

**ELABORACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA DE
ALGUNOS SUELOS A PARTIR DE PROPIEDADES ÍNDICE**

CÉSAR ALEJANDRO FRESNEDA SALDARRIAGA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLIN

FACULTAD DE MINAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**ELABORACIÓN DE LA CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA DE
ALGUNOS SUELOS A PARTIR DE PROPIEDADES ÍNDICE**

**ELABORATION OF THE SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE OF
SOME SOILS FROM INDEX PROPERTIES**

CÉSAR ALEJANDRO FRESNEDA SALDARRIAGA

**Tesis de investigación presentada como requisito parcial para
optar al título de:**

Magister en Ingeniería – Geotecnia

Directora: DSc. Yamile Valencia González

Codirector: MSc. Oscar Echeverri Ramírez

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE MINAS

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

MEDELLIN

2019

CONTENIDO

CONTENIDO	3
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE FIGURAS	4
1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	15
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos Específicos	16
3. MARCO TEÓRICO	16
4. METODOLOGÍA	25
4.1. Programa De Trabajo	25
4.2. Recopilación de la información disponible	27
4.3. Selección del Modelo de trabajo	39
4.4. Determinación de la curva característica con modelo de Durner	54
4.5. Validación del modelo.....	93
4.5.1. Validación con suelos de la base de datos	93
4.5.2. Validación con suelos adicionales	98
4.6. Evaluación en el modelo de Perera y Zapata 2005.....	101
5. CONCLUSIONES	116
6. REFERENCIAS	118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sectores y sus propiedades índice	27
Tabla 2. Caracterización geológica y geomorfológica.....	34
Tabla 3. Coeficientes de Correlación (R^2).....	51
Tabla 4. Mejor ajuste según la base de datos	53
Tabla 5. Parámetros ajuste modelo Durner.....	56
Tabla 6. Relaciones determinadas entre propiedades índice.	71
Tabla 7. Diferencia Promedio y Límite líquido de los diferentes sitios.....	89
Tabla 8. Parámetros modelo Durner, previa aplicación de propuesta de calibración.....	91
Tabla 9. Sitios seleccionados aleatoriamente para definir propuesta de validación.....	93
Tabla 10. Diferencia Promedio y Límite líquido de los sitios escogidos para validación.....	97
Tabla 11. Propiedades índice Suelo Granizal	99
Tabla 12. Propiedades índice Suelo Granizal	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zonas de la SWCC. Modificado de Camapum (2015)	18
Figura 2. SWCC representativa según el tipo de material. (Modificado de Meza 2012)	19
Figura 3. SWCC con tendencia bimodal. (Modificado de Camapum 2015)	20
Figura 4. Curvas de retención de agua con base en el D60 Y WPI (Zapata,1999)	24
Figura 5. Ubicación de los sitios de la base de datos.....	32
Figura 6. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Barbosa (Sup iza), Caldas 1(Sup der), Caldas 2(Inf iza) y Caldas 3 (inf der).....	42
Figura 7. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. El Volador 1 (Sup iza), El Volador 2 (Sup der), El Volador 3(Inf iza) y Nutibara1 (inf der).....	43
Figura 8. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Nutibara2 (Sup iza), Nutibara 3 (Sup der), El Santuario 1(Inf iza) y El Santuario 2 (inf der).	44

Figura 9. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Fac Minas (Sup izq), Girardota 1 (Sup der), Girardota 2(Inf izq) y Guarne 1 (inf der).	45
Figura 10. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Guarne 2 (Sup izq), Indural 1 (Sup der), Indural 2(Inf izq) e Indural 3 (inf der).....	46
Figura 11. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Itagüí 1 (Sup izq), Itagüí 2 (Sup der), Itagüí 3 (Inf izq) y La Asomadera 1 (inf der).....	47
Figura 12. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. La Asomadera 2 (Sup izq), La Asomadera 3 (Sup der), Marinilla1 (Inf izq) y Marinilla 2 (inf der).....	48
Figura 13. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Marinilla 3 (Sup izq), Marinilla 4 (Sup der), Marinilla 5 (Inf izq) y Ríongro (inf der).....	49
Figura 14. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. San Pedro 1 (Sup izq), San Pedro 2 (Sup der), San Pedro 3 (Inf izq) y Santa Elena (inf der).	50
Figura 15. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Barbosa y Caldas	58
Figura 16. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Caldas y Cerro El Volador	59
Figura 17. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Cerro El Volador y Cerro Nutibara.....	60
Figura 18. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Cerro Nutibara y El Santuario.	61
Figura 19. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Facultad de Minas y Girardota.....	62
Figura 20. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Guarne e Indural.	63
Figura 21. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Indural e Itagüí.....	64
Figura 22. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Itagüí y La Asomadera.	65
Figura 23. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. La Asomadera y Marinilla.....	66
Figura 24. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Marinilla	67
Figura 25. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Marinilla, Ríonegro y San Pedro.	68

Figura 26. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. San Pedro y Santa Elena.	69
Figura 27. Gráfico de comparación parámetro θ_s con la relación $(Wn^{\wedge}e)$	72
Figura 28. Gráfico de comparación parámetro $W1$ con la relación $(GS^{\wedge}Finos)$	72
Figura 29. Gráfico de comparación parámetro $a1$ con la relación $(IP^{\wedge}LP)$	73
Figura 30. Gráfico de comparación parámetro $a2$ con la relación $(IP^{\wedge}wn)$	73
Figura 31. Gráfico de comparación parámetro $n1$ con la relación $(exp(GS))$	74
Figura 32. Gráfico de comparación parámetro $n2$ con la relación $((GS/LL))$	74
Figura 33. Algoritmo para determinación de propuesta de calibración (utilizando R Studio)	75
Figura 34. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Barbosa	77
Figura 35. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Caldas 2.....	77
Figura 36. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Caldas 3.....	78
Figura 37. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. El Volador 1	78
Figura 38. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. El Volador 2	78
Figura 39. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. El Volador 3	79
Figura 40. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Nutibara 1	79
Figura 41. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Nutibara 2.....	79
Figura 42. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Nutibara 3.....	80
Figura 43. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Santuario 1.....	80
Figura 44. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Santuario 2.....	80
Figura 45. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Facultad de Minas.....	81
Figura 46. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Girardota 1.	81
Figura 47. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Girardota 2.	81

Figura 48. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Guarne 1.....	82
Figura 49. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Guarne 2.....	82
Figura 50. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Indural 1.....	82
Figura 51. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Indural 2.....	83
Figura 52. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Indural 3.....	83
Figura 53. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Itagüí 1.....	83
Figura 54. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Itagüí 2.....	84
Figura 55. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Itagüí 3.....	84
Figura 56. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Asomadera 1.....	84
Figura 57. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Asomadera 2.....	85
Figura 58. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Asomadera 3.....	85
Figura 59. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 1.....	85
Figura 60. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 2.....	86
Figura 61. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 3.....	86
Figura 62. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 4.....	86
Figura 63. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 5.....	87
Figura 64. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Rionegro.....	87
Figura 65. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. San Pedro 1.....	87
Figura 66. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. San Pedro 2.....	88
Figura 67. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. San Pedro 3.....	88

Figura 68. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Santa Elena.....	88
Figura 69. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Barbosa	95
Figura 70. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Asomadera 3.....	95
Figura 71. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Nutibara 1	95
Figura 72. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Guarne 1.....	96
Figura 73. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Marinilla 5.....	96
Figura 74. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Girardota 2.....	96
Figura 75. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Guarne 2.....	97
Figura 76. SWCC Localización del área de estudio (Tomado de Google Earth™, 2018)	99
Figura 77. Curva de retención de agua Granizal y parámetros experimentales de Durner.	100
Figura 78. SWCC mediante propuesta de calibración. Granizal	100
Figura 79. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Barbosa	102
Figura 80. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Caldas 1	103
Figura 81. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Caldas 2	103
Figura 82. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Caldas 3	103
Figura 83. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. El Volador 1	104
Figura 84. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. El Volador 2	104
Figura 85. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. El Volador 3	104
Figura 86. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Nutibara 1	105
Figura 87. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Nutibara 2	105
Figura 88. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Nutibara 3	105

Figura 89. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Santuario 1.....	106
Figura 90. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Santuario 2.....	106
Figura 91. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Facultad de Minas.	106
Figura 92. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Girardota 1.	107
Figura 93. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Girardota 2.	107
Figura 94. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Guarne 1.	107
Figura 95. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Guarne 2.	108
Figura 96. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Indural 1.	108
Figura 97. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Indural 2.	108
Figura 98. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Indural 3.	109
Figura 99. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Itagüí 1.	109
Figura 100. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Itagüí 2.	109
Figura 101. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Itagüí 3.....	110
Figura 102. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Asomadera 1.....	110
Figura 103. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Asomadera 2.....	110
Figura 104. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Asomadera 3.....	111
Figura 105. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 1.....	111
Figura 106. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 2.....	111
Figura 107. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 3.....	112
Figura 108. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 4.....	112

Figura 109. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 5.....	112
Figura 110. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Rionegro.....	113
Figura 111. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. San Pedro 1.....	113
Figura 112. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. San Pedro 2.....	113
Figura 113. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. San Pedro 3.....	114
Figura 114. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Santa Elena.....	114
Figura 115. Relación entre succión máxima y valor de entrada de aire en los macroporos	115

A mis padres y mi familia por creer siempre en mis capacidades, a los profesores Yamile Valencia y Oscar Echeverri por toda su ayuda. Especialmente a mi hermana Isabel y a la Ingeniera Carolina.

Todo lo que deseas está al otro lado del miedo. “Jack Canfield”

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado de Ingeniería – Área Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

A los profesores Yamile Valencia y Óscar Echeverri por su ayuda y aportes en este camino desde el pregrado, por sus consejos, por sus enseñanzas y su paciencia.

Al ingeniero Johnatan Ramos por su aporte tan significativo en esta investigación.

A Colciencias y su convocatoria de jóvenes investigadores por acoger y apoyar esta investigación.

A los profesores André Brasil y Edwin García por sus oportunas sugerencias y aportes técnicos.

Al grupo de investigación de geotecnia y su aporte en las bases de datos para desarrollar esta investigación.

Al laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia.

Al profesor Juan Carlos Salazar Uribe y la escuela de estadística de la Universidad Nacional

A todas aquellas personas que de alguna forma estuvieron implicados en la realización de este trabajo.

RESUMEN

La succión que presenta un suelo para diferentes contenidos de humedad se representa mediante la Curva Característica de Retención de Agua (SWCC, Soil Water Characteristic Curve). Esta curva influye en la determinación de la resistencia al corte del suelo, tornando muy importante su interpretación para el entendimiento de la mecánica de suelos parcialmente saturados. La determinación experimental de la succión del suelo y posteriormente de dicha curva requiere de procedimientos de larga duración, por tal motivo se propone generar aproximaciones a la curva característica de retención de agua basadas en propiedades índice, a partir de la ejecución de ensayos físicos simples a suelos ubicados en el Área metropolitana del Valle de Aburrá y Oriente Antioqueño; esto a través de la validación de ecuaciones paramétricas calibradas y ajustadas al ámbito local, lo anterior serviría en caso de que no pueda realizarse la prueba de succión o como una aproximación inicial mientras se ejecuta el ensayo.

PALABRAS CLAVE

Curva Característica de Retención de Agua, Succión, Propiedades índice, Resistencia al Corte, Contenido de Humedad.

ABSTRACT

The suction that presents a soil for different moisture contents is represented by the Soil Water Characteristic Curve (SWCC). This curve influences the Shear Strength determination, making its interpretation very important for the understanding of the unsaturated soils mechanics. The experimental determination of the soil's suction and later of the SWCC requires long testing times, so it is proposed to generate approximations to the SWCC based on index properties, starting from the execution of simple physical tests to soils located in the metropolitan area of the Valle de Aburrá and Oriente Antioqueño, This approximations will be made through the validation of parametric equations, calibrated and adjusted, to the local scope, this would serve in the event that the suction test cannot be performed or as an initial approximation while the test is in progress.

KEYWORDS

Soil Water Characteristic Curve, Suction, Index Properties, Shear Strenght, Moisture Contents.

1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

En ingeniería geotécnica, gran parte de las obras de infraestructura son construidas en suelos en condiciones no saturadas; pero en general para los estudios, realización de diseños y solución de problemas que puedan presentarse, se recurre a teorías clásicas o estados críticos, donde se considera el suelo en condiciones saturadas. Esto conduce a sobre-estimar factores de seguridad, incurriendo en costos mayores que podrían llegar a minimizarse teniendo en cuenta las teorías de suelos no saturados. Incorporando el uso de la mecánica de suelos no saturados y específicamente la curva de retención de agua a partir de ejecución de ensayos simples, se plantea la presente investigación que resolverá el siguiente interrogante:

¿Es posible determinar la curva de retención de agua de los suelos a partir de sus propiedades índice?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar la curva de retención de agua de algunos suelos a partir de propiedades índice tales como: la granulometría, los límites de consistencia y la relación de vacíos.

2.2. Objetivos Específicos

- Calibrar un modelo de predicción de la curva de retención de agua para algunos suelos a partir del ajuste de ciertos modelos presentados en la literatura.
- Validar los modelos de predicción de la curva característica usando la base de datos de la Universidad Nacional de Colombia, la cual cuenta con aproximadamente 30 diferentes tipos de suelos caracterizados mediante la Clasificación Unificada y succión matricial.
- Comparar el modelo de predicción propuesto con el presentado por Y. Perera et al. (2005). Determinar la incidencia del índice de vacíos en la determinación de la curva de retención de agua.

3. MARCO TEÓRICO

Los suelos parcialmente saturados, están conformados por tres fases: sólida, líquida y gaseosa; esto significa que los vacíos del suelo están ocupados por agua y aire. La existencia de estas tres fases implica la aplicación de teorías diferentes a las de la mecánica de suelos clásica para estudiar las propiedades y comportamiento mecánico; uno de estos conceptos de valiosa importancia es el de la succión del suelo, esta se define como la energía que requiere el suelo para retener agua (Lee et al, 1995). La succión del suelo consta de dos componentes, a saber: la succión matricial (h_m) que es asociada a la capilaridad y la succión osmótica (π) que se debe a la presencia de sales disueltas en el agua; el valor de succión matricial depende del tamaño y distribución de las partículas, así como del tamaño

o

de los poros y del grado de saturación del suelo, cuando la saturación disminuye la succión matricial aumenta, esta puede expresarse como la diferencia entre las presiones de aire y de agua en los poros.

La relación entre el contenido de humedad y la succión se representa mediante la curva característica de retención de agua (SWCC), en la SWCC se muestra en las ordenadas el contenido de humedad, ya sea en términos de humedad volumétrica, gravimétrica o grado de saturación y en las abscisas se presenta la succión matricial o total del suelo (generalmente se trabaja con la matricial ya que en la práctica los problemas de ingeniería son asociados al cambio en las condiciones del medio ambiente, la succión osmótica aplicaría en casos donde se presente alteración en el contenido de sales en el suelo por contaminación química (Meza, 2012)). La SWCC consta generalmente de 3 zonas: la capilar, la de des-saturación, y la residual. Ver Figura 1.

En la zona capilar (zona 1), la gráfica es horizontal, aquí el suelo permanece saturado y el valor de la humedad en este tramo es la requerida para que el aire entre en los macroporos del suelo (Fredlund, 1999), la zona 2 de des-saturación corresponde a una zona de transición en la cual el suelo presenta una interfase entre aire y agua, el agua es desplazada por aire; por tanto, la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incrementa a medida que el suelo pierde más agua. Al finalizar esta zona, el agua se encuentra en un estado discontinuo y el coeficiente de permeabilidad se reduce en forma importante, conforme disminuye la humedad se llega a la zona residual, el punto de quiebre es conocido como el valor de saturación residual, en la zona 3 los poros se encuentran principalmente ocupados por aire. (Camapum, de Farias, Lemos, dos Anjos, & Chagas, 2015). En esta zona un incremento de succión no produce un cambio importante en el contenido de agua, la cual es tan escasa que no fluye entre los poros y la remoción puede ser sólo por evaporación (Hosagasi,

o

2006). En esta región en donde las succiones son muy altas, el agua está adsorbida a las partículas.

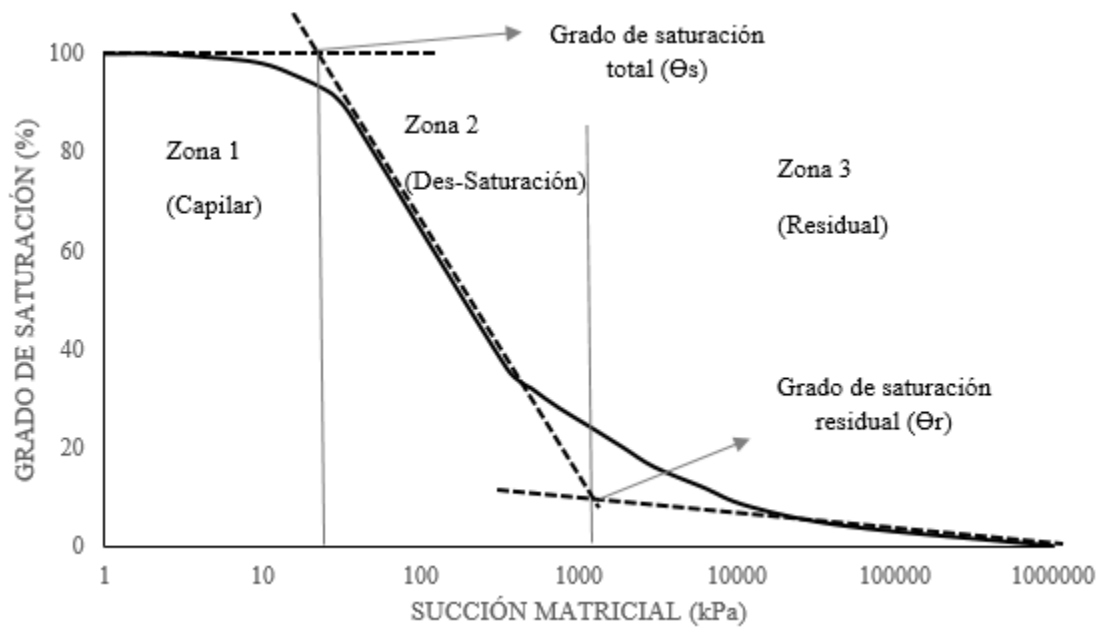


Figura 1. Zonas de la SWCC. Modificado de Camapum (2015)

La distribución de los poros, así como el tamaño de los granos influye en la forma de la SWCC, el valor de la entrada de aire en los macroporos es menor en los suelos gruesos, al ser los poros de mayor tamaño el valor de la tensión superficial es menor y se requiere menos succión para que ocurra la desaturación del suelo. En la Figura 2 se observa la comparación de curvas típicas representativas para la SWCC de arenas, limos y arcillas.

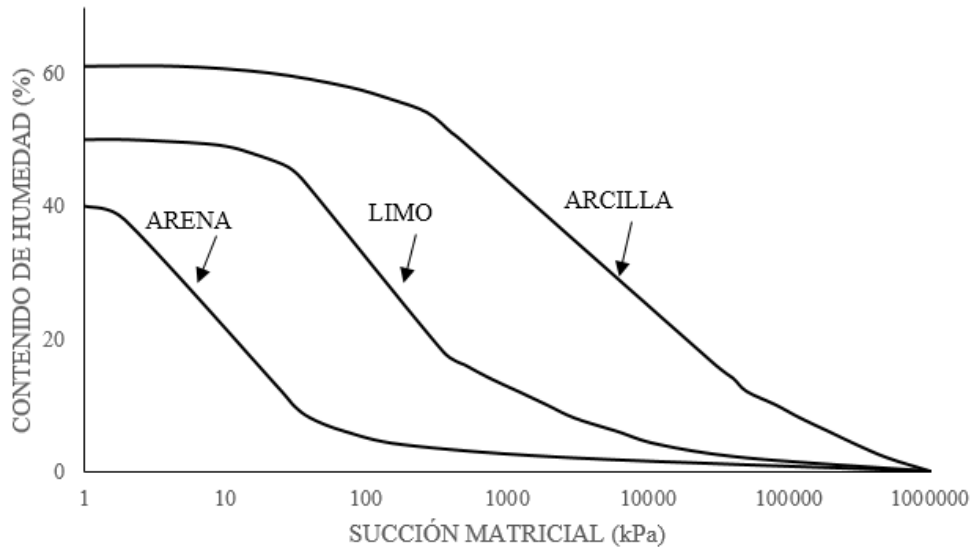


Figura 2. SWCC representativa según el tipo de material. (Modificado de Meza 2012)

Los suelos presentan características diferentes según su origen y ubicación geográfica, en particular los suelos de las zonas tropicales (como es el caso de los suelos en estudio) que están influenciados en mayor grado que los suelos de regiones templadas por factores que favorecen el proceso de meteorización, generándose propiedades ingenieriles diferentes; en particular, estos suelos presentan distribuciones granulométricas discontinuas y estructuras con macro y microporos; usualmente la SWCC para estos suelos tropicales tiene una tendencia bimodal, es decir la curva presenta 2 subcurvas que corresponden a 2 zonas de desaturación y 2 zonas aproximadamente horizontales que corresponden a 2 valores de entrada de aire una a los macroporos del suelo y otra a los microporos como se observa en la Figura 3 (Camapum, de Farias, Lemos, dos Anjos, & Chagas, 2015)

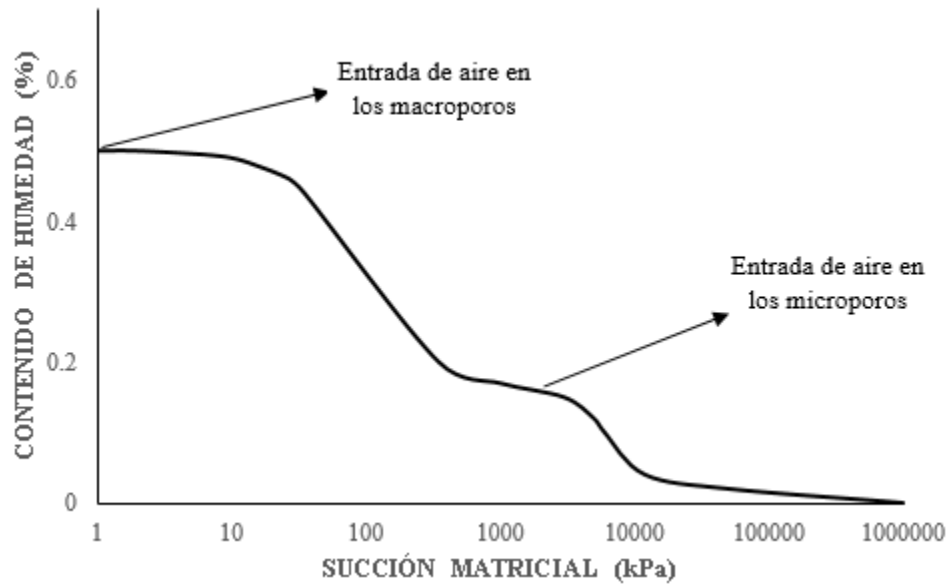


Figura 3. SWCC con tendencia bimodal. (Modificado de Camapum 2015)

Puede determinarse la SWCC de manera directa o indirecta mediante procedimientos de laboratorio extensos, en la práctica geotécnica habitualmente se recurre a teorías clásicas donde se considera el suelo en condiciones saturadas y se desprecia el valor de la succión o se toma de la literatura donde las investigaciones realizadas generalmente corresponden a suelos con diferentes condiciones geográficas y ambientales, de esta manera se ignora o se estima incorrectamente el aporte de la succión en la resistencia al corte y puede incurrirse en subestimaciones en los diseños. Con la presente investigación se plantea estimar la curva de retención de agua a partir de las propiedades índice del suelo, tales como límites de consistencia, humedad natural, gravedad específica, porcentaje de finos y relación de vacíos; propiedades de sencilla y común obtención y donde mediante la calibración e implementación de modelos existentes ajustados a los suelos de la región, específicamente del Oriente Antioqueño y Valle de Aburrá, pueden brindar solución, ya que la determinación de la curva de

o

retención de agua, como se ha mencionado puede ser un proceso prolongado y costoso.

Para facilitar una determinación eficiente de dicha curva se han desarrollado a través de los años diferentes modelos matemáticos teniendo en cuenta diversas consideraciones o criterios, a continuación se enuncian cronológicamente los avances más significativos en esta área.

Brooks y Corey en el año 1964 propusieron un modelo que depende del coeficiente de permeabilidad del suelo y un parámetro llamado presión de burbujas (h_b), esta función paramétrica se muestra en la ecuación (1) (Brooks & Corey, 1964).

$$S_e = \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} \quad (1)$$

En este caso la cabeza de succión matricial se representa mediante (h) y está dada en centímetros de agua y (S_e) representa la saturación efectiva del suelo la cual se define como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

Donde (θ) es la humedad volumétrica del suelo, (θ_s) es el contenido volumétrico de agua en estado saturado y (θ_r) es el contenido de agua residual.

En el año 1980 Van Genuchten propuso un modelo que introduce parámetros de forma de la curva de retención de agua del suelo, estos se dan en ese caso por la entrada de aire al suelo para diferentes humedades. Se establece también una comparación con el modelo de Brooks y Corey

o

mostrando que este se desviaba para valores de humedad cercanos a la humedad de saturación (van Genuchten, 1980).

$$S_e = \left[\frac{1}{1+(\alpha h)^n} \right]^m \quad (3)$$

los parámetros (α_i , m_i y n_i) están sujetos a:

$$\alpha_i > 0, m_i > 0, n_i > 1$$

$$m_i + \frac{1}{n_i} = 1$$

En 1981 Arya y Paris proponen un modelo para determinar la curva característica con base en la distribución y tamaño de los granos, además involucran una de las propiedades índice del suelo como la gravedad específica (L. Arya & J.Paris, 1981).

Durner en el año 1994 propone un modelo que introduce principalmente la heterogeneidad de la estructura de los poros del suelo y el coeficiente de permeabilidad del suelo material (Durner, 1994); el modelo de Durner toma como base la forma del modelo de Van Genuchten, Durner propone la determinación de la SWCC mediante una función multimodal, esto tomando en consideración la heterogeneidad de la estructura de poros del suelo ya que en muchos casos podrían presentar una SWCC con forma bimodal debido a la presencia de macro y micro poros (Durner, 1994). Ver ecuación (3).

$$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1+(\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1+(\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la SWCC de un determinado suelo presente forma bimodal, w_1 es un factor de peso para la primera subcurva o modo y $(1-w_1)$ el factor de peso de la segunda subcurva, en el caso de curvas con tendencia unimodal el valor de w_1 es muy cercano a 1.

Este mismo año Fredlund y Xing integrando los conceptos anteriores, además teniendo en cuenta parámetros de forma que son función de la denominada succión residual del suelo proponen un modelo logarítmico para determinar la curva de retención de agua (Fredlund, 1994).

Kosugi en el año 1996 propone un modelo logarítmico para la determinación de la curva de retención de agua, introduciendo en gran medida el valor del coeficiente de permeabilidad (Kosugi, 1996).

Las propuestas de Fredlund y Xing (1994) y Kosugi (1996) se presentan en las ecuaciones (7) y (8) respectivamente (Fredlund, 1994), (Kosugi, 1996).

$$S_e = C(h) \left[\frac{1}{\ln[e + (h/a)^n]} \right]^m \quad (5)$$

$$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right] \quad (6)$$

Zapata presenta en el año 1999 en su disertación de la Universidad de Arizona las variaciones para la determinación de la curva de retención de agua, teniendo en cuenta los diferentes modelos a lo largo de la historia y

o

los procesos de laboratorio, además plantea un modelo para determinar dicha curva ajustando los parámetros de Fredlund y Xing utilizando expresiones obtenidas estadísticamente que emplean las propiedades índice del suelo como el índice de plasticidad, porcentaje de finos y D_{60} (Zapata, Houston, Houston, & Walsh, 1999). Definidos estos parámetros la autora propone una familia de curvas con diferentes wPI Y D_{60} . Usando la ecuación de Fredlund and Xing. Dicha familia se muestra en la Figura 4.

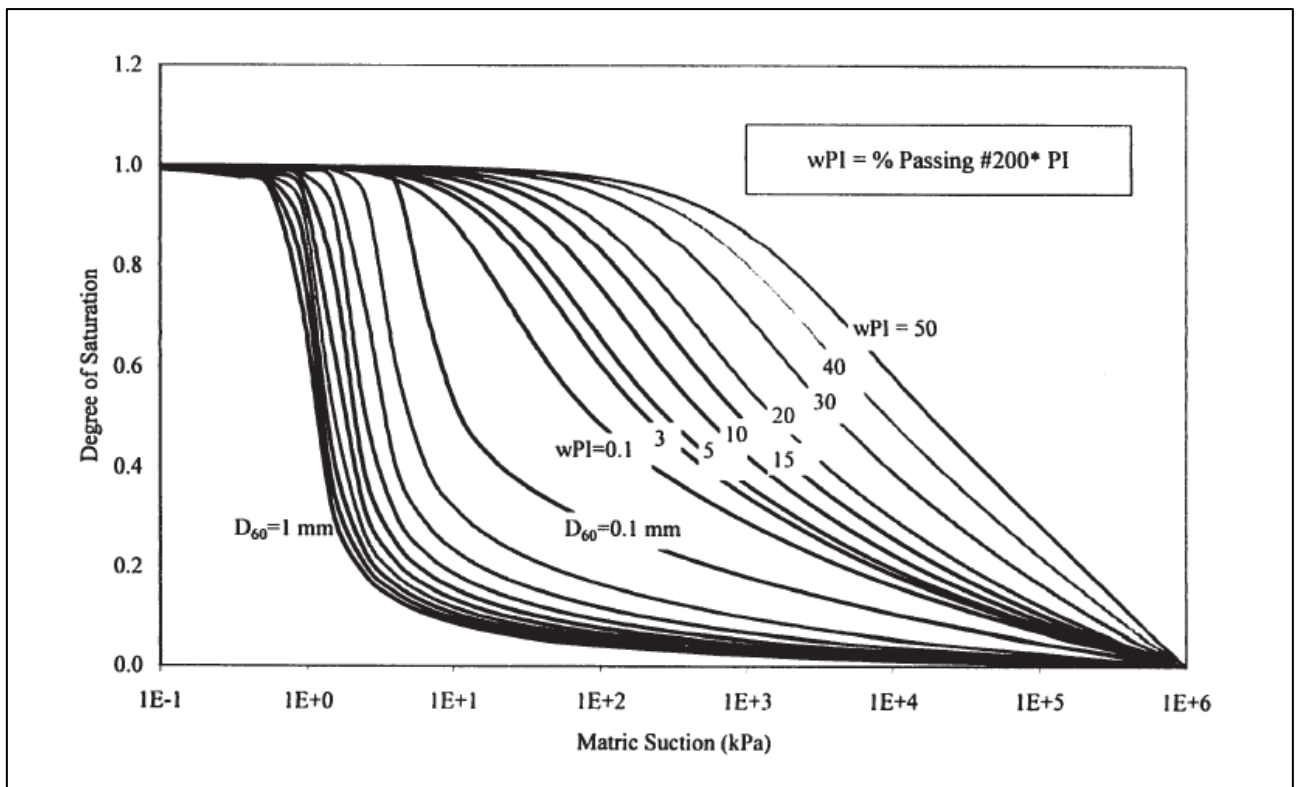


Figura 4. Curvas de retención de agua con base en el D_{60} Y wPI (Zapata, 1999)

Perera y Zapata en el año 2005 (Perera et al, 2005) proponen una mejora a la propuesta realizada por la misma Zapata en el año 1999, definiéndola para diferentes tipos de materiales y considerando sus propiedades índice principales según el tipo de material.

o

Seki en el año 2007 se basa en la distribución logarítmica de Kosugi y mediante una superposición lineal determina una expresión lognormal multimodal que podría modelar la tendencia bimodal de los suelos que tengan esta tendencia por la presencia de macro y micro poros en su estructura, además elabora un software para determinar la curva de retención de agua con diferentes metodologías y compararla con una curva determinada mediante resultados experimentales. (Seki, 2007). Ecuación (7).

$$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right] \quad (7)$$

4. METODOLOGÍA

4.1. Programa De Trabajo

Para determinar la curva de retención de agua a partir de propiedades índice se decide utilizar una base de datos de diferentes suelos que cuentan con caracterización geotécnica y determinación de dicha curva. De este grupo de datos se busca encontrar relaciones entre parámetros de forma de la curva característica de retención de agua y las propiedades índice, se espera que las propiedades que tienen que ver con la cantidad de agua y capacidad de retención de agua en los poros del suelo sean las más influyentes y estén relacionadas en la determinación de dicha curva.

El plan de trabajo contempla utilizar la curva de retención de agua de los suelos de la base de datos comparando sus curvas experimentales con las curvas determinadas mediante algunos de los modelos desarrollados por diferentes autores, estos modelos son paramétricos y por medio de

o

regresiones numéricas se busca definir el grado de ajuste de los mismos con las curvas experimentales mediante la determinación de coeficientes de correlación. Una vez determinados dichos coeficientes de correlación y habiendo definido cuales son los modelos que presentan mejor ajuste se concretará con cuál se trabajará teniendo en cuenta efectivamente el grado de ajuste y cantidad de parámetros del modelo, ya que entre más parámetros se tenga, se dificulta en mayor grado encontrar una correlación para determinar la curva característica de retención de agua; para el modelo seleccionado se planteará una propuesta que permita obtener todos sus parámetros haciendo uso de las propiedades índice del suelo.

Con el fin de probar la propuesta para la determinación de la curva de retención de agua elaborada con el modelo seleccionado previamente y observar si es aplicable o no a los suelos del Valle de Aburrá y Oriente Antioqueño, se calcularán los parámetros del modelo seleccionado haciendo uso de las propiedades índice de 2 materiales de suelo localizados en puntos diferentes a los de la base de datos, a estos suelos se les realizan los mismos ensayos de caracterización con los que cuentan los suelos de la base de datos; además se determinará su curva de retención de agua de manera experimental para compararla con la obtenida mediante la propuesta anteriormente definida.

Como ejercicio adicional, se determinarán para los suelos de la base de datos los parámetros de la propuesta de calibración elaborada por Perera y Zapata en el año 2005, con el objetivo de establecer que tan aplicable es esta propuesta para los suelos de esta región, además se comparará dicha propuesta con la desarrollada con el modelo seleccionado previamente.

4.2. Recopilación de la información disponible

Se cuenta con una base de datos de investigaciones realizadas por el grupo de Investigación de Geotecnia de la Universidad Nacional – Sede Medellín, estas investigaciones fueron hechas en diferentes zonas del área Metropolitana del Valle de Aburrá y Oriente Antioqueño, cada muestra de esta base de datos cuenta con caracterización consistente en límites de consistencia (LL:Límite Líquido, LP:Límite Plástico, IP:Índice Plástico) granulometría (Porcentaje de finos: % finos), índice de vacíos (e), gravedad específica (GS), humedad natural (wn), además curva de retención de agua.

En la Tabla 1 Se presenta el resumen de las propiedades índice determinadas para las diferentes muestras, en total se cuenta con 36 puntos distribuidos en 15 zonas.

Tabla 1. Sectores y sus propiedades índice

SECTOR		LL	LP	IP	% Finos	e	GS	Wn
1	Barbosa	0.46	0.34	0.12	0.60	1.22	2.69	0.26
2	Caldas 1	0.00	0.00	0.00	0.87	1.98	2.53	1.05
	Caldas 2	0.72	0.52	0.20	0.96	1.50	2.83	0.44
	Caldas 3	0.72	0.50	0.22	0.98	1.89	2.89	0.48
3	El Volador 1	0.83	0.59	0.24	0.98	2.04	2.56	0.42
	El Volador 2	0.53	0.41	0.12	0.72	1.70	2.55	0.37
	El Volador 3	0.39	0.32	0.07	0.68	1.17	2.57	0.24
4	Nutibara 1	0.43	0.35	0.08	0.59	0.98	2.98	0.29
	Nutibara 2	0.46	0.31	0.15	0.77	1.24	2.84	0.47
	Nutibara 3	0.44	0.32	0.12	0.83	1.00	2.73	0.43
5	Santuario 1	0.37	0.21	0.16	0.63	0.96	2.78	0.29
	Santuario 2	0.38	0.37	0.01	0.50	1.02	2.75	0.25
6	Fac Minas	0.85	0.46	0.39	0.25	1.20	2.53	0.36
7	Girardota 1	0.73	0.42	0.31	0.88	1.30	2.89	0.32
	Girardota 2	0.76	0.51	0.25	0.77	1.70	2.9	0.48
8	Guarne 1	0.58	0.33	0.25	0.57	1.10	2.8	0.30
	Guarne 2	0.54	0.36	0.18	0.57	1.00	2.8	0.28

SECTOR		LL	LP	IP	% Finos	e	GS	Wn
9	Indural 1	0.60	0.45	0.15	0.88	1.39	2.66	0.13
	Indural 2	0.44	0.41	0.03	0.70	1.16	2.63	0.10
	Indural 3	0.35	0.35	0.00	0.59	0.78	2.63	0.04
10	Itagüí 1	0.58	0.45	0.13	0.97	1.45	2.66	0.32
	Itagüí 2	0.36	0.33	0.03	0.97	1.07	2.75	0.17
	Itagüí 3	0.35	0.35	0.00	0.82	1.05	2.72	0.16
11	Asomadera1	0.56	0.49	0.07	0.95	1.01	2.83	0.38
	Asomadera2	0.54	0.47	0.07	0.92	1.72	2.87	0.38
	Asomadera3	0.57	0.49	0.08	0.98	2.01	2.77	0.47
12	Marinilla 1	0.55	0.55	0.00	0.24	1.40	2.8	0.19
	Marinilla 2	0.38	0.36	0.02	0.43	1.40	2.8	0.19
	Marinilla 3	0.75	0.31	0.44	0.24	1.21	2.81	0.35
	Marinilla 4	0.79	0.55	0.24	0.28	1.09	2.69	0.41
	Marinilla 5	0.62	0.62	0.00	0.28	1.30	2.66	0.29
13	Ríonegro	0.53	0.45	0.08	0.92	1.54	2.79	0.31
14	San Pedro 1	0.62	0.56	0.06	0.69	1.16	2.56	0.28
	San Pedro 2	0.55	0.48	0.07	0.72	1.50	2.56	0.32
	San Pedro 3	0.42	0.42	0.00	0.63	0.92	2.58	0.18
15	Santa Elena	0.64	0.52	0.12	0.95	2.01	3.06	0.44

A continuación se presentan las investigaciones de las cuales se extrajeron los datos de caracterización de los sitios.

- *Influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento de dos perfiles de alteración originados de rocas metamórficas (Valencia, Tesis de Maestría Ingeniería Geotecnia 2005). (Indural 1,2,3 y El Volador 1,2,3).*
- *Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas ígneas presentes en Medellín. (Echeverri, Tesis de Maestría Ingeniería Geotecnia 2005). (San Pedro 1,2,3 e Itagüí 1,2,3).*

o

- *Efecto de la meteorización en el comportamiento de un suelo tropical del Oriente Antioqueño (Romaña et al., XVI Jornadas Geotécnicas 2009).(Marinilla 3,4,5)*
- *Comparativo entre la succión medida en campo y la succión medida en laboratorio de una ladera del corregimiento de Santa Elena, Antioquia. (Vélez et al., XIII Congreso Colombiano de Geotecnia 2010).(Santa Elena 1).*
- *Análisis de las alteraciones físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas de un suelo residual de Batolito Antioqueño contaminado con gasolina. (Ocampo et al., XIII Congreso Colombiano de Geotecnia 2010). (Marinilla 1)*
- *Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales. (Aristizábal et al., Revista Boletín Ciencias de la Tierra 2011).(Caldas 1,2,3 y Asomadera 1,2,3).*
- *Caracterización físico-química, mineralógica y mecánica de un suelo tropical de la margen izquierda del río Medellín a la altura de Barbosa. (Ortiz, Tesis de Pregrado Ingeniería Civil 2011). (Barbosa).*
- *Clasificación y caracterización de suelos tropicales en un talud de la autopista Medellín – Bogotá en el tramo de vía entre marinilla y santuario. (Escobar, Tesis de Maestría Ingeniería Geotecnia 2011). (Marinilla 2 y El Santuario 2).*

o

- *Variación de las propiedades geotécnicas por los suelos lixiviados de residuos sólidos urbanos en un suelo tropical. (Quintero et al., XVI Jornadas Geotécnicas 2012). (Rionegro).*
- *Una metodología para la caracterización física, mineralógica, estructural y mecánica de un suelo tropical en el valle de Aburrá, municipio de Girardota. (Valderrama et al., XVI Jornadas Geotécnicas 2012). (Girardota 2)*
- *Aplicación de la biomineralización en suelos de la ciudad de Medellín para mitigar procesos erosivos. (Arrieta, Tesis de maestría Ingeniería Geotecnia 2012). (Nutibara 1,2,3)*
- *Caracterización geotécnica de un suelo tropical laterítico. (Fresneda et al., Revista INGECUC 2013). (Girardota 1).*
- *Comportamiento geotécnico de un suelo residual tropical contaminado con gasolina (Echeverri et al., Revista Dyna 2013).(Guarne 2).*
- *Influencia de las altas temperaturas en algunas propiedades geotécnicas de un suelo tropical superficial (Álvarez et al., XIV Congreso Colombiano de Geotecnia 2014). (Facultad de Minas)*
- *Estudio geotécnico de un suelo tropical para determinar su estado de meteorización y su efecto en las propiedades mecánicas. (Valencia et al., Revista Facultad de ciencias Universidad Nacional de Colombia 2014). (Guarne 1)*

o

- *Efecto de los lixiviados de residuos en las propiedades geotécnicas de un suelo tropical. (Quintero, Tesis de maestría Ingeniería Geotecnia 2016).(El Santuario 1).*

En la Figura 5 se presenta la localización de los puntos de la base de datos.

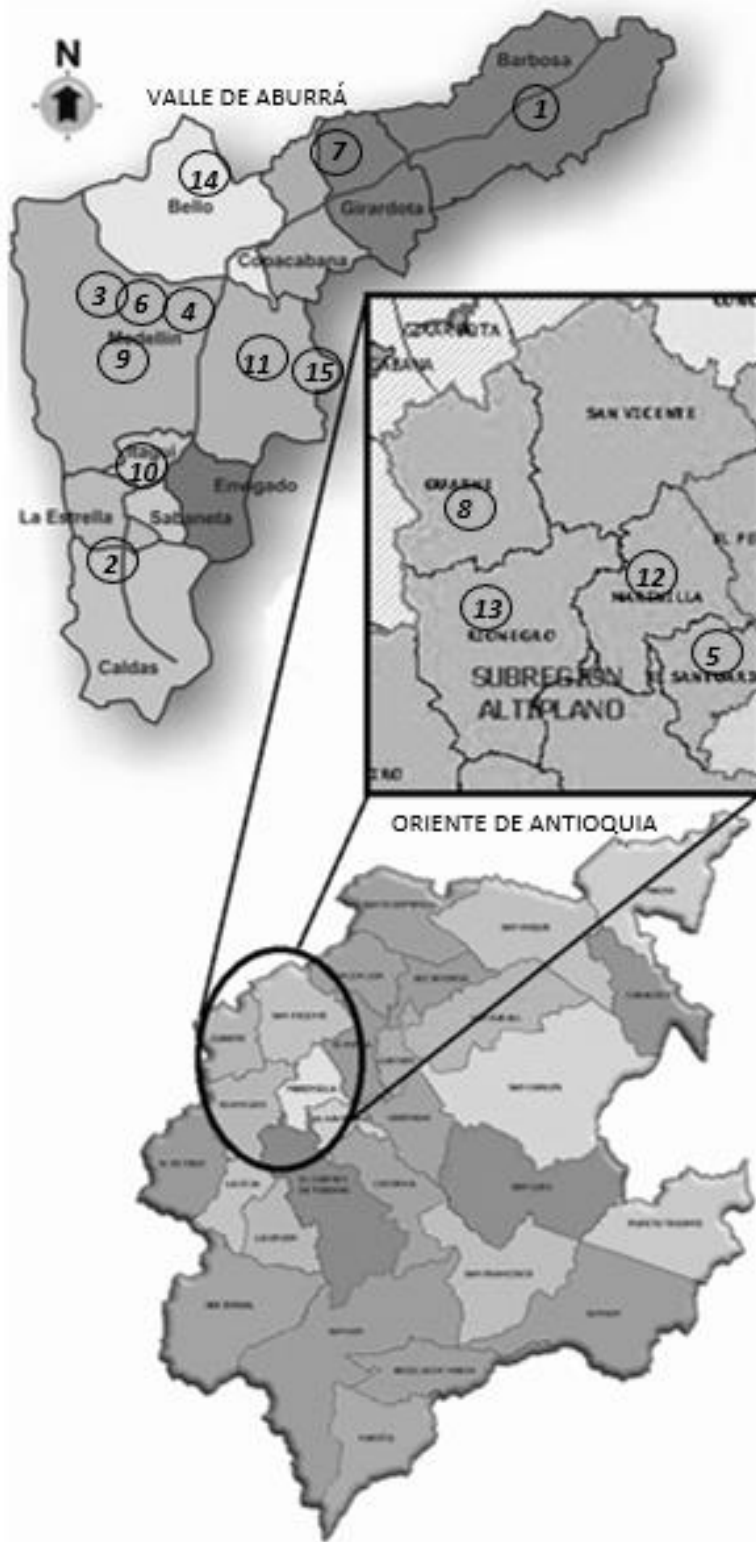


Figura 5. Ubicación de los sitios de la base de datos.

o

Específicamente para cada uno de los suelos de la base de datos la caracterización se llevó a cabo mediante la realización de los ensayos clásicos de determinación de la humedad natural (ASTM D216-05), gravedad específica (ASTM D854-06) y límites de consistencia (ASTM D4318-05); así como el ensayos de granulometría por tamizado (ASTM D422-07); se tienen entonces para cada punto datos de humedad natural, límite líquido, límite plástico, índice plástico, granulometría (se trabajará con el porcentaje de finos), relación de vacíos, gravedad específica y curva característica de retención de agua (SWCC); la obtención de la curva característica de retención de agua se realizó por el método de papel filtro por trayectoria mixta con el objeto de determinar la succión matricial de la muestra.

Este ensayo consiste en utilizar cuerpos de prueba con diámetro de 50 mm y altura 20 mm aproximadamente, en el cual se distribuyen las humedades desde la mínima hasta la máxima partiendo de la humedad natural, lo cual se logra dejando secar o humedeciendo con agua destilada los cuerpos. Luego se coloca el papel filtro y se deja equilibrar la humedad por un mínimo de 15 días. Después de este tiempo es determinada la humedad del papel asociada a un valor de succión matricial, que es el mismo del cuerpo de prueba. El valor de succión es determinado a través de una curva de calibración, por tal motivo este método es conocido como indirecto. Todas las SWCC de nuestros suelos fueron determinadas con papel filtro Whatman N°42, se presentan a continuación las ecuaciones de calibración de dicho papel filtro, para contenidos de humedad mayores al 47% se utiliza la ecuación (8) y para contenidos de humedades menores o iguales al 47% se utiliza la ecuación (9).

$$\text{Succión (kPa)} = 10^{(6,05-2,48 \log w)} \quad (8)$$

$$\text{Succión (kPa)} = 10^{(4,84-0,0622w)} \quad (9)$$

Donde w es el contenido gravimétrico de humedad.

Como pudo observarse en la Tabla 1 y en la Figura 5, cada suelo pertenece a una zona diferente del departamento de Antioquia, comprendiendo el Valle de Aburrá y el Oriente Antioqueño. A continuación se presentan los aspectos más relevantes de la caracterización geológica y geomorfológica de cada uno de estos sitios.

Tabla 2. Caracterización geológica y geomorfológica

Ubicación	Geología y Geomorfolología
Barbosa	La zona de estudio se ubica sobre el Batolito Antioqueño, en él aflora un cuerpo cuarzodiorítico; la meteorización aquí presentada genera una capa de uno o dos metros de color anaranjado a rojizo, compuesta por arcilla y limos arcillosos muy plásticos, parcialmente orgánicos, sin estructuras originales de la roca, equivalente a un suelo residual maduro de limos con baja permeabilidad y una zona saprolítica de espesor variable.
Caldas	La zona de estudio se encuentra en rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande, donde predominan localmente brechas volcánicas, y que regionalmente comprende metasedimentos como esquistos silíceos negros, filitas grafitosas, liditas, cuarcitas de grano fino y diques de andesita y dacita. Las rocas volcánicas del Complejo incluyen las rocas verdes debido a la cloritización de rocas basálticas. Este último tipo de roca se caracteriza por texturas félsicas y porfídicas, y por tener una mineralogía compuesta por plagioclasas muy alteradas y augita como mineral máfico predominante. En los horizontes superficiales se encontró presencia de cenizas volcánicas transportadas.
Cerro El Volador	La zona de estudio se origina de la meteorización de las rocas metamórficas correspondientes a las anfibolitas de Medellín. El cerro

Ubicación	Geología y Geomorfología
	<p>el Volador se localiza sobre las anfibolitas de la margen izquierda, estas constituidas esencialmente por hornblenda y plagioclasa, con una textura néisica a esquistosa; por lo general estas rocas se observan fuertemente meteorizadas, desarrollando suelos residuales de espesor considerable, en general superior a los 20 m. Los metros más superficiales están constituidos por un limo arcilloso blando, de color pardo rojizo a amarillo, pasando a un saprolito limo arenoso, de color gris verdoso, con bandas blancas que presentan estructuras heredadas de la roca parental.</p>
Cerro Nutibara	<p>La zona de estudio es un sitio afectado por un proceso de erosión laminar en el Cerro Nutibara. Este cerro se encuentra localizado sobre la margen izquierda del río Medellín, al lado de la desembocadura de la quebrada Altavista. Su configuración general es circular, con un diámetro promedio de 600 m, y cubre un área de 40 hectáreas aproximadamente. Su cima es suave y redondeada, alcanza los 1580 m de altitud y está flanqueado por vertientes desde suaves hasta moderadas con declives. Se encuentra modelado sobre terrenos constituidos por gneises anfibólicos y anfibolitas fuertemente meteorizadas. Sus vertientes aparecen cubiertas localmente por depósitos coluviales poco extensos. Hacia su flanco nororiental aparece ocupado parcialmente por viviendas y algunas urbanizaciones.</p>

Ubicación	Geología y Geomorfología
El Santuario	La zona de estudio presenta un paisaje irregular de colinas, vertientes medias y valles asociado con las rocas ígneas del Batolito Antioqueño, complementado por la presencia de vertientes más largas y abruptas que rompen el modelado de colinas sobre las partes altas del municipio, mientras que sobre la zona baja del municipio (zona urbana), se distingue un paisaje propio de planicies aluviales.
Facultad de Minas	La zona de estudio corresponde al sector noroccidental del municipio de Medellín en La Facultad de Minas específicamente ubicado en el bloque M8. En esta zona son característicos los depósitos de flujos de lodo y escombros con fragmentos de rocas; debajo de éstos se encuentran suelos residuales procedentes de la Anfibolita de Medellín. En la zona es bastante probable encontrar suelo de tipo limo arcilloso, arcillo arenoso o limo arenosa. Los flujos de lodo se diferencian por su color amarillento y gris los cuales y se ubican por encima de los flujos de escombros. En estos flujos predominan los fino granular y su matriz está compuesta por limos (MH o ML), llegando a ser arcillosa o arenosa (CL o SM),
Girardota	La zona de estudio está compuesta en su mayoría por rocas metamórficas (anfíbolita) del Grupo Ayurá-Montebello, así como por extensos depósitos de vertiente y aluviales. Las anfíbolitas están constituidas principalmente por hornblenda (anfíbol) y plagioclasa.
Guarne	El suelo analizado se deriva de la meteorización de rocas ígneas de composición cuarzo diorítica; esta formación geológica ígnea intrusiva se caracteriza por su poca variabilidad petroquímica y su facilidad para la meteorización en ambientes húmedos, lo que

Ubicación	Geología y Geomorfología
	<p>propicia perfiles profundos de meteorización, es común encontrar suelos residuales del batolito bajo "techos colgados" de anfibolita. En las zonas bajas el paisaje lo dominan terrazas y depósitos aluviales. Las pendientes de la zona se encuentran entre moderadas a pronunciadas. Se logran identificar en la zona 5 horizontes de meteorización: Una capa de suelo orgánico seguido de cenizas, a continuación se tienen mantos limosos rojizos; posteriormente, se aprecia un suelo arenoso con presencia de cuarzo de tamaños perceptibles a simple vista; suprayaciendo la roca parental se identifica el saprolito, en el cual se advierten estructuras heredadas. En todo el perfil de meteorización se detectó la presencia de cuarzo siendo este de menor tamaño en horizontes superficiales.</p>
Indural (Medellín)	<p>La zona de estudio se origina de la meteorización de las rocas metamórficas correspondientes al Neis de la Iguaná. El neis de la Iguaná se localiza en la parte baja de la cuenca de la Quebrada la Iguaná y se extiende desde las inmediaciones del barrio Olaya Herrera hasta el cerro El Volador, presentando relaciones de contacto con la anfibolita y diques de diorita y cuarzodiorita con el Stock de Altavista. Presenta un bandeamiento composicional debido a la concentración de minerales con clara orientación. La meteorización que actúa sobre este cuerpo metamórfico desarrolla suelos residuales limosos y arcillosos de colores claros y un saprolito moteado entre blanco y gris, los espesores de estos suelos residuales en general superan los 20 m</p>
Itagüí	<p>Son suelos residuales del Stock de Altavista que pueden alcanzar en general más de 20 m de espesor con predominio de limos arcillosos en superficie de colores amarillos claros y blancos y variaciones en</p>

Ubicación	Geología y Geomorfología
	<p>profundidad a limos arenosos o arenas limosas grises; es común encontrar “bolas” de roca embebidas en el manto residual. Las pendientes moderadamente altas, la tala de bosques y los procesos de explotación de canteras, generan condiciones favorables para la erosión</p>
La Asomadera	<p>La zona de estudio se encuentra en rocas graníticas del Stock de San Diego, caracterizado como una unidad de cuerpos intrusivos cretáceos. Son rocas ígneas plutónicas básicas que varían composicionalmente, desde dioritas hasta gabros olivínicos. Presentan texturas desde fanerítica fina hasta pegmatítica. Mineralógicamente se observa feldespatos cálcico y hornblenda, además de algún contenido ocasional de olivino. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada.</p>
Marinilla	<p>Dentro del marco geológico el principal cuerpo ígneo es de tipo intrusivo el cual es conocido como el Batolito Antioqueño. Entre los tipos de rocas más frecuentes se encuentran las anfibolitas como los principales tipos de rocas metamórficas; areniscas, arcillolitas, conglomerados y chert, como las principales sedimentarias, y entre las rocas ígneas más abundantes se encuentran las granodioritas, granitos, gabros y cuarzodioritas. El paisaje se compone de dos unidades geomorfológicas básicas: Colinas altas, derivadas de las rocas metamórficas y Colinas bajas, derivados de la granodiorita del batolito antioqueño. Dichas colinas están cubiertas de ceniza volcánica con espesores de 0.7m hasta 1.3m</p>

Ubicación	Geología y Geomorfología
Ríonegro	Los suelos de la zona de estudio están compuestos por rocas ígneas intrusivas de carácter ácido, las cuales corresponde al batolito antioqueño, compuesto por granito. Estos son derivados de cenizas volcánicas, los cuales están constituidos principalmente por materiales cristalinos en su fracción mineral arcillosa.
San Pedro	Son suelos derivados del batolito de ovejas que tienen textura arenosa y colores que varían desde café rojizos en superficie a blancos y grises en profundidad, y están recubiertos por espesores variables de cenizas volcánicas. Los perfiles desarrollados son bastante maduros como lo evidencia la presencia de gibsita en los niveles más superficiales.
Santa Elena	La zona de estudio se trata de una amplia área en la que se encuentran suelos residuales de anfibolita hasta una profundidad del orden de 10 a 15 m, cubiertos por una capa de andosoles de 0,6 a 1 m de espesor. Presenta una topografía con pendientes de suaves a moderadas, conformada por colinas bajas y redondeadas, bien drenadas; también hay pendientes moderadamente altas localizadas cerca a la divisoria de aguas de la cuenca del río Medellín.

4.3. Selección del Modelo de trabajo

Diferentes autores han propuesto modelos para determinar la curva de retención de agua con base en propiedades del suelo, en las investigaciones realizadas se han utilizado diferentes criterios que implican la aparición de variables según sea el caso abordado, en esta fase se busca

o

adaptar alguno de los modelos o métodos usados a los suelos de las regiones de Antioquia a las que pertenecen los suelos de las bases de datos, los cuales por estar ubicados en el trópico podrían haber sido sometidos a condiciones particulares de meteorización lo cual haría que presentaran características diferentes a los suelos de las zonas templadas (para los cuales se han desarrollado las anteriores investigaciones en su mayoría).

Los modelos a aplicar son de los más utilizados según la revisión bibliográfica realizada (Seki, 2007). A continuación, se muestran las expresiones paramétricas generales de los modelos a aplicar, así como su respectivo autor y año de publicación, los parámetros de forma y bases fundamentales de cada modelo fueron mencionados en el marco teórico.

- Brooks and Corey (1964)

$$S_e = \begin{cases} \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} & (h > h_b) \\ 1 & (h \leq h_b) \end{cases}$$

- van Genuchten (1980)

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$$

- Kosugi (1996)

$$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right]$$

- Fredlund and Xing (1994)

$$S_e = C(h) \left[\frac{1}{\ln[e + (h/a)^n]} \right]^m$$

- Durner (1994)

$$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2}$$

- Seki (2007)

o

$$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right]$$

A continuación, se presenta la comparación de las curvas de retención de agua para los suelos de la base de datos calculadas con los ya mencionados modelos y las curvas experimentales obtenidas por el método del papel filtro; estas curvas se elaboraron mediante regresión encontrando los valores de los parámetros para cada ecuación y presentan en el eje de las abscisas la succión matricial en cm columna de agua y en el eje de las ordenadas el contenido volumétrico de agua.

En la Figura 6 a la Figura 14 se presentan las regresiones según cada uno de los autores mencionados, junto con los datos experimentales para cada uno de los puntos de la base de datos.

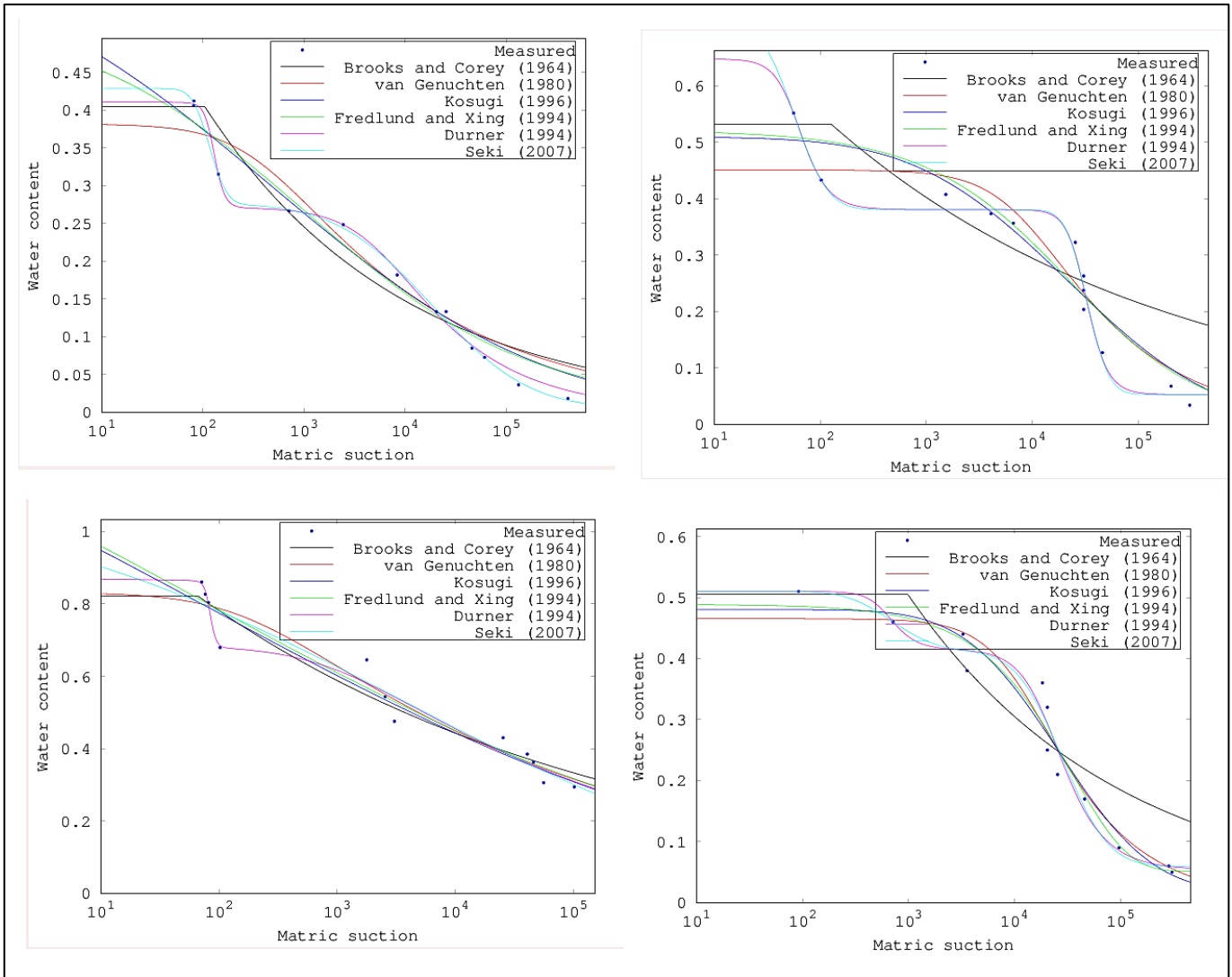


Figura 6. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Barbosa (Sup izq), Caldas 1 (Sup der), Caldas 2 (Inf izq) y Caldas 3 (inf der).

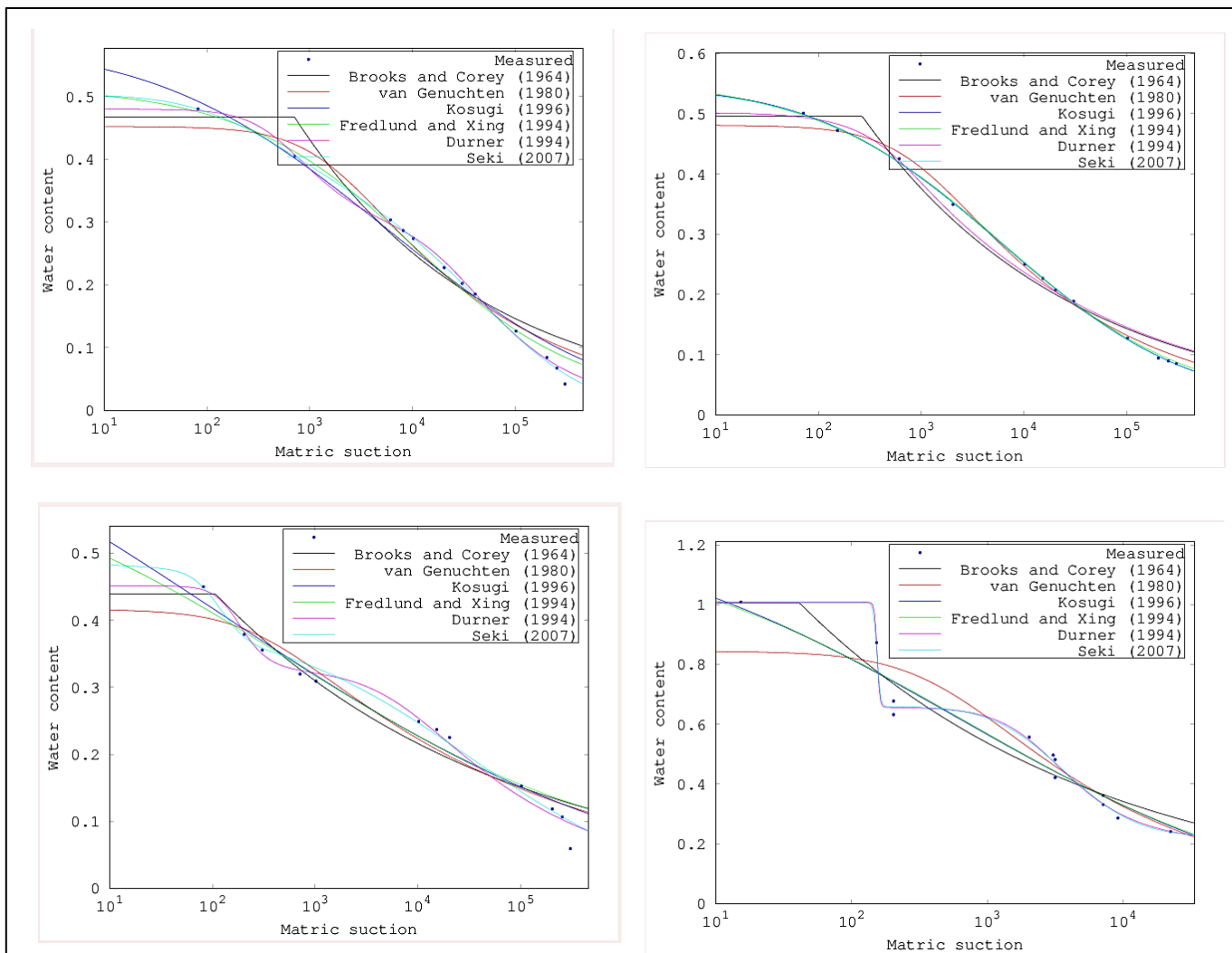


Figura 7. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. El Volador 1 (Sup izq), El Volador 2 (Sup der), El Volador 3(Inf izq) y Nufibara1 (inf der).

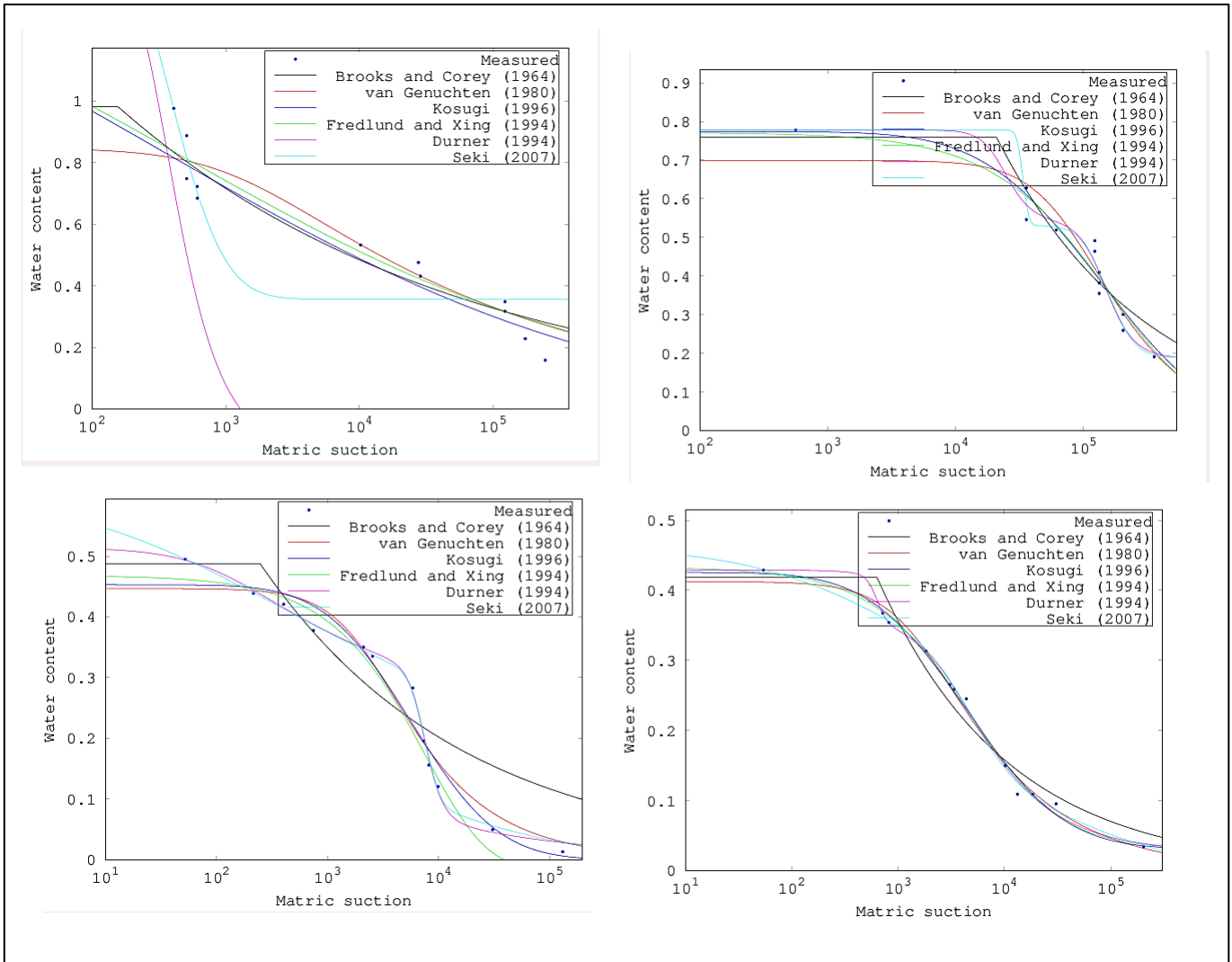


Figura 8. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Nutibara2 (Sup izq), Nutibara 3 (Sup der), El Santuario 1 (Inf izq) y El Santuario 2 (inf der).

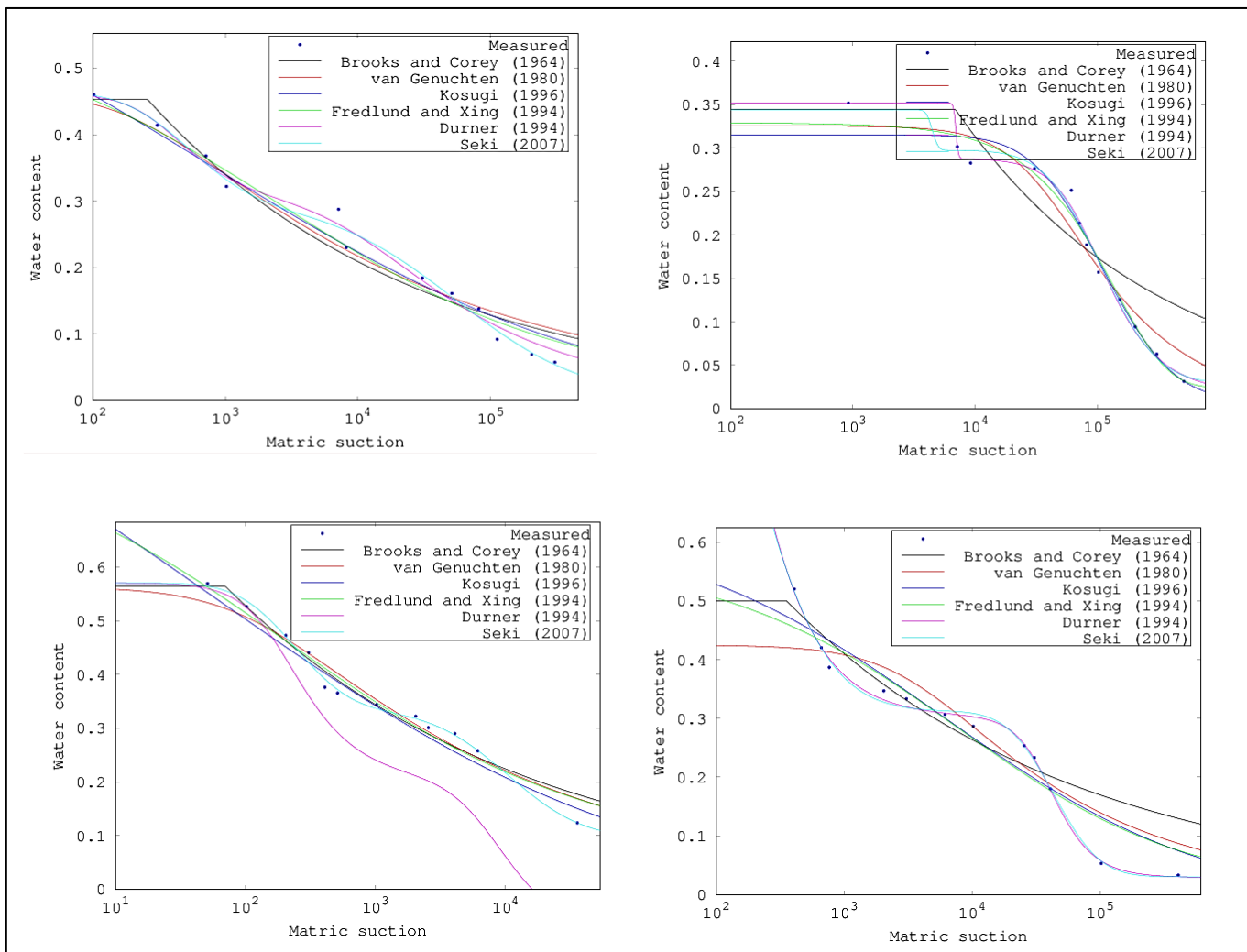


Figura 9. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Fac Minas (Sup izq), Girardota 1 (Sup der), Girardota 2(Inf izq) y Guarne 1 (inf der).

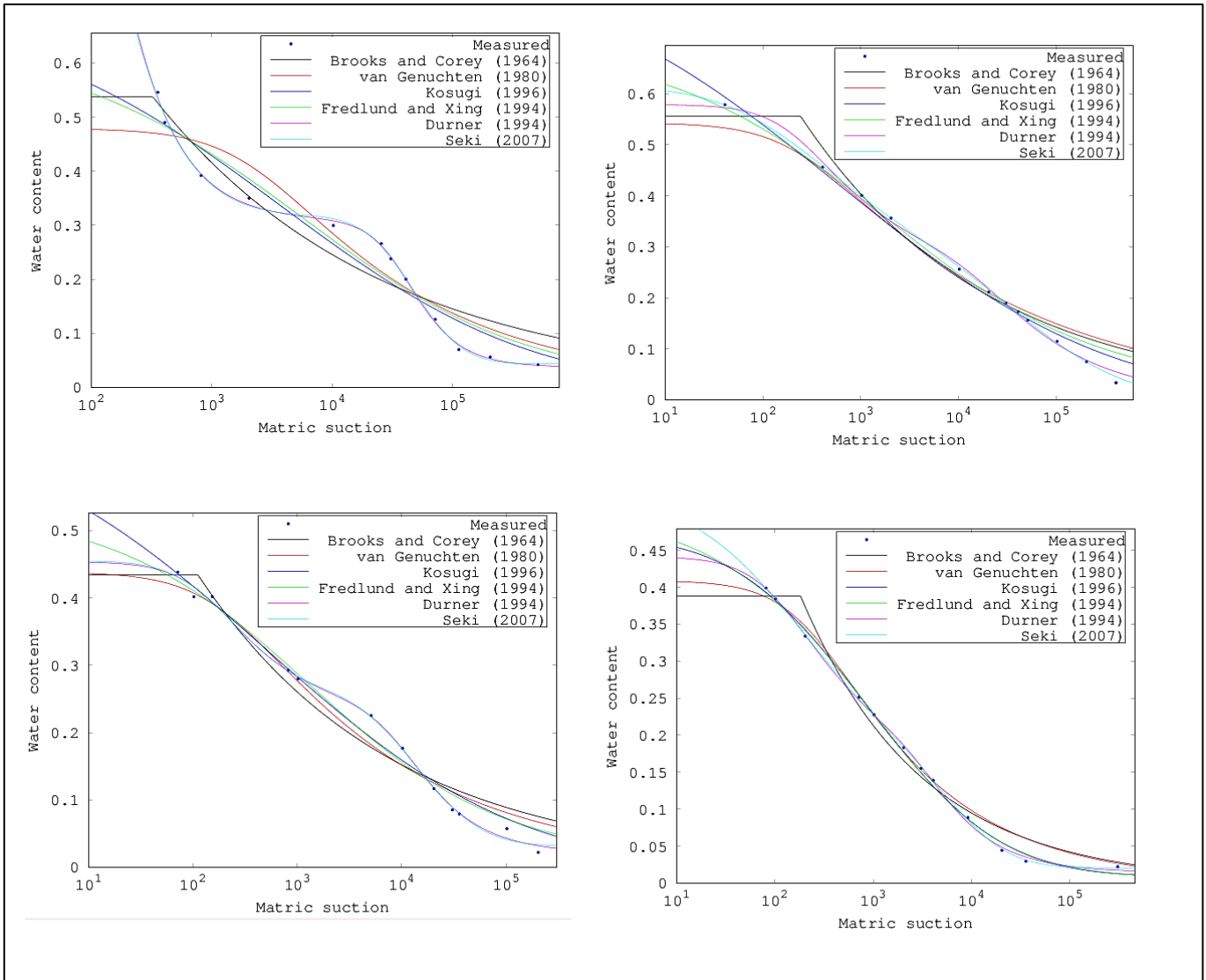


Figura 10. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Guarne 2 (Sup izq), Indural 1 (Sup der), Indural 2(Inf izq) e Indural 3 (inf der).

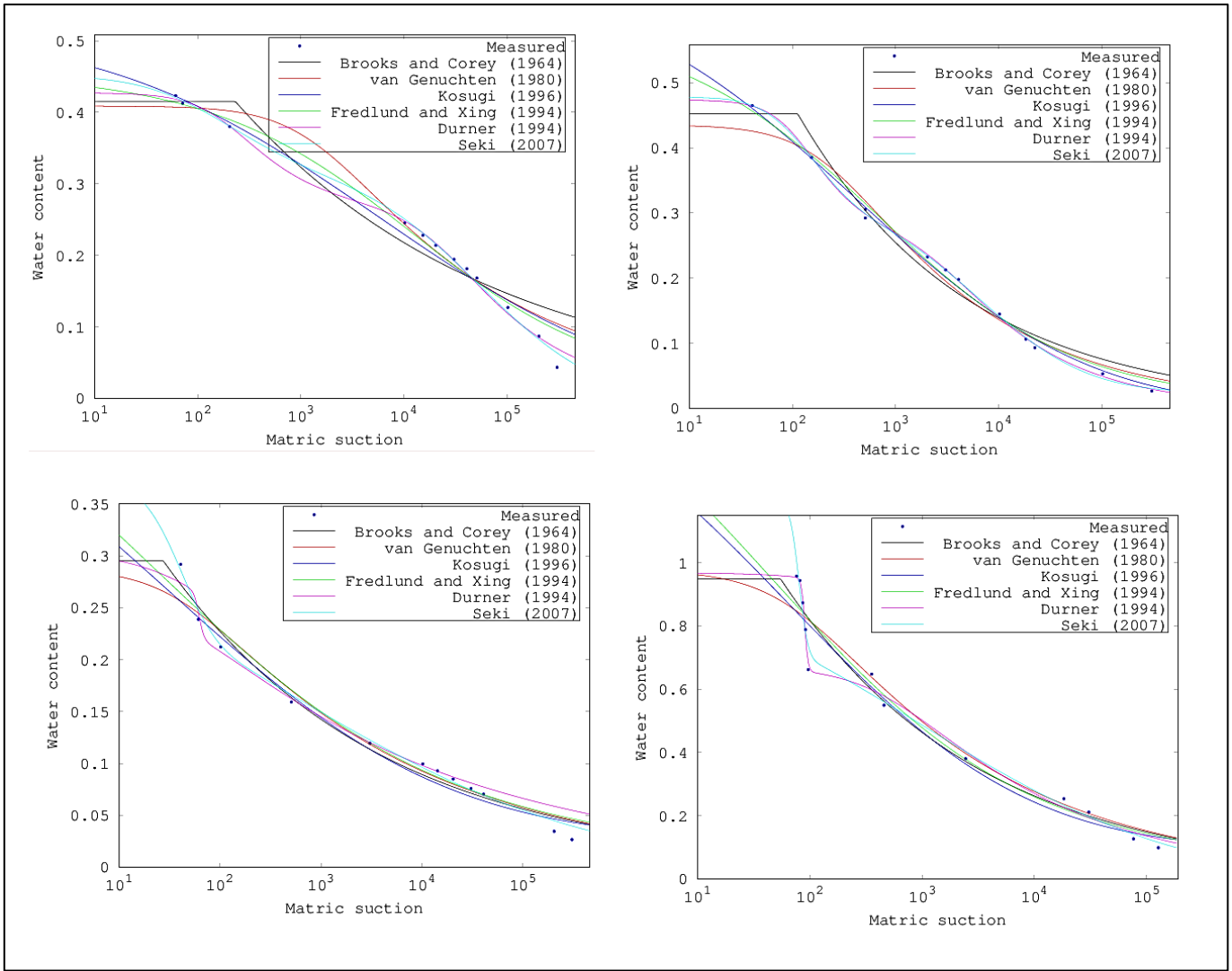


Figura 11. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Itagüí 1 (Sup izq), Itagüí 2 (Sup der), Itagüí 3 (Inf izq) y La Asomadera 1 (inf der).

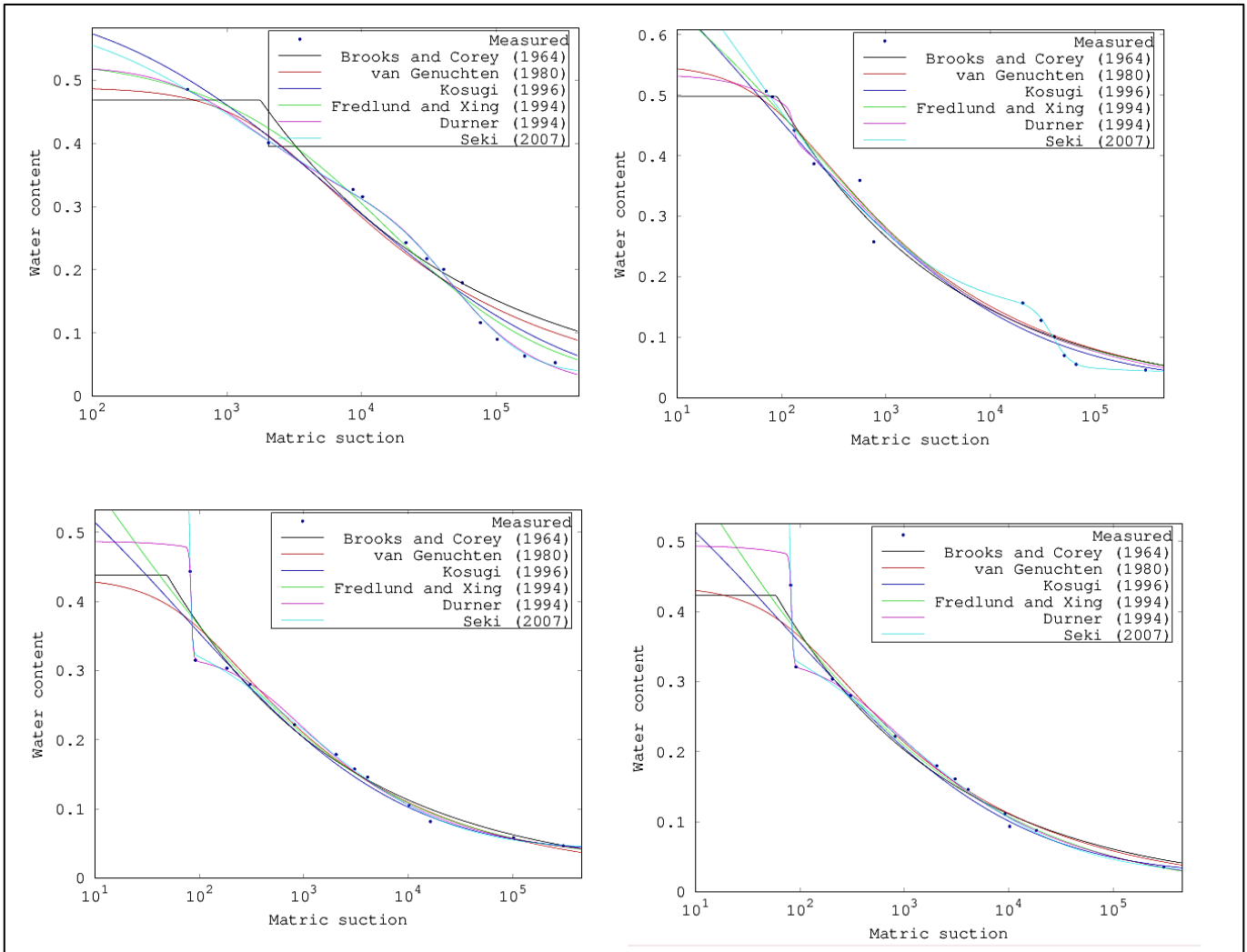


Figura 12. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. La Asomadera 2 (Sup izq), La Asomadera 3 (Sup der), Marinilla1 (Inf izq) y Marinilla 2 (inf der).

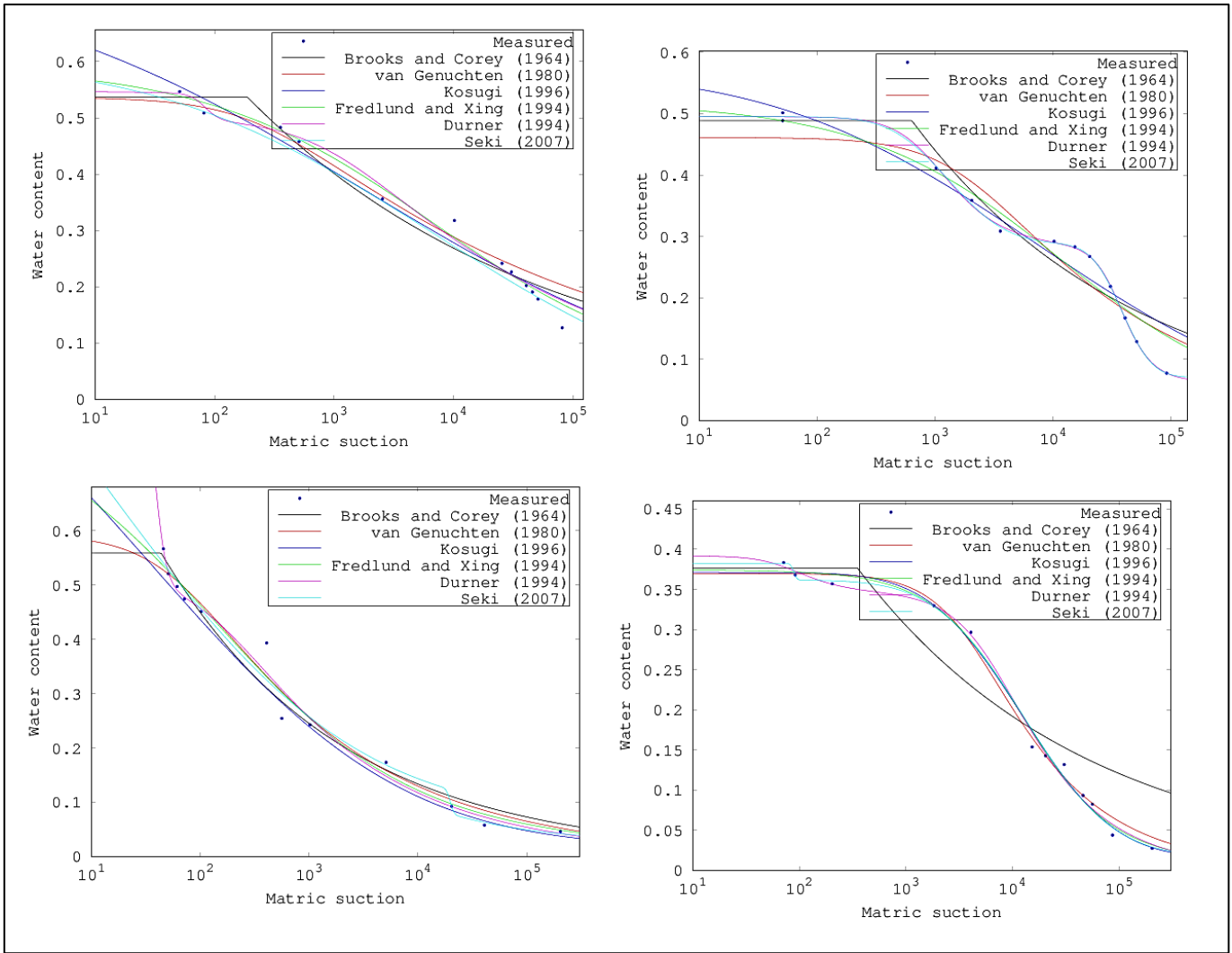


Figura 13. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. Marinilla 3 (Sup izq), Marinilla 4 (Sup der), Marinilla 5 (Inf izq) y Ríongro (inf der).

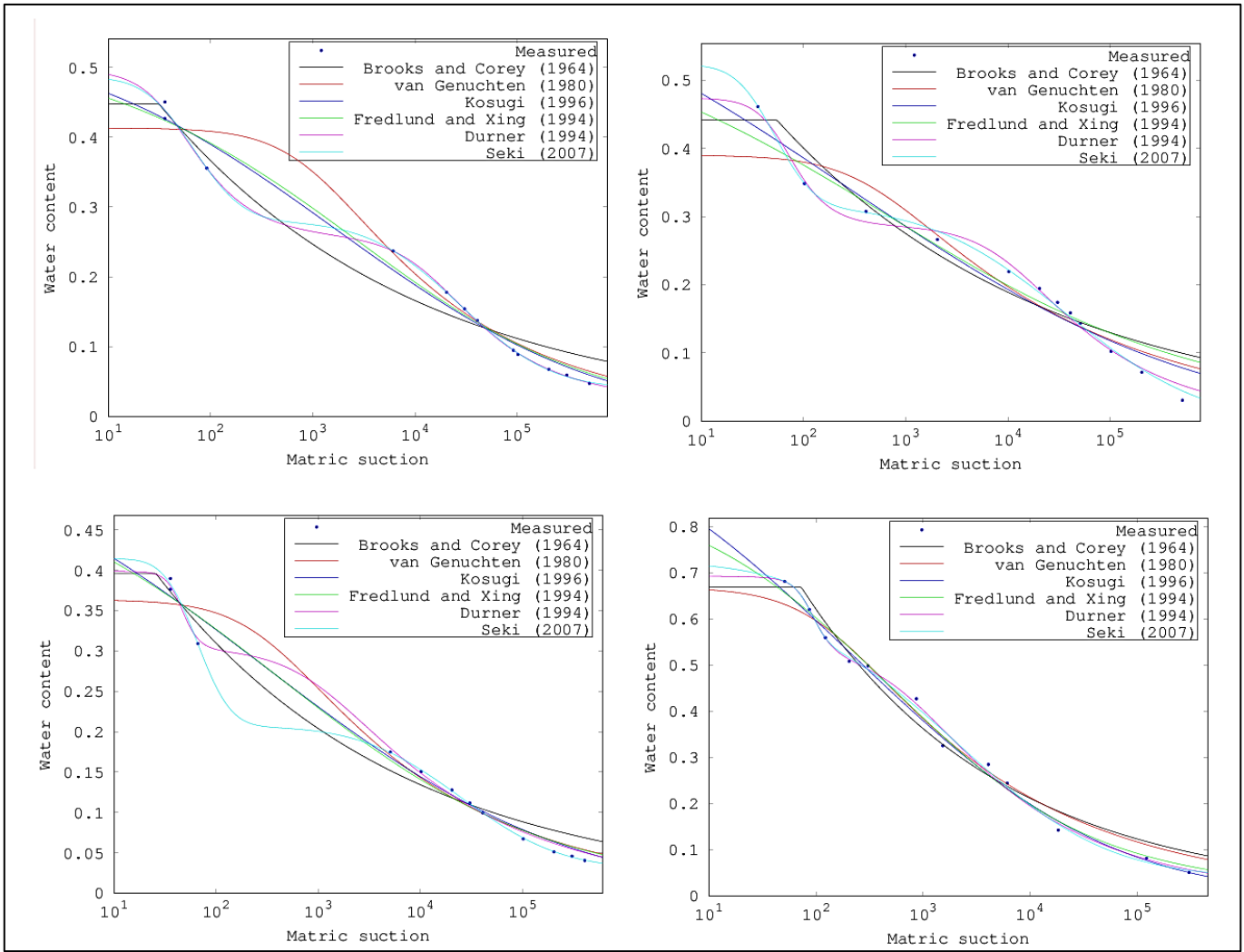


Figura 14. Comparación Curvas de retención de agua experimentales y teóricas. San Pedro 1 (Sup izq), San Pedro 2 (Sup der), San Pedro 3 (Inf izq) y Santa Elena (inf der).

En la Tabla 3 se presentan los coeficientes de correlación obtenidos para las curvas de retención de agua con las diferentes metodologías.

Tabla 3. Coeficientes de Correlación (R^2)

Sitio	Brooks and Corey	van Genuchten	Kosugi	Fredlund and Xing	Durner	Seki
Barbosa	0.93807	0.94209	0.96105	0.96085	0.99670	0.99869
Caldas 1	0.72491	0.89455	0.91152	0.91380	0.98339	0.98287
Caldas 2	0.93744	0.93969	0.94364	0.94329	0.97275	0.94328
Caldas 3	0.83600	0.94700	0.95100	0.95834	0.96894	0.96730
El Volador 1	0.92317	0.96366	0.97084	0.98370	0.99605	0.99813
El Volador 2	0.98151	0.99419	0.99961	0.99940	0.98404	0.99961
El Volador 3	0.94083	0.93726	0.95468	0.94727	0.98649	0.98347
Nutibara 1	0.92461	0.87178	0.93428	0.93321	0.99154	0.99059
Nutibara 2	0.90573	0.90130	0.91359	0.90958	0.84425	0.84289
Nutibara 3	0.88963	0.90234	0.93048	0.93585	0.95750	0.95824
Santuario 1	0.84814	0.95707	0.96526	0.97246	0.99715	0.99731
Santuario 2	0.95833	0.98989	0.99299	0.99411	0.99556	0.99632
Fac Minas	0.95051	0.95138	0.96630	0.96984	0.98546	0.99010
Girardota 1	0.79434	0.94362	0.97151	0.97604	0.99274	0.99014
Girardota 2	0.96398	0.95171	0.96909	0.96372	0.99396	0.99443
Guarne 1	0.86798	0.88176	0.91930	0.91711	0.99561	0.99404
Guarne 2	0.91252	0.91210	0.93930	0.93541	0.99783	0.99743

o

Sifio	Brooks and Corey	van Genuchten	Kosugi	Fredlund and Xing	Durner	Seki
Indural 1	0.96533	0.95698	0.98522	0.98126	0.99696	0.99931
Indural 2	0.95430	0.96928	0.98067	0.97991	0.99719	0.99680
Indural 3	0.97698	0.98737	0.99725	0.99701	0.99919	0.99982
Itagüí 1	0.92921	0.96589	0.96889	0.97756	0.99438	0.99635
Itagüí 2	0.97623	0.97904	0.99486	0.99172	0.99897	0.99893
Itagüí 3	0.97916	0.96886	0.97198	0.97358	0.97555	0.99350
Asomadera1	0.95562	0.94844	0.95252	0.95379	0.99338	0.98553
Asomadera2	0.90823	0.94099	0.96513	0.98030	0.99405	0.99492
Asomadera3	0.97946	0.97814	0.98034	0.97963	0.98164	0.99033
Marinilla 1	0.95334	0.94843	0.95188	0.95304	0.99859	0.99811
Marinilla 2	0.95834	0.95420	0.95831	0.95992	0.99813	0.99782
Marinilla 3	0.96496	0.95312	0.97284	0.98338	0.97950	0.97664
Marinilla 4	0.91545	0.91859	0.92906	0.94500	0.99876	0.99907
Marinilla 5	0.97354	0.97586	0.97867	0.97796	0.98267	0.97991
Ríonegro	0.86383	0.99204	0.99340	0.99340	0.99501	0.99468
San Pedro 1	0.95936	0.97403	0.98267	0.98233	0.99873	0.99872
San Pedro 2	0.92214	0.91603	0.95159	0.93616	0.99209	0.99693
San Pedro 3	0.97485	0.97724	0.98654	0.98487	0.99673	0.99943

Sitio	Brooks and Corey	van Genuchten	Kosugi	Fredlund and Xing	Durner	Seki
Santa Elena	0.97831	0.98086	0.99239	0.99060	0.99555	0.99578

En la mayoría de los casos la correlación es mayor a 90% por lo cual se pensaría que cualquier modelo de estos es ajustable según los alcances de esta investigación. La idea inicial es trabajar con el modelo que ofrezca mejor ajuste en la mayoría de los casos, para este propósito se cuenta cuantas veces cada uno de los modelos usados fue el mejor ajuste para los suelos de la base de datos. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Mejor ajuste según la base de datos

Modelo	Cantidad de veces que obtuvo el mayor coeficiente de correlación	Coefficiente de correlación Promedio
Brooks and Corey	0	0,927
van Genuchten	0	0,949
Kosugi	1	0,964
Fredlund and Xing	1	0,965
Durner	15	0,986
Seki	19	0,987

o

Como se observa el modelo de Seki obtuvo el mayor número de ajustes con mejor coeficiente de correlación promedio, también el modelo propuesto por Durner obtiene un muy buen ajuste, puede verse entonces que estos dos modelos se ajustan muy bien a diferencia de los otros, dada su expresión logarítmica acumulada que permiten representar matemáticamente la bimodalidad que tienen muchos de los suelos de la base de datos, los cuales presentan un alto grado de meteorización y cuentan con características particulares, específicamente para este caso se genera una estructura de macroporos y microporos. Podría trabajarse entonces, con cualquiera de estos 2 modelos, decidiéndose por incorporar el modelo de Durner para determinar la curva de retención de agua, ya que este tiene una expresión menos compleja que Seki y por ende más simple para introducir las propiedades índices dentro de las diferentes variables.

El modelo de Durner implica la determinación de la curva de retención de agua mediante una función multimodal, partiendo principalmente de las condiciones del modelo de Van Genuchten, de esta forma podría ajustarse mejor este modelo a suelos cuya curva característica sea de comportamiento bimodal, teniendo en cuenta este enfoque, se utilizará el modelo paramétrico de Durner para definir una nueva propuesta empírica de determinación de la curva de retención de agua, calibrando los parámetros del modelo con expresiones numéricas resultantes de las propiedades índice de los suelos de la base de datos.

4.4. Determinación de la curva característica usando modelo de DURNER

El modelo seleccionado como se mencionó anteriormente es el modelo de Durner el cual es un modelo bimodal a continuación presentamos nuevamente la expresión (Ecuación 4) y sus parámetros de forma.

o

$$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2}$$

En este caso la cabeza de succión matricial se representa mediante (h) y está dada en centímetros de agua y (S_e) representa la saturación efectiva del suelo la cual se define como:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Donde (θ) es la humedad volumétrica del suelo, (θ_s) es el contenido volumétrico de agua en estado saturado y (θ_r) es el contenido de agua residual.

los parámetros (α_i, m_i y n_i) están sujetos a:

$$\alpha_i > 0, m_i > 0, n_i > 1$$

$$m_i + \frac{1}{n_i} = 1$$

Y los subíndices 1 y 2 corresponden a cada uno de los modos de la expresión, los parámetros m y n son adimensionales y el parámetro α tiene dimensiones inversas a las de presión $\left(\frac{1}{kPa}\right), \left(\frac{1}{cmH_2O}\right)$.

Teniendo en cuenta el ajuste realizado a los datos experimentales, se determinan para cada uno de los suelos de la base de datos, los parámetros de la ecuación de Durner que permiten definir la curva de retención de agua, en la Tabla 5 se observa la determinación de los parámetros del modelo paramétrico de Durner para cada uno de los sitios de nuestra base de datos.

Tabla 5. Parámetros ajuste modelo Durner.

Sitio	θ_s	θ_r	w1	α_1	n1	m1	α_2	n2	m2
Barbosa	0,41	3,3E-06	0,34	7,8E-03	8,97	0,89	1,8E-04	1,52	0,34
Caldas 1	0,65	5,3E-02	0,45	1,7E-02	3,78	0,74	3,3E-05	4,80	0,79
Caldas 2	0,87	4,1E-04	0,21	1,2E-02	18,06	0,94	1,1E-03	1,17	0,15
Caldas 3	0,51	5,4E-02	0,21	1,6E-03	4,03	0,75	4,8E-05	2,57	0,61
El Volador 1	0,48	4,7E-06	0,41	1,9E-03	1,86	0,46	4,3E-05	1,58	0,37
El Volador 2	0,50	6,1E-04	0,91	2,2E-03	1,21	0,17	1,6E-03	2,40	0,58
El Volador 3	0,45	1,0E-07	0,28	5,9E-03	3,60	0,72	1,6E-04	1,31	0,24
Nutibara 1	1,01	2,0E-01	0,44	6,5E-03	47,45	0,98	4,1E-04	2,11	0,53
Nutibara 2	1,61	2,7E-01	0,93	3,2E-03	2,78	0,64	1,9E-22	2,18	0,54
Nutibara 3	0,78	1,9E-01	0,40	4,3E-05	4,70	0,79	7,2E-06	4,36	0,77
Santuario 1	0,51	1,1E-06	0,52	9,2E-03	1,32	0,24	1,4E-04	5,88	0,83
Santuario 2	0,43	2,6E-02	0,17	1,6E-03	8,97	0,89	3,4E-04	1,78	0,44
Fac Minas	0,46	1,9E-06	0,34	2,9E-03	2,34	0,57	1,1E-04	1,40	0,29
Girardota 1	0,35	1,8E-02	0,19	1,4E-04	49,65	0,98	1,2E-05	2,41	0,59
Girardota 2	0,57	9,7E-02	0,55	5,6E-03	2,33	0,57	1,4E-04	2,30	0,56
Guarne 1	1,34	2,9E-02	0,79	8,5E-03	2,24	0,55	2,7E-05	3,19	0,69
Guarne 2	1,45	3,7E-02	0,81	1,1E-02	2,20	0,55	2,7E-05	2,67	0,63
Indural 1	0,58	5,1E-08	0,53	4,1E-03	1,62	0,38	6,8E-05	1,50	0,33
Indural 2	0,45	2,0E-02	0,50	6,9E-03	1,76	0,43	1,1E-04	1,97	0,49
Indural 3	0,44	1,4E-02	0,65	8,6E-03	1,63	0,39	3,1E-04	1,99	0,50
Itagui 1	0,43	1,8E-07	0,38	5,3E-03	1,78	0,44	4,6E-05	1,50	0,33
Itagui 2	0,47	1,6E-04	0,42	8,5E-03	2,25	0,55	4,0E-04	1,46	0,32

Sitio	θ_s	θ_r	w1	a1	n1	m1	a2	n2	m2
Itagui 3	0,30	4,5E-07	0,86	3,0E-02	1,17	0,15	1,6E-02	18,28	0,95
Asomadera1	0,97	2,4E-06	0,30	1,1E-02	30,66	0,97	2,1E-03	1,30	0,23
Asomadera2	0,52	1,6E-05	0,55	1,4E-03	1,46	0,31	3,0E-05	2,03	0,51
Asomadera3	0,53	2,8E-06	0,09	7,7E-03	24,05	0,96	6,7E-03	1,28	0,22
Marinilla 1	0,49	2,5E-02	0,35	1,2E-02	49,98	0,98	2,6E-03	1,40	0,29
Marinilla 2	0,49	3,5E-07	0,32	1,2E-02	47,30	0,98	3,3E-03	1,33	0,25
Marinilla 3	0,55	1,4E-05	0,09	1,2E-02	7,26	0,86	1,0E-03	1,24	0,19
Marinilla 4	0,50	6,3E-02	0,49	1,1E-03	2,28	0,56	2,9E-05	3,82	0,74
Marinilla 5	0,90	3,2E-03	0,43	2,6E-02	9,05	0,89	7,1E-03	1,35	0,26
Ríonegro	0,39	1,4E-08	0,12	1,3E-02	2,45	0,59	1,6E-04	1,67	0,40
San Pedro 1	0,50	2,1E-02	0,51	2,4E-02	1,99	0,50	7,4E-05	1,60	0,37
San Pedro 2	0,47	5,1E-06	0,40	1,6E-02	2,77	0,64	1,0E-04	1,43	0,30
San Pedro 3	0,40	2,1E-06	0,24	2,2E-02	5,68	0,82	1,1E-03	1,30	0,23
Santa Elena	0,69	2,1E-06	0,23	1,1E-02	4,92	0,80	1,6E-03	1,36	0,27

Se presentan en las Figura 15 a la Figura 26 la comparación de las curvas de retención de agua experimentales para los suelos de la base de datos y las determinadas mediante el modelo de Durner. en el eje de las abscisas la succión matricial en cm columna de agua y en el eje de las ordenadas el contenido volumétrico de agua

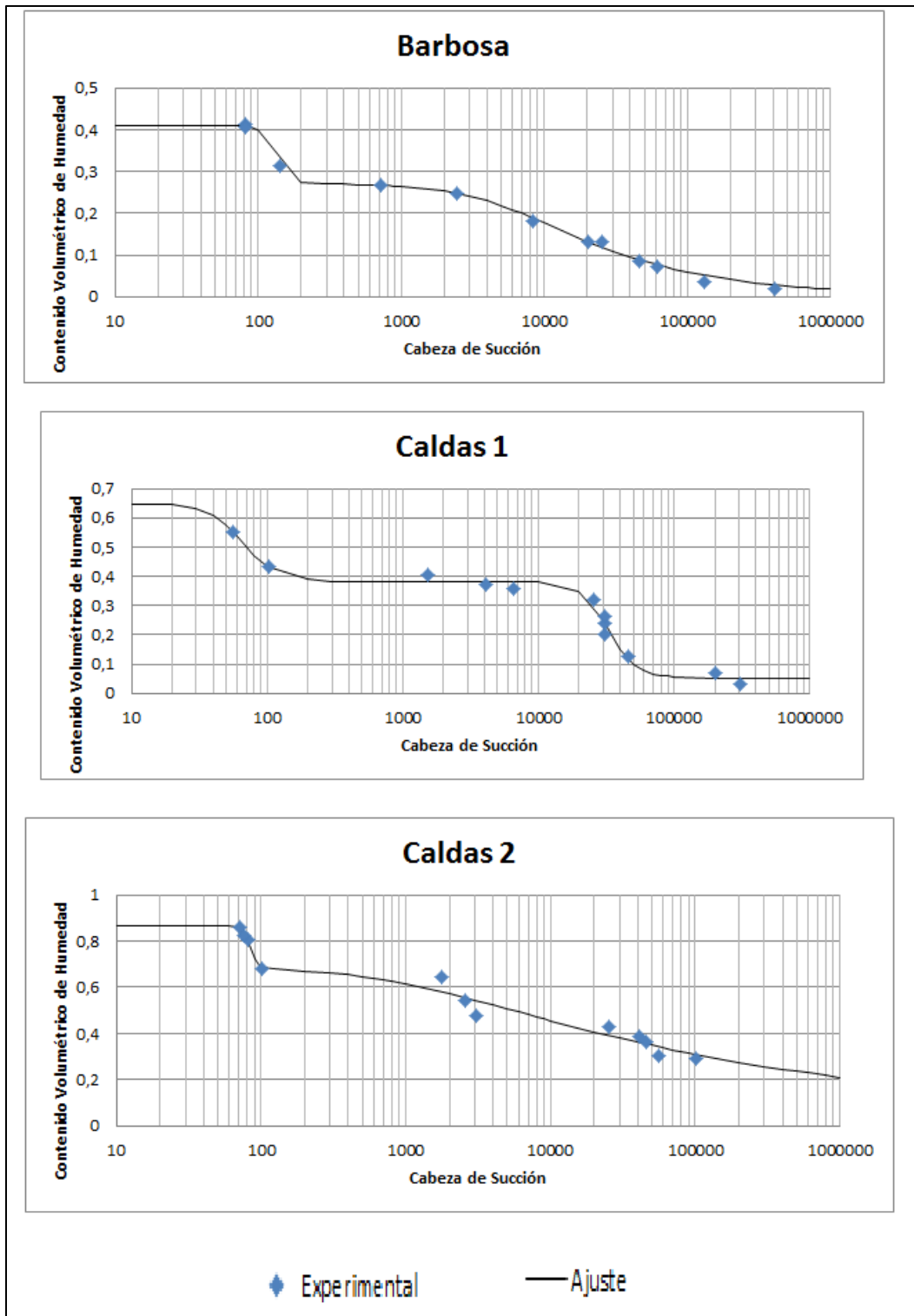


Figura 15. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Barbosa y Caldas

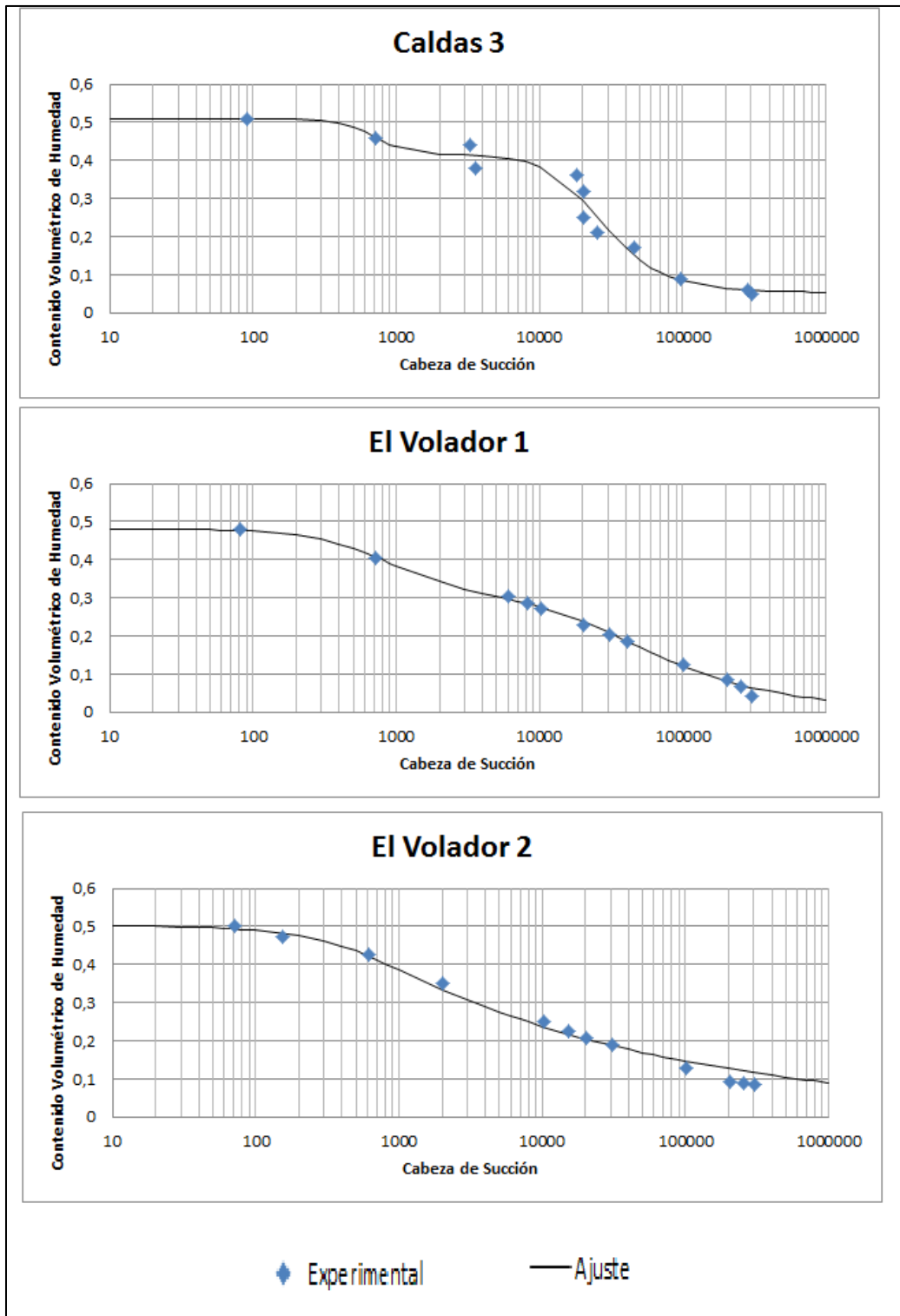


Figura 16. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Caldas y Cerro El Volador

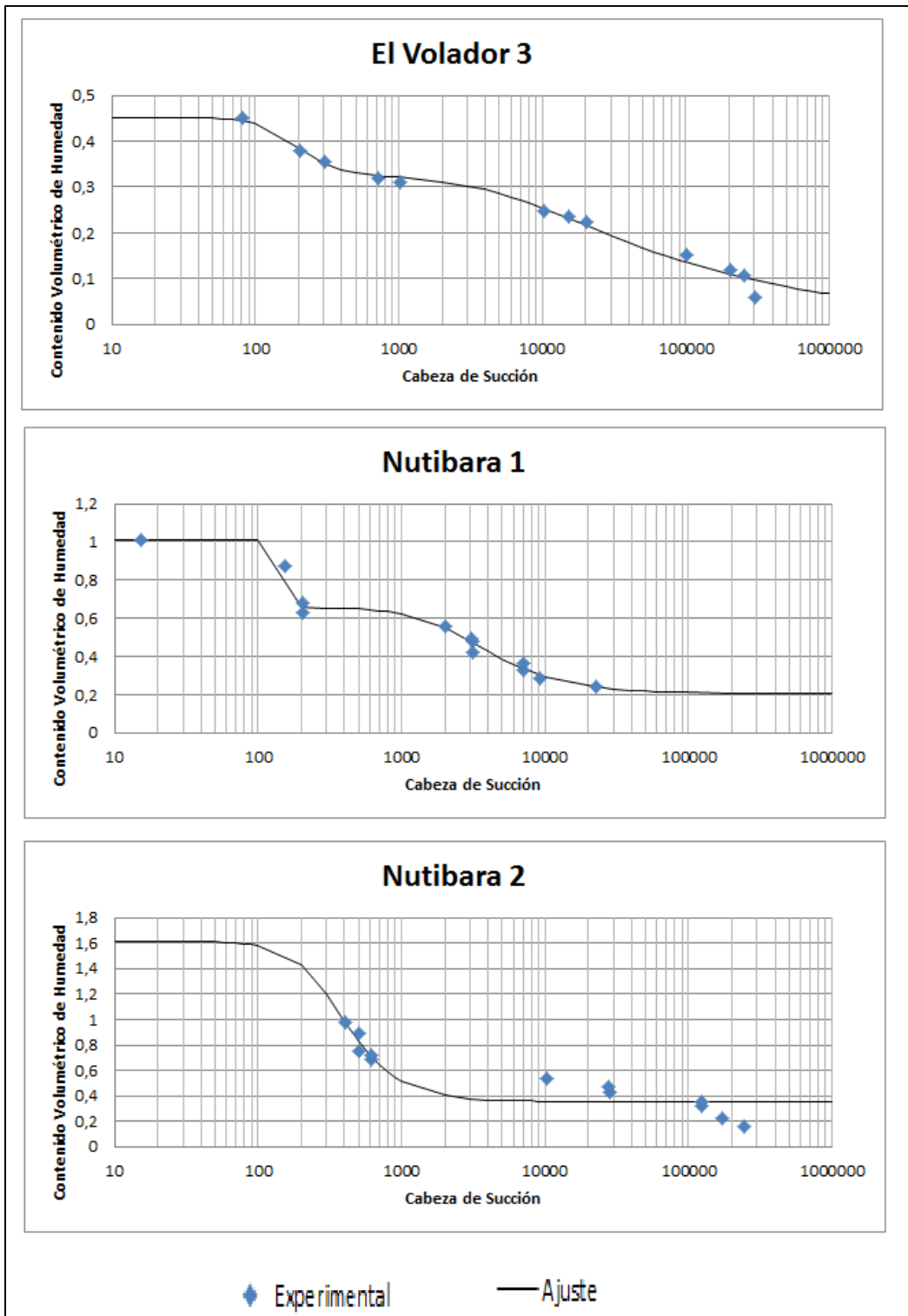


Figura 17. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Cerro El Volador y Cerro Nutibara.

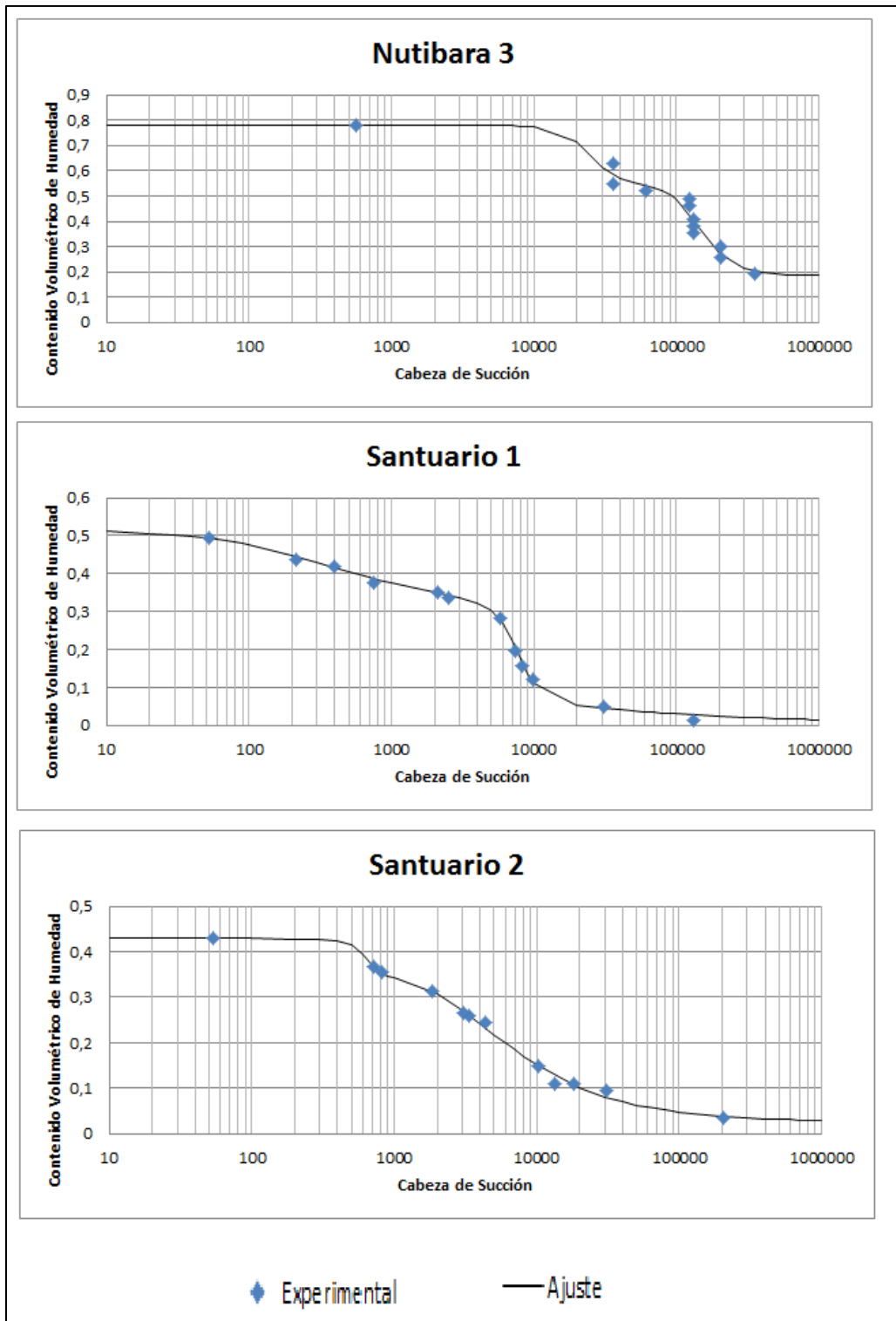


Figura 18. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Cerro Nutibara y El Santuario.

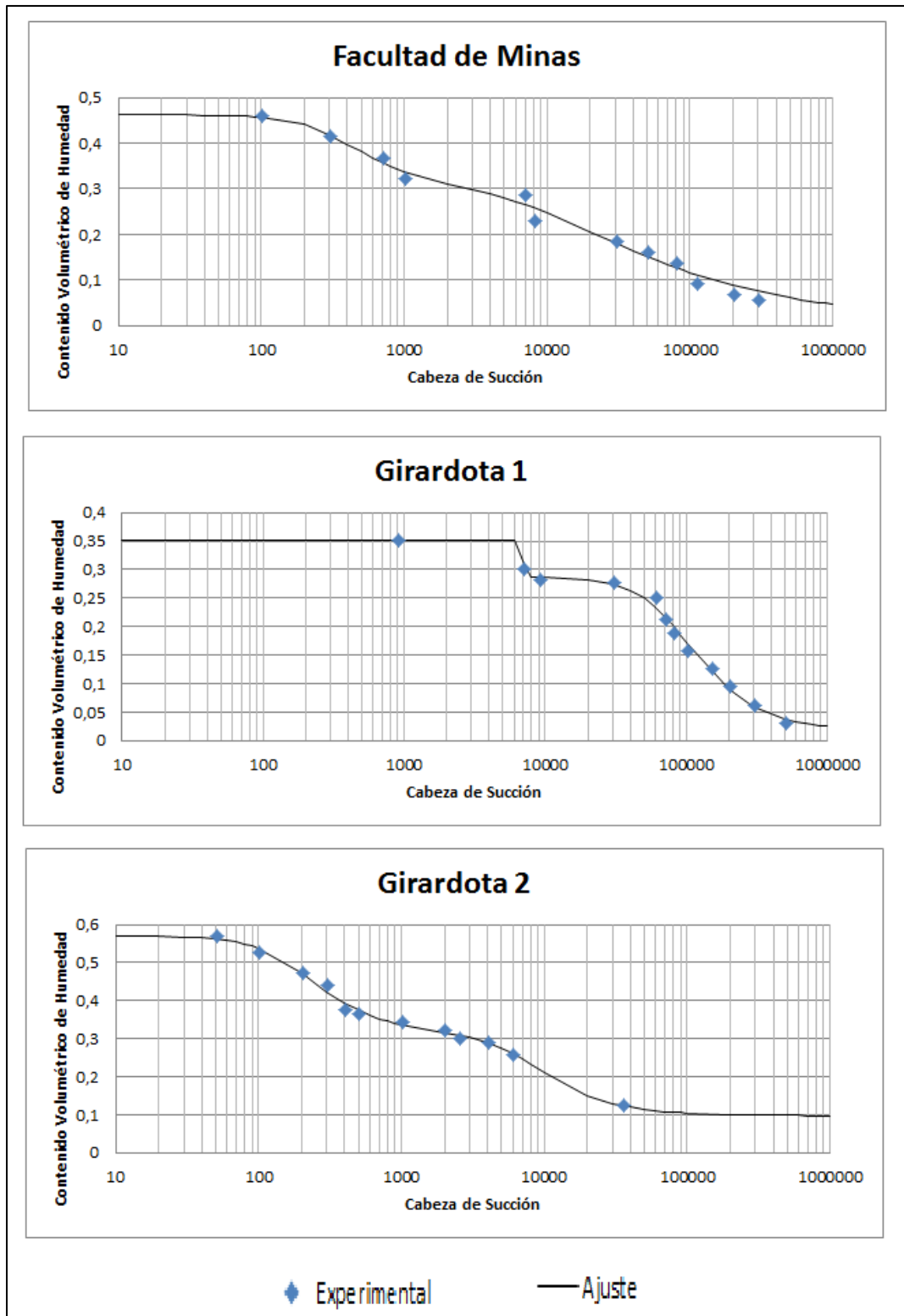


Figura 19. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Facultad de Minas y Girardota

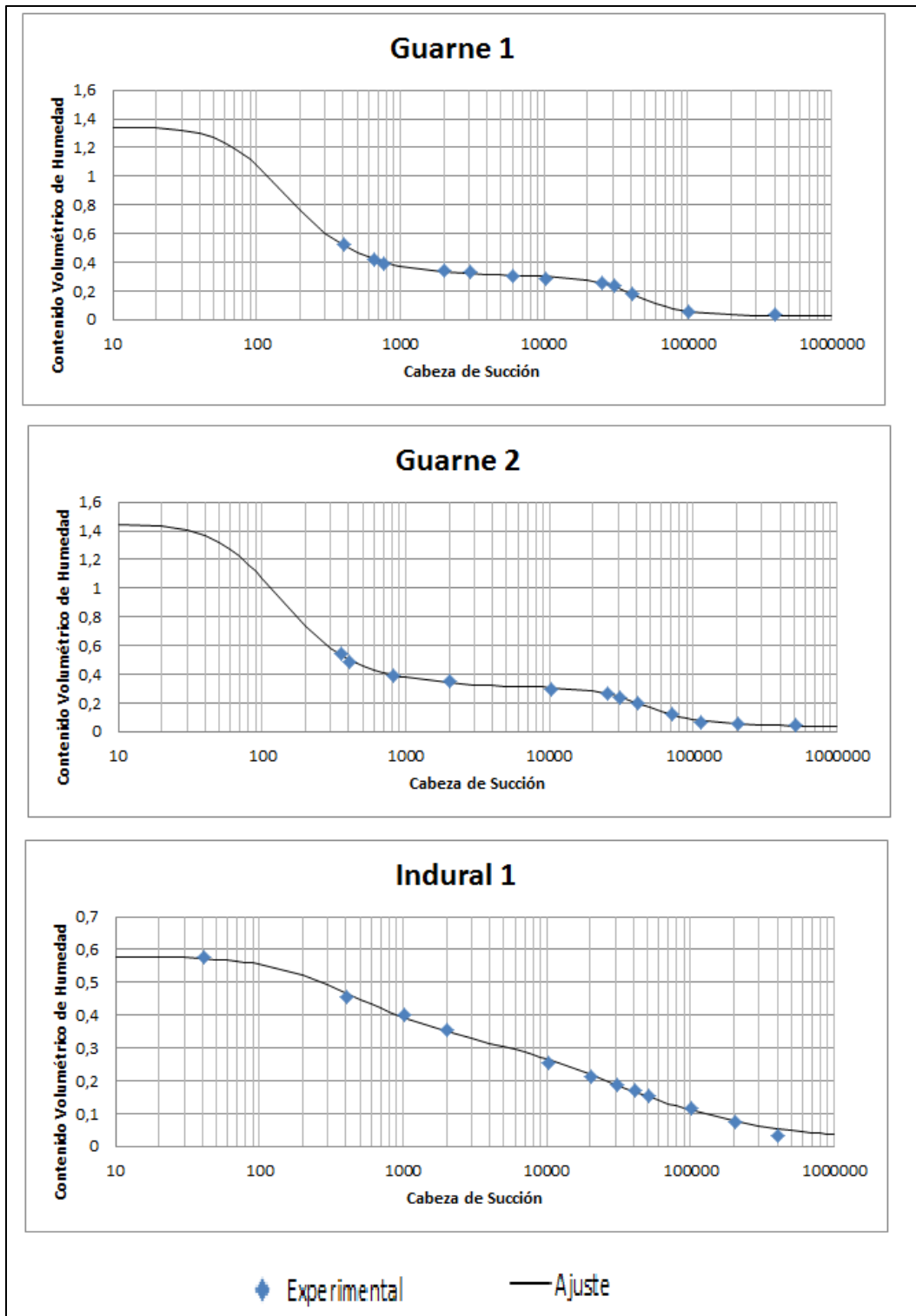


Figura 20. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Guarne e Indural.

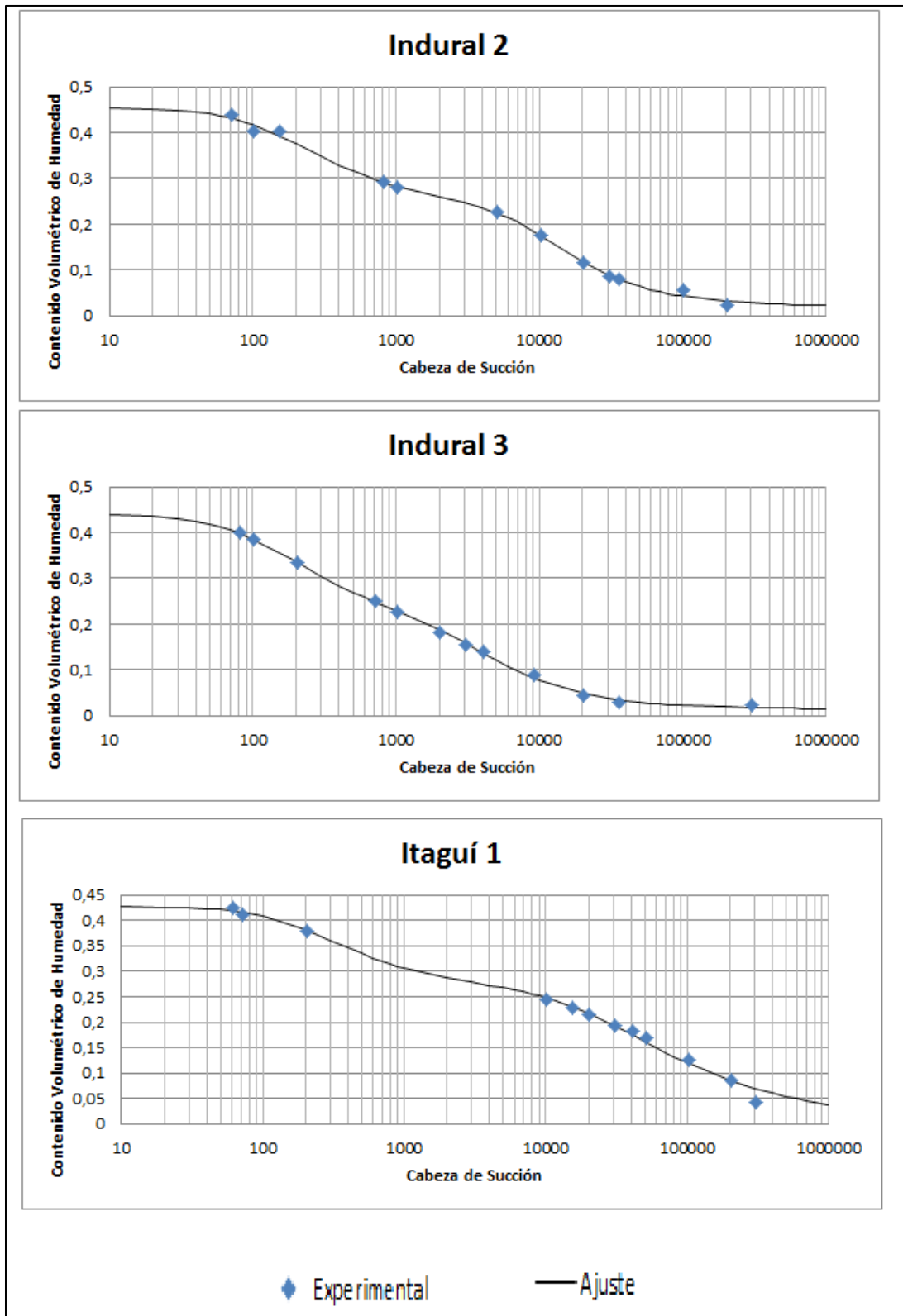


Figura 21. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Indural e Itagüí.

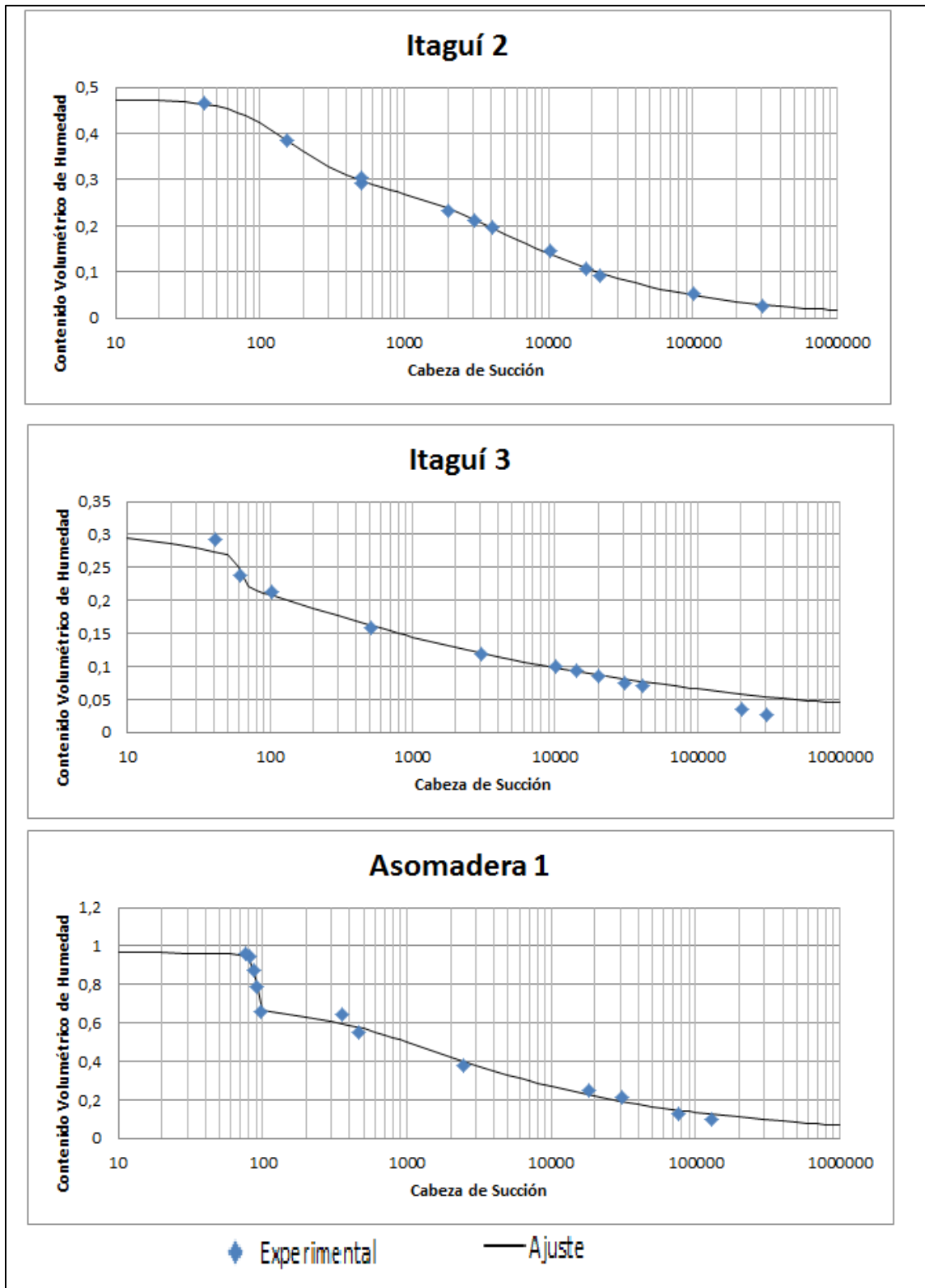


Figura 22. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Itagüí y La Asomadera.

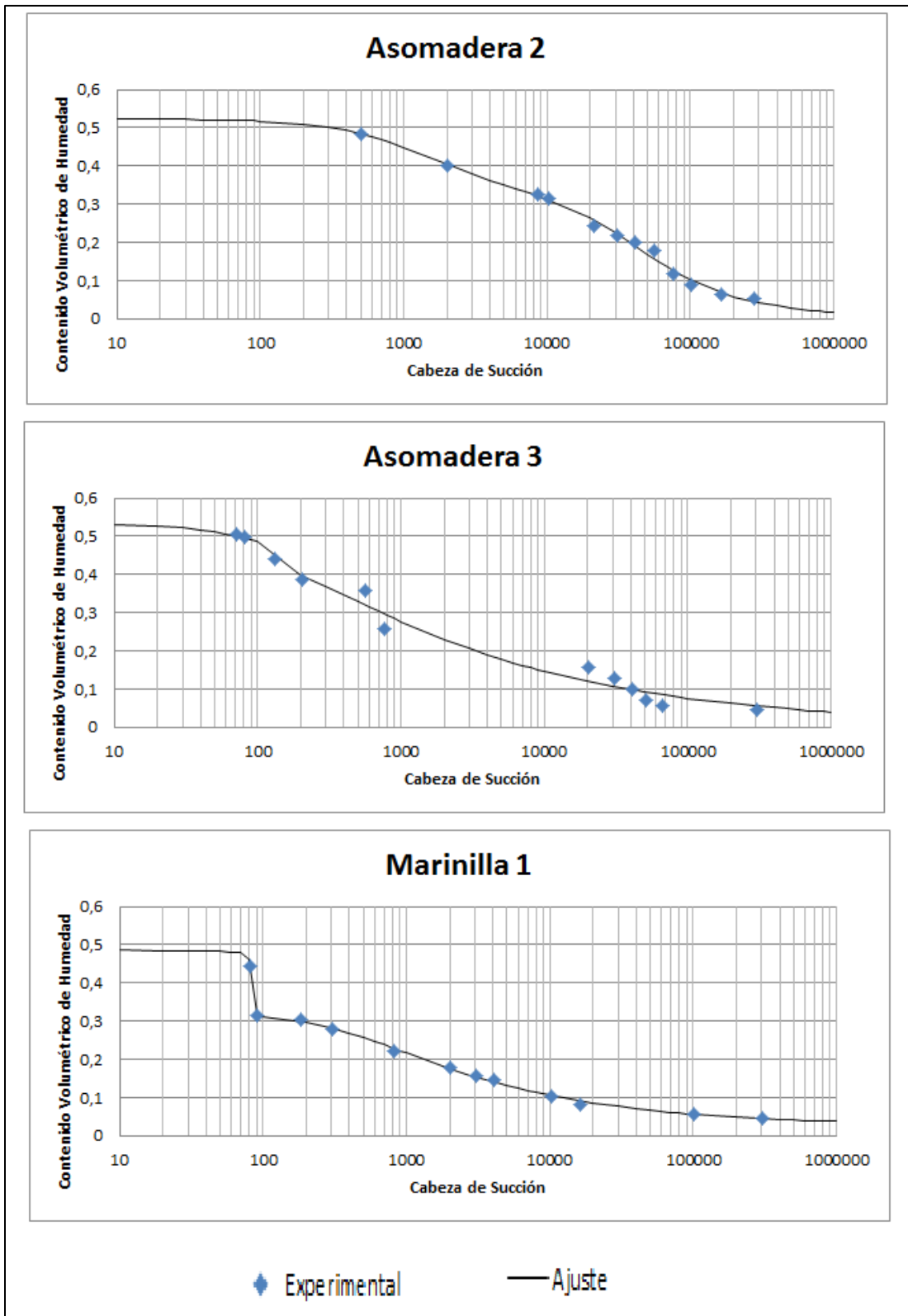


Figura 23. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. La Asomadera y Marinilla.

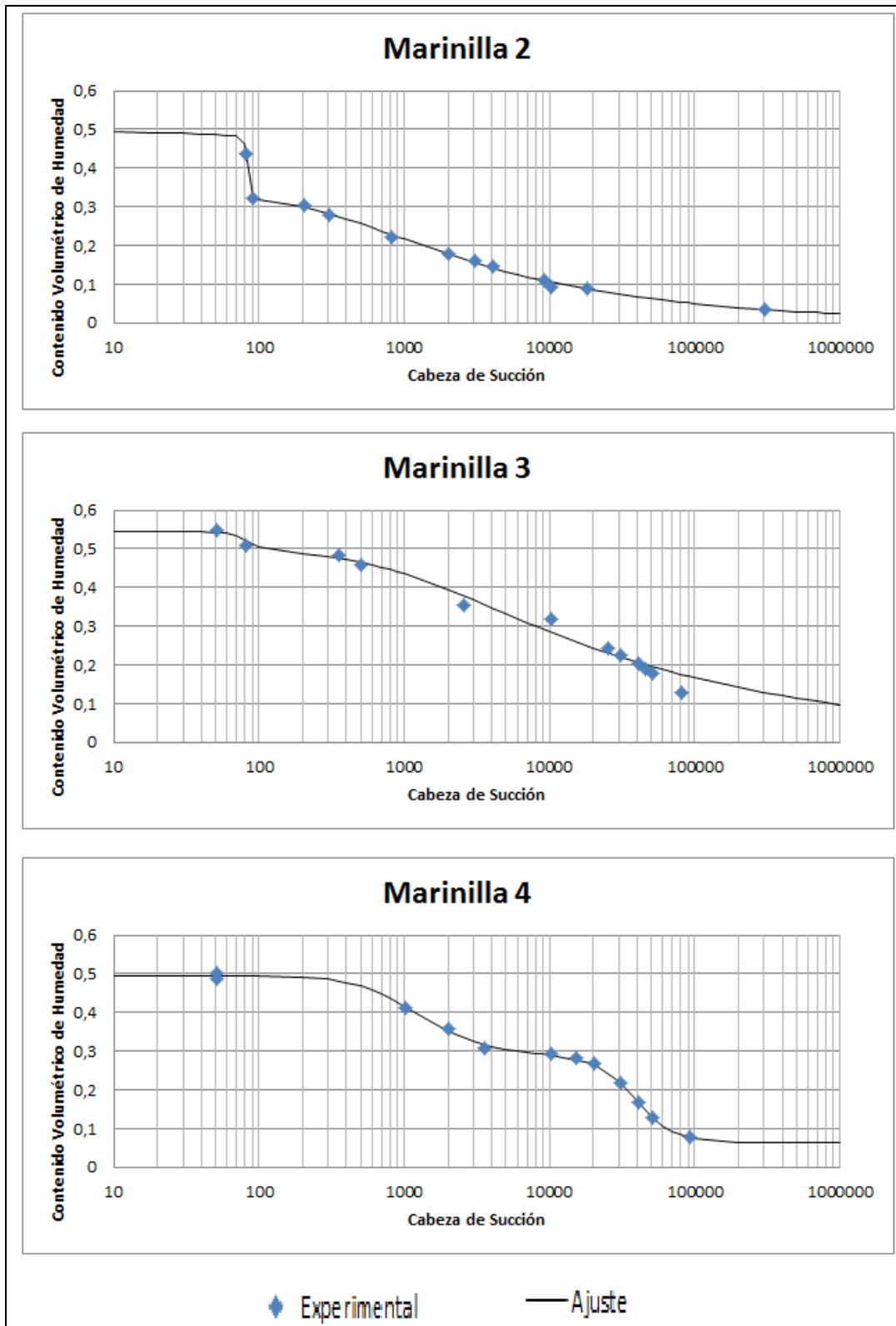


Figura 24. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Marinilla

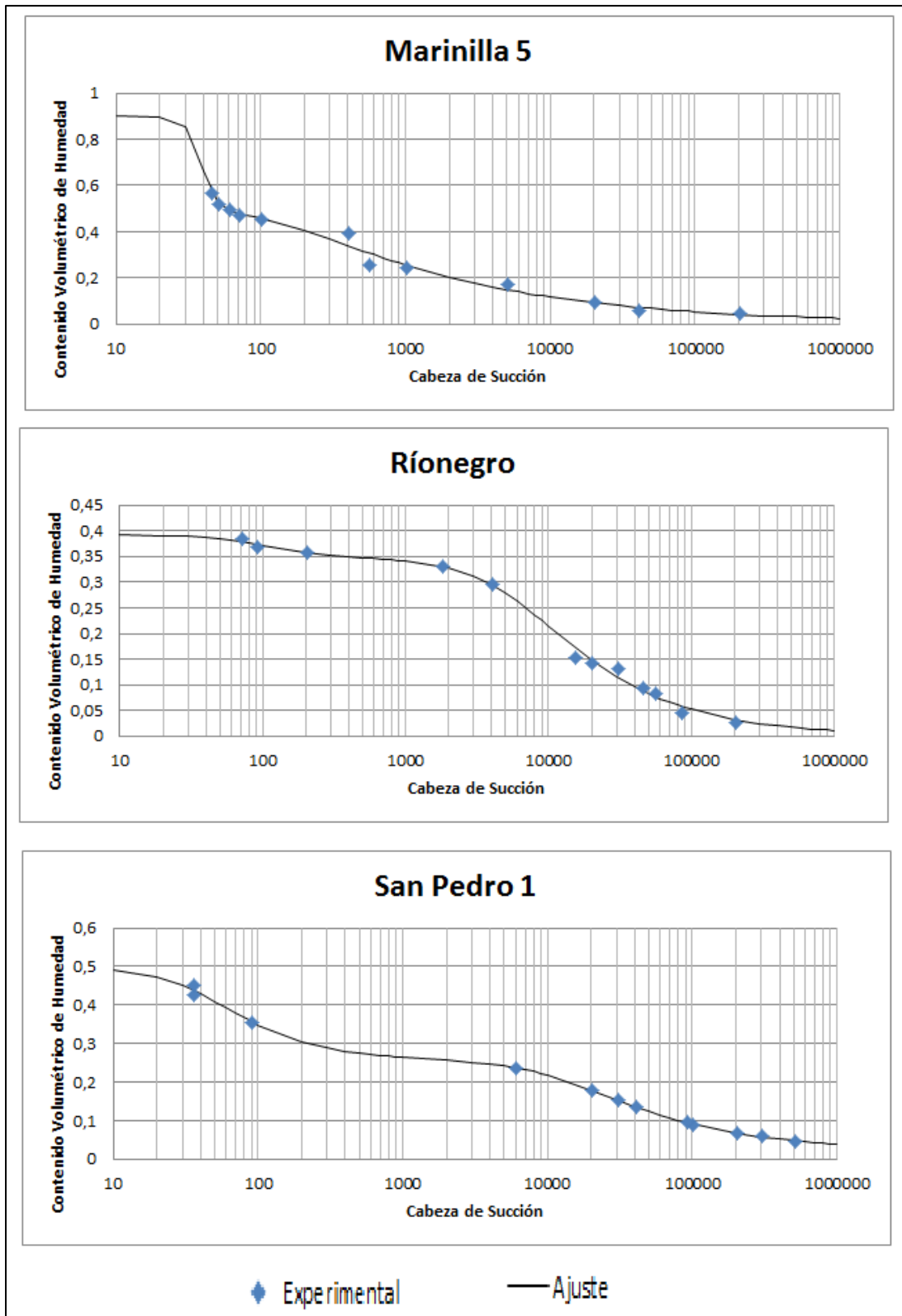


Figura 25. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. Marinilla, Ríonegro y San Pedro.

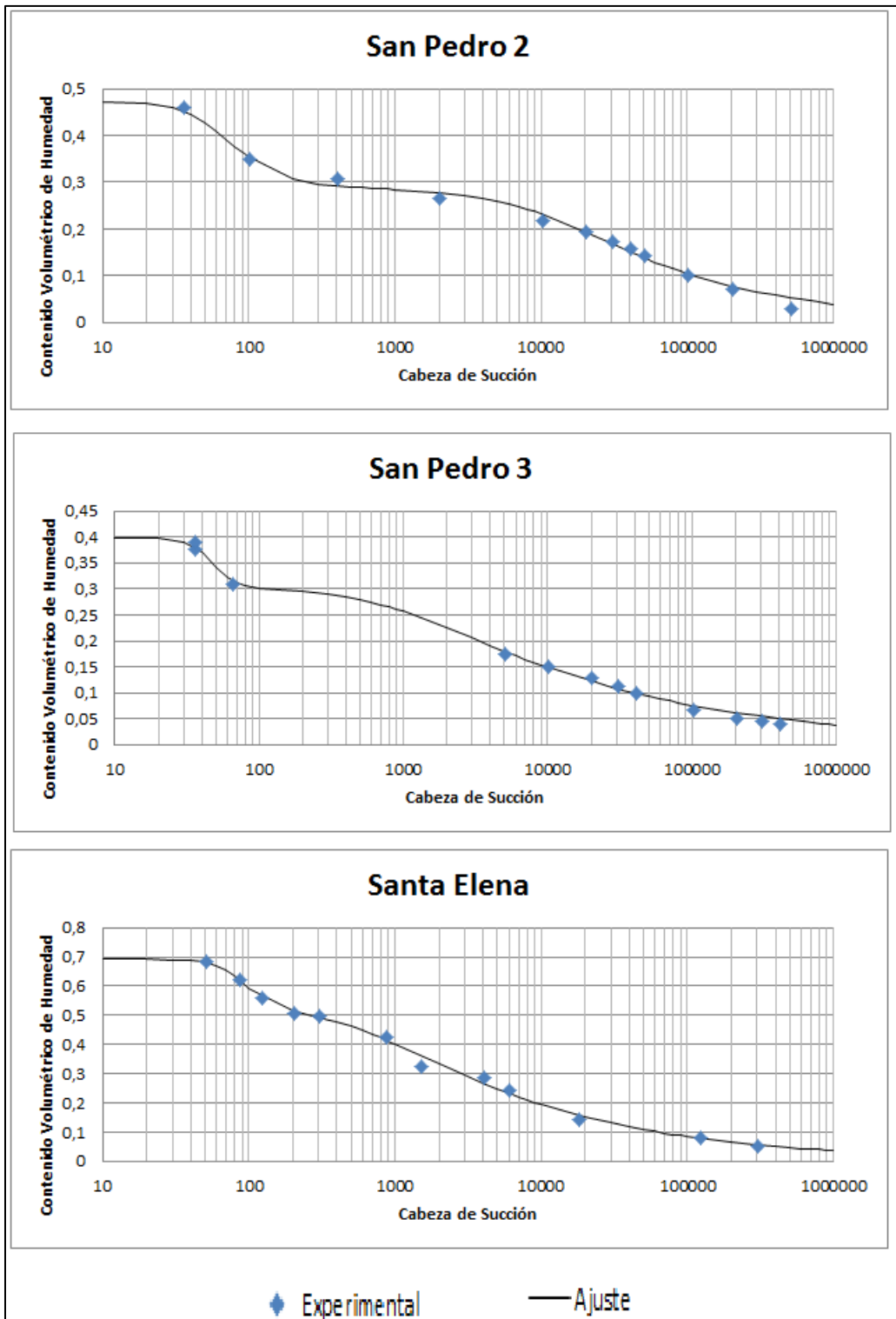


Figura 26. Comparación Curvas de retención de agua experimental y ajuste con el modelo de Durner. San Pedro y Santa Elena.

o

El siguiente paso es encontrar relaciones matemáticas que permitan definir las variables del modelo involucrando las propiedades índices del suelo. Para encontrar expresiones que permitan determinar los parámetros del modelo de Durner con base en las propiedades índice se hicieron gráficas de los parámetros mencionados versus las propiedades índice del suelo o la combinación de estos; ya sea sumándolos, multiplicándolos o dividiéndolos. Permittiendo obtener para cada uno de los casos una propuesta que presentara el mejor ajuste y que calibrara dicho parámetro. En la Tabla 6 se muestran las expresiones determinadas mediante las propiedades índice y con las cuales se buscó relacionar los parámetros del modelo de Durner, en total fueron ensayadas y graficadas 126 relaciones para llegar a las expresiones definitivas.

Tabla 6. Relaciones determinadas entre propiedades índice.

Propiedades índice directas	LL	LP	IP	% Finos	e	GS	wn
Producto entre propiedades índice		LL*LP	LL*IP	(LL *FINOS)	(LL *e)	(LL*GS)	LL*wn
			LP*IP	(LP *FINOS)	(LP *e)	LP*GS	LP*wn
				(IP *FINOS)	(IP *e)	(IP *GS)	IP*wn
					(Finos * e)	(Finos * GS)	Finos*wn
						(e*GS)	e*wn
División entre Propiedades índice		LL/LP	LL/IP	(LL /FINOS)	(LL /e)	(LL /GS)	LL/LP
			LP/IP	(LP /FINOS)	(LP /e)	(LP /GS)	LP/wn
				(IP /FINOS)	(IP /e)	(IP /GS)	IP/wn
					(Finos /e)	(Finos /GS)	Finos/wn
						(e/GS)	e/wn
							GS/wn
		LP/LL	IP/LL	(FINOS/LL)	(e/LL)	(GS/LL)	wn/LL
			IP/LP	(FINOS/LP)	(e/LP)	GS/LP	wn/LP
				(FINOS/IP)	(e/IP)	GS/IP	wn/IP
					(e/Finos)	GS/Finos	wn/Finos
Potencia entre propiedades índice		LL^LP	LL^IP	(LL ^FINOS)	(LL ^e)	LL^GS	LL^wn
			Lp^IP	(LP ^FINOS)	(LP ^e)	LP^GS	LP^wn
				(IP ^FINOS)	(IP ^e)	IP^GS	IP^wn
					(Finos ^e)	Finos^GS	Finos^wn
						e^GS	e^wn
							GS^wn
		LP^LL	IP^LL	(FINOS^LL)	(e^LL)	GS^LL	wn^LL
			IP^LP	(FINOS^LP)	(e^LP)	GS^LP	wn^LP
				(FINOS^IP)	(e^IP)	GS^IP	wn^IP
					(e^Finos)	GS^Finos	wn^Finos
Exponencial de propiedades índice	exp(LL)	exp(LP)	exp(IP)	exp (Finos)	exp e	exp GS	exp wn
	ln (LL)	ln (LP)	ln (IP)	ln (Finos)	ln e	ln (GS)	
Logaritmo de Propiedades índice							ln(1/wn)

En las figuras 27 a la figura 32 se muestran algunas curvas donde se relacionan los parámetros de la ecuación de Durner con propiedades índice, esto se hizo inicialmente descartando algunos de los datos para analizar las tendencias y relaciones principales.

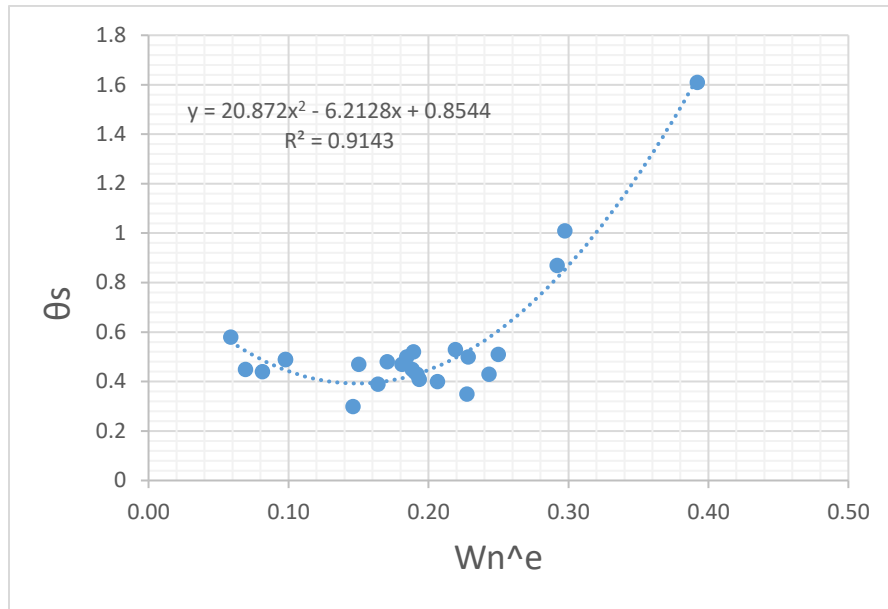


Figura 27. Gráfico de comparación parámetro θ_s con la relación (Wn^e)

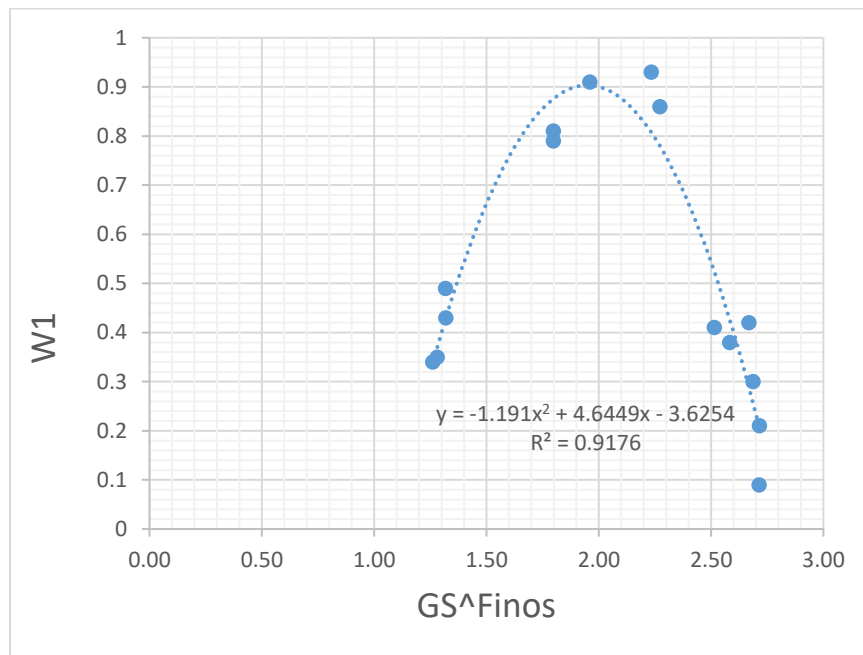


Figura 28. Gráfico de comparación parámetro $W1$ con la relación (GS^{Finos})

o

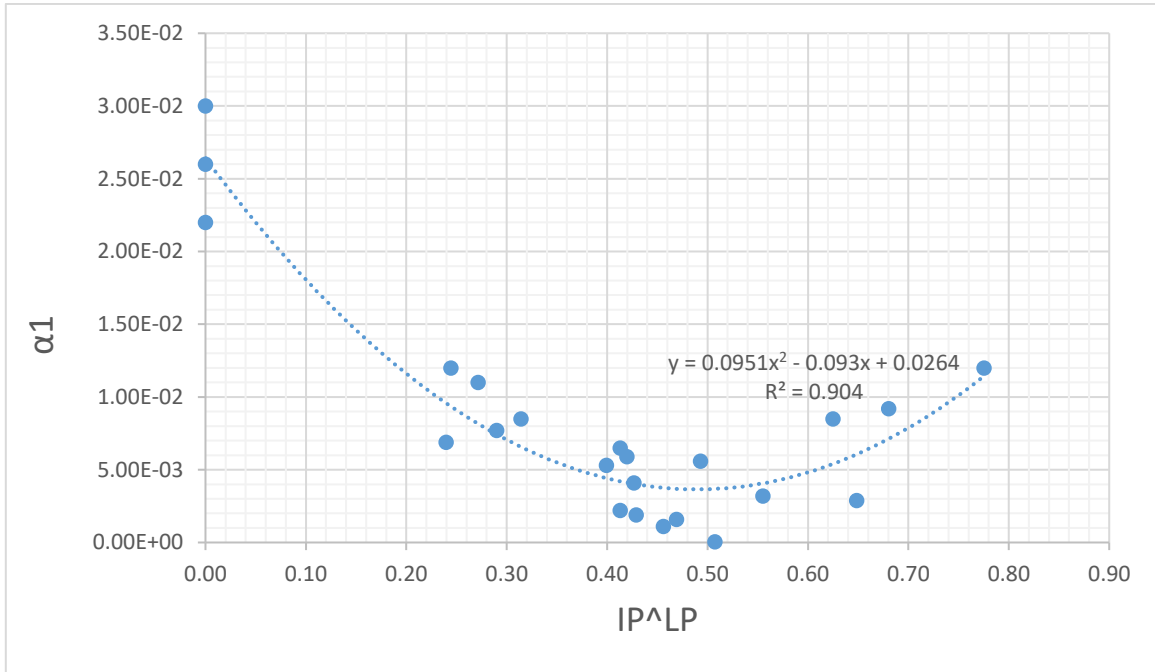


Figura 29. Gráfico de comparación parámetro α_1 con la relación (IP^{LP})

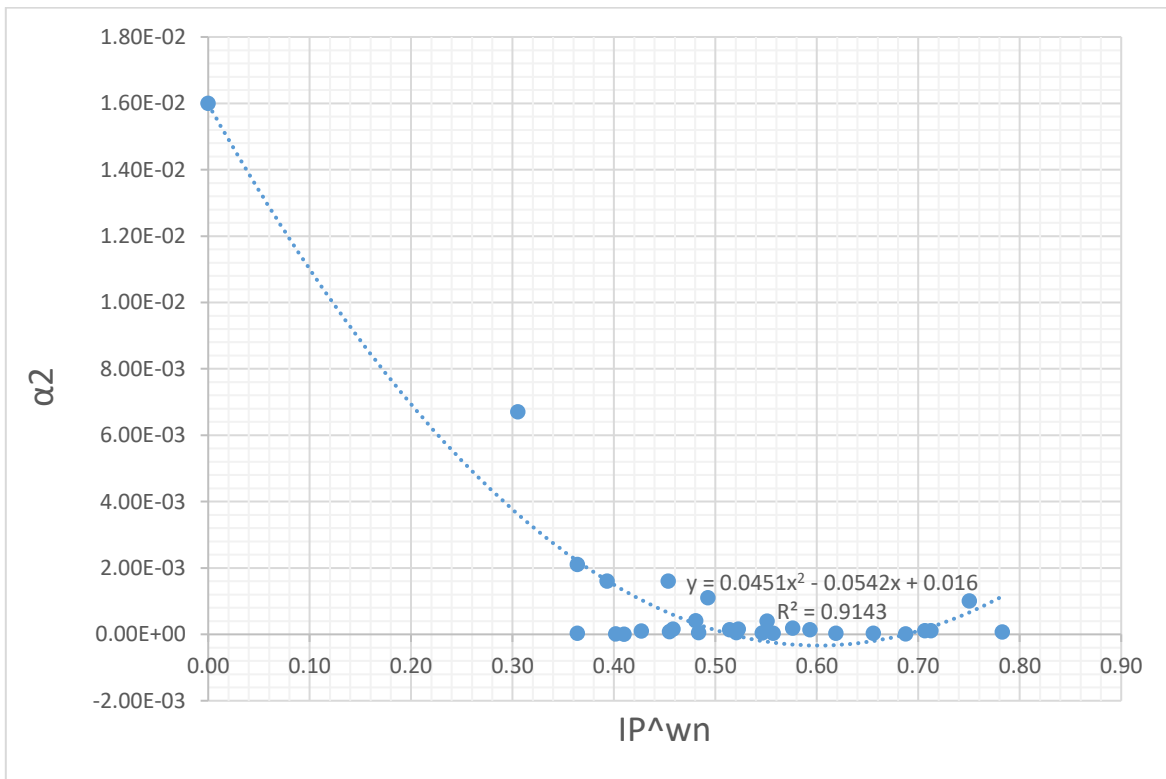


Figura 30. Gráfico de comparación parámetro α_2 con la relación (IP^{wn})

o

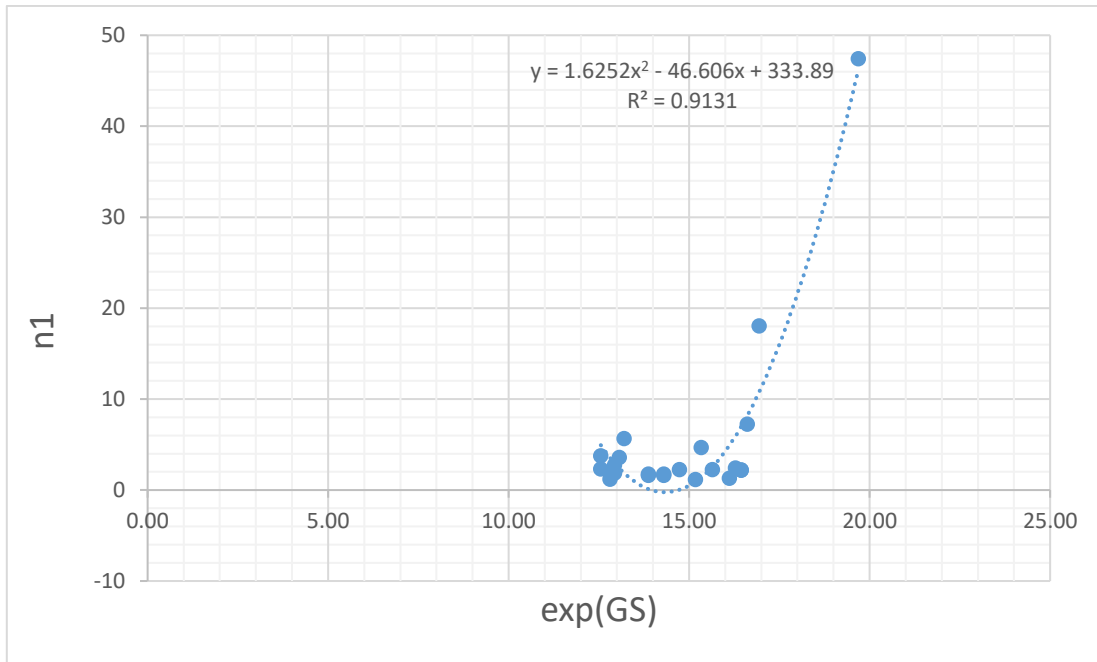


Figura 31. Gráfico de comparación parámetro $n1$ con la relación $(\exp(GS))$

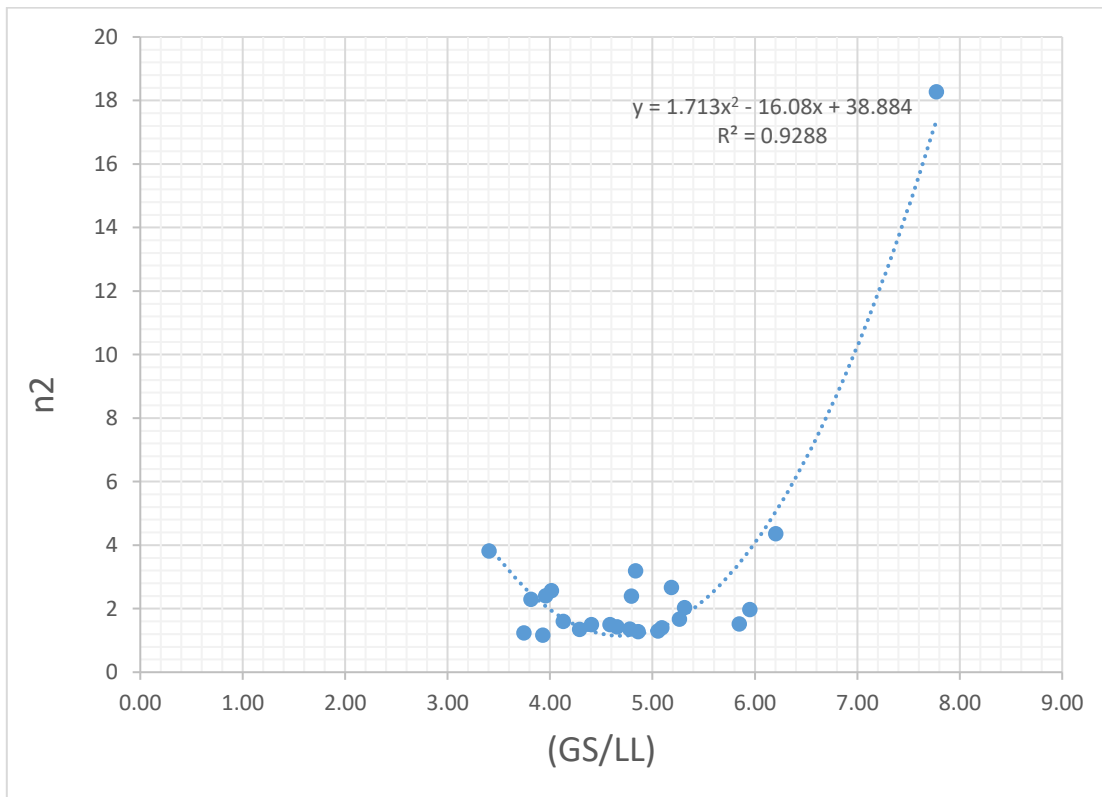


Figura 32. Gráfico de comparación parámetro $n2$ con la relación $((GS/LL))$

o

Una vez establecidas las principales relaciones con cada uno de los parámetros de Durner se procedió a encontrar la propuesta de calibración de cada uno de estos, para tal efecto se utilizó un algoritmo de ajuste en el Software R Studio. El cual emplea el paquete nls2, especializado en metodologías de ajuste y correlaciones. En la Figura 33 se presenta el proceso de determinación de las ecuaciones de calibración mediante la aplicación del algoritmo.

```
>
> y = c(18.06, 4.03, 8.97, 1.62, 1.76, 1.63, 1.78, 2.25, 1.17, 49.98,
47.3, 2.45, 1.99, 2.77, 5.68)
> x = c(0.940604061, 0.962536668, 0.493116352, 0.837203267, 0.661170893, 0.6637
576, 0.956795259, 0.967934023, 0.811903746, 0.135611256, 0.306800341, 0
79494756, 0.650226919, 0.610940259, 0.653722308)
>
>
> #Introducimos una función, como pensamos que puede comportarse la distribución
> foo = function(x,b1,b2,b3,b4){
+   (b1*x^b2 + b3*x + b4)}
>
> #Introducimos esos parámetros en la función NLS2 y este nos arrojará unos de mejor a
ste, hasta converger
> nls2(y ~ foo(x, b1, b2, b3, b4),
+   start=c(b1=145.99,b2=2,b3=-220.65,b4=84.979),
+   control = nls.control(warnOnly = TRUE))
Nonlinear regression model
model: y ~ foo(x, b1, b2, b3, b4)
data: <environment>
      b1      b2      b3      b4
63.758  3.736 -125.441  72.390
residual sum-of-squares: 475.7

Number of iterations to convergence: 13
Achieved convergence tolerance: 2.947e-06
>
```

Figura 33. Algoritmo para determinación de propuesta de calibración (utilizando R Studio)

Específicamente en el algoritmo se ingresan 2 vectores X (combinación de propiedades índice) y Y (parámetros de forma de la ecuación de Durner) y una expresión numérica con parámetros de forma, teniendo como base las expresiones y parámetros que resultaron con mejor ajuste de las relaciones de la Tabla 6, los parámetros de forma se nombran desde el b1 hasta el bn (b4 en el caso de la Figura 33), el algoritmo realiza iteraciones hasta encontrar parámetros de mejor ajuste a los propuestos inicialmente.

o

Se presenta a continuación con las ecuaciones (10) a (16) una propuesta inicial para determinar la SWCC utilizando las propiedades índice del suelo para calibrar mediante operaciones numéricas los parámetros de la propuesta de Durner.

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2}$$

$$\theta_s = 41.89 * wn^{2.34*e} - 19.82 * wn^{1.80*e} + 0.59 \quad (10)$$

$$\theta_r = 0.18 * \left(\frac{wn}{LL} \right)^{13.75} + 0.03 * \left(\frac{wn}{LL} \right)^{1.59} + 0.01 \quad (11)$$

$$w_1 = -1.73 * (\%Finos * GS)^{2*GS} + 1.77 * (\%Finos)^{GS} + 0.14 \quad (12)$$

$$\alpha_1 = 0.07 * (IP)^{4.39*LP} - 0.04 * (IP)^{LP} + 0,02 \quad (13)$$

$$n_1 = 145.99 * (\%Finos)^{2*e} - 220.65 * (\%Finos)^e + 84.98 \quad (14)$$

$$\alpha_2 = |0.19 * (LP)^{2*LL} - 0.22 * (LP)^{LL} + 0.06| \quad (15)$$

$$m_2 = \left| -0.25 * \left(\frac{e}{LL} \right)^2 + 1.44 * \left(\frac{e}{LL} \right) - 1.61 \right| \quad (16)$$

De la figura 34 a 68 se presenta la SWCC para los suelos de la base de datos determinada mediante propiedades índice haciendo uso de la propuesta planteada, además su comparación con los datos experimentales y el ajuste de la función de Durner.

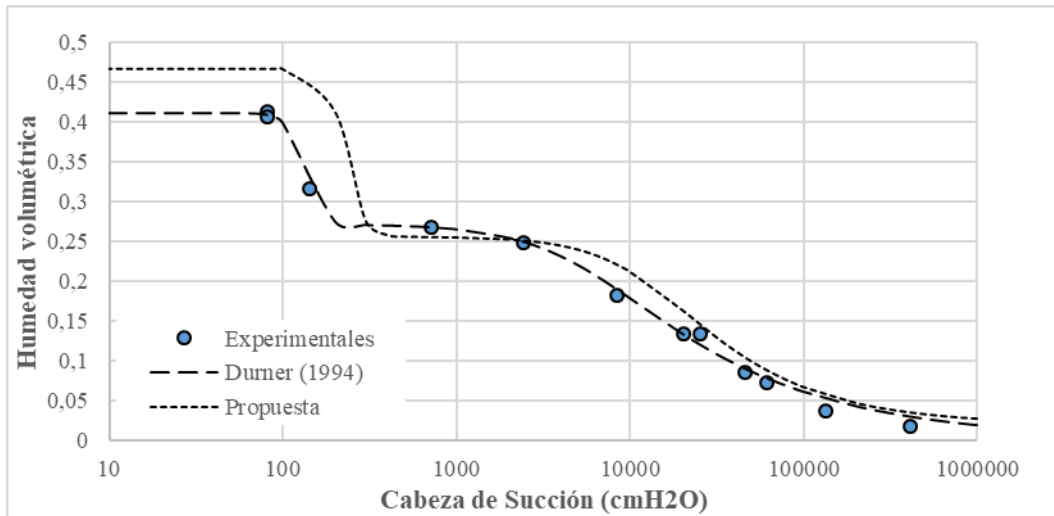


Figura 34. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Barbosa

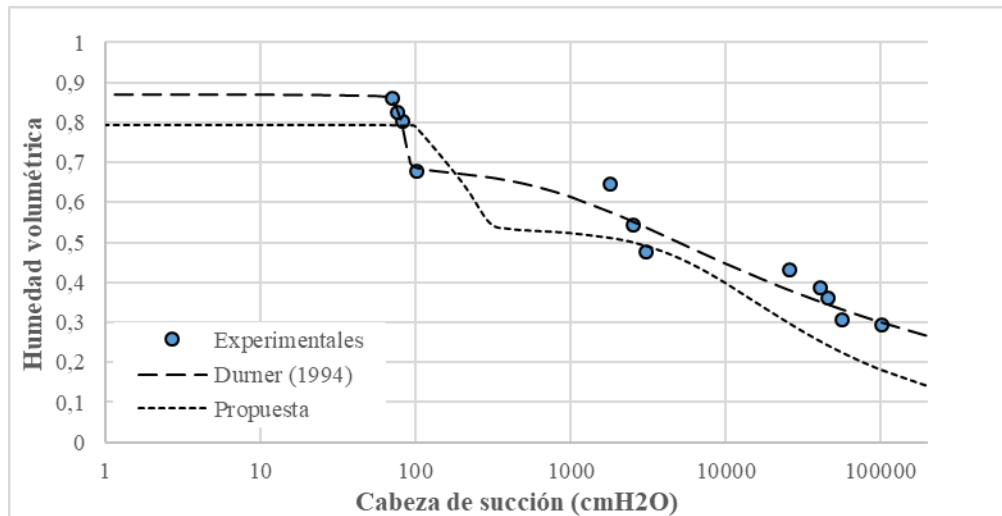


Figura 35. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Caldas 2

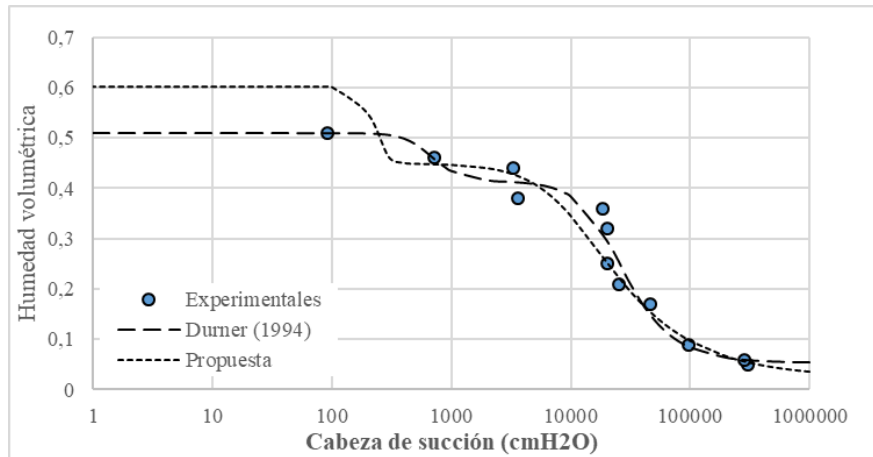


Figura 36. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Caldas 3

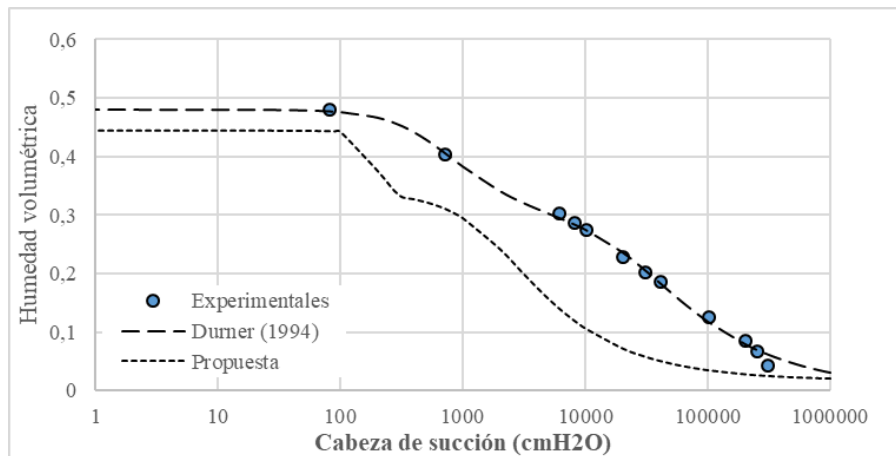


Figura 37. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. El Volador 1

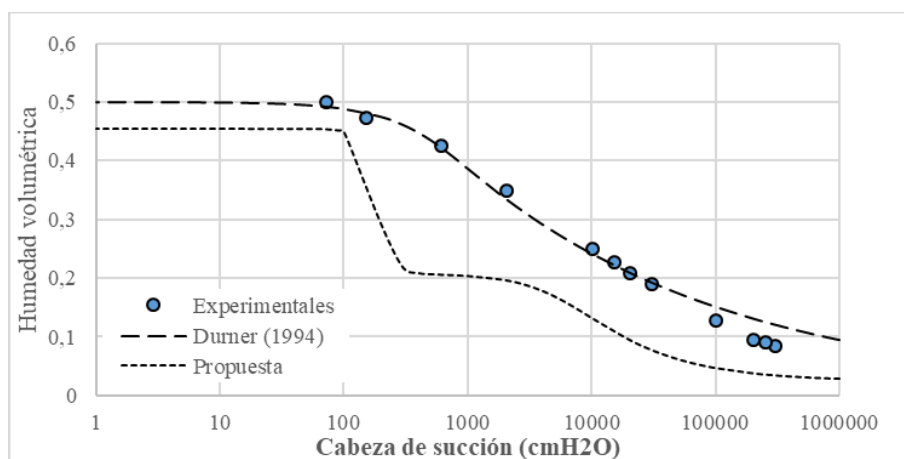


Figura 38. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. El Volador 2

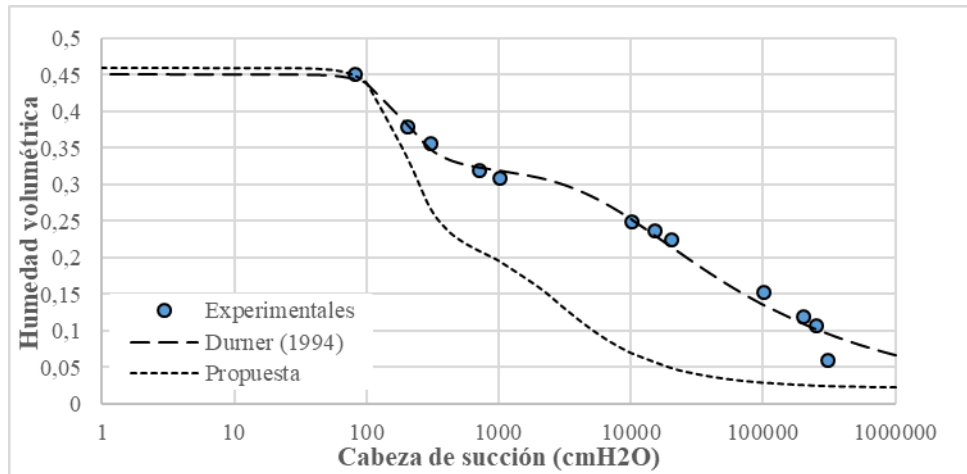


Figura 39. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. El Volador 3

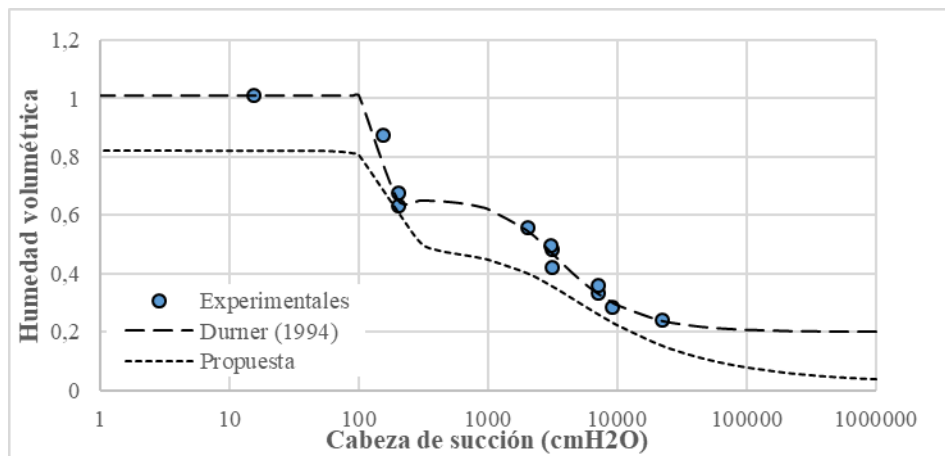


Figura 40. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Nutibara 1

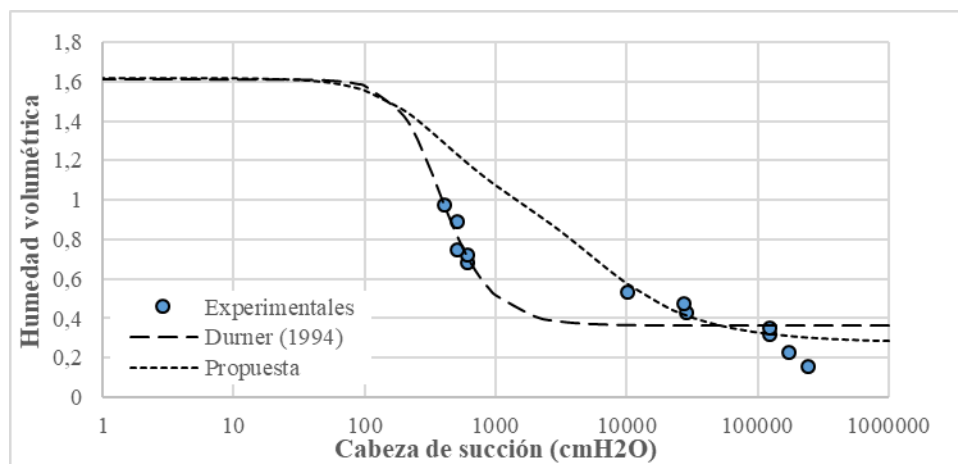


Figura 41. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Nutibara 2

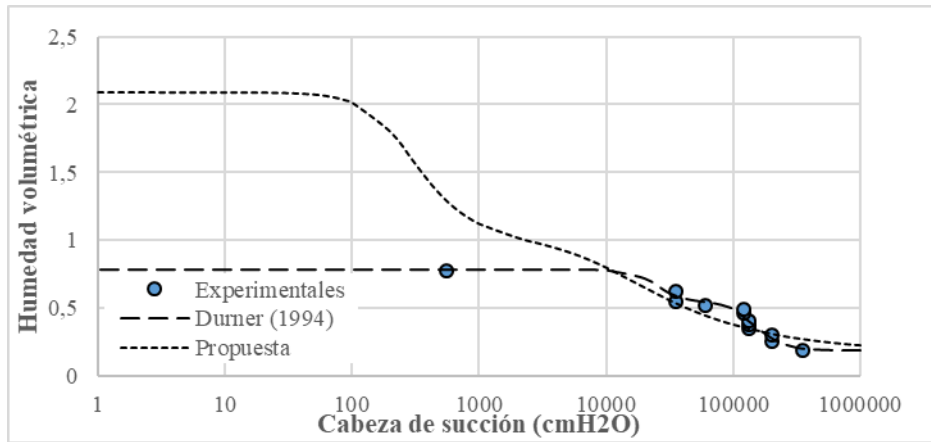


Figura 42. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Nutibara 3

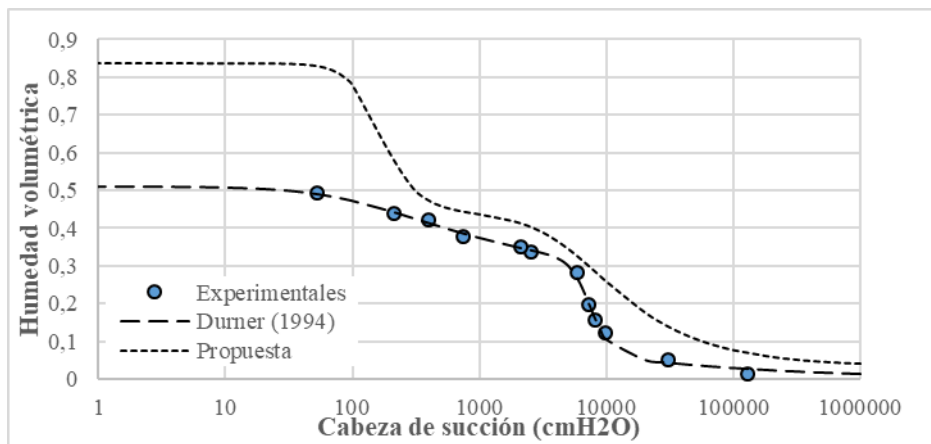


Figura 43. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Santuario 1.

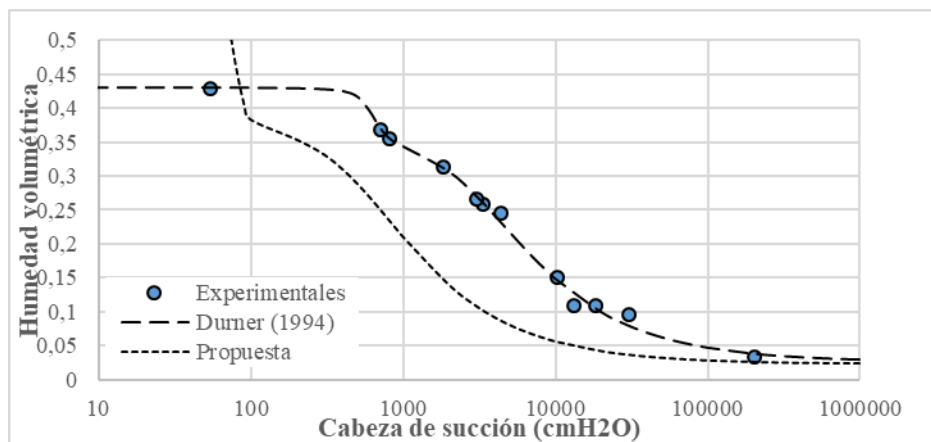


Figura 44. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Santuario 2.

0

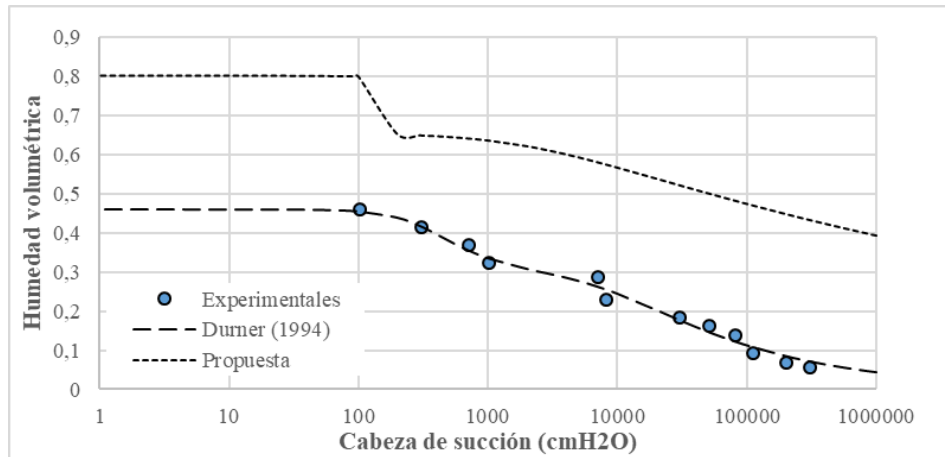


Figura 45. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Facultad de Minas.

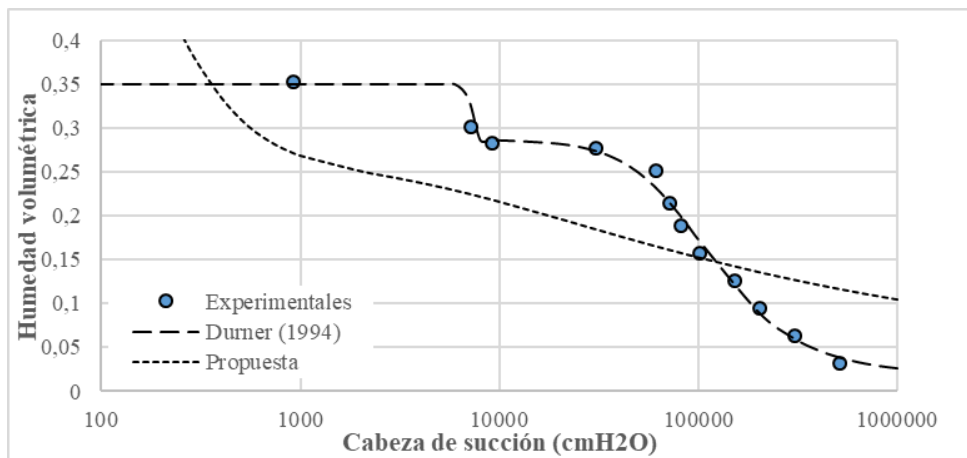


Figura 46. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Girardota 1.

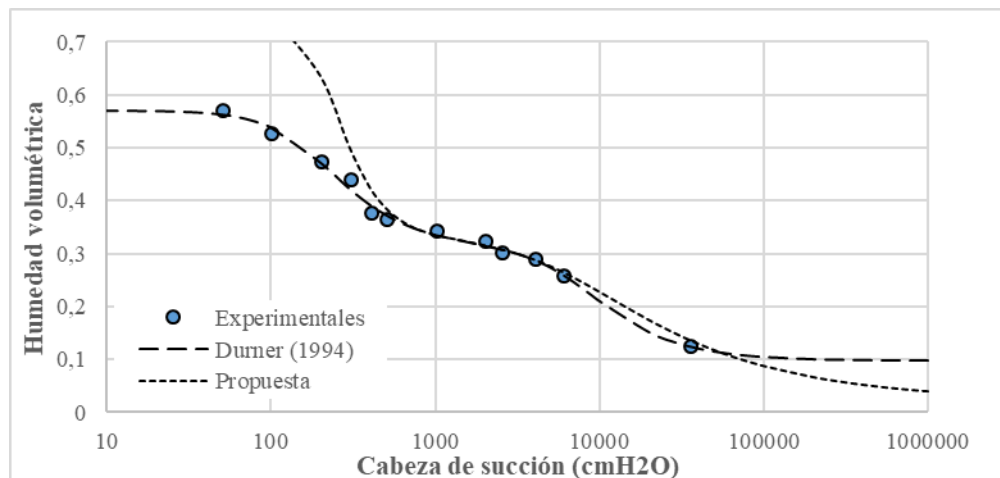


Figura 47. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Girardota 2.

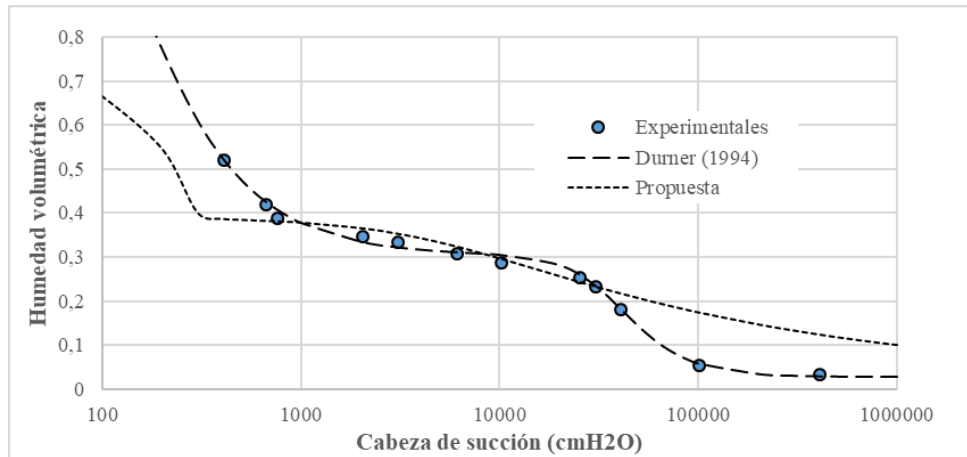


Figura 48. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Guarne 1.

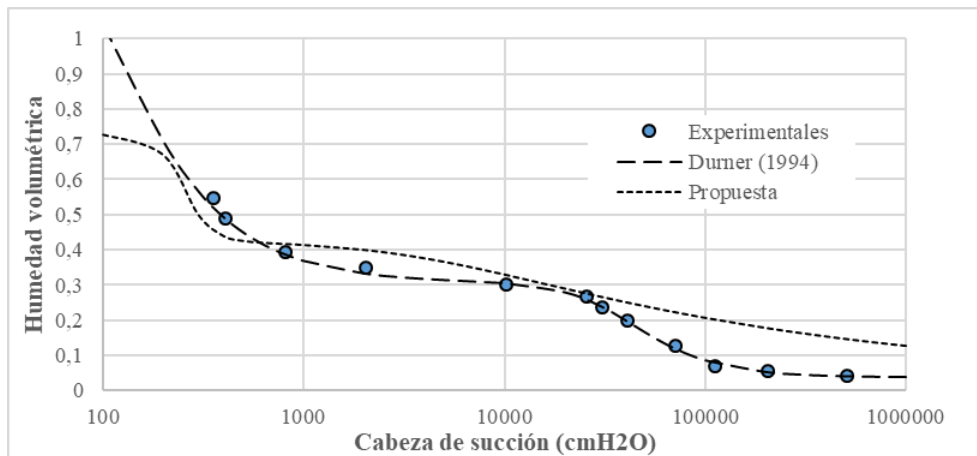


Figura 49. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Guarne 2.

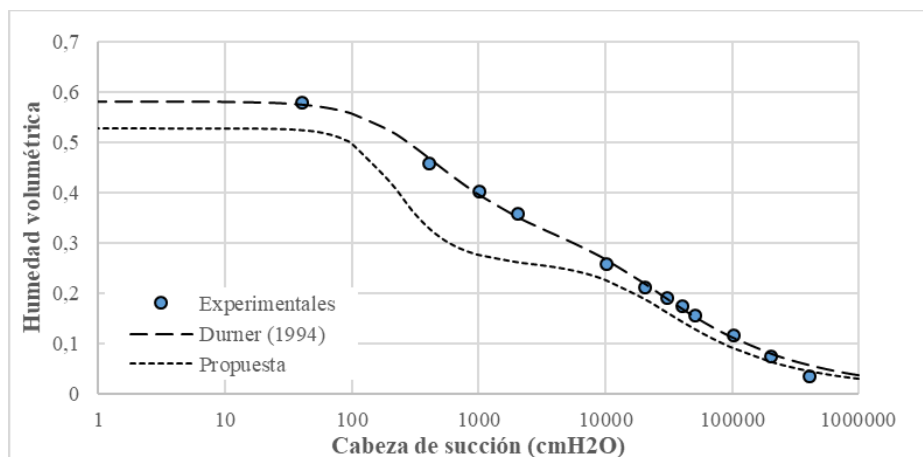


Figura 50. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Indural 1.

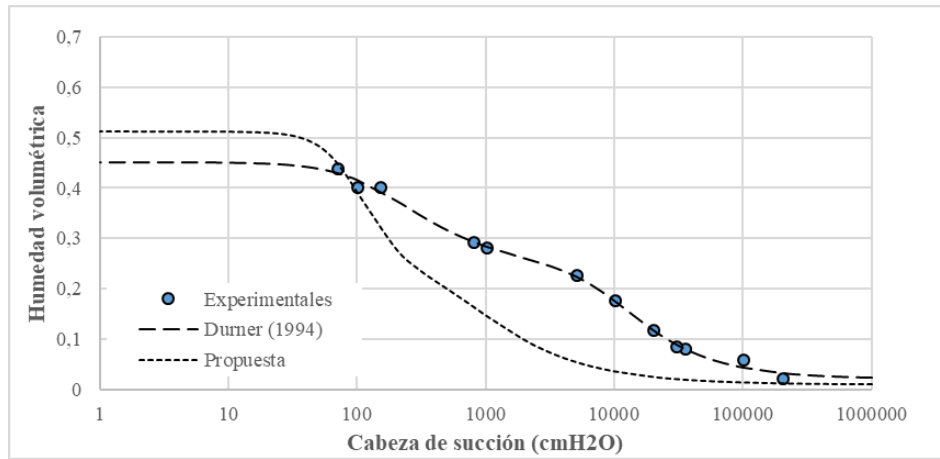


Figura 51. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Indural 2.

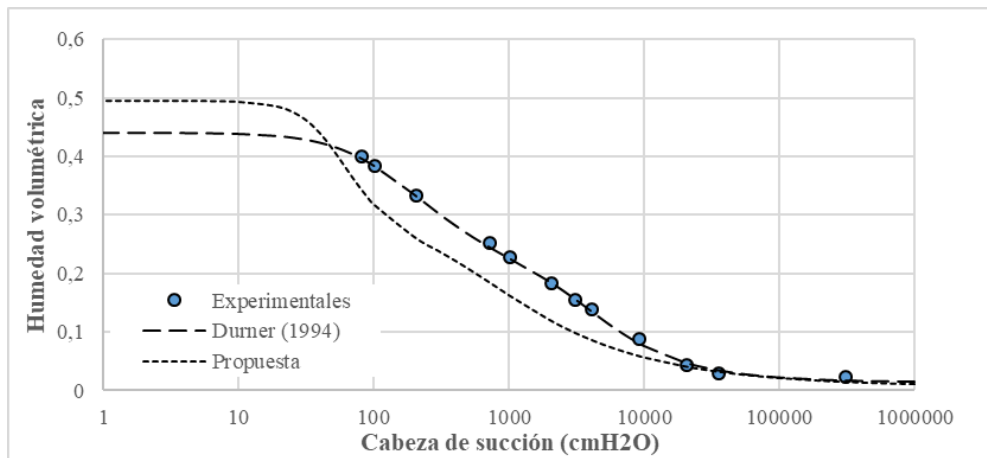


Figura 52. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Indural 3.

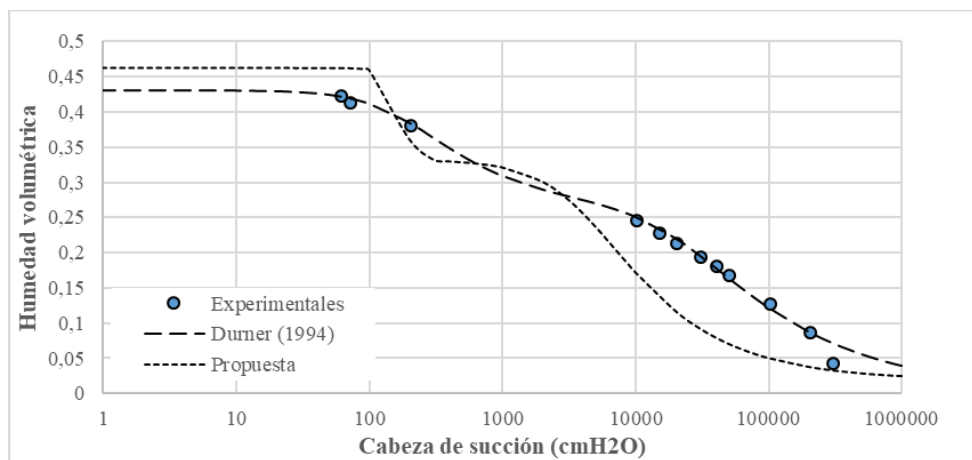


Figura 53. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Itagüí 1.

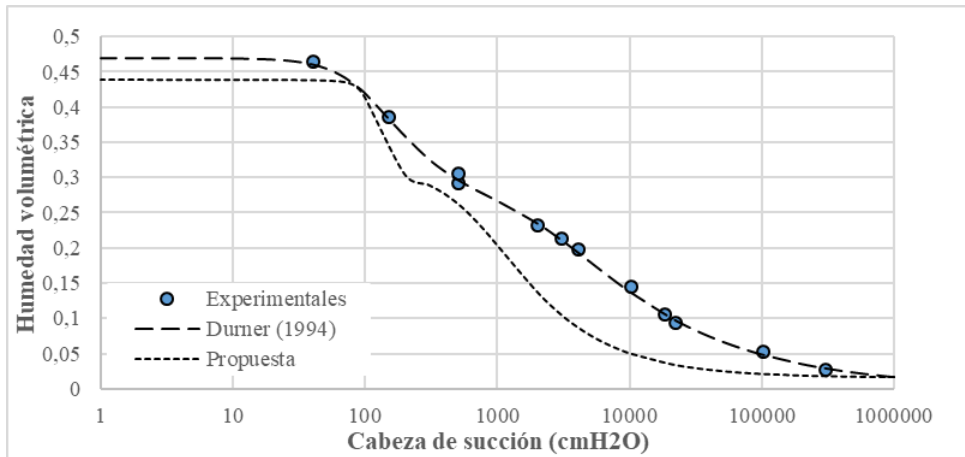


Figura 54. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Itagüí 2.

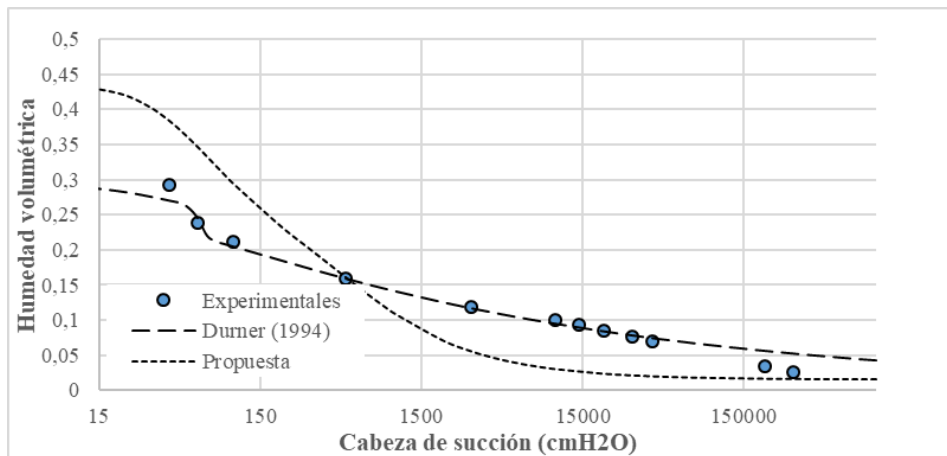


Figura 55. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Itagüí 3.

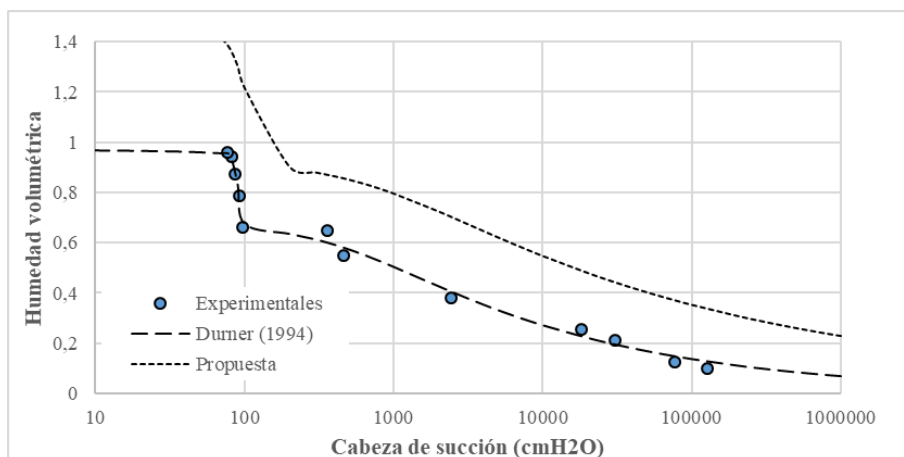


Figura 56. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Asomadera 1.

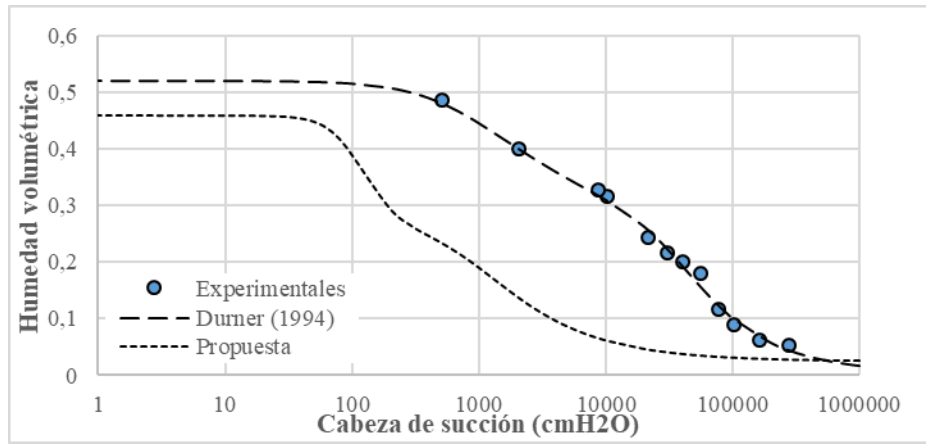


Figura 57. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Asomadera 2.

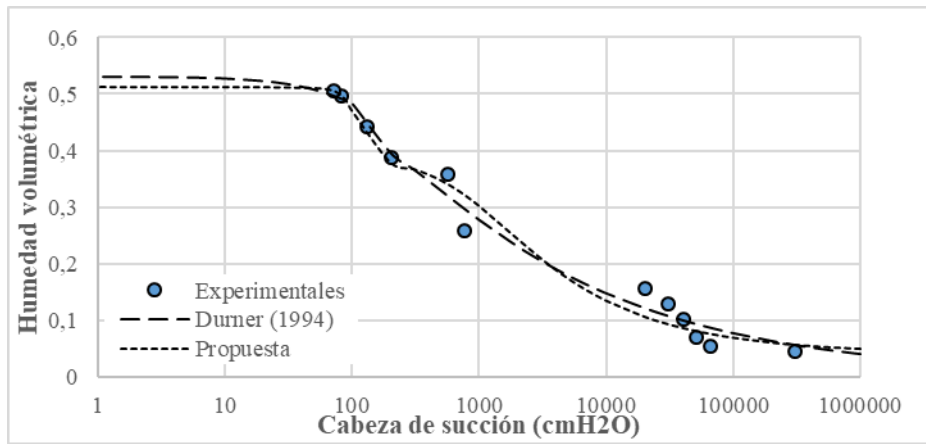


Figura 58. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Asomadera 3.

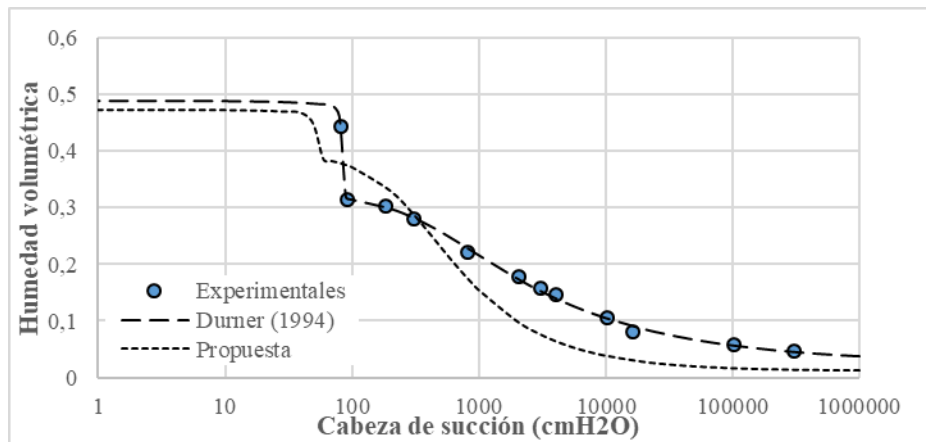


Figura 59. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 1.

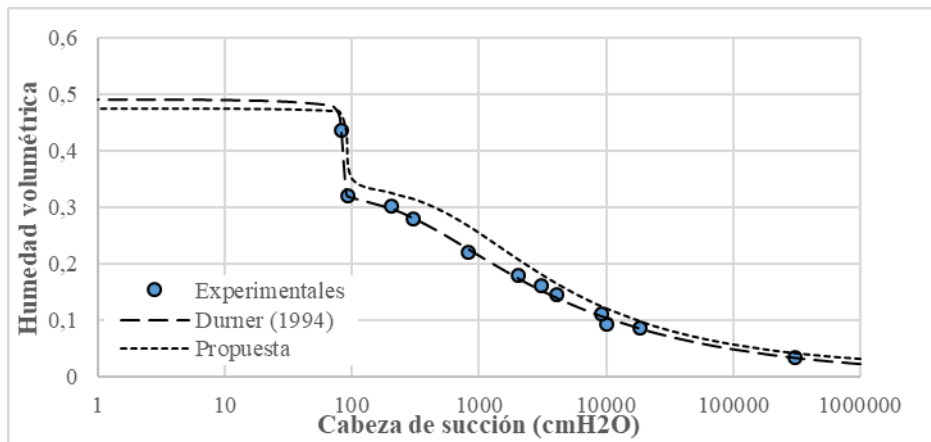


Figura 60. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 2.

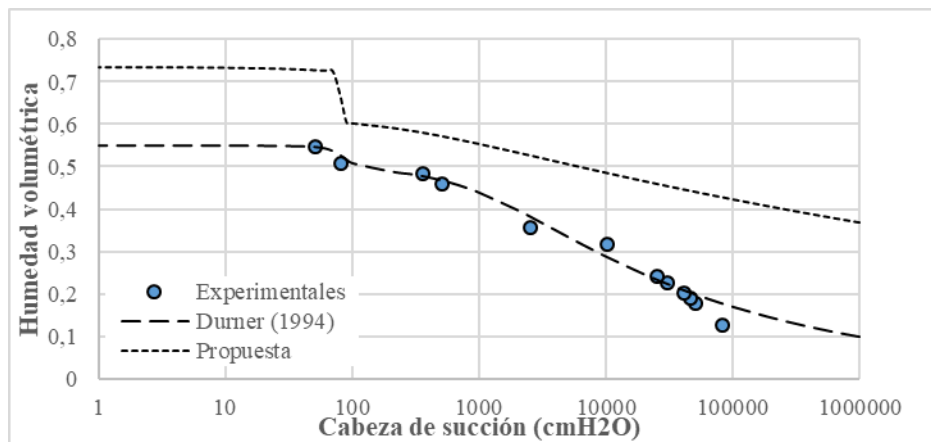


Figura 61. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 3.

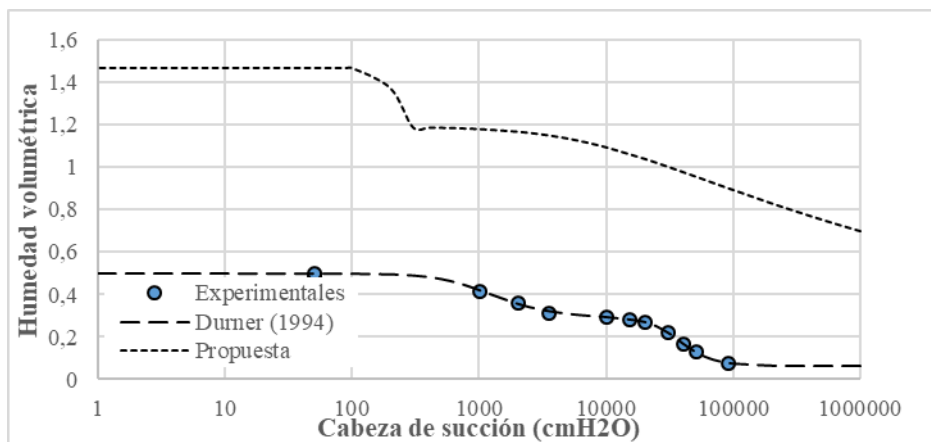


Figura 62. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 4.

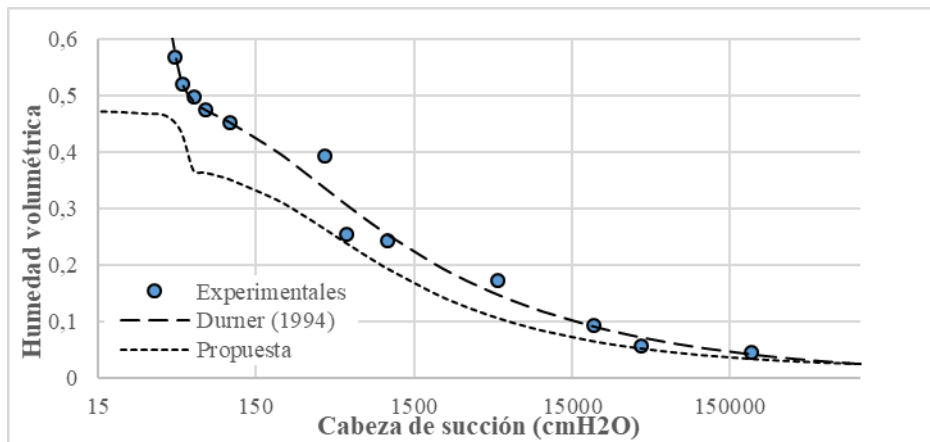


Figura 63. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Marinilla 5.

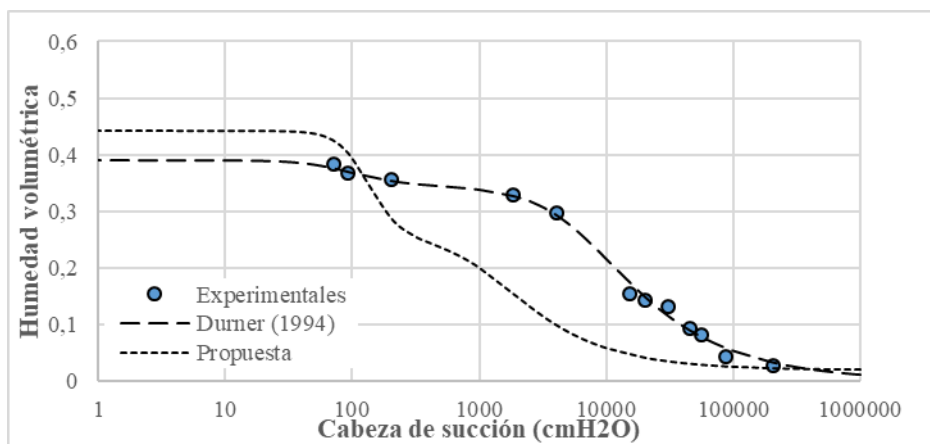


Figura 64. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Rionegro.

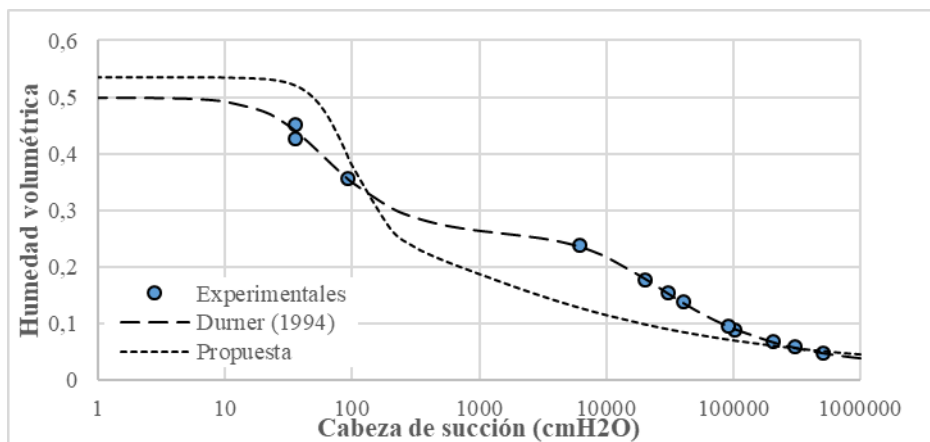


Figura 65. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. San Pedro 1.

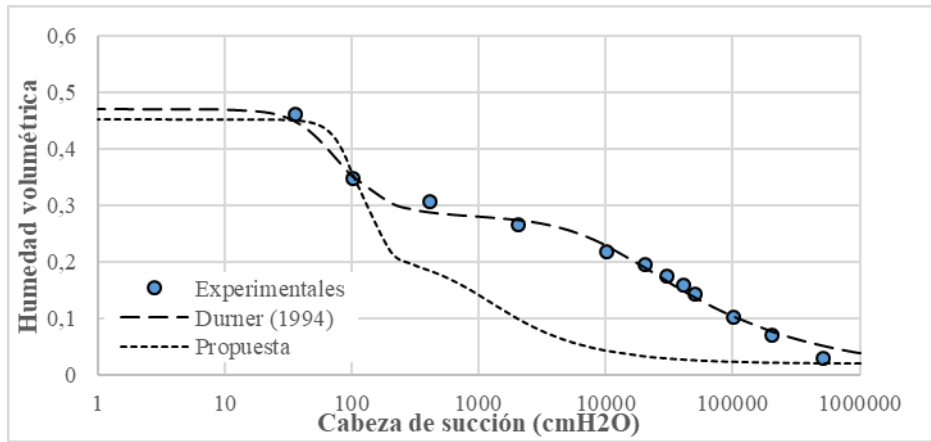


Figura 66. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. San Pedro 2.

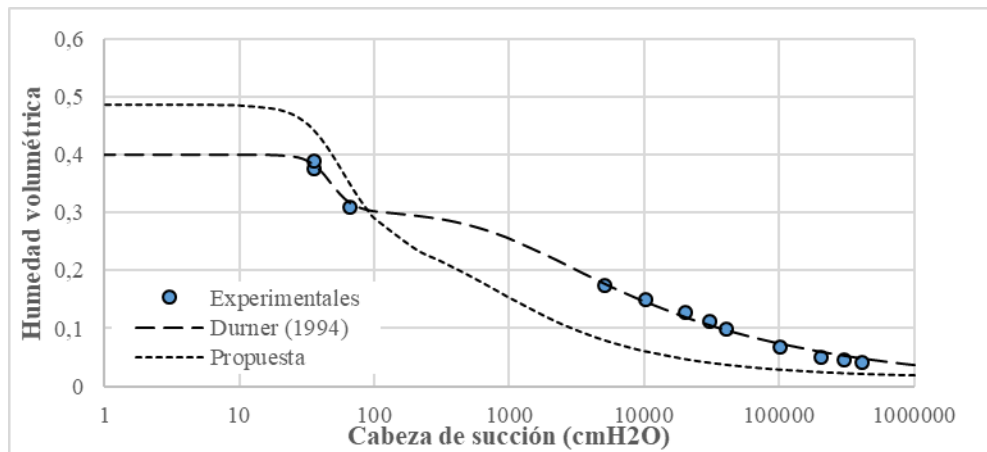


Figura 67. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. San Pedro 3.

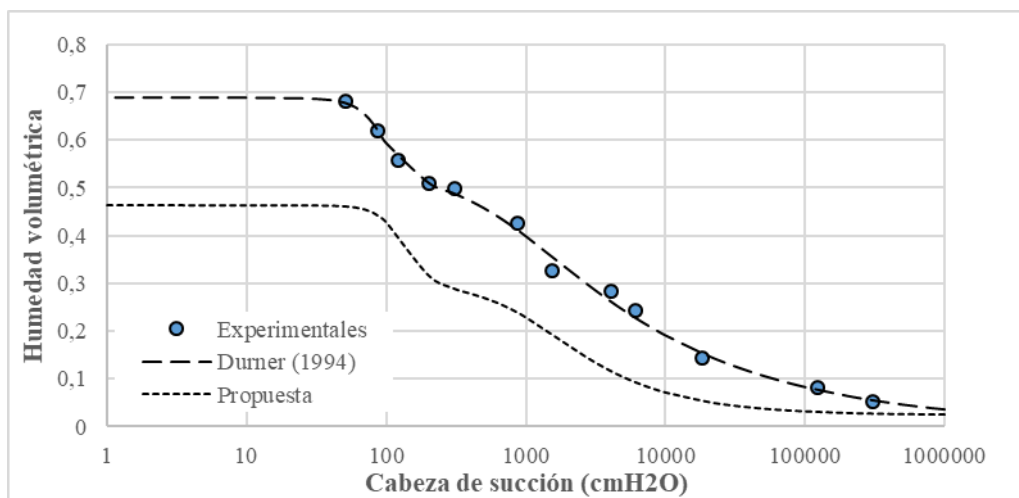


Figura 68. Determinación de curva mediante propuesta de calibración. Santa Elena.

Con base en las figuras anteriores puede decirse que la propuesta de ajuste, ayuda a predecir la curva de retención de agua de manera muy precisa en algunos casos, para establecer un valor numérico que permita establecer el grado de ajuste se promedian las diferencias de humedad entre la curva experimental y la obtenida mediante la propuesta. Se ordenaron los datos teniendo en cuenta sus propiedades índice, encontrándose mejor ajuste en la mayoría de los casos para los suelos de menor límite líquido.

Tabla 7. Diferencia Promedio y Límite líquido de los diferentes sitios.

SITIO	LL	Diferencia Promedio
Fac Minas	0.85	0.317
El Volador 1	0.83	0.106
Marinilla 4	0.79	0.821
Girardota 2	0.76	0.062
Marinilla 3	0.75	0.166
Caldas 3	0.72	0.023
Caldas 2	0.72	0.083
Santa Elena	0.64	0.131
Marinilla 5	0.62	0.057
San Pedro 1	0.62	0.061
Indural 1	0.60	0.060
Itagui 1	0.58	0.047
Guarne 1	0.58	0.053
Asomadera3	0.57	0.011
Asomadera1	0.56	0.290
Marinilla 1	0.55	0.051
San Pedro 2	0.55	0.102
Guarne 2	0.54	0.063
Asomadera2	0.54	0.192

SITIO	LL	Diferencia Promedio
El Volador 2	0.53	0.126
Ríonegro	0.53	0.099
Barbosa	0.46	0.022
Nutibara 2	0.46	0.253
Indural 2	0.44	0.092
Nutibara 1	0.44	0.077
Nutibara 3	0.44	0.169
Girardota 1	0.43	0.142
San Pedro 3	0.42	0.065
El Volador 3	0.39	0.118
Marinilla 2	0.38	0.026
Santuario 2	0.38	0.085
Santuario 1	0.37	0.119
Itagui 2	0.36	0.048
Indural 3	0.35	0.034
Itagui 3	0.35	0.056

En general se obtiene un ajuste aceptable para 22 de los 3 puntos de la base de datos (61% de los casos), considerando buen ajuste hasta una diferencia promedio de 10 % de contenido de humedad volumétrico. Se identificó que la propuesta ajusta muy bien para materiales cuyo límite líquido es inferior a 53%.

o

Desde el punto de vista geológico los suelos que presentaron mejor ajuste con la propuesta realizada fueron los residuales de batolito Antioqueño (Barbosa, El Santuario, Guarne, Marinilla, Rionegro). Los materiales provenientes de las Anfibolitas de Medellín, Neis de la Iguaná y Stock de Altavista presentaron un buen ajuste. En menor grado pero también con algunos de sus suelos con buen ajuste, están los derivados de las formaciones Quebrada Grande, Ayurá Montebello, Stock de San Diego y Batolito de Ovejas). Esta investigación podría ampliarse determinando una propuesta para cada una de las formaciones geológicas o para una formación en específico, teniendo en cuenta que se debe realizar una amplia recolección de datos con muchos más suelos de cada una de las formaciones.

Teniendo en cuenta la propuesta aplicada se presentan a continuación (ver Tabla 8) los parámetros del modelo de Durner obtenidos mediante las ecuaciones 10 a 16 para cada uno de los suelos de la base de datos.

Tabla 8. Parámetros modelo Durner, previa aplicación de propuesta de calibración.

Sitio	θ_s	θ_r	w1	a1	n1	m1	a2	n2	m2
Barbosa	0,465	0,0188	0,47	0,0045	8,6	0,88	0,0001	1,8	0,44
Caldas 2	0,792	0,0207	0,34	0,0053	6,6	0,85	0,0002	1,4	0,30
Caldas 3	0,601	0,0234	0,26	0,0047	7,9	0,87	0,0001	1,8	0,44
El Volador 1	0,444	0,0167	0,25	0,0054	7,8	0,87	0,0006	1,7	0,41
El Volador 2	0,455	0,0252	0,58	0,0058	6,6	0,85	0,0002	1,7	0,43
El Volador 3	0,459	0,0210	0,55	0,0056	3,6	0,72	0,0005	1,8	0,45
Nutibara 1	0,823	0,0238	0,43	0,0058	5,3	0,81	0,0004	1,6	0,37
Nutibara 2	1,619	0,2796	0,58	0,0041	1,8	0,43	0,0002	1,8	0,45
Nutibara 3	2,086	0,1674	0,57	0,0043	2,4	0,59	0,0001	1,6	0,36

Sitio	θ_s	θ_r	w1	a1	n1	m1	a2	n2	m2
Santuario 1	0,837	0,0321	0,49	0,0067	3,5	0,71	0,0002	1,8	0,43
Santuario 2	0,578	0,0229	0,36	0,0129	11,7	0,91	0,0019	1,8	0,44
Fac Minas	0,801	0,0139	0,19	0,0055	48,4	0,98	0,0005	1,1	0,08
Girardota 1	0,532	0,0144	0,53	0,0047	2,8	0,65	0,0002	1,2	0,16
Girardota 2	0,767	0,0216	0,58	0,0044	3,5	0,72	0,0002	1,5	0,35
Guarne 1	0,665	0,0171	0,43	0,0049	8,5	0,88	0,0002	1,3	0,22
Guarne 2	0,730	0,0171	0,43	0,0041	6,6	0,85	0,0002	1,2	0,19
Indural 1	0,527	0,0084	0,52	0,0055	2,6	0,61	0,0001	1,6	0,37
Indural 2	0,512	0,0086	0,56	0,0109	2,9	0,66	0,0015	1,8	0,44
Indural 3	0,495	0,0066	0,47	0,0196	2,8	0,65	0,0022	1,5	0,35
Itagui 1	0,463	0,0183	0,29	0,0061	7,5	0,87	0,0002	1,7	0,42
Itagui 2	0,439	0,0155	0,30	0,0084	8,2	0,88	0,0014	1,8	0,45
Itagui 3	0,440	0,0150	0,58	0,0196	2,1	0,52	0,0022	1,8	0,45
Asomadera1	1,451	0,0241	0,37	0,0098	7,1	0,86	0,0014	1,2	0,17
Asomadera2	0,460	0,0257	0,45	0,0093	3,4	0,71	0,0012	1,7	0,43
Asomadera3	0,512	0,0422	0,26	0,0092	7,7	0,87	0,0012	1,5	0,35
Marinilla 1	0,474	0,0116	0,17	0,0196	57,7	0,98	0,0035	1,7	0,43
Marinilla 2	0,474	0,0164	0,29	0,0107	31,0	0,97	0,0016	1,4	0,29
Marinilla 3	0,734	0,0153	0,17	0,0125	50,8	0,98	0,0049	1,1	0,06
Marinilla 4	1,465	0,0171	0,19	0,0049	39,2	0,97	0,0001	1,1	0,10
Marinilla 5	0,475	0,0153	0,19	0,0196	47,6	0,98	0,0049	1,4	0,30
Ríonegro	0,441	0,0195	0,45	0,0082	3,8	0,74	0,0009	1,8	0,45
San Pedro 1	0,534	0,0148	0,56	0,0121	3,2	0,69	0,0025	1,3	0,20

Sitio	θ_s	θ_r	w1	a1	n1	m1	a2	n2	m2
San Pedro 2	0,452	0,0195	0,58	0,0096	4,7	0,79	0,0013	1,8	0,45
San Pedro 3	0,486	0,0141	0,51	0,0196	3,1	0,68	0,0023	1,5	0,34
Santa Elena	0,464	0,0246	0,38	0,0079	4,7	0,79	0,0009	1,8	0,44

4.5. Validación del modelo

4.5.1. Validación con suelos de la base de datos

Con el fin de establecer la validez del modelo se seleccionaron los datos de los 22 sitios para los que se obtuvo mejor ajuste, de estos 22 grupos de datos experimentales se escogieron aleatoriamente 15 sitios a los cuales se les realizó el mismo procedimiento realizado anteriormente con la totalidad de los datos para determinar una propuesta que permitiera definir la curva característica con base en las propiedades índice del suelo. Posteriormente con los datos de propiedades índice de los 7 sitios restantes se aplicó la propuesta realizada. Lo anterior es con el fin de evaluar la validez de la propuesta con datos independientes a los tenidos en cuenta para realizar la propuesta.

Tabla 9. Sitios seleccionados aleatoriamente para definir propuesta de validación.

SITIOS SELECCIONADOS PARA PROPUESTA DE VALIDACIÓN
Caldas 3
Marinilla 2
Indural 3
Itagui 1

o

Itagui 2
Marinilla 1
Itagui 3
Indural 1
San Pedro 1
San Pedro 3
Caldas 2
Santuario 2
Indural 2
Rionegro
San Pedro 2

Teniendo en cuenta lo anterior se presenta la propuesta utilizando únicamente los datos de los 15 sitios de la Tabla 9.

$$\theta_s = 1349.19 * wn^{6.14*e} - 3.35 * wn^{1.80*e} + 0.52 \quad (17)$$

$$\theta_r = 0.19 * \left(\frac{wn}{LL}\right)^{13.74} + 0.04 * \left(\frac{wn}{LL}\right)^{1.59} + 0.05 \quad (18)$$

$$w_1 = -0.87 * (\%Finos * GS)^{3.08*GS} + 0.77 * (\%Finos)^{GS} + 0.24 \quad (19)$$

$$\alpha_1 = 0.08 * (IP)^{4.39*LP} - 0.04 * (IP)^{LP} + 0,02 \quad (20)$$

$$n_1 = 147 * (\%Finos)^{2.05*e} - 219 * (\%Finos)^e + 86 \quad (21)$$

$$\alpha_2 = |0.19 * (LP)^{2.03*LL} - 0.22 * (LP)^{LL} + 0.06| \quad (22)$$

$$m_2 = \left| -0.25 * \left(\frac{e}{LL}\right)^{2.03} + 1.44 * \left(\frac{e}{LL}\right) - 1.61 \right| \quad (23)$$

De la figura 69 a la 75 se presenta la SWCC para los 7 suelos de la base de datos determinada mediante la propuesta realizada con los datos de los 15 sitios restantes, además su comparación con los datos experimentales y el ajuste de la función de Durner.

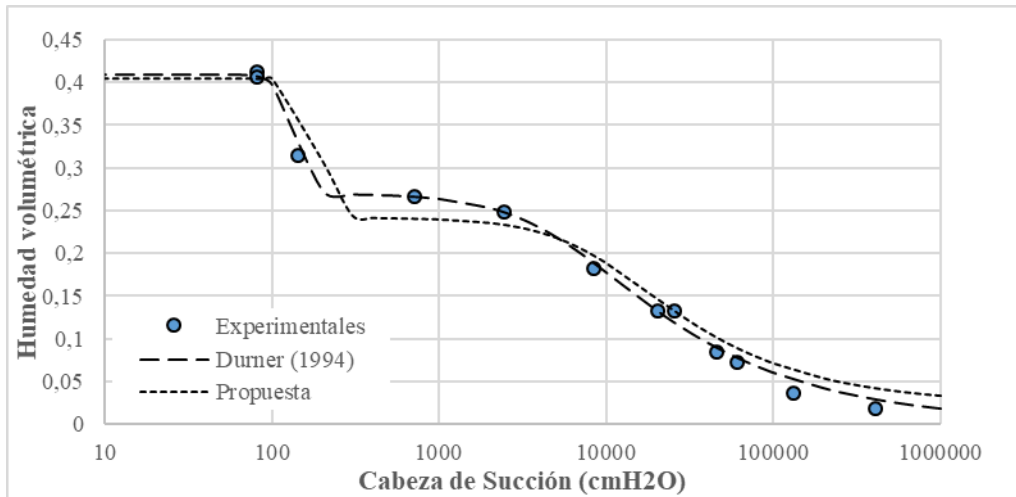


Figura 69. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Barbosa

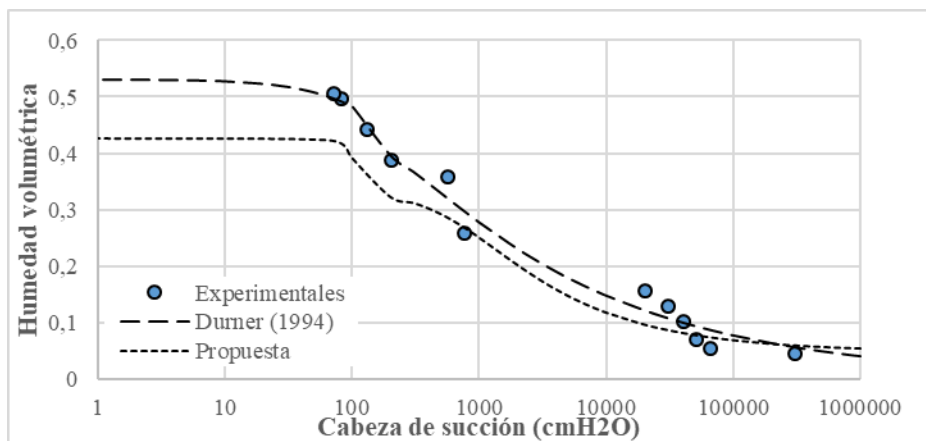


Figura 70. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Asomadera 3

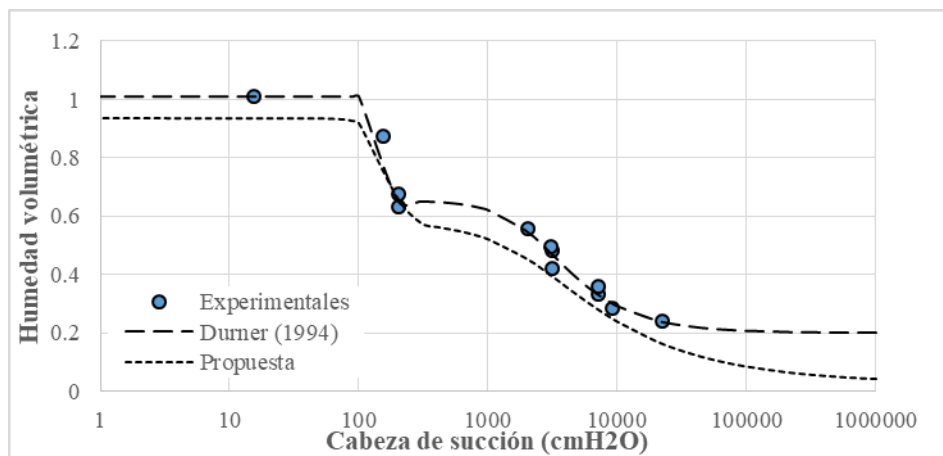


Figura 71. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Nutibara 1

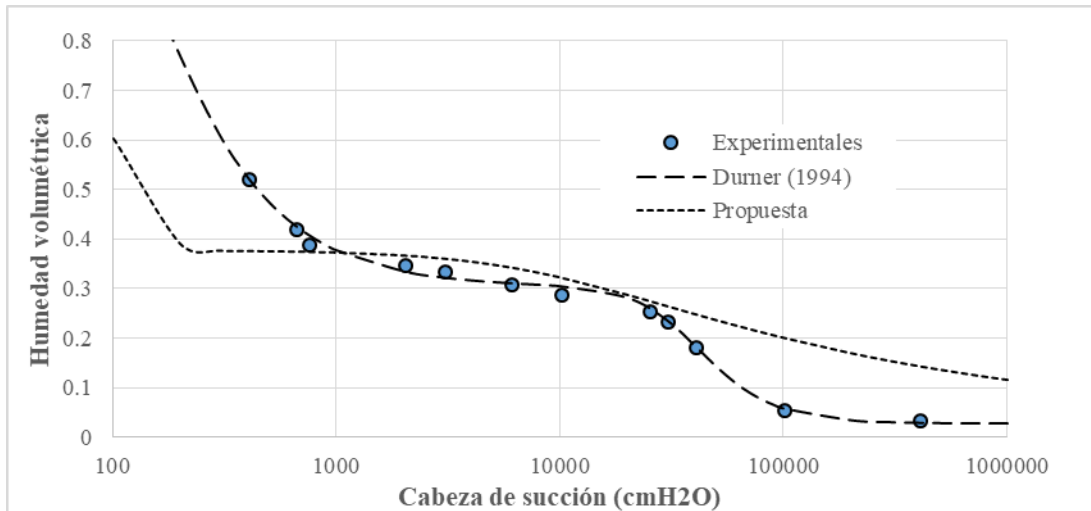


Figura 72. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Guarne 1.

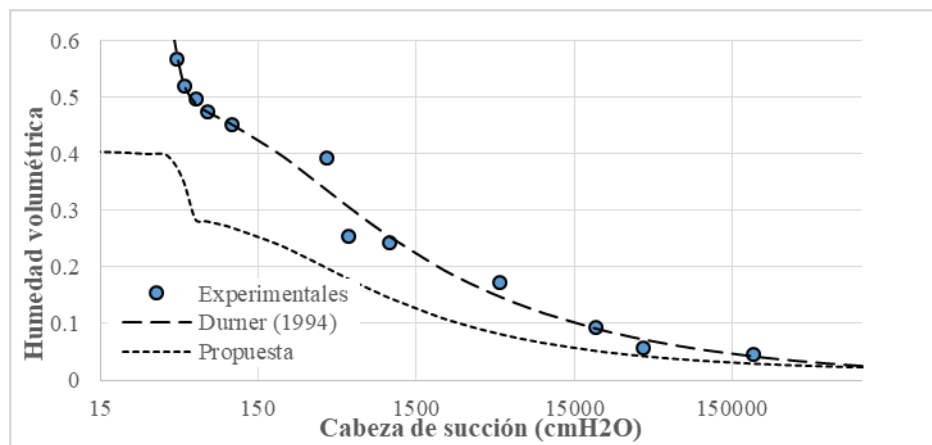


Figura 73. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Marinilla 5.

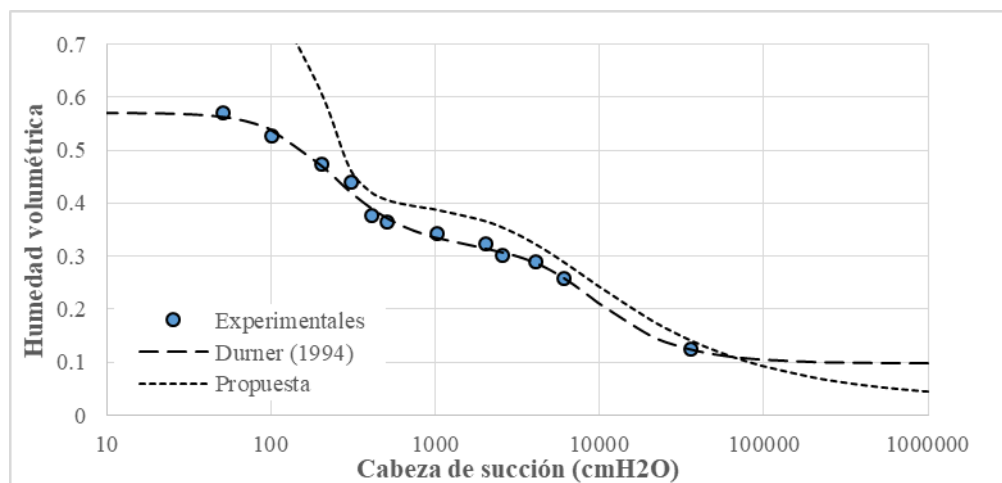


Figura 74. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Girardota 2.

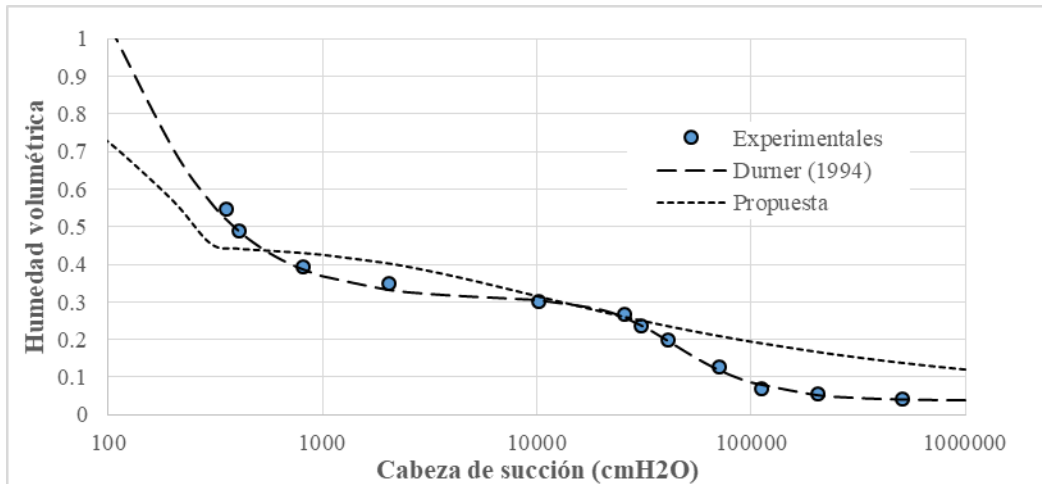


Figura 75. SWCC mediante propuesta de calibración para validación. Guarne 2.

Para observar la modificación que hubo en el grado de ajuste con la propuesta realizada utilizando los suelos escogidos para la validación, se presenta la diferencia promedio del ajuste para los suelos de los cuales no se utilizaron sus datos.

Tabla 10. Diferencia Promedio y Límite líquido de los sitios escogidos para validación

SITIO	DIFERENCIA PROMEDIO INICIAL	DIFERENCIA PROMEDIO VALIDACIÓN
Asomadera3	0.032	0.032
Barbosa	0.014	0.014
Guarne 1	0.053	0.068
Marinilla 5	0.057	0.095
Girardota 2	0.062	0.088
Guarne 2	0.063	0.059
Nutibara 1	0.077	0.075

o

Teniendo en cuenta lo anterior se observa que el ajuste varía siendo mejor en algunos casos y desmejorando en otros el principal desfase se observa al inicio de las curvas características implicando principalmente el parámetro θ_s , esto se debe a que esta nueva propuesta no incluyó para su generación los datos de estos 7 sitios, aun así la tendencia de los gráficos sigue siendo similar, esto se considera como una validación inicial de la propuesta de calibración.

4.5.2. Validación con suelos adicionales

Para verificar la validez del modelo se hizo adicionalmente la caracterización de un suelo independiente a los pertenecientes a la base de datos, la caracterización de éste material al igual que los otros suelos consistió en la determinación de límites de consistencia, granulometría, índice de vacíos, gravedad específica y humedad natural, además de la curva de retención de agua.

La zona de estudio se localiza entre las abscisas K0 + 700 y K0 + 800 de la vía interna del parque industrial Croacia ubicado en el Kilómetro 3,5 de la autopista Medellín-Bogotá a la altura de la vereda Granizal, jurisdicción del municipio de Bello, departamento de Antioquia. (Ver Figura 76. SWCC Localización del área de estudio (Tomado de Google Earth™, 2018)Figura 76)

0

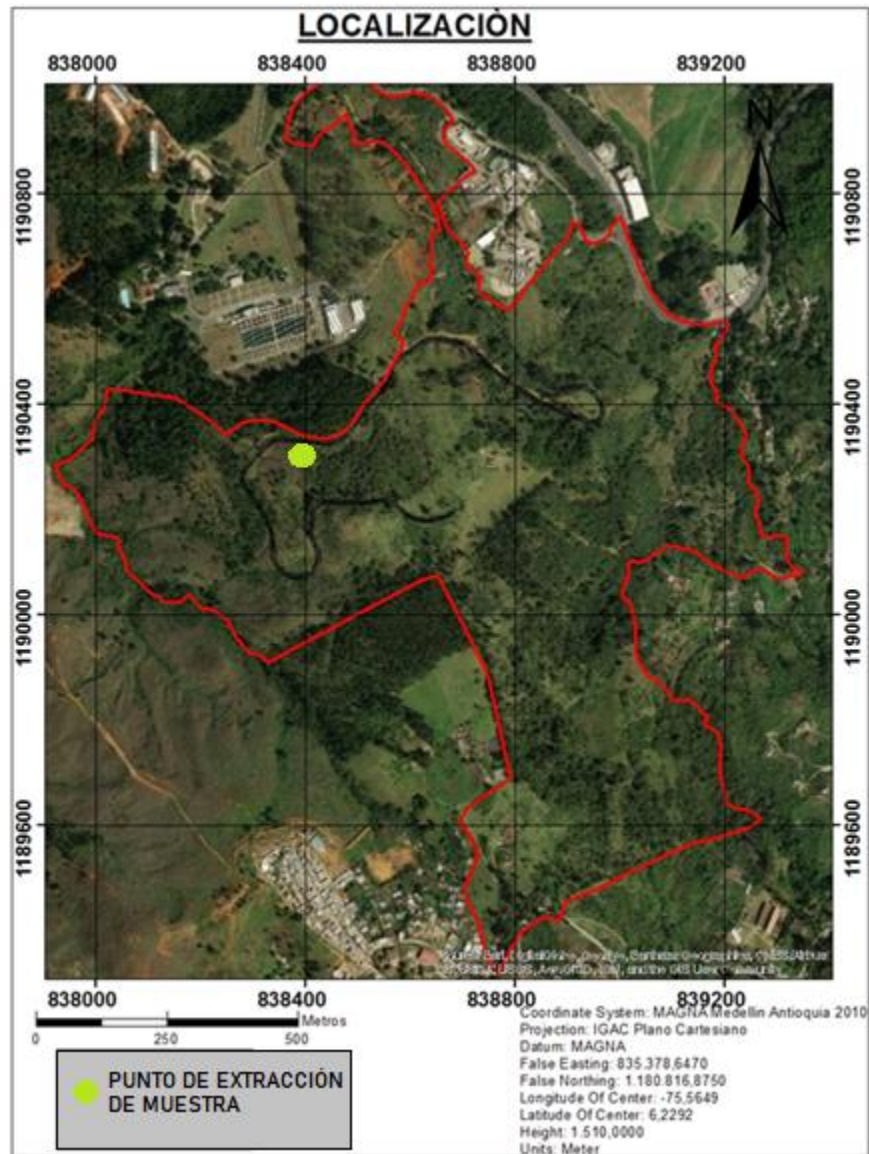


Figura 76. SWCC Localización del área de estudio (Tomado de Google Earth™, 2018)

En la Tabla 11 Se presenta el resumen de las propiedades índice del material y en la Figura 77 se presenta la curva de retención de agua, así como los parámetros experimentales del modelo de Durner para este mismo suelo.

Tabla 11. Propiedades índice Suelo Granizal

SECTOR	LL	LP	IP	% Finos	e	GS	Wn
Granizal	0.52	0.34	0.18	0.83	1.22	2.55	0.30

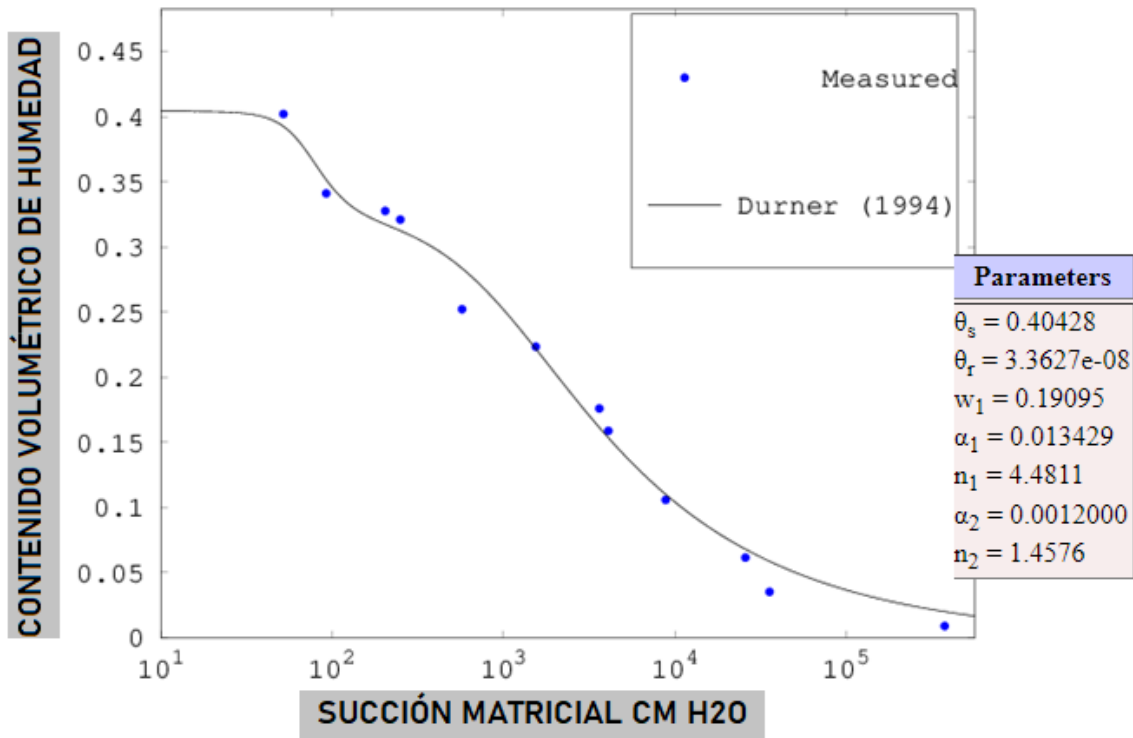


Figura 77. Curva de retención de agua Granizal y parámetros experimentales de Durner.

Teniendo en cuenta lo anterior se aplicaron las ecuaciones (10) a (16) de la propuesta realizada, en la Figura 78 se presenta la comparación de la curva obtenida experimentalmente y la realizada mediante la propuesta.

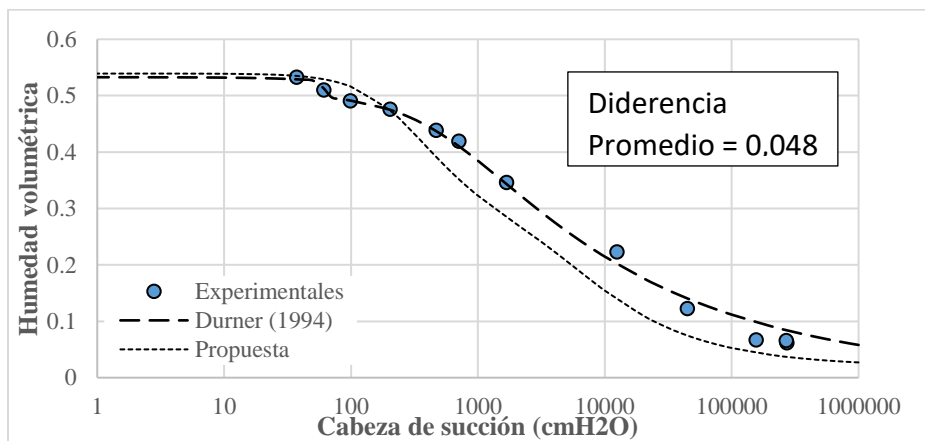


Figura 78. SWCC mediante propuesta de calibración. Granizal

o

Adicionalmente se presenta en la Tabla 12 los valores de los parámetros de Durner experimentales y obtenidos mediante la propuesta.

Tabla 12. Propiedades índice Suelo Granizal

Parámetro	θ_s	θ_r	w1	a1	n1	m1	a2	n2	m2
Experimental	0.533	0.0000021	0.054	0.016	20.700	0.952	0.0020	1.285	0.222
Propuesta	0.539	0.0192838	0.565	0.004	1.851	0.460	0.0002	1.626	0.385

Se obtiene un buen ajuste entre los gráficos, lo cual es avalado con el valor de la diferencia promedio siendo este inferior a la unidad, se observa en este caso la importancia en el ajuste de los parámetros θ_s y n_2 , estos son muy próximos a los experimentales y definen la tendencia similar de ambas curvas. Como se mencionó el grado ajuste es mayor para suelos con límite líquido inferior a 53%, lo cual se refleja en la aplicación de la propuesta en este sitio.

4.6. Evaluación en el modelo de Perera y Zapata 2005.

El modelo planteado por estos autores consiste en la definición de una propuesta de determinación de la curva de retención de agua utilizando las propiedades índice del suelo, tal como se hizo en el numeral anterior. A diferencia del modelo de Durner ellos se basaron en el modelo de Fredlund y Xing.

$$S_e = C(h) \left[\frac{1}{\ln[e + (h/a)^n]} \right]^m$$

Se busca entonces, comprobar que tan ajustada es dicha propuesta para la base de datos en estudio, teniendo en cuenta que esta no es multimodal como la de Durner y gran parte de los materiales de la base de datos presentan bimodalidad en su curva de retención de agua. En las ecuaciones

o

(17), (18) y (19) se observa la propuesta de determinación de los parámetros de la ecuación según Perera y Zapata para materiales con plasticidad.

$$a = 32,835 * \ln(\%Finos * IP) + 32,438 \quad (17)$$

$$n = 1,421 \%Finos * IP^{-0.3185} \quad (18)$$

$$m = -0.2154 * \ln(\%Finos * IP) + 0.7145 \quad (19)$$

Utilizando esta propuesta se procedió a determinar la curva de retención de agua y se compara con las curvas de los datos experimentales, modelo de Durner y modelo de Zapata y Perera (Figuras 79 a 114):

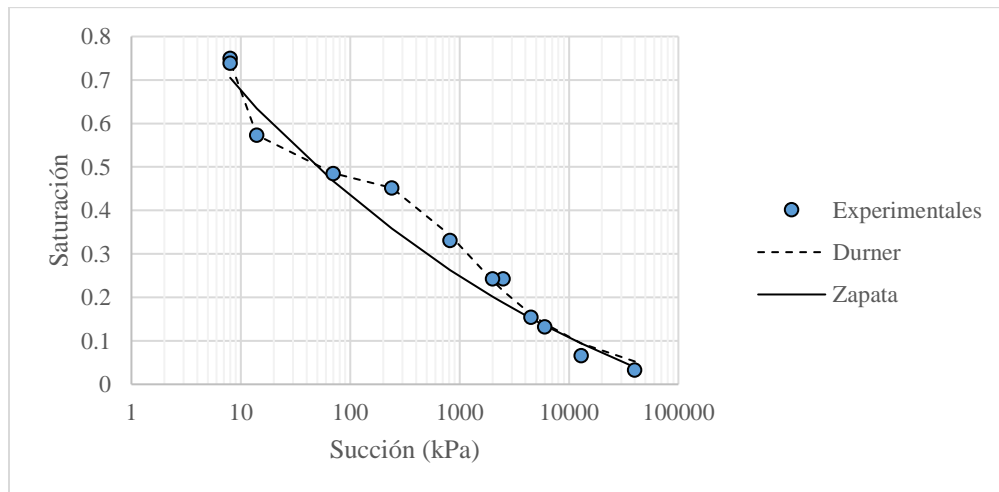


Figura 79. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Barbosa

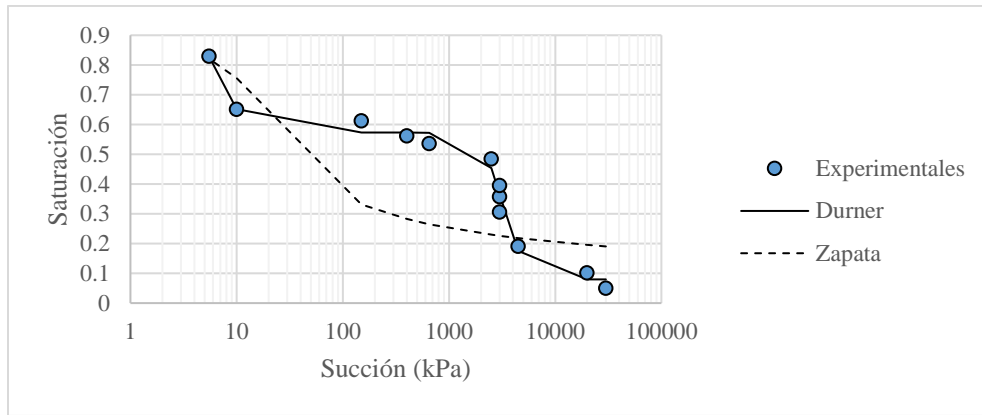


Figura 80. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Caldas 1

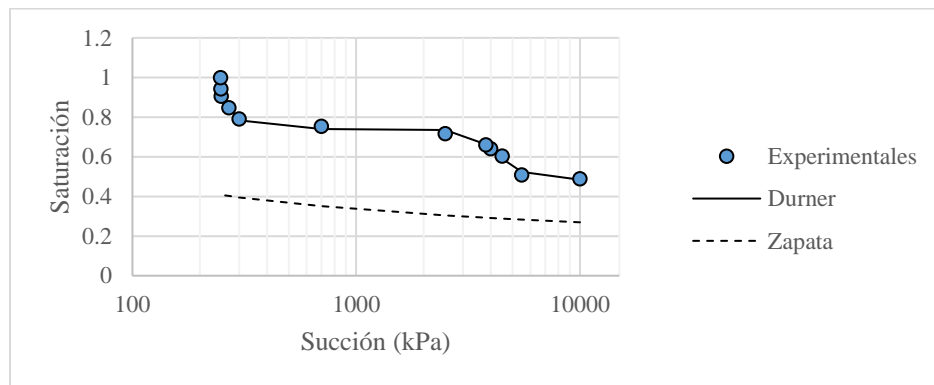


Figura 81. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Caldas 2

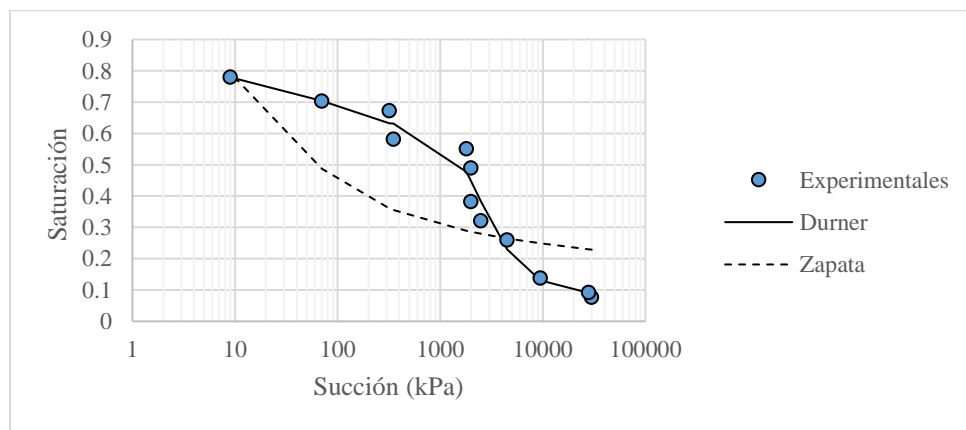


Figura 82. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Caldas 3

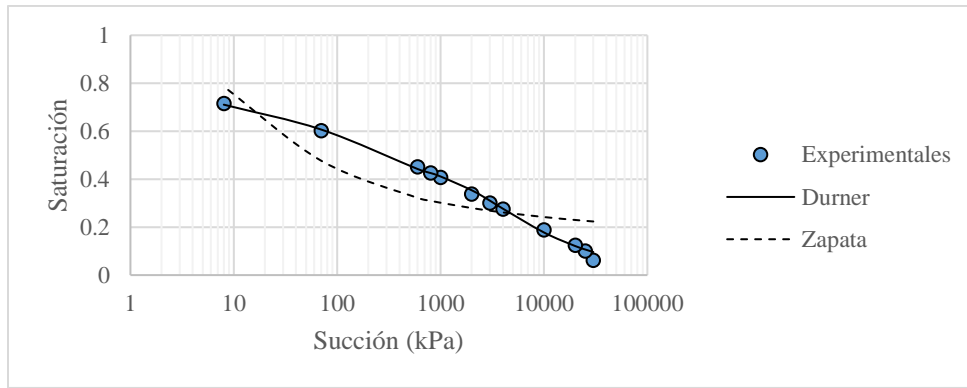


Figura 83. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. El Volador 1

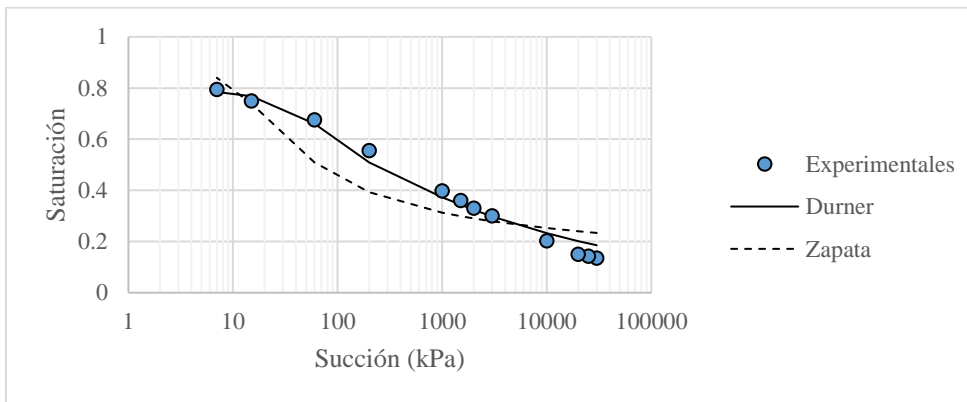


Figura 84. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. El Volador 2

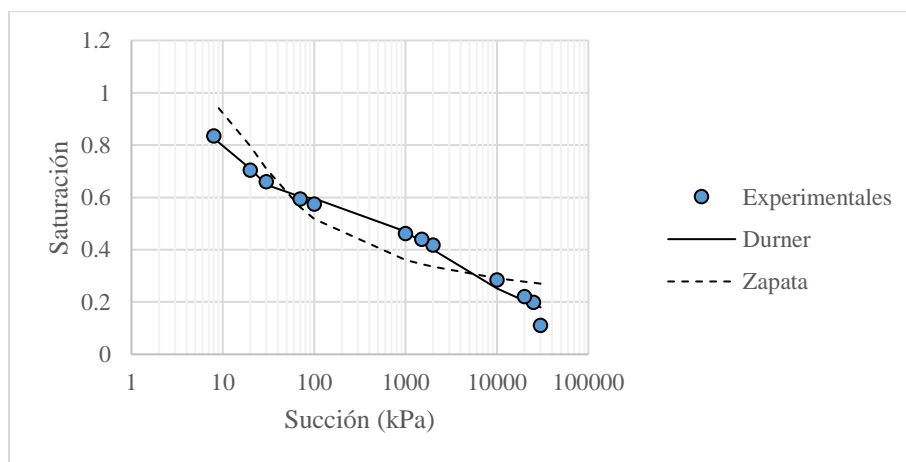


Figura 85. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. El Volador 3

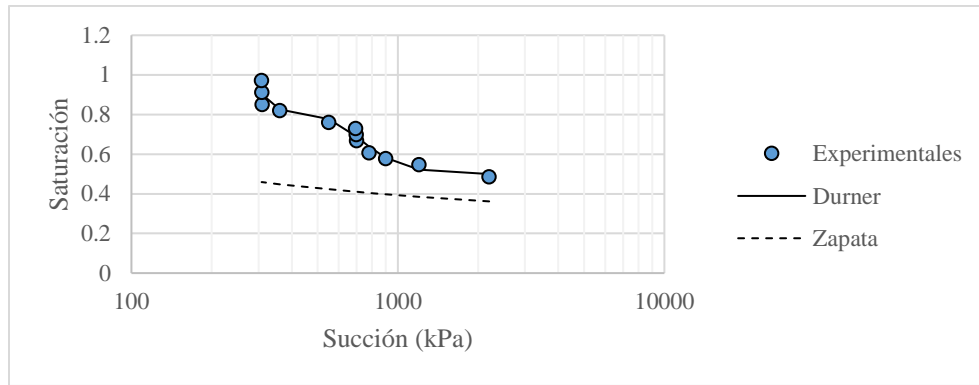


Figura 86. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Nutibara 1

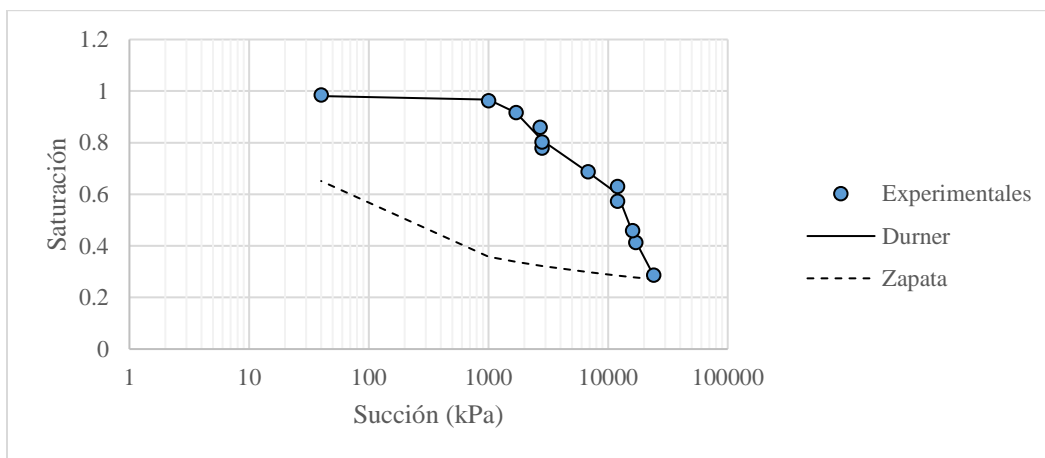


Figura 87. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Nutibara 2

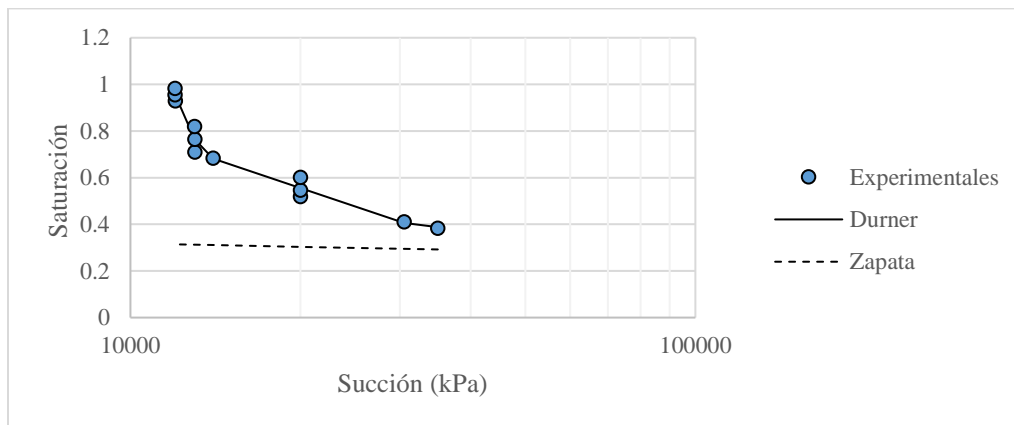


Figura 88. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Nutibara 3

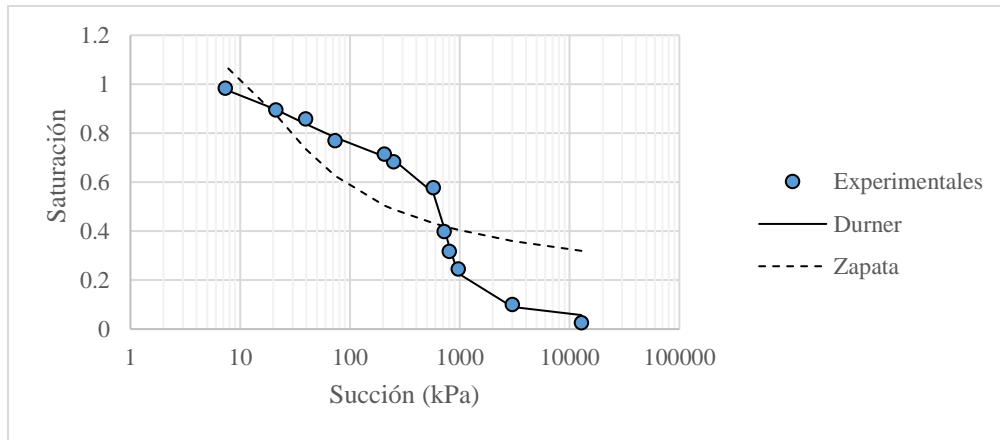


Figura 89. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Santuario 1.

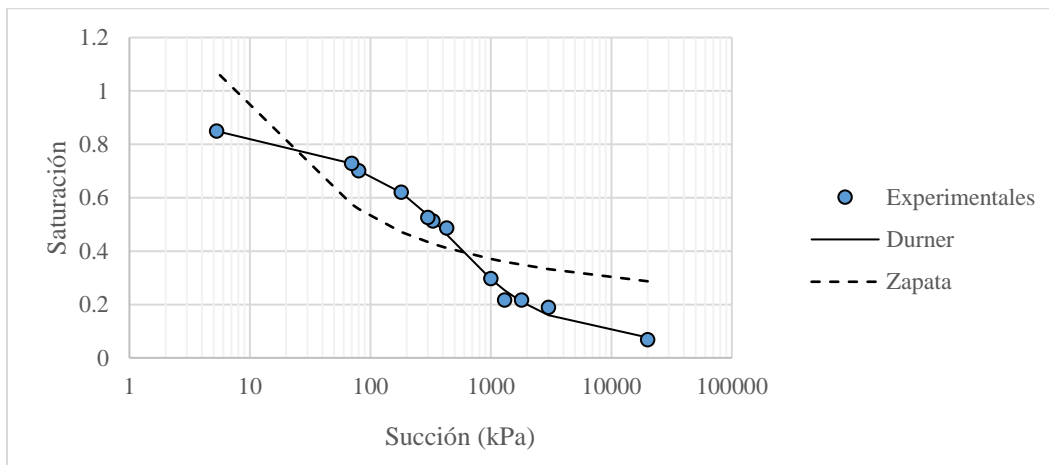


Figura 90. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Santuario 2.

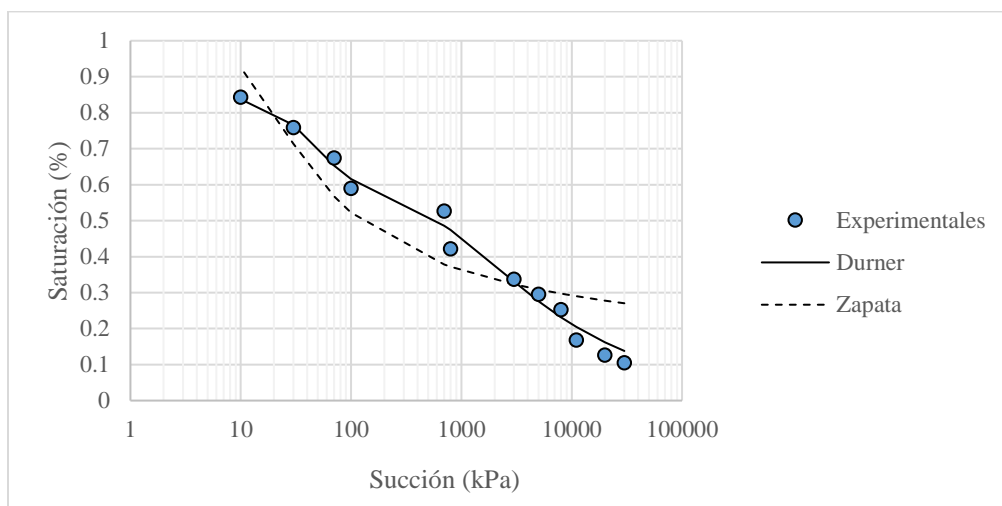


Figura 91. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Facultad de Minas.

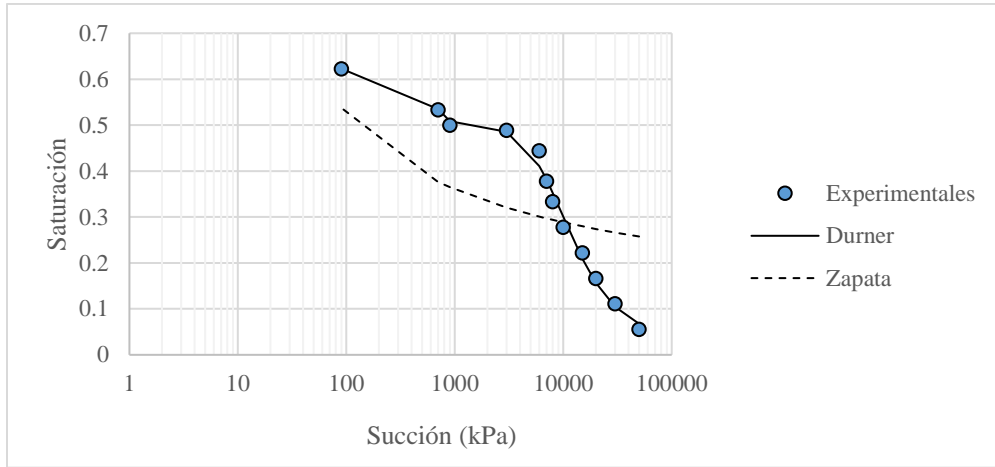


Figura 92. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Girardota 1.

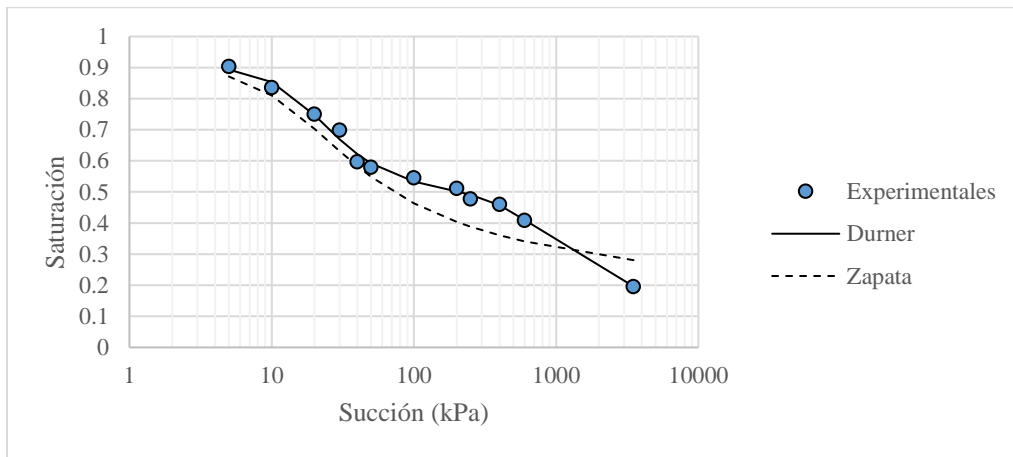


Figura 93. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Girardota 2.

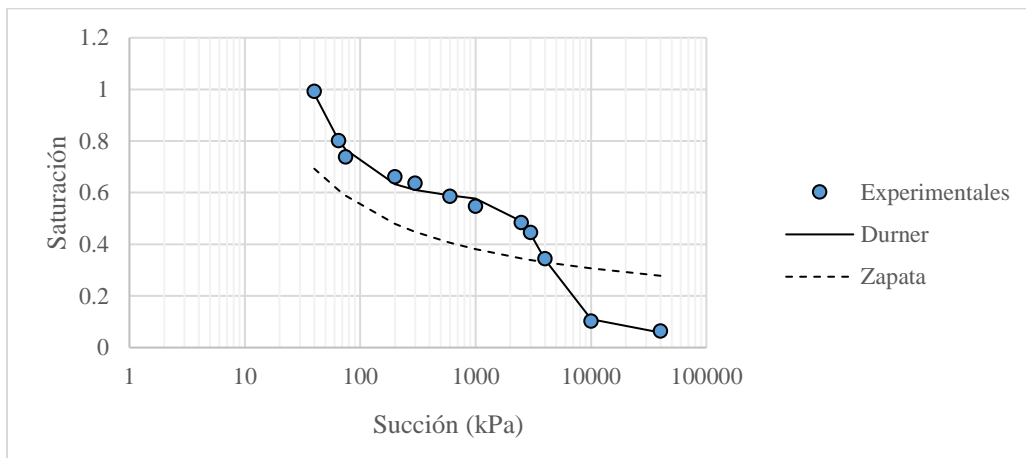


Figura 94. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Guarne 1.

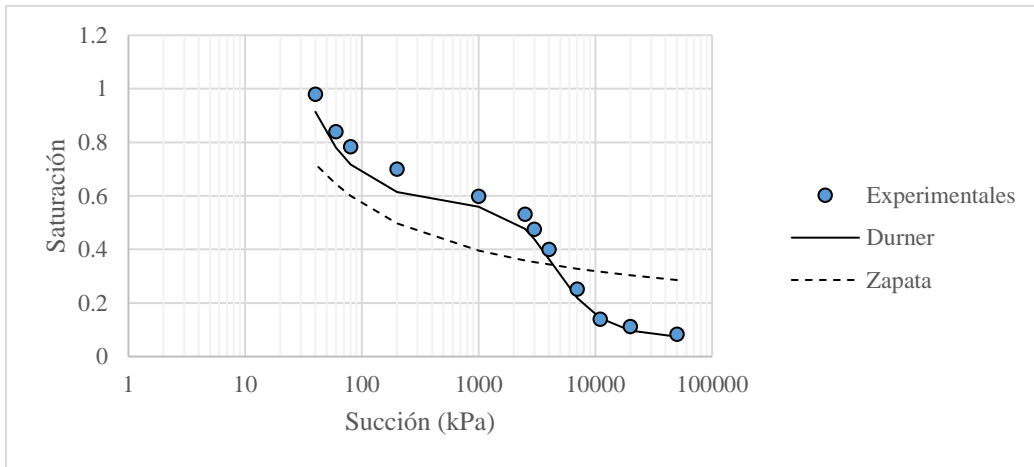


Figura 95. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Guarne 2.

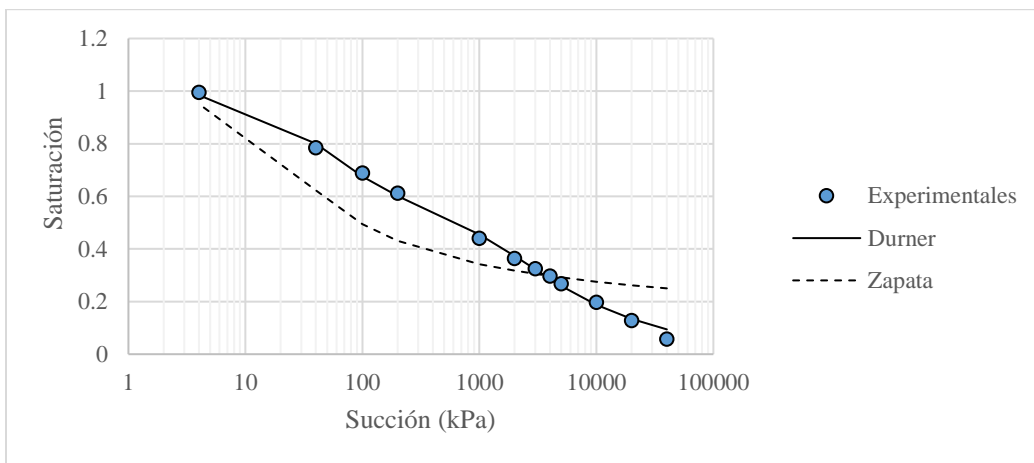


Figura 96. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Indural 1.

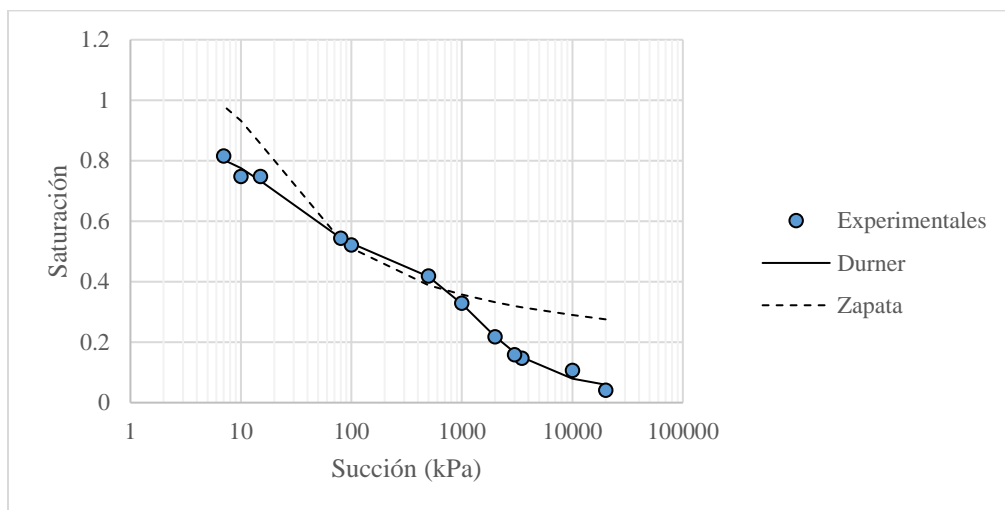


Figura 97. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Indural 2.

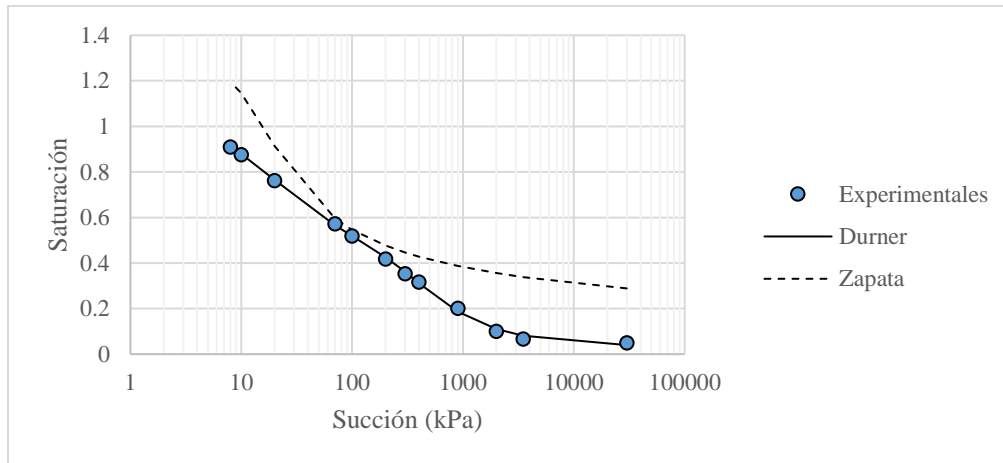


Figura 98. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Indural 3.

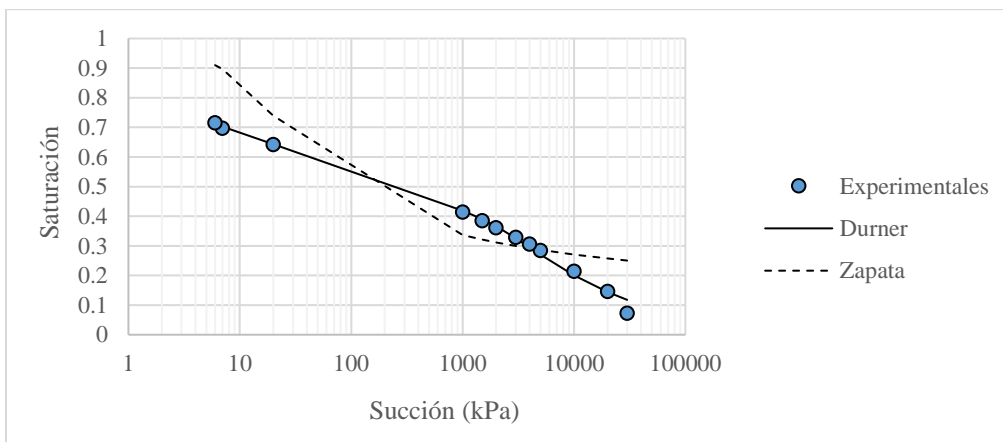


Figura 99. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Itagüí 1.

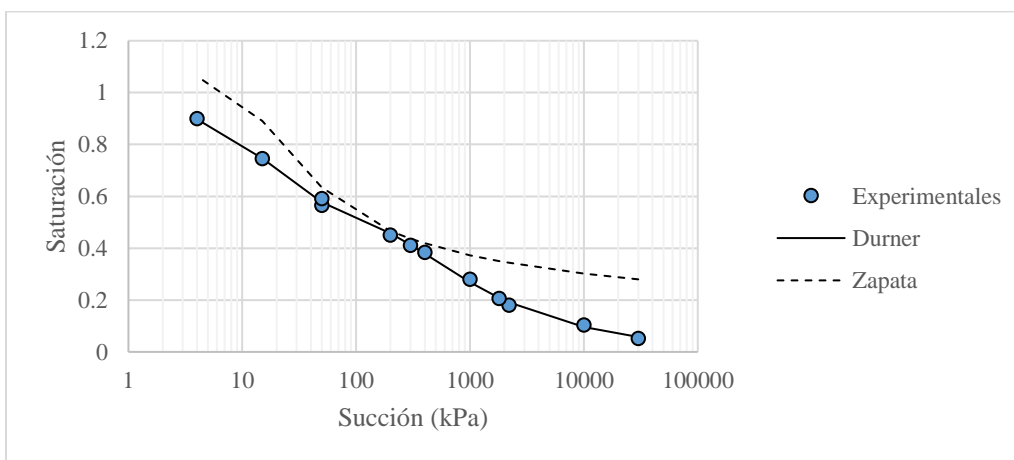


Figura 100. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Itagüí 2.

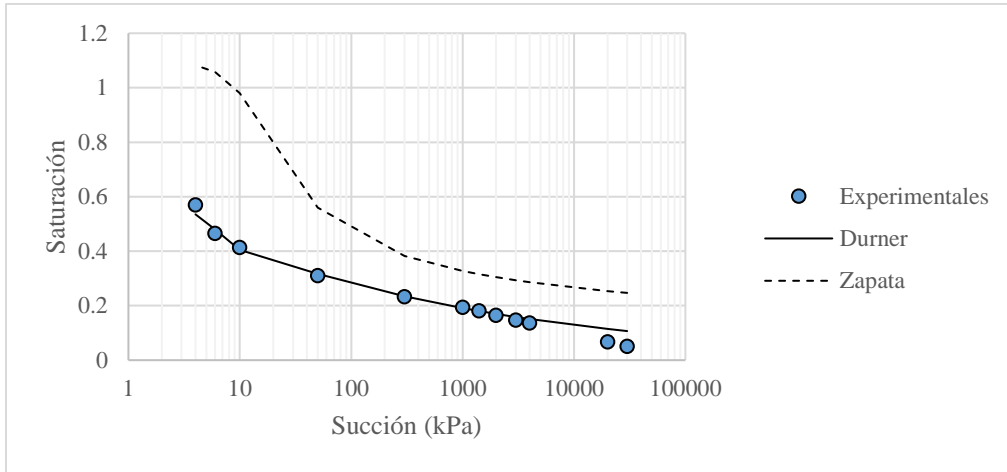


Figura 101. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Itagüí 3

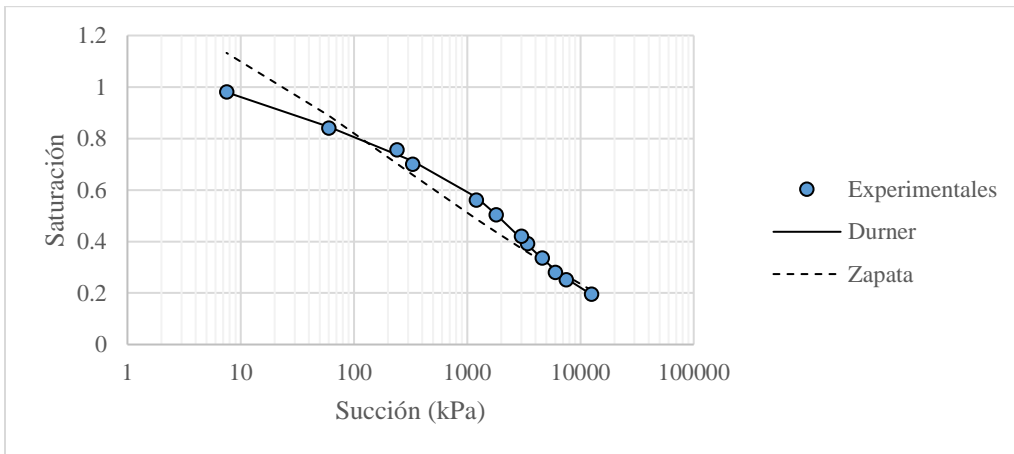


Figura 102. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Asomadera 1.

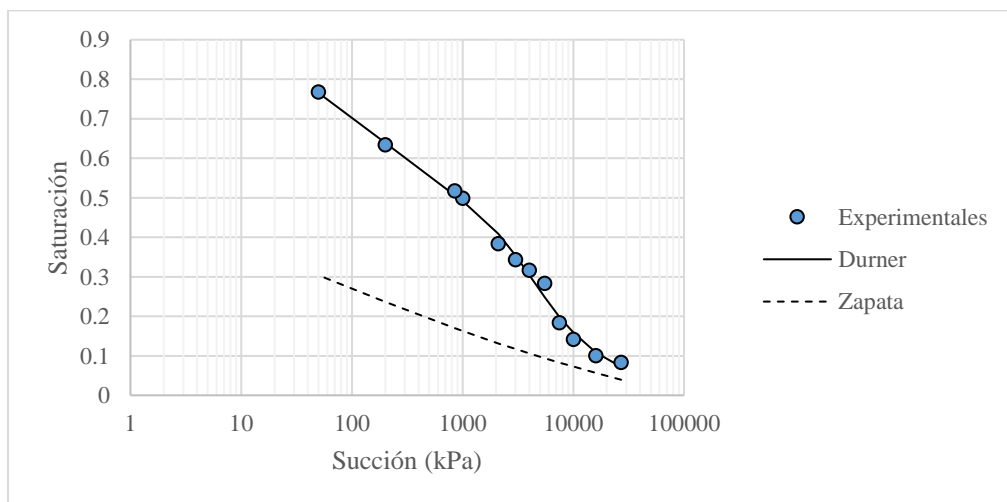


Figura 103. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Asomadera 2.

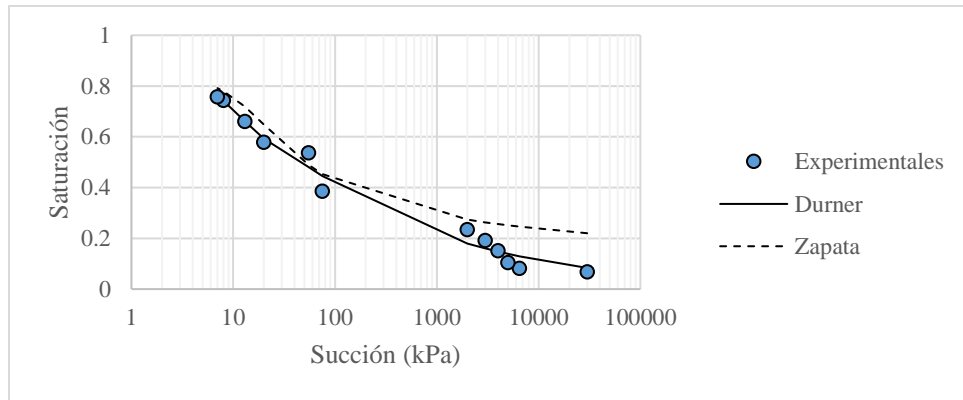


Figura 104. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Asomadera 3.

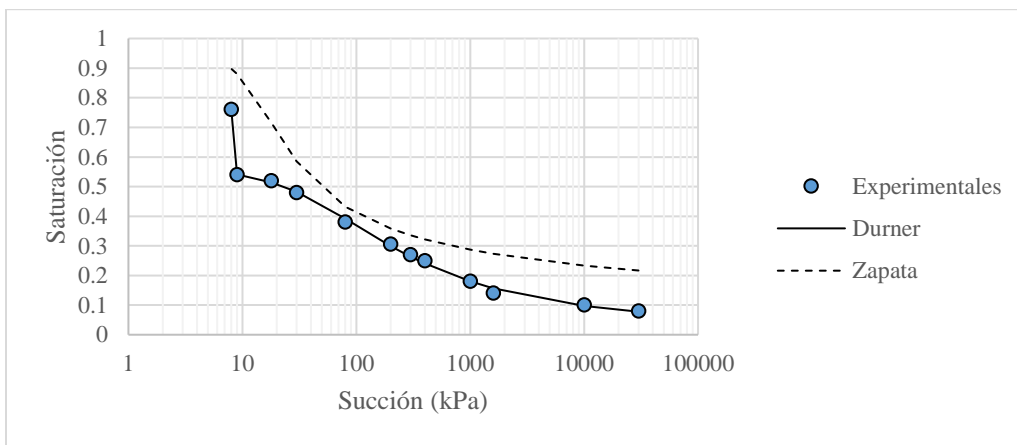


Figura 105. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 1.

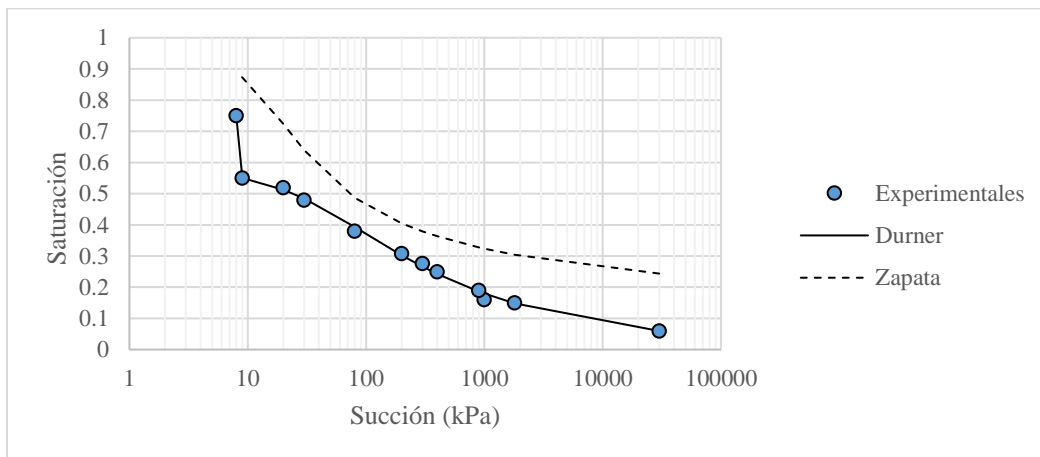


Figura 106. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 2.

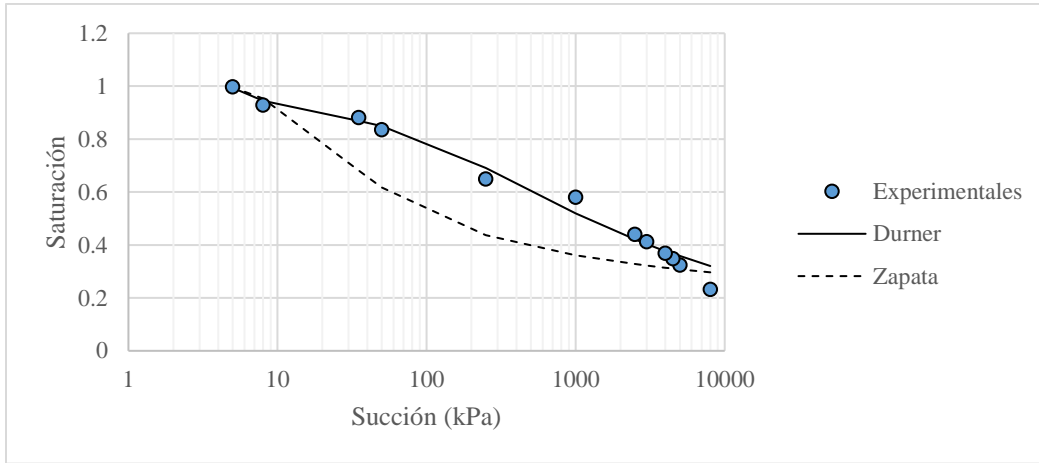


Figura 107. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 3.

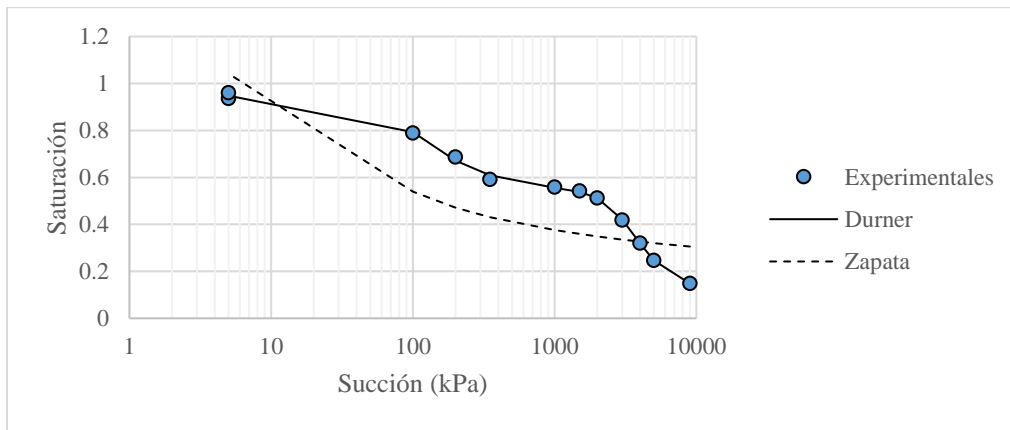


Figura 108. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 4.

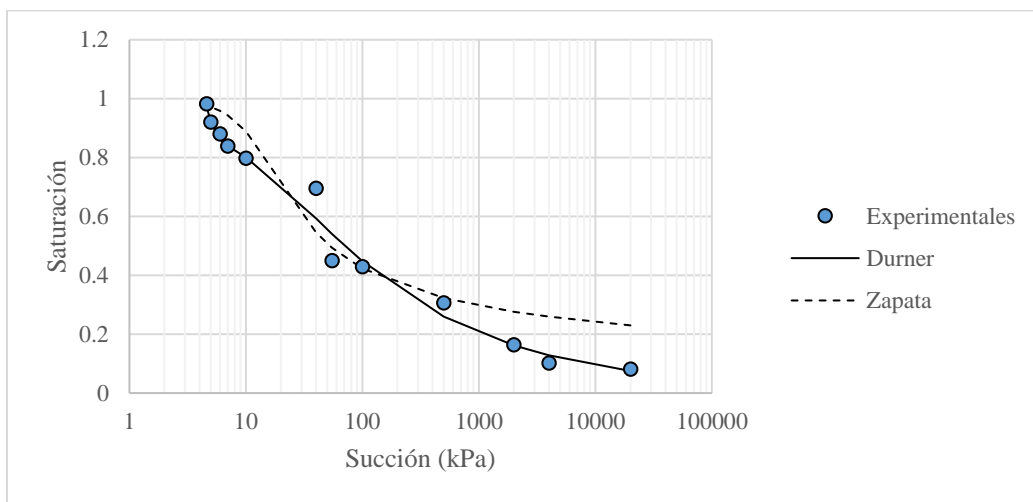


Figura 109. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Marinilla 5.

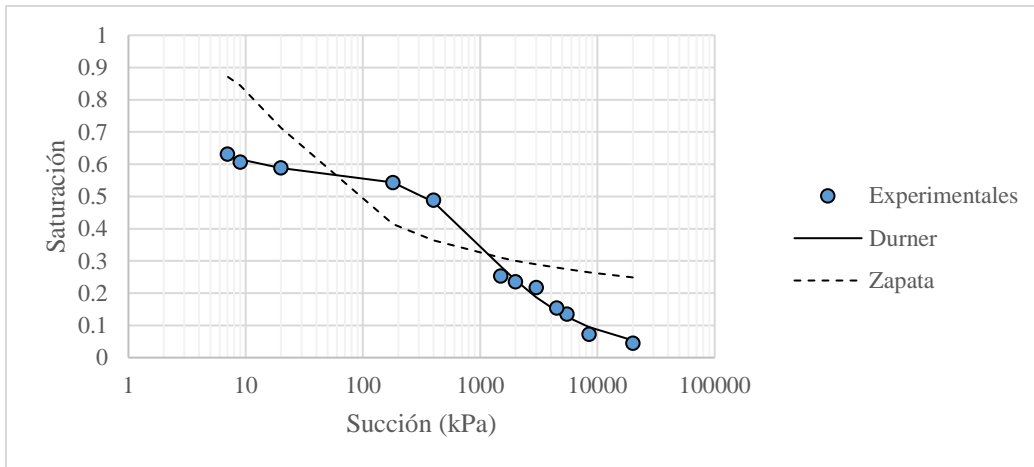


Figura 110. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Rionegro.

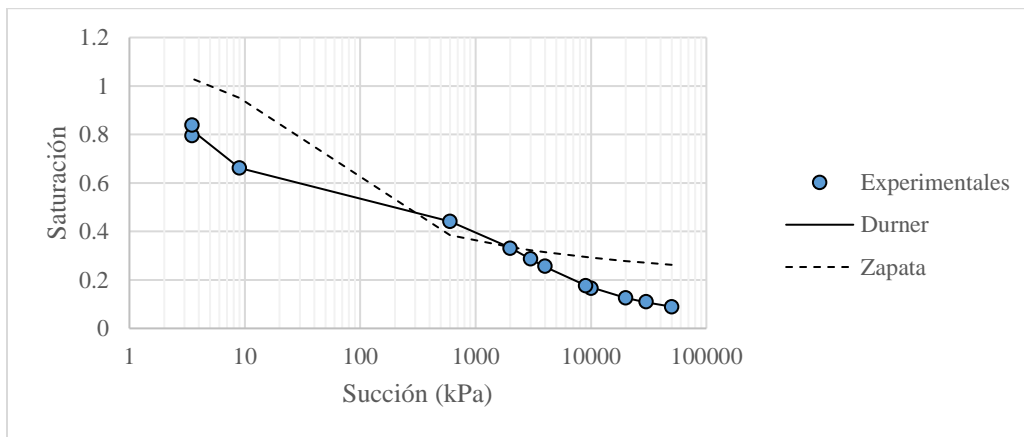


Figura 111. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. San Pedro 1.

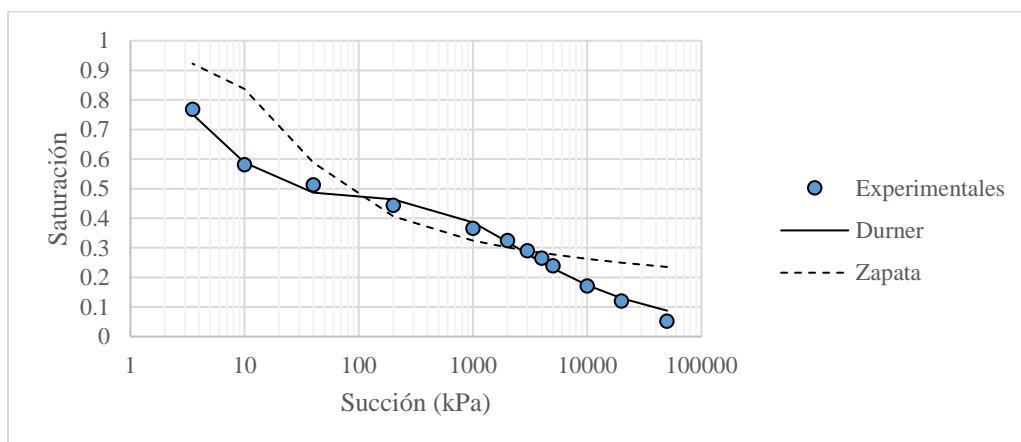


Figura 112. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. San Pedro 2.

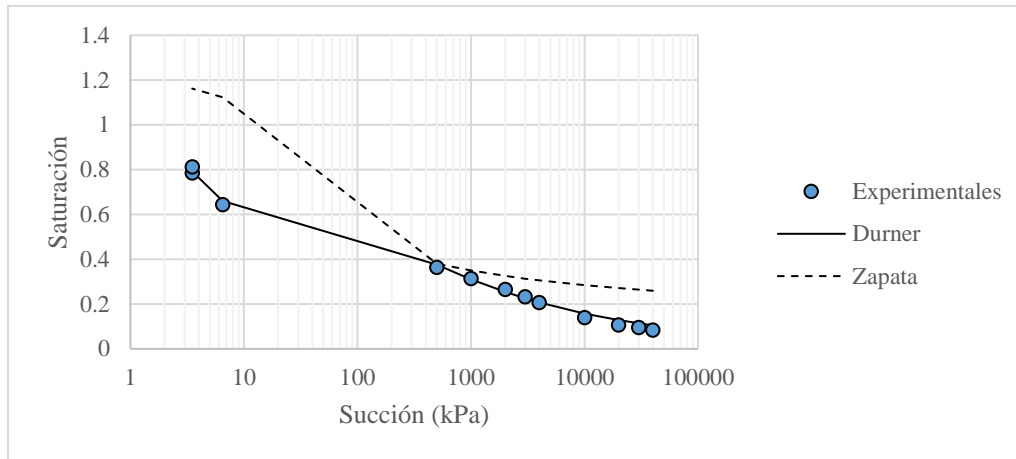


Figura 113. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. San Pedro 3.

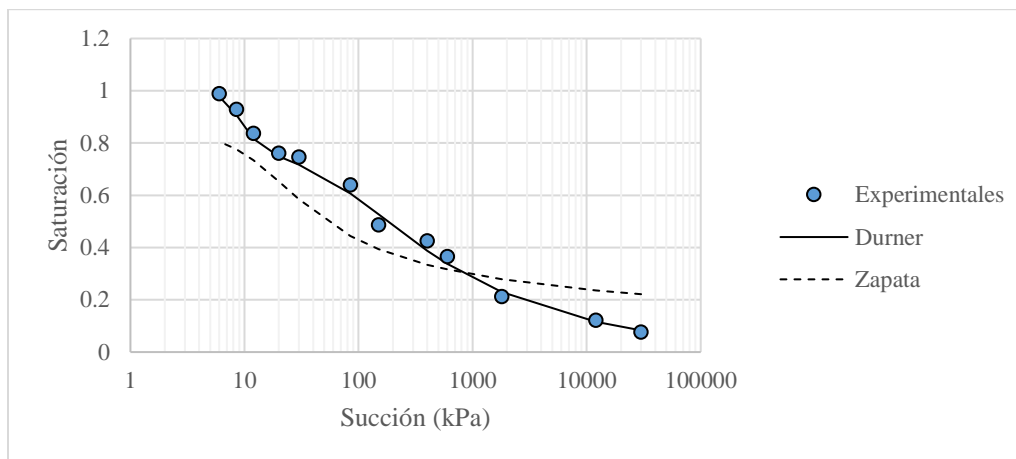


Figura 114. Determinación de curva mediante propuesta de Zapata. Santa Elena

La determinación de la curva de retención con la propuesta de Durner es una mejor aproximación en la mayoría de los casos que la hecha con la propuesta de Zapata y Perera, debido a que esta permite hacer un ajuste numérico de tipo bimodal.

A diferencia de la propuesta de Durner, la determinación de los parámetros con la propuesta de Zapata incluye la utilización de más parámetros como la humedad natural e índice de vacíos, específicamente este último valor se espera que influya en la determinación de la curva de retención de agua,

o

ya que la distribución y tamaño de los vacíos determinan la capacidad de retención de agua y por ende el valor de la succión (Dineen, 1997). Para determinar dicha influencia de la relación de vacíos, se presenta en la Figura 115 una relación entre los valores de la succión máxima obtenida para cada punto de la base de datos y el valor de entrada de aire en los macroporos multiplicado por la relación LL/e.

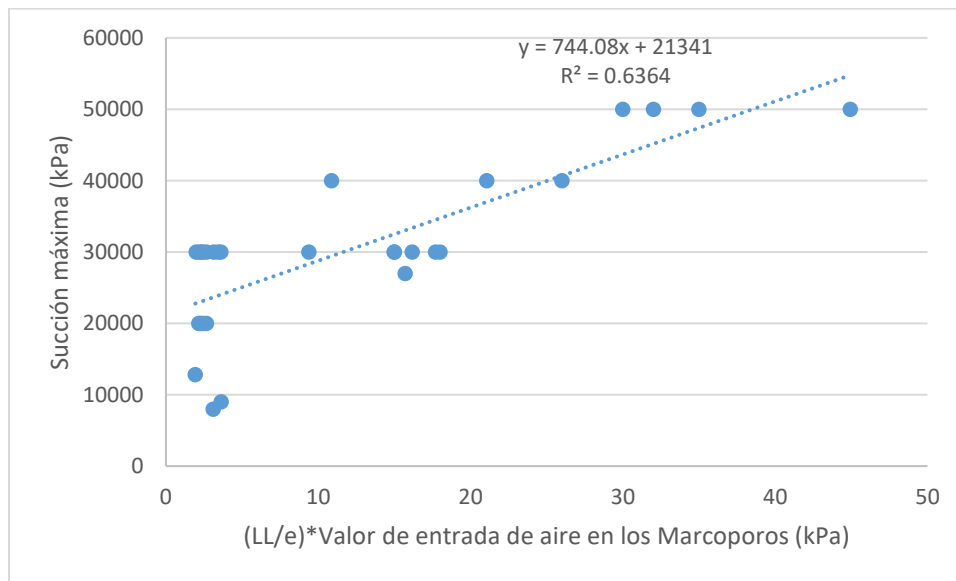


Figura 115. Relación entre succión máxima y valor de entrada de aire en los macroporos

El modelo de Zapata incluye la predicción de la curva mediante otras propiedades índice diferentes a las del índice plástico, uno de los objetivos era determinar si esta propiedad por estar relacionada con la capacidad de retener agua del suelo, presentaba una relación directa con la determinación de la curva de retención de agua; relación que se buscó a partir de analizar el comportamiento de succión máxima frente a el valor de entrada en los macroporos (Camapum 2015). Sin embargo en el gráfico anterior no se observa una influencia directa de este valor con la relación de vacíos. Donde se aprecia el aporte de la relación de vacíos en la

o

determinación de la curva fue en una de las ecuaciones del modelo propuesto mediante el gráfico de Durner, pero no tuvo un aporte real en la determinación de la curva mediante el modelo de Zapata y Perera, tal como se pensaba inicialmente.

5. CONCLUSIONES

Las ecuaciones (10) a (16) funcionan como propuesta para determinación de la curva de retención de agua para los suelos del Valle de Aburrá y Oriente Antioqueño con límites líquidos inferiores a 53%.

Las propiedades índice como la distribución granulométrica que se asocian a conductividad hidráulica del suelo, se relacionan con la SWCC pudiendo entonces determinarse para los suelos de la región mencionada una propuesta para estimar la SWCC con base en dichas propiedades índice.

El índice de vacíos es una propiedad que se relaciona con la capacidad de retención de agua y por ende con la curva característica de retención de agua, utilizarla en los modelos arrojó mejores ajustes con las curvas experimentales.

La determinación de la curva de retención con la propuesta de Durner es una mejor aproximación en la mayoría de los casos que la obtenida con la propuesta de Zapata Y Perera.

Para los suelos de Antioquia, específicamente los del Valle de Aburrá y área Metropolitana los modelos que mejor representan la SWCC son los que tienen estructura bimodal, al encontrarse que en la zona tropical han sufrido procesos de meteorización severos, formando una estructura de macro y micro poros.

o

El modelo de Durner (1994) presenta un mejor ajuste en la mayoría de casos y en la valoración promedio para los suelos de la base de datos.

El modelo de Durner al ser una propuesta multimodal se generaliza igualmente para los suelos que presentan una SWCC unimodal, dándole casi la totalidad del porcentaje de participación al modo de la primera subcurva.

Se encontró que los parámetros θ_s , w_1 y a_2 son los más influyentes en la forma de la SWCC una estimación incorrecta de estos en la propuesta podría afectar completamente la tendencia y por ende el ajuste.

La propuesta de Durner debe modificarse o ajustarse con ecuaciones que permitan estimar mejor la curva de retención de agua para suelos con límites líquidos mayores a 53%.

Agrupando los materiales de acuerdo a su génesis geológica, se identifica que los materiales provenientes del Batolito Antioqueño presentan un mejor ajuste con la propuesta de determinación de Curva de retención de agua realizada.

Es recomendable incrementar el número de suelos de la base de datos para cada formación geológica, o para alguna en específico, esto teniendo en cuenta las condiciones de formación de cada una de estas.

La determinación de la curva característica utilizando el modelo de Durner empleada en una de sus ecuaciones la relación de vacíos, sin embargo se esperaba un aporte más significativo de este parámetro teniendo en cuenta que está ligado a la capacidad que tiene el suelo para retener agua.

6. REFERENCIAS

- Arrieta, M. (2011). Mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo tropical de la ciudad de Medellín).
- Arya, L. M., Leij, F. J., Th, M., & Peter, V. G. (1997). (1999) Scaling Parameter to Predict Soil Water Characteristic from Particle-Size Distribution Data, (1981), 510–519.
- Brooks, R. H., & Corey, T. (1964). Hydraulic properties of porous media and their relations to drainage design, 3(March), 26–28.
- Camapum, J., de Farias, G., Lemos, S., dos Anjos, M., & Chagas, F. (2015). *Solos não saturados no contexto geotécnico*.
- Cano, K. R., No, J. P., Ospina, H., Sergio, A., An, J., & Pinto, O. (2014). Geotechnical study of a tropical soil to determine the state of weathering and the ia y geomorfolog ´, 70–83.
- Cotet, V., Dumitru, S., Mocanu, V., Calciu, I., & Vizitiu, O. (2014). Prediction of soil water retention properties by using Arya-Paris model.
- Dolinar, B. (2015). Prediction of the soil-water characteristic curve based on the specific surface area of fine-grained soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(3), 697–703. <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0664-y>
- Durner, W. (1994). Hydraulic Conductivity Estimation for Soils with Heterogeneous pore Structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211;223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- Echeverri Ramírez, O. (2005). Efecto de la microestructura en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de algunos suelos provenientes de rocas Ígneas presentes en Medellín, 89. Retrieved from

o

<http://www.bdigital.unal.edu.co/12724/>

Fredlund, X. (1994). Equations for the soil-water characteristic ' curve '.

Hyvonen, S. L., & Louise, S. (2004). Reproduced with permission of the copyright owner. Further reproduction prohibited without permission. *Dissertation*, (May).

Kosugi. (1996). Hydraulic properties, 32(9), 2697–2703.

L.Arya, & J.Paris. (1981). A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from Particle-Size Distribution and Bulk Density Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1023–1030. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060004x>

Medina, P., & Lopez, A. (2011). Análisis crítico del diseño factorial 2 k sobre casos aplicados Critical analysis of 2k factorial design based on applied cases, (47), 101–106.

Meza, V. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación a La Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (31), 23–38. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>

Ocampo, D., Hernández, L., Valencia, Y., & Echeverri, O. (2010). Análisis de las alteraciones físicas , químicas , mineralógicas y mecánicas de un suelo residual de Batolito Antioqueño contaminado con gasolina Analysis of physical , chemical , mineralogical and mechanic alterations of a residual soil from Batholith of, 1–11.

Perera, Y., Zapata, C., Hosuston, W., & HOUSTON, S. (n.d.). Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve Based on Grain-Size-Distribution and Index Properties, 1–12.

- Quintero, A., & Valencia, Y. (2012). Variación de las propiedades geotécnicas por los lixiviados de residuos sólidos urbanos en un suelo tropical.
- Quintero Ramirez, A., Valencia González, Y., & Lara Valencia, L. A. (2017). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical. *Dyna*, 84(203), 283–290. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.63875>
- Satynaga, A., Rahardjo, H., Leong, E.-C., & Wang, J.-Y. (2013). Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution.
- Seki, K. (2007). SWRC fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure, 407–437.
- Valencia González, Y. (2005). Influencia de la meteorización en las propiedades y comportamiento de dos perfiles de alteración originados en rocas metamórficas, 102.
- van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Yepes, j; Mesa, J; Valderrama N, Valencia, Y. (2012). Una metodología para la caracterización física, mineralógica, estructural y mecánica de un suelo tropical en el Valle de Aburrá, Municipio de Girardota.
- Zapata, C., Houston, W., Houston, S., & Walsh, K. (1999). Soil-Water Characteristic Curve Variability Claudia E. Zapata 1, William N. Houston 2, Sandra L. Houston 2, and Kenneth D. Walsh 3.

o