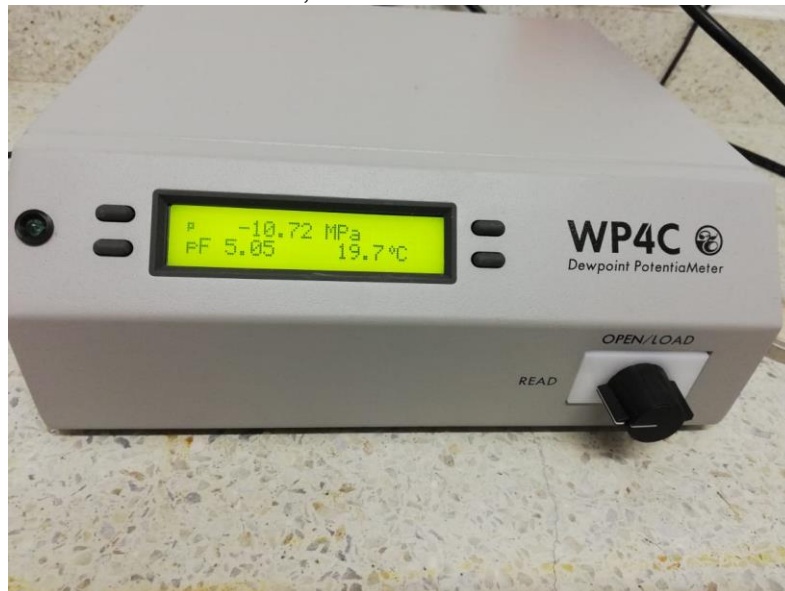
Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 3% Humedad



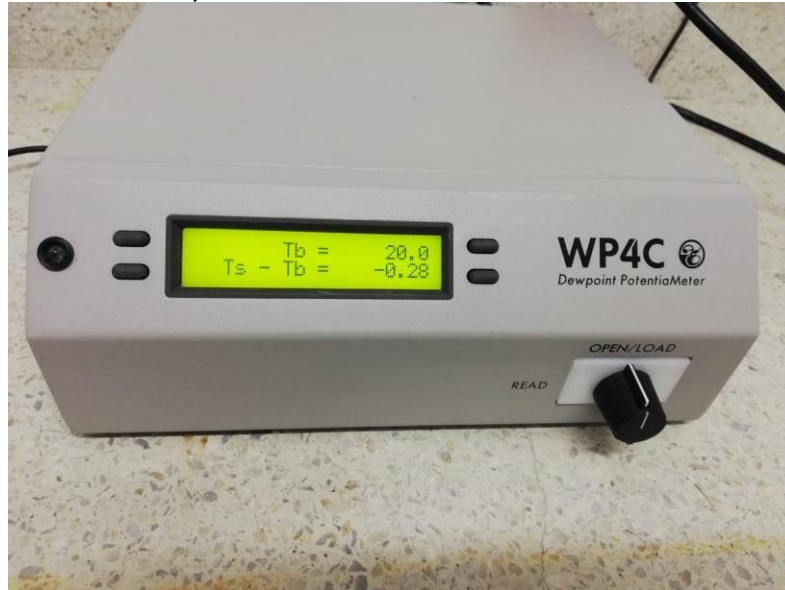
Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 3% Humedad



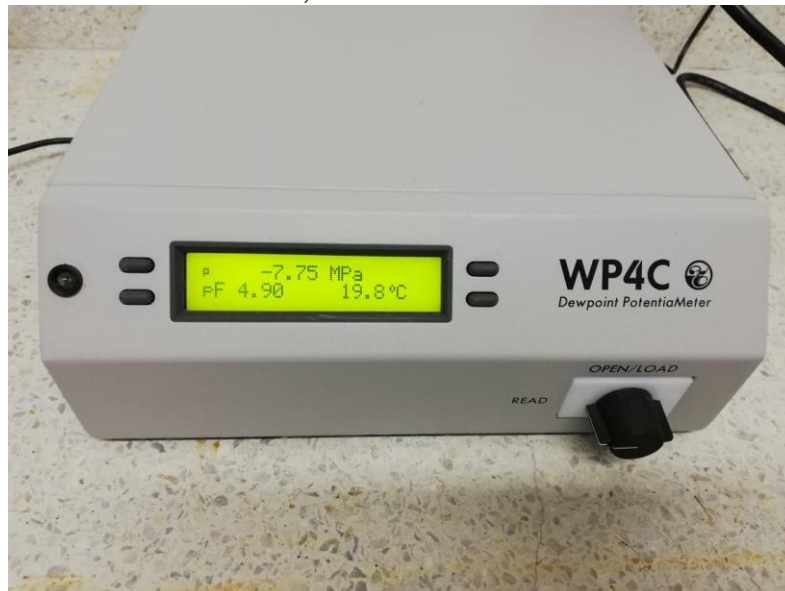
Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Diferencia de temperatura, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 41. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 95% Caolín + 5% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

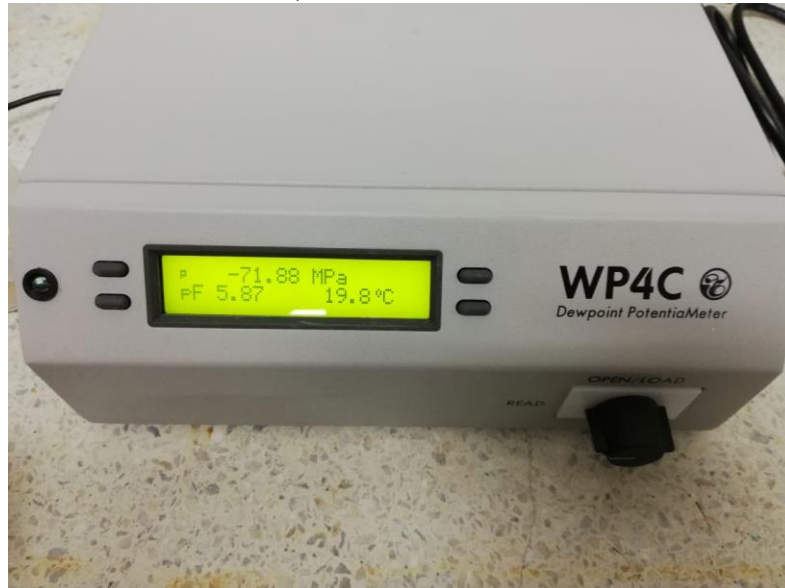
- **CAOLÍN 90%, DIATOMEAS 10%**

Figura 42. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 0% Humedad



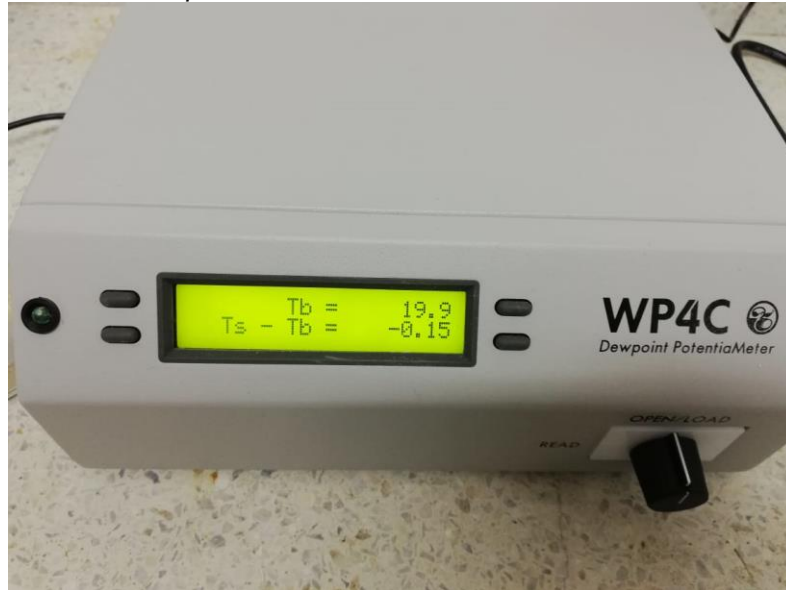
Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 0% Humedad



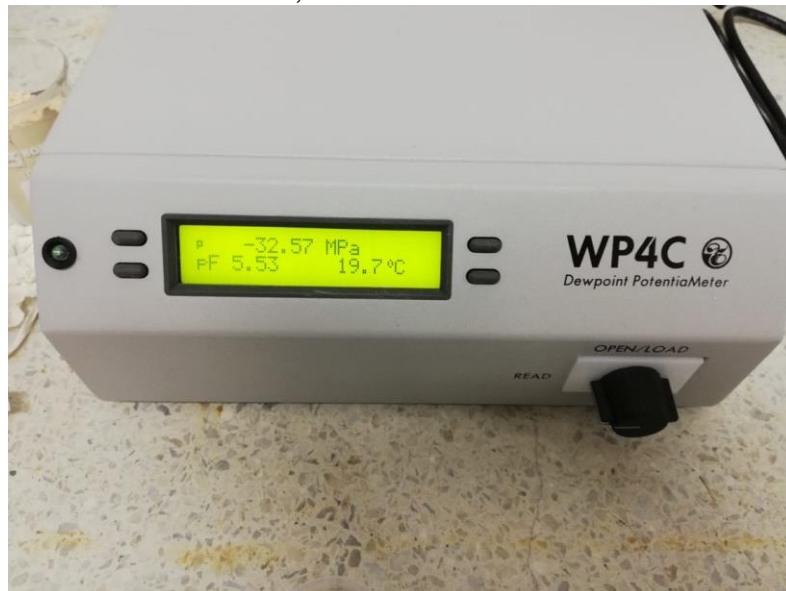
Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 1% Humedad



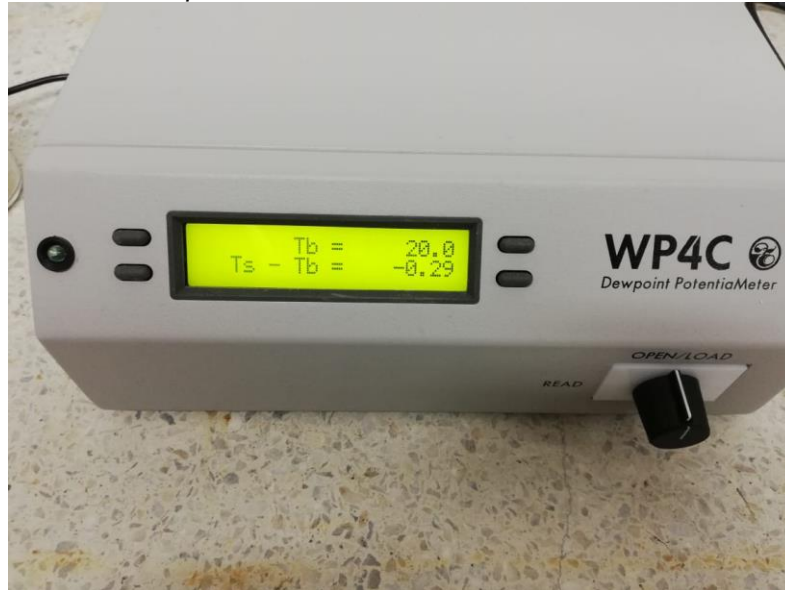
Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 1% Humedad



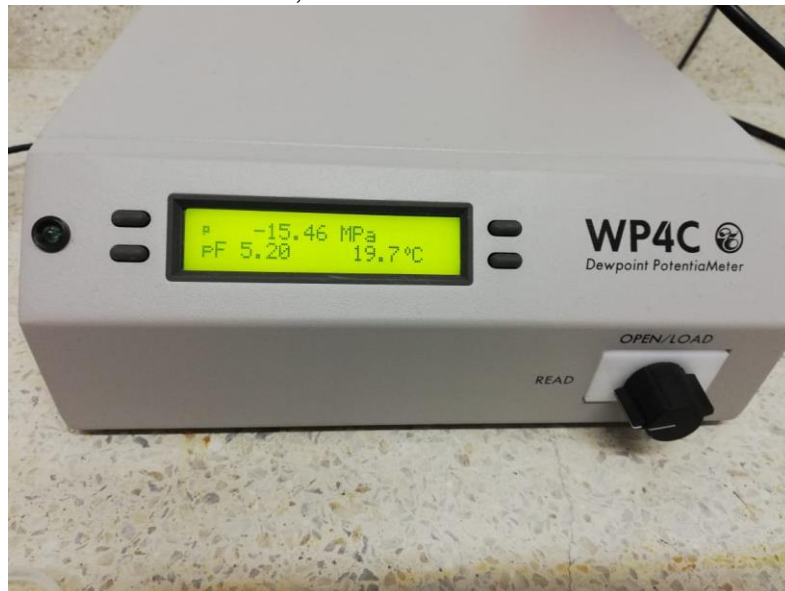
Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 2% Humedad



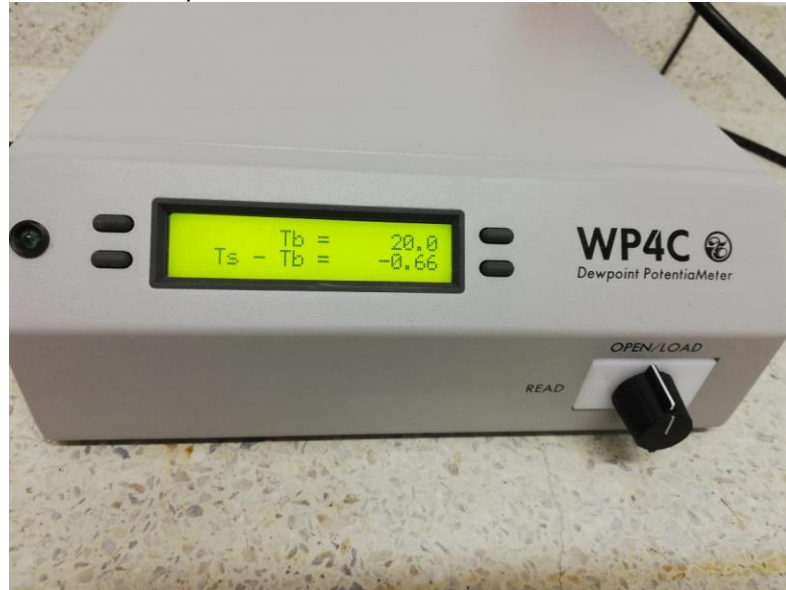
Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 2% Humedad



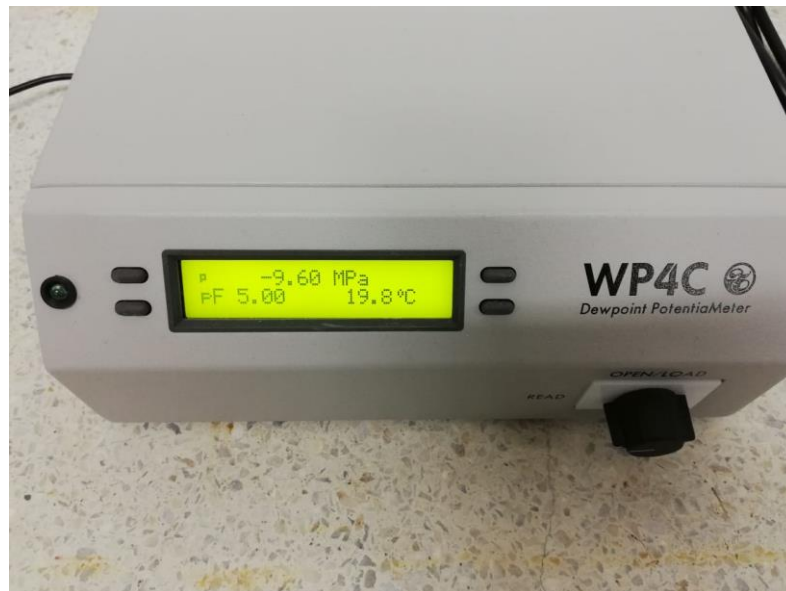
Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 3% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 3% Humedad



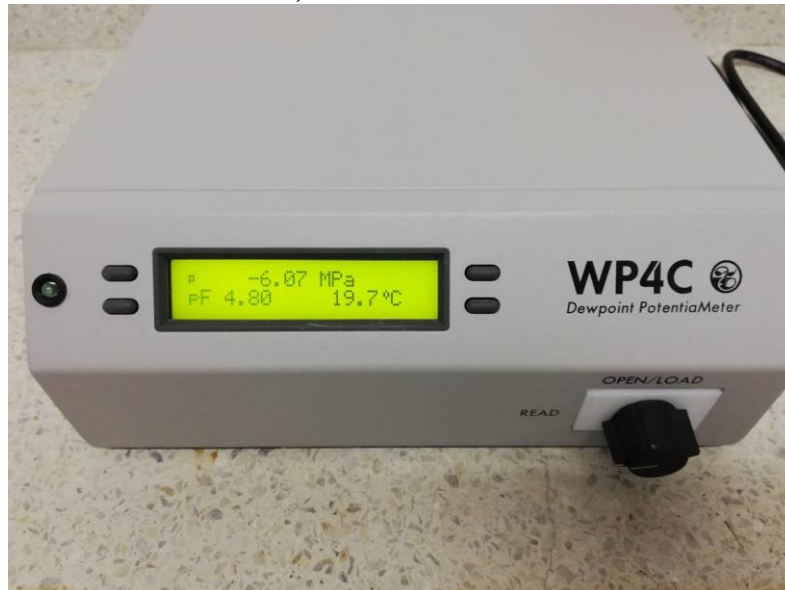
Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Diferencia de temperatura, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 90% Caolín + 10% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

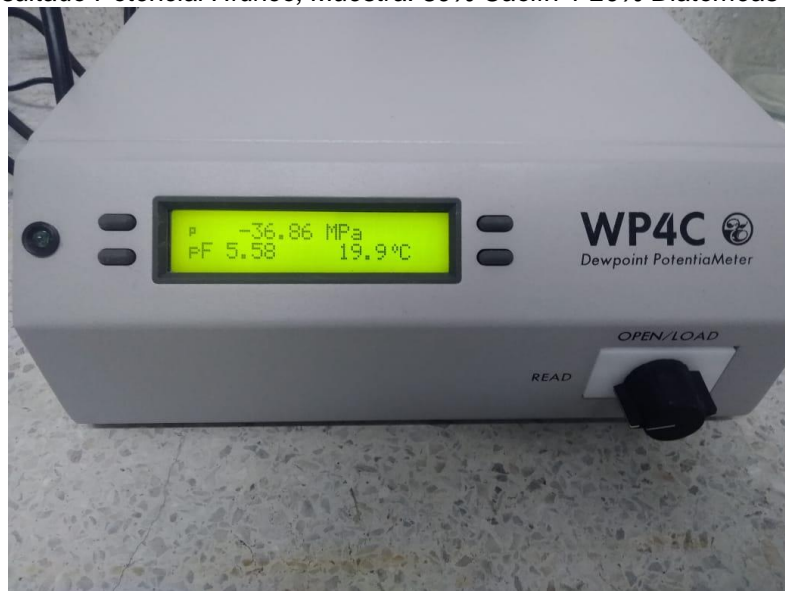
- CAOLÍN 80%, DIATOMEAS 20%

Figura 52. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 0% Humedad



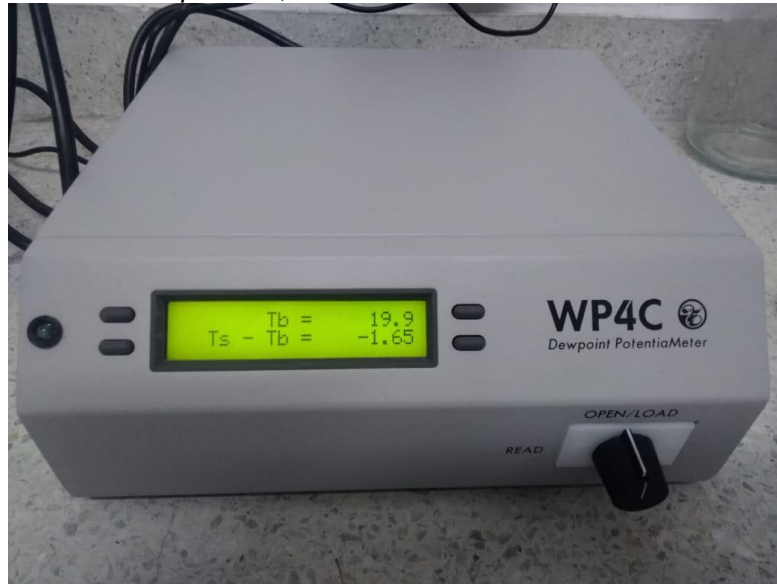
Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 0% Humedad



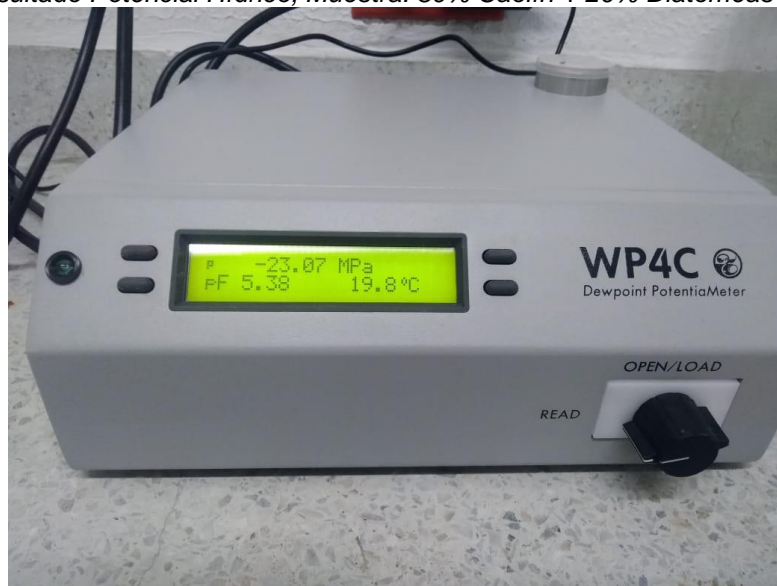
Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 1% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 55. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 1% Humedad



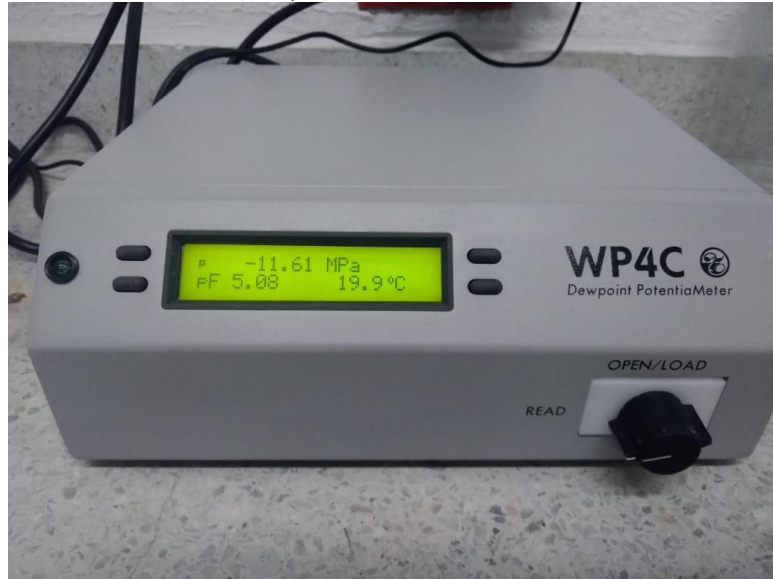
Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 2% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 2% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 3% Humedad



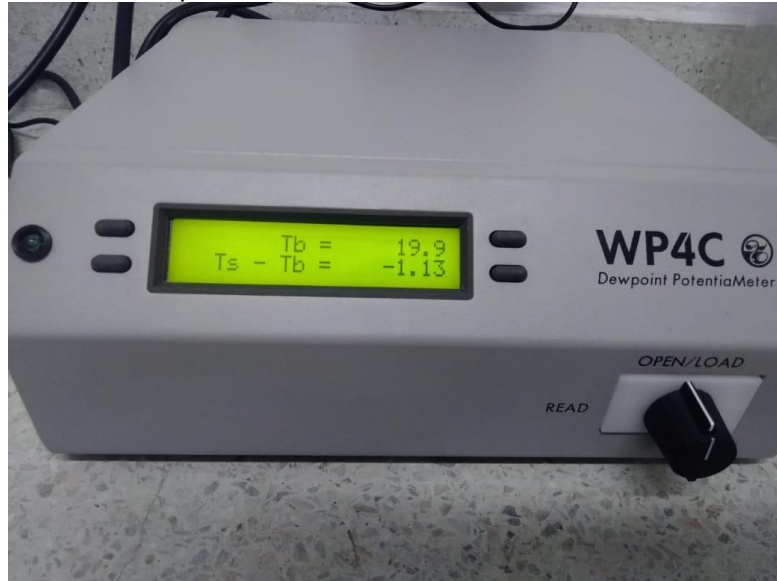
Fuente: Elaboración propia

Figura 59. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 3% Humedad



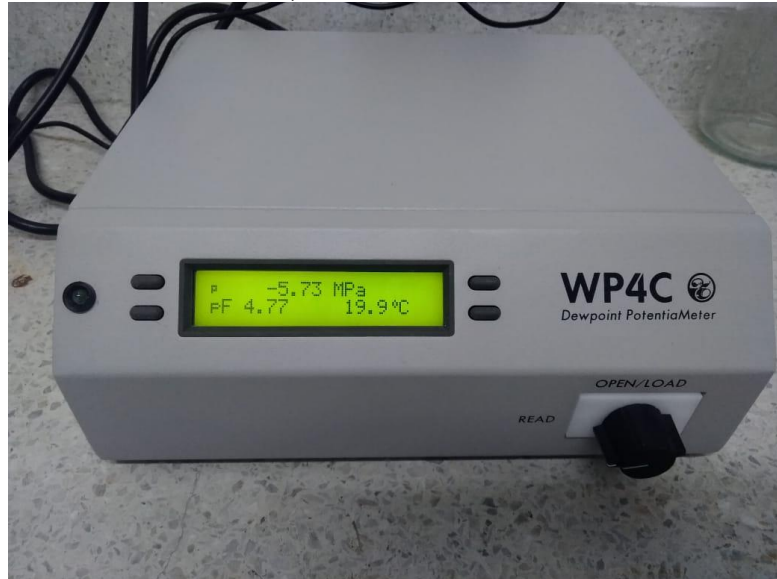
Fuente: Elaboración propia

Figura 60. Diferencia de temperatura, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

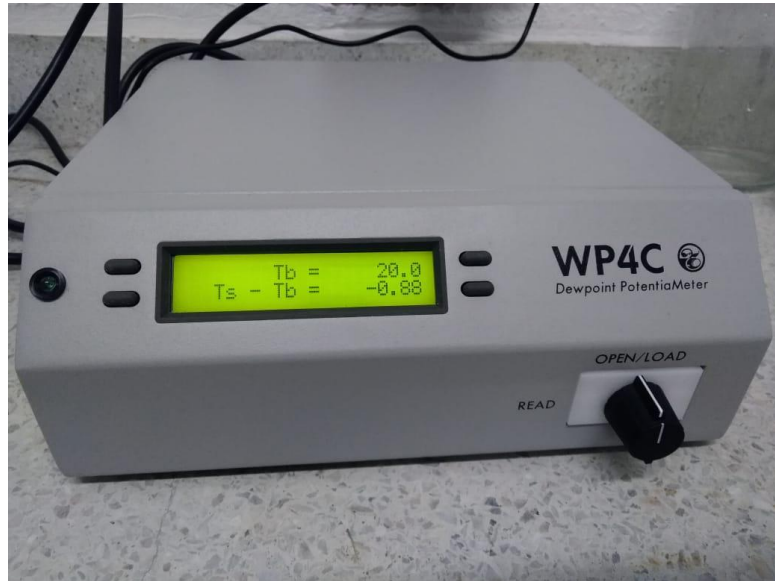
Figura 61. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 80% Caolín + 20% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

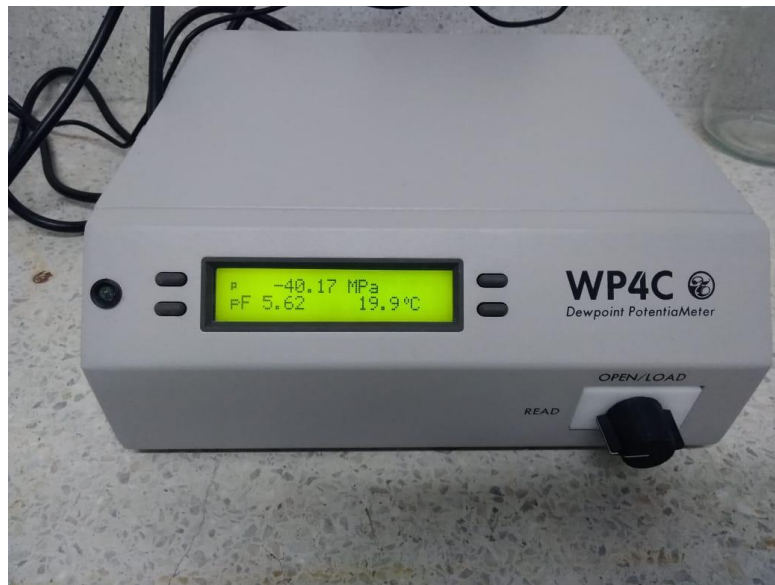
- CAOLÍN 60%, DIATOMEAS 40%

Figura 62. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 0% Humedad



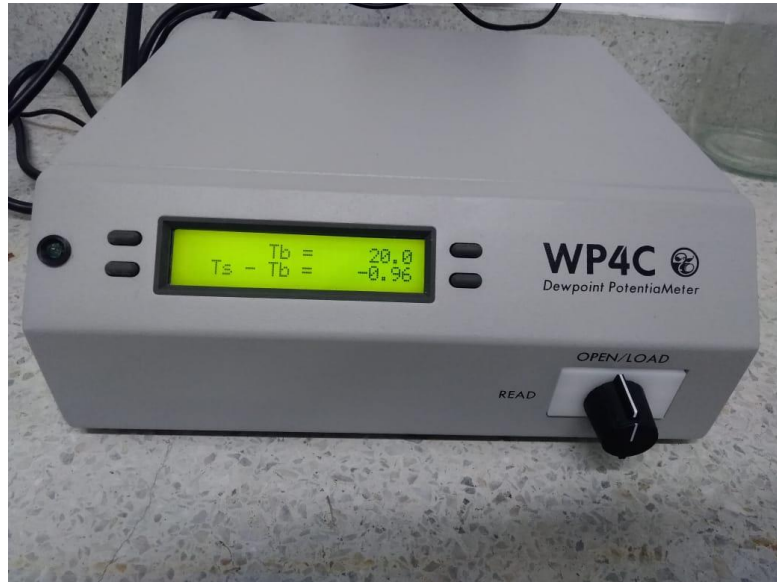
Fuente: Elaboración propia

Figura 63. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 0% Humedad



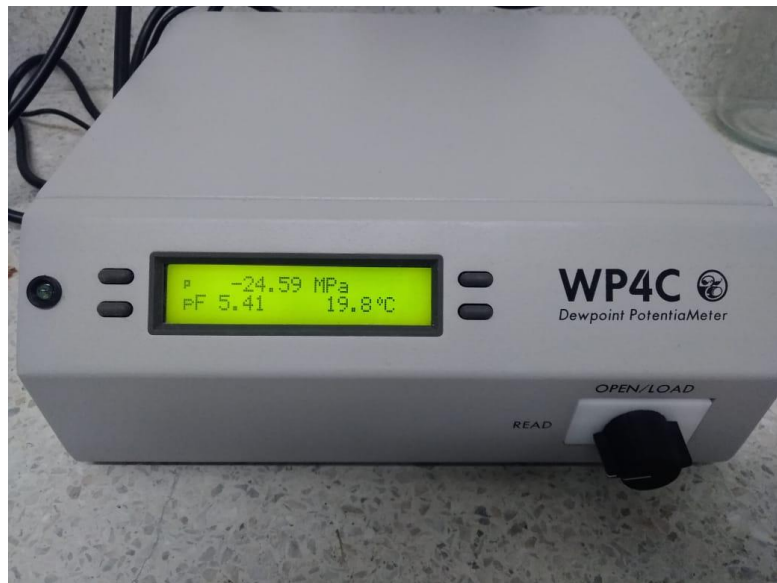
Fuente: Elaboración propia

Figura 64. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 1% Humedad



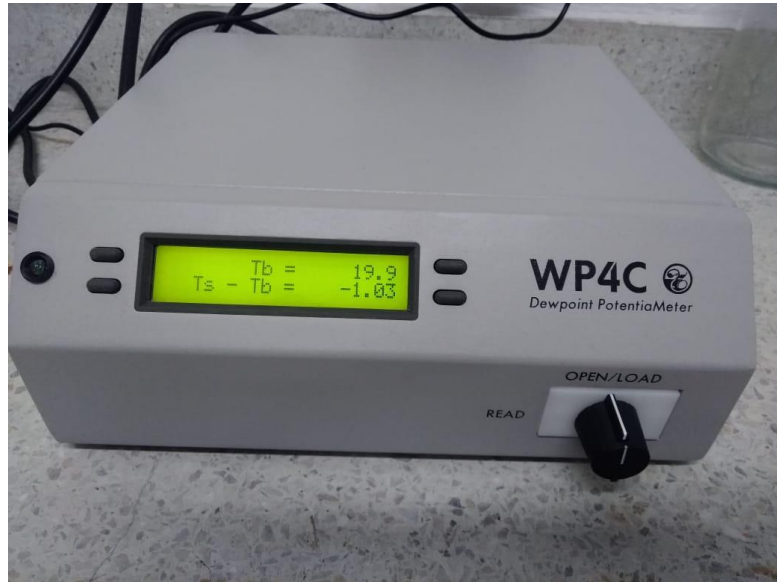
Fuente: Elaboración propia

Figura 65. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 1% Humedad



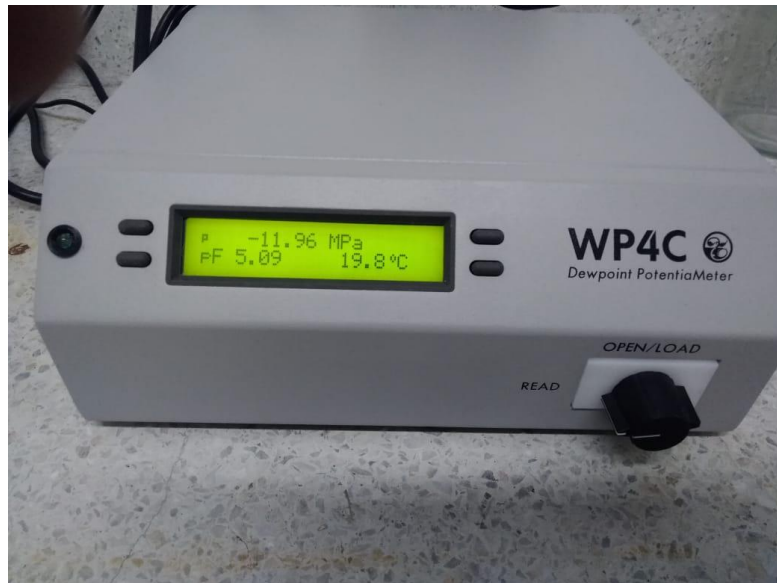
Fuente: Elaboración propia

Figura 66. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 2% Humedad



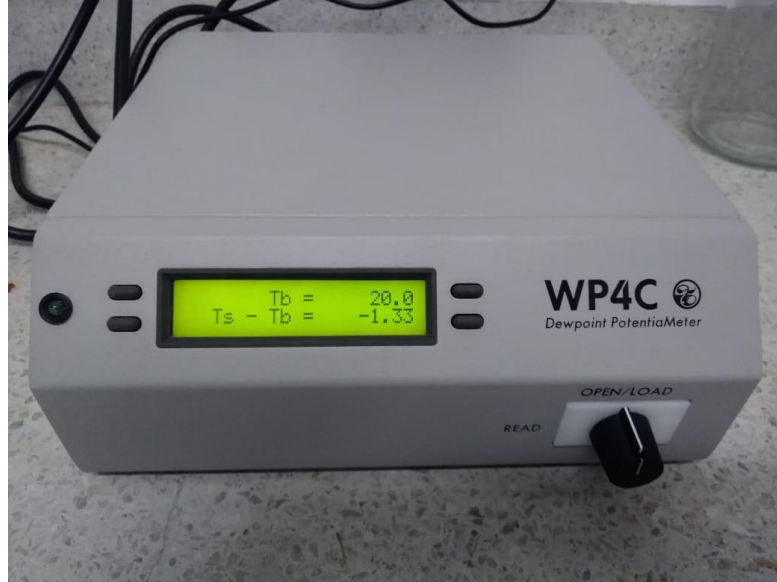
Fuente: Elaboración propia

Figura 67. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 2% Humedad



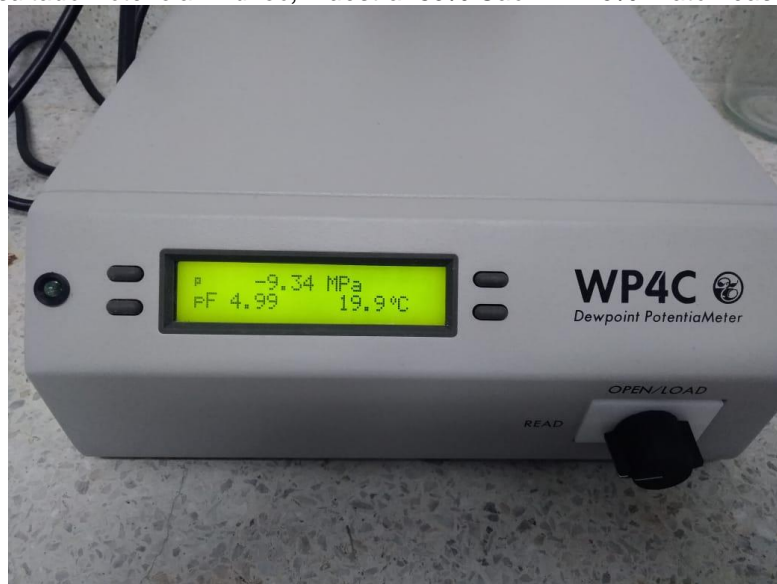
Fuente: Elaboración propia

Figura 68. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 3% Humedad



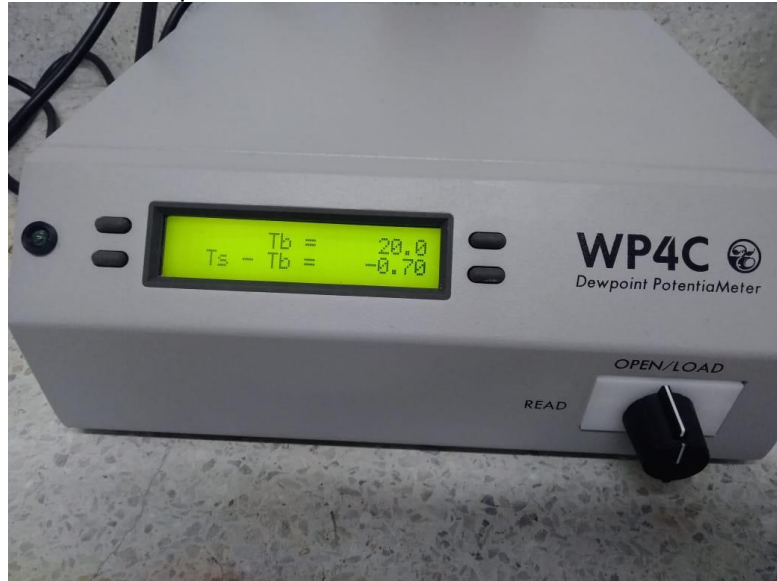
Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 3% Humedad



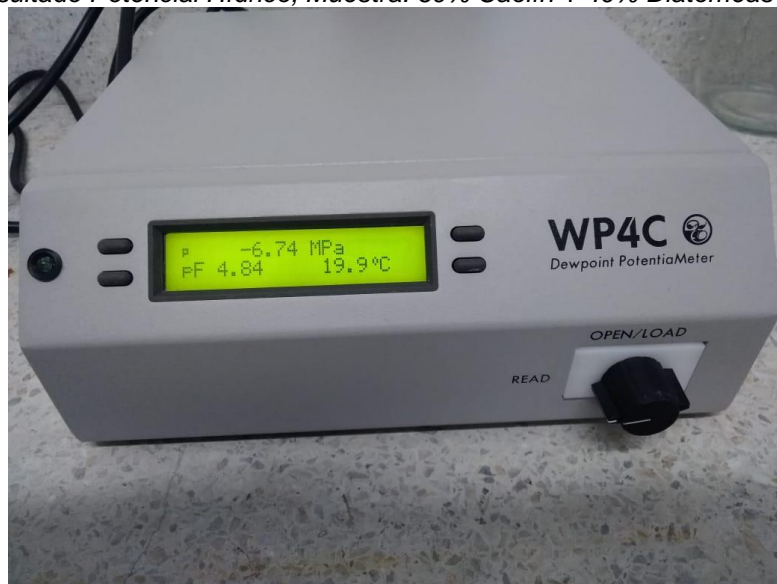
Fuente: Elaboración propia

Figura 70. Diferencia de temperatura, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia

Figura 71. Resultado Potencial Hídrico, Muestra: 60% Caolín + 40% Diatomeas + 4% Humedad



Fuente: Elaboración propia