



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un suelo Inceptisol

**CHUQUISALA CHAVEZ LUIS LENIN
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un suelo Inceptisol

**CHUQUISALA CHAVEZ LUIS LENIN
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJOS EXPERIMENTALES

Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un suelo Inceptisol

**CHUQUISALA CHAVEZ LUIS LENIN
INGENIERO AGRONOMO**

CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE

**MACHALA
2022**

Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un suelo inceptisol

por Luis Lenin Chuquisala Chávez

Fecha de entrega: 08-mar-2023 09:04a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2032095389

Nombre del archivo: Trabajo_de_titulaci_n_Lenin_Chquisala.docx (84.74K)

Total de palabras: 10462

Total de caracteres: 52963

Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un suelo inceptisol

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

2%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Técnica de Machala

Trabajo del estudiante

5%

2

repositorio.utc.edu.ec

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

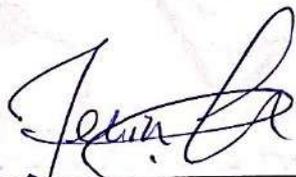
El que suscribe, CHUQUISALA CHAVEZ LUIS LENIN, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un suelo Inceptisol, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



CHUQUISALA CHAVEZ LUIS LENIN

0704641497

DEDICATORIA

A mis queridos padres Nataly Chávez y José Luis Chuquisala, a quienes se los debo todo, por darme siempre su apoyo incondicional durante toda mi etapa de preparación universitaria, por creer en mí y ayudarme a alcanzar cada gran meta que me propuse hasta llegar a ser un profesional.

A mi dulce abuela Nelly Laines, por los valores y consejos que me inculcó siempre, hicieron eco en mí, permitiendo estar siempre motivado y ser una persona honrada.

AGRADECIMIENTOS

A mi querida Universidad Técnica de Machala y su emblemática Facultad de Ciencias Agropecuarias, por brindarme los conocimientos y las vivencias que me formaron durante mi carrera.

De manera muy especial a mi estimado tutor y amigo Ing. Julio Chabla Carrillo, por todo su apoyo brindado hacia mí, durante todo el transcurso de mi trabajo de titulación, su convicción como maestro fue el mejor ejemplo y me permitió siempre aprender de él.

A todos mis docentes, en especial a Ing. Sara Castillo Herrera; Ing. Eduardo Luna Romero e Ing. Diego Villaseñor Ortiz, aquellos que me dieron más que conocimientos, su amistad y camaradería para trabajar en equipo y confianza.

A mis compañeros que mutuamente nos apoyamos para lograr superarnos y entablar una duradera amistad.

RESUMEN

La resistencia mecánica a la penetración (RPM), se ha constituido en un método de identificación de capas compactadas de suelo por diversos causales. Las mediciones realizadas con el penetrómetro de cono Field Scout 900, así como también la medición de los contenidos hídricos (θ) por medio de la sonda TDR 350, destacan por brindar información de campo en tiempo real a bajo costo y ser un equipo de fácil manejo para productores o técnicos del sector agropecuario. Los aportes de los avances tecnológicos, permiten disponer de nuevos equipos precisos y versátiles, con la ventaja de poder efectuar varias repeticiones de toma de datos in situ en la rizosfera de la mayoría de cultivos, empleando poco esfuerzo y en corto tiempo. En los suelos de orden Inceptisol, la variabilidad espacial conjunto a la variabilidad temporal, se encuentran interrelacionadas a las propiedades físicas y el régimen hídrico de la zona, pudiendo provocar periodos de contracción – dilatación por su textura arcillosa predominante. En el presente trabajo se establecieron las relaciones matemáticas entre la RPM y el contenido hídrico del suelo de 5 perfiles, considerando estratos de 5 cm en los primeros 10 cm, y en estratos de 10 cm hasta los 40 cm de profundidad, de una parcela con cultivo de banano de la Granja experimental Santa Inés de la Universidad Técnica de Machala, en el estudio de estas 2 variables, se evaluaron 3 modelos de regresión matemática: lineal, logarítmica y polinómica; con los contenidos hídricos: humedad volumétrica TDR; humedad volumétrica por diferencia de pesos (θ_v), humedad gravimétrica (θ_g), y humedad relativa saturada (θ_v/θ_s), determinando que el modelo matemático que mejor se ajusta para todos los contenidos de humedad en el primer y último estrato (00-05 y 30-40) es el logarítmico con un R^2 de 0.649 y 0.791 respectivamente; exceptuando el caso de θ_v TDR en donde su R^2 fue de 0.602 y 0.705; también se determinó que el modelo logarítmico presenta el mejor ajuste para θ_v : en el estrato de 10 a 20 cm con un R^2 de 0.475. Mientras que para los estratos

restantes se obtuvo que el modelo polinómico es el que presenta mayor ajuste, siendo para θ_v TDR: estrato de 05 a 10 cm un R^2 0.618; estrato de 10 a 20 cm un R^2 de 0.692 y estrato de 10 a 20 cm un R^2 de 0.790. Para θ_v : estrato de 05 a 10 cm un R^2 0.562; estrato de 20 a 30 cm un R^2 de 0.744. Para θ_g : estrato de 05 a 10 cm un R^2 0.562; estrato de 10 a 20 cm un R^2 0.468 y estrato de 30 a 40 cm un R^2 0.775. Para θ_v/θ_s : estrato de 05 a 10 cm un R^2 0.562; estrato de 10 a 20 cm un R^2 0.468 y estrato de 30 a 40 cm un R^2 0.860.

Palabras claves: Resistencia mecánica a la penetración, contenido hídrico, relaciones matemáticas, estratos.

ABSTRACT

The mechanical resistance to penetration (RPM) has become a method for identifying compacted soil layers for various reasons. The measurements made with the Field Scout 900 cone penetrometer, as well as the measurement of water content (θ) by means of the TDR 350 probe, stand out for providing real-time field information at low cost and for being easy to use equipment for producers or technicians in the agricultural sector. Technological advances provide new, precise and versatile equipment, with the advantage of being able to carry out several repetitions of data collection in situ in the rhizosphere of most crops, with little effort and in a short time. In Inceptisol soils, spatial variability together with temporal variability are interrelated to the physical properties and the water regime of the area, which can cause periods of contraction - dilation due to its predominant clayey texture. In the present work, mathematical relationships were established between RMP and soil water content of 5 profiles, considering strata of 05 cm in the first 10 cm, and in strata of 10 cm to 40 cm depth, of a plot with banana crop of the Santa Inés experimental farm of the Technical University of Machala, in the study of these 2 variables, 3 mathematical regression models were evaluated: linear, logarithmic and polynomial; with the water contents: volumetric moisture TDR; volumetric moisture by weight difference (θ_v), gravimetric moisture (θ_g), and saturated relative humidity (θ_v/θ_s), determining that the mathematical model that best fits for all moisture contents in the first and last stratum (00-05 and 30-40) is the logarithmic one with an R^2 of 0.649 and 0.791 respectively; except for the case of θ_v TDR, where its R^2 was 0.602 and 0.705; it was also determined that the logarithmic model presents the best fit for θ_v : in the stratum from 10 to 20 cm with an R^2 of 0.475. While for the remaining strata it was obtained that the polynomial model is the one that presents the best fit, being for θ_v TDR: stratum from 05 to 10 cm an R^2 0.618; stratum from 10 to 20 cm an R^2 of 0.692 and stratum from 10 to 20 cm an R^2 of

0.790. For θ_v : stratum from 05 to 10 cm an R^2 0.562; stratum from 20 to 30 cm an R^2 of 0.744.
For θ_G : stratum from 05 to 10 cm an R^2 0.562; stratum from 10 to 20 cm an R^2 0.468 and stratum
from 30 to 40 cm an R^2 0.775. For θ_v/θ_s : stratum from 05 to 10 cm an R^2 0.562; stratum from 10
to 20 cm an R^2 0.468 and stratum from 30 to 40 cm an R^2 0.860.

Key words: mechanical resistance to penetration, water content, mathematical relationships,
stratum.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	19
1.1 Objetivo general:	20
1.2 Objetivos específicos:	20
II. REVISIÓN DE LITERATURA	21
2.1 Propiedades físicas del suelo	21
2.1.1 <i>Textura</i>	21
2.1.1.1. Textura arenosa	22
2.1.1.2. Textura limosa	22
2.1.1.3. Textura arcillosa	22
2.1.2. <i>Estructura</i>	22
2.1.2.1. Sin estructura	23
2.1.2.2. Con estructura	23
2.1.2.3. Con estructura destruida	23
2.1.3 <i>Porosidad</i>	23
2.1.4 <i>Permeabilidad</i>	25
2.1.5 <i>Infiltración del agua en el suelo</i>	26
2.2 Características estructurales de los suelos Inceptisoles	27
2.3 Formas de agua en el suelo	27
2.3.1 <i>Agua gravitacional</i>	28

2.3.2	<i>Agua capilar</i>	28
2.3.3	<i>Agua higroscópica</i>	28
2.4	Estados de humedad en el suelo	29
2.4.1	<i>Saturación</i>	29
2.4.2	<i>Capacidad de campo</i>	29
2.4.3	<i>Punto de marchitez permanente</i>	30
2.4.4	<i>Agua útil</i>	30
2.4.5	<i>Agua aprovechable</i>	31
2.5	Medición de la humedad del suelo	32
2.5.1	<i>Método gravimétrico</i>	33
2.5.2	<i>Método de resistencia eléctrica</i>	33
2.5.3	<i>Métodos dieléctricos</i>	34
2.5.3.2.	Reflectometría en dominio temporal (sonda TDR).	35
2.5.4	<i>Método del Tensiómetro</i>	35
2.5.5	<i>Teledetección</i>	36
2.6	Compactación del suelo	36
2.6.1	<i>Causas de un enraizamiento limitado</i>	37
2.6.2	<i>Indicadores del enraizamiento restringido</i>	37
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1	Localización del área de estudio	40
3.2	Ubicación geográfica y caracterización de la zona de estudio	40

3.3 Características del suelo	41
3.4 Diseño de estudio	41
3.5 Croquis del experimento	42
3.6 Materiales y herramientas	42
3.6.1 <i>Materiales y equipos de campo</i>	42
3.6.2 <i>Materiales de laboratorio</i>	43
3.6.3 <i>Materiales de oficina</i>	43
3.7 Variables de estudio	43
3.7.1 <i>Textura y clase textural</i>	44
3.7.2 <i>Densidad real</i>	47
3.7.3 <i>Densidad aparente</i>	48
3.7.4 <i>Porosidad total</i>	49
3.7.4 <i>Capacidad de campo</i>	50
3.7.5 <i>Punto de marchitez</i>	50
3.7.6 <i>Saturación</i>	50
3.7.8 <i>Contenido gravimétrico de agua en el suelo</i>	50
3.7.9 <i>Contenido volumétrico de agua en el suelo</i>	51
3.7.10 <i>Resistencia mecánica a la penetración (RMP)</i>	52
3.7.11 <i>Conductividad eléctrica</i>	53
3.7.12 <i>Temperatura</i>	53
3.8 Análisis estadístico	53

3.9 Coeficiente de determinación (R²)	53
3.10 Relaciones matemáticas	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	55
4.1 Análisis exploratorio de las propiedades físicas del suelo	55
4.2 Análisis multivariado	61
4.3 Relaciones matemáticas bivariadas	67
4.4 Relaciones matemáticas multivariada	70
V. CONCLUSIONES	74
VI. Bibliografía	75
ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Intervalos de tamaño de componentes del suelo</i> _____	21
Tabla 2. <i>Tipos de suelo según su contenido</i> _____	22
Tabla 3. Clases texturales del suelo de la zona de estudio _____	41
Tabla 4. <i>Métodos de medición de las variables del estudio</i> _____	43
Tabla 5. <i>Prueba de normalidad para cada profundidad</i> _____	55
Tabla 6. Distribución de frecuencia de la clase textural agrupada por profundidades _	57
Tabla 7. Estadística descriptiva perfil de 0 a 5 cm _____	60
Tabla 8. Clasificación del coeficiente de variación de las propiedades físicas _____	61
Tabla 9. Coeficientes de correlación de Pearson _____	65
Tabla 10. Contenidos hídricos del perfil del suelo estudiado _____	66
Tabla 11. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_v TDT _____	67
Tabla 12. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_v _____	68
Tabla 13. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_g _____	69
Tabla 14. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_v/θ_s _____	69
Tabla 15. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs Cc vs Da _____	70
Tabla 16. Ecuaciones matemáticas entre la RMP vs Cc vs Porosidad _____	71
Tabla 17. Ecuaciones matemáticas entre la RMP vs Cc vs θ_s _____	71
Tabla 18. <i>Ecuaciones matemáticas entre RMP vs PMP vs Da</i> _____	72
Tabla 19. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs PMP vs Limo _____	72
Tabla 20. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs PMP vs Arena _____	72

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. <i>Niveles de humedad en el suelo</i> _____	29
Figura 2. <i>Agua útil y no útil para las plantas</i> _____	31
Figura 3. <i>Ubicación geográfica del predio de estudio</i> _____	40
Figura 4. <i>Croquis del experimento</i> _____	42
Figura 5. <i>Determinación de clase textural en laboratorio</i> _____	47
Figura 6. <i>Determinación de densidad real en laboratorio</i> _____	48
Figura 7. <i>Pesado de muestras no alteradas por método del cilindro</i> _____	48
Figura 8. <i>Lectura de contenido de humedad con sonda TDR 350 Field Scout</i> _____	52
Figura 9. <i>Medición de la resistencia mecánica a la penetración</i> _____	52
Figura 10. <i>Curva de retención calicata 6 perfil 30 - 40 cm</i> _____	59
Figura 11. <i>Curva de retencion calicata 2 perfil 10 - 20 cm</i> _____	59
Figura 12. <i>Curva de retencion calicata 9 perfil 30 - 40 cm</i> _____	60
Figura 13. <i>Perfil de RMP en condición de capacidad de campo</i> _____	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para determinar porosidad _____	25
Ecuación 2. Ecuación para determinar conductividad hidráulica _____	26
Ecuación 3. Ecuación para determinar la infiltración del agua en el suelo _____	27
Ecuación 4. Ecuación para determinar el agua útil _____	32
Ecuación 5. Ecuación para determinar el agua aprovechable _____	33
Ecuación 6. Ecuación para determinar el porcentaje de limo + arcilla _____	46
Ecuación 7. Ecuación para determinar el % de arcilla _____	47
Ecuación 8. Ecuación para determinar el porcentaje de limo _____	47
Ecuación 9. Ecuación para determinar el porcentaje de arena _____	47
Ecuación 10. Ecuación para determinar densidad real _____	48
Ecuación 11. Ecuación para determinar densidad aparente _____	50
Ecuación 12. Ecuación para determinar porosidad total _____	50
Ecuación 13. Ecuación para determinar contenido gravimétrico de agua en el suelo__	52
Ecuación 14. Ecuación para determinar contenido volumétrico de agua en el suelo __	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Contenido de arcilla por perfil de suelo. _____	79
Anexo 2. Contenido de limo por perfil de suelo. _____	79
Anexo 3. Contenido de arena por perfil de suelo. _____	80
Anexo 4. Curva de densidad aparente. _____	80
Anexo 5. Curva de densidad real _____	81
Anexo 6. Curva de contenido de humedad en estado de saturación. _____	81
Anexo 7. Curva de contenido de humedad a capacidad de campo. _____	82
Anexo 8. Curva de contenido de humedad en punto de marchitez permanente. _____	82
Anexo 9. Curva de porcentaje de porosidad. _____	83
Anexo 10. Curva de contenido de humedad gravimétrica. _____	83
Anexo 11. Curva de contenido de humedad volumétrica. _____	84
Anexo 12. Curva de temperatura del perfil del suelo. _____	84
Anexo 13. Curva de conductividad eléctrica. _____	85
Anexo 14. Curva de retención calicata 1 perfil 00 - 05 cm. _____	85
Anexo 15. Curva de retención calicata 1 perfil 05 - 10 cm. _____	86
Anexo 16. Curva de retención calicata 1 perfil 10 - 20 cm. _____	86
Anexo 17. Curva de retención calicata 1 perfil 20 - 30 cm. _____	87
Anexo 18. Curva de retención calicata 1 perfil 30 - 40 cm. _____	87
Anexo 19. Curva de retención calicata 2 perfil 0 - 5 cm. _____	88
Anexo 20. Curva de retención calicata 2 perfil 5 - 10 cm. _____	88
Anexo 21. Curva de retención calicata 2 perfil 10 - 20 cm. _____	89

Anexo 22. Curva de retención calicata 2 perfil 20 - 30 cm. _____	89
Anexo 23. Curva de retención calicata 2 perfil 30 - 40 cm. _____	90
Anexo 24. Curva de retención calicata 3 perfil 0 - 5 cm. _____	90
Anexo 25. Curva de retención calicata 3 perfil 5 - 10 cm. _____	91
Anexo 26. Curva de retención calicata 3 perfil 10 - 20 cm. _____	91
Anexo 27. Curva de retención calicata 3 perfil 20 - 30 cm. _____	92
Anexo 28. Curva de retención calicata 3 perfil 30 - 40 cm. _____	92
Anexo 29. Curva de retención calicata 4 perfil 0 - 5 cm. _____	93
Anexo 30. Curva de retención calicata 4 perfil 5 - 10 cm. _____	93
Anexo 31. Curva de retención calicata 4 perfil 10 - 20 cm. _____	94
Anexo 32. Curva de retención calicata 4 perfil 20 - 30 cm. _____	94
Anexo 33. Curva de retención calicata 4 perfil 30 - 40 cm. _____	95
Anexo 34. Curva de retención calicata 5 perfil 0 - 5 cm. _____	95
Anexo 35. Curva de retención calicata 5 perfil 5 - 10 cm. _____	96
Anexo 36. Curva de retención calicata 5 perfil 10 - 20 cm. _____	96
Anexo 37. Curva de retención calicata 5 perfil 20 - 30 cm. _____	97
Anexo 38. Curva de retención calicata 5 perfil 30 - 40 cm. _____	97
Anexo 39. Curva de retención calicata 6 perfil 0 - 5 cm. _____	98
Anexo 40. Curva de retención calicata 6 perfil 5 - 10 cm. _____	98
Anexo 41. Curva de retención calicata 6 perfil 10 - 20 cm. _____	99
Anexo 42. Curva de retención calicata 6 perfil 20 - 30 cm. _____	99
Anexo 43. Curva de retención calicata 6 perfil 30 - 40 cm. _____	100
Anexo 44. Curva de retención calicata 7 perfil 0 - 5 cm. _____	100

Anexo 45. Curva de retención calicata 7 perfil 5 - 10 cm. _____	101
Anexo 46. Curva de retención calicata 7 perfil 10 - 20 cm. _____	101
Anexo 47. Curva de retención calicata 7 perfil 20 - 30 cm. _____	102
Anexo 48. Curva de retención calicata 7 perfil 30 - 40 cm. _____	102
Anexo 49. Curva de retención calicata 8 perfil 0 - 5 cm. _____	103
Anexo 50. Curva de retención calicata 8 perfil 5 - 10 cm. _____	103
Anexo 51. Curva de retención calicata 8 perfil 10 - 20 cm. _____	104
Anexo 52. Curva de retención calicata 8 perfil 20 - 30 cm. _____	104
Anexo 53. Curva de retención calicata 8 perfil 30 - 40 cm. _____	105
Anexo 54. Curva de retención calicata 9 perfil 0 - 5 cm. _____	105
Anexo 55. Curva de retención calicata 9 perfil 5 - 10 cm. _____	106
Anexo 56. Curva de retención calicata 9 perfil 10 - 20 cm. _____	106
Anexo 57. Curva de retención calicata 9 perfil 20 - 30 cm. _____	107
Anexo 58. Curva de retención calicata 9 perfil 30 - 40 cm. _____	107
Anexo 59. Curva de retención calicata 10 perfil 0 - 5 cm.' _____	108
Anexo 60. Curva de retención calicata 10 perfil 5 - 10 cm. _____	108
Anexo 61. Curva de retención calicata 10 perfil 10 - 20 cm. _____	109
Anexo 62. Curva de retención calicata 10 perfil 20 - 30 cm. _____	109
Anexo 63. Curva de retención calicata 10 perfil 30 - 40 cm. _____	110
Anexo 64. Resultados de análisis de muestras de laboratorio _____	111

INTRODUCCIÓN

El suelo es el recurso natural más importante de la agricultura, los estudios del mismo sirven para evitar su deterioro, y ayuda a mejorar los procesos de explotación agropecuaria manteniendo y mejorando estándares de productividad. Sus propiedades físicas e hidrológicas tienen una relevante relación con la producción; la textura; densidad, porosidad y contenido de humedad, son las más influyentes en el crecimiento y desarrollo de cultivos, dado que permiten el suministro eficiente de agua y aireación de la rizosfera (Cueva, 2020).

El comportamiento físico - edáfico de estas propiedades que se encuentran estrechamente interrelacionadas en el sistema agua – suelo – planta, condicionan el comportamiento del movimiento del agua. Mantener las condiciones adecuadas de campo, y tener disponible los medios para poder monitorear el nivel de humedad del suelo, así como su nivel de compactación, se convierte en una necesidad para los productores; sin embargo, los métodos; equipos y análisis de laboratorios para poder determinar estas variables, pueden limitarlos por tener elevados costos, largos tiempos de esperas para su adquisición por no existir en el país y otras ocasiones la impericia en su calibración y manejo (Cenara et. al, 2005).

Es preciso discriminar las propiedades físicas del suelo que inciden en el desarrollo vegetativo, de aquellas que lo hacen en forma indirecta, pero en tiempo real. Relaciones básicas, tanto gravimétricas como volumétricas, así como la lámina de agua de riego, se convierten en la manera más sencilla y común de establecer los valores del contenido hídrico del suelo. Este trabajo evalúa la correlación que existe entre el contenido hídrico y la resistencia mecánica a la penetración por medio de ecuaciones matemáticas que ajustan estas dos variables y mide cuán asociadas están unas con otras para poder estimar valores confiables sin necesidad de emplear análisis de laboratorio costosos o demorados.

1.1 Objetivo general:

Determinar las relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración (RMP), diversos contenidos hídricos (θ) y ciertas propiedades por estratos de 5 y 10 centímetros, en el perfil de 40 centímetros en un suelo inceptisol con cultivo de banano.

1.2 Objetivos específicos:

- Establecer las relaciones entre la resistencia mecánica a la penetración (RMP) y el contenido de humedad volumétrica, gravimétrica y relativa saturada, determinando su ecuación lineal, logarítmica y polinómica para los diversos estratos en el perfil del suelo.
- Relacionar la RMP; los contenidos hídricos a capacidad de campo (C_c), punto de marchitez permanente (PMP) y los valores de las propiedades físicas del suelo que inciden en la retención de humedad del mismo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Propiedades físicas del suelo

La calidad del suelo está relacionada con la habilidad de este para sostener la productividad biológica, su funcionalidad ecosistémica, así como mantener un balance ambiental biofísico (Yáñez et. al, 2018). Las propiedades físicas confieren al suelo la calidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva. Las propiedades físicas del suelo, son más fáciles de medir, y están asociados a los cambios geoquímicos del ecosistema y se reconocen como buenos indicadores de la calidad del suelo (Gamero et. al, 2020).

Las propiedades físicas del suelo se miden comparándolas con escalas, ya sean de tamaño, consistencia, entre otros. Permitiendo conocer las particularidades de sus componentes relacionados con: textura del suelo, estructura, porosidad, permeabilidad.

2.1.1 Textura

La propiedad de textura comprende el peso en porcentaje de tres elementos minerales: arena, limo y arcilla. Estos elementos se determinan conforme al diámetro de las partículas medida en milímetros (Thompson & Troeh, 2021).

Tabla 1. *Intervalos de tamaño de componentes del suelo*

Elemento	Apartado del suelo	Tamaño (mm)
Arena	Arena muy gruesa	2.00 – 1.00
	Arena gruesa	1.00 – 0.50
	Arena media	0.50 – 0.25
	Arena fina	0.25 – 0.10
	Arena muy fina	0.05 – 0.002
Limo	Limo	0.05 – 0.002
Arcilla	Arcilla	Menor a 0.002

Fuente: Thompson y Troeh (2021).

De esta forma, según la proporción de estos elementos, los suelos se clasifican en:

Tabla 2. *Tipos de suelo según su contenido*

Tipo de suelo	Contenido
Arenoso	$\geq 70\%$ de arena
Arcilloso-arenoso	$> 45\%$ de arcilla y $< 45\%$ arena
Arcillo-limoso	$< 40\%$ de limo
Francos	45-50% de arena, 20-25% de limo y 15-20% arcilla + materia orgánica.

Fuente: Marinas (2022).

Conocer la clase textural del suelo permite determinar los efectos (ventajas o inconvenientes) sobre el:

2.1.1.1. Textura arenosa. Presenta un bajo contenido de nutrientes, un nivel alto de permeabilidad y una alta velocidad de infiltración.

2.1.1.2. Textura limosa. El almacenamiento de nutrientes es intermedio, la permeabilidad es media-alta; y, tienen una baja velocidad de infiltración.

2.1.1.3. Textura arcillosa. Se caracteriza por contenido medio de nutrientes, la permeabilidad es media-alta; y, tienen una baja velocidad de infiltración.

2.1.2. Estructura

La estructura del suelo es uno de los atributos para evaluar la calidad del suelo, y puede ser utilizada como indicador de la compactación del suelo, la formación de costras y la susceptibilidad del suelo a la erosión del suelo, ayudando al control de la pérdida de productividad y la degradación ambiental (Campos et. al, 2019).

Suelos con la misma textura pueden presentar características físicas diferentes como consecuencia del ordenamiento específico de sus partículas. La ordenación individual de las partículas lleva a formar unidades mayores que se denomina agregados o unidades estructurales.

De acuerdo con Thompson y Troeh (2021), los agregados son uniones naturales de los elementos primarios del suelo (arena, limo y arcilla). Estos pueden presentarse de diferentes maneras por su tamaño o grado de desarrollo, también se los puede clasificar en:

2.1.2.1. Sin estructura. Se subdivide en:

- a) *Grano suelto.* Sus partículas son independientes, se presentan en suelos muy arenosos.
- b) *Masiva.* Son masas compactas de partículas, característico de los suelos arcillosos.

2.1.2.2. Con estructura. Se subdivide en:

- a) *Granular.* Son agregados esferoidales.
- b) *Laminar.* Son agregados que presentan dimensiones horizontales.
- c) *Poliédrica.* Los agregados tienen dimensiones verticales y horizontales equivalentes.
- d) *Prismática.* Los agregados son más altos que anchos.

2.1.2.3. Con estructura destruida. Son suelos inundados o altamente húmedos, donde sus poros desaparecen.

2.1.3 Porosidad

La porosidad del suelo, el tamaño de los poros y la geometría controlan la transmisión y el almacenamiento de agua, y proporcionan aire y espacio para el crecimiento de las raíces.

Diferentes tamaños de poros, que cumplen varias funciones en la aireación, infiltración, drenaje y almacenamiento de agua, contribuyen a la porosidad total del suelo. Tanto la porosidad

del suelo como la distribución del tamaño de los poros afectan integralmente el movimiento del agua del suelo (Iglesias et. al, 2014).

Cuando aumenta la compactación, hay mayor densidad, menor porosidad y, en consecuencia, mayor resistencia del suelo a la penetración, lo que dificulta el crecimiento de las raíces, reduce la infiltración y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas, lo que reduce los rendimientos (Mattei et. al, 2021).

La porosidad del suelo es el volumen de aire y agua en una unidad de volumen del suelo, se expresa en porcentaje, teniendo como valor medio de 50% y hasta un 80% en suelos de alto contenido de materia orgánica. La fórmula para determinar la porosidad del suelo es:

$$P = \left(1 - \frac{da}{dr}\right) * 100 \quad (1)$$

Fuente: Ecuación para determinar porosidad (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

P = Porosidad del suelo (%).

da = Densidad aparente (gr cm^{-3}).

dr = Densidad real (gr cm^{-3}).

Los poros pueden ser grandes (macroporos) por lo que circula el aire y más pequeños (microporos) por los que circula y se retiene el agua. El tamaño y el porcentaje de poros de un suelo es muy importante para conocer aspectos como la circulación y filtración del agua, así como su percolación hacia capas más profundas (Marinas, 2022).

2.1.4 Permeabilidad

Este concepto físico mide o cuantifica la velocidad con la que el agua pasa por el medio utilizando una variable denominada coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica. La mayoría de los estudios de suelos incluyen cantidades físicas relacionadas con la permeabilidad en una condición completamente saturada, donde el paso del agua ocurre bajo una conexión efectiva, en la que todos los poros del material están llenos de agua (Ruge et. al, 2021).

La velocidad con la que el agua se desplaza en a través del suelo, depende fundamentalmente del volumen y características del espacio poroso del agua almacenada en el perfil (humedad previa) y de la altura de la lámina de agua que pueda existir sobre el terreno en el momento de realizar la medida (Rui-Wamba, 2020).

El agua se desplaza por los espacios porosos que quedan entre las partículas sólidas (orgánicas y minerales), un mayor tamaño de los poros conlleva a una mayor permeabilidad. Si, por el contrario, existe poros muy pequeños por mayor densidad de las partículas; o existe un sellamiento o encostramiento superficial, el agua queda retenida en la superficie de las partículas por atracción capilar, con lo que la velocidad de circulación decrece.

Lo mismo ocurre a medida que los macro y microporos está ocupado por agua. La acción de la gravedad y la presión hidrostática asociada al encharcamiento del terreno producen el efecto contrario: su aumento acelera el desplazamiento. La velocidad de circulación del agua a través del suelo se mide con la siguiente fórmula:

$$K = \frac{Q*L}{S*H} \quad (2)$$

Fuente: Ecuación para determinar conductividad hidráulica (Chaico, 2010).

Donde:

K = Conductividad hidráulica ($m\ s^{-1}$).

Q = Caudal ($m^3\ s^{-1}$).

L = Distancia que recorre el agua (m).

S = Superficie de sección transversal de flujo

H = Altura.

2.1.5 Infiltración del agua en el suelo

La infiltración es considerada como el proceso por el cual, el agua que llega a la superficie del suelo penetra en él, tanto por efecto de la gravedad (macroposidad), como de la capilaridad (microposidad), mientras que la tasa de infiltración es una medida de la velocidad con la cual el agua penetra en el suelo. Una de las ecuaciones matemáticas más ampliamente usada para describir la infiltración es:

$$I = K T^{-n} \quad (3)$$

Fuente: Ecuación para determinar la infiltración del agua en el suelo (Jaramillo, 2002).

Donde:

I = Infiltración instantánea

T = Tiempo que se aplica o permanece el agua en el suelo

K y n = Constantes

2.2 Características estructurales de los suelos Inceptisoles

Son suelos incipientes o jóvenes, aquellos que están comenzando a visualizar el desarrollo de los horizontes. Son suelos con uno o más horizontes de diagnóstico cuya génesis es de rápida formación, con procesos de translocación de materiales o meteorización extrema como la formación aluvial por el desbordamiento de los ríos (FAO, 2009).

También incluyen suelos cuyos horizontes de diagnóstico, aun estando algo desarrollados, carecen de rasgos definidos y pertenecientes a otros órdenes del suelo. En este orden se encuentran suelos con propiedades físicas y químicas muy variables, por ejemplo: suelos desde mal drenados a bien drenados, texturas de arenosas a arcillosas, pH de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, con saturación de bases mayor o menor a 60%, etc.; propiedades que han sido muy bien aprovechadas en nuestro sector agrícola en cultivos claves en la economía del país, como cacao, maíz duro, palma africana y banano (SIGTIERRAS, 2017).

En el Ecuador y en particular en la provincia de El Oro, estos suelos tienen una gran distribución geográfica, que representa un 35% del área cartografiada; cubriendo un sin número de paisajísticas y bajo diferentes tipos de cobertura que van desde vastos sectores con cubiertas de pastizales hasta los cultivos de gran representación económica como banano, cacao entre otros.

2.3 Formas de agua en el suelo

El agua en el suelo se halla alojada en los macro y micros poros y absorbida en las partículas de suelo. Para un determinado momento, la cantidad de agua contenida por un suelo podrá definirse según las siguientes condiciones. El agua se presenta de formas diferentes cuando interactúa con el suelo, esta puede ser agua gravitacional, agua capilar y agua higroscópica (Becker, 2018; Lowenfels & Lewis, 2021).

2.3.1 Agua gravitacional

Esta se mueve libremente por la acción de la gravedad, se drena en el suelo, siendo los poros más grandes los que promueven el flujo gravitacional; donde a medida que se llenan dichos poros, la gravedad desplaza y empuja el aire permitiendo que el agua fluya y entre un nuevo suministro de aire (Lowenfels & Lewis, 2021).

2.3.2 Agua capilar

Es el agua retenida en los poros o capilares del agua. Los espacios más pequeños de los poros del suelo contienen una película de agua capilar que no está influenciada por la gravedad. El líquido se une por la atracción de las moléculas entre sí mediante la fuerza de cohesión; y, se une a la superficie del suelo mediante la fuerza de adhesión. Esta forma de agua es el principal suministro de agua para las plantas, ya que esta puede fluir hacia arriba (Lowenfels & Lewis, 2021).

2.3.3 Agua higroscópica

Es la retenida en el suelo luego de ser removida el agua gravitacional y el agua capilar. El agua higroscópica es una película muy fina, de tan solo unas pocas moléculas de grosor que se adhiere a las partículas del suelo en virtud de sus propiedades eléctricas. Esta película es tan delgada que los enlaces entre las moléculas de agua y las partículas de suelo están concentrados y son extremadamente difíciles de romper. En consecuencia, las raíces no pueden absorberla, pero esta película de agua resulta crítica para la microbiota de la rizosfera, para que pueda vivir y moverse (Lowenfels & Lewis, 2021).

2.4 Estados de humedad en el suelo

2.4.1 Saturación

Contenido de agua de un suelo en el que todos sus poros están llenos de agua, como se ilustra en la figura 1. Esta situación puede observarse inmediatamente después de una lluvia o riego abundante. En suelos con adecuado drenaje, la saturación es una situación temporal, debido que el exceso de agua se drena por los poros por acción de la gravedad para ser desplazado por aire (Shaxson & Barber, 2005).

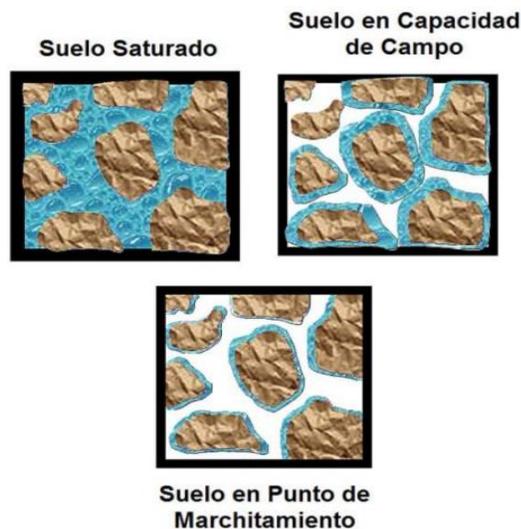


Figura 1. Niveles de humedad en el suelo

Fuente: Mendoza (2013).

2.4.2 Capacidad de campo

La capacidad de retención de agua en el suelo es un parámetro de base física utilizado por técnicos agropecuarios, forestales e investigadores, como uno de los factores estimadores de la disponibilidad de agua para las plantas (Izquierdo & Arévalo, 2021). La bondad de estos

parámetros se contrasta mediante el análisis de correlaciones, con resultados satisfactorios (Chicas et. al, 2014).

Según Fernández y Togores (2019), la capacidad de campo se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje, este fenómeno ocurre por la trasmisión del agua a través de los poros mayores de 0,05 mm de diámetro; sin embargo, la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0,03 y 1 mm de diámetro (Shaxson & Barber, 2005).

2.4.3 Punto de marchitez permanente

Corresponde al límite inferior de la humedad aprovechable por las plantas, cuando no son capaces de seguir obteniendo humedad suficiente para hacer frente a sus necesidades hídricas, llegadas a este punto se marchitan permanentemente. Por tanto, el punto de marchitez es el contenido de humedad del suelo a partir del cual las plantas no pueden extraer más agua y se marchitan, aquí la aireación es máxima (Fernández & Togores, 2019).

Las estimaciones de campo del punto de marchitamiento se realizan mediante el cálculo del contenido de humedad del terreno en el cual las plantas se han marchitado permanentemente. Este método está sujeto a más errores y requiere una gran experiencia, mayor que el de determinación de la capacidad de campo sobre el terreno (Israelsen & Hansen, 2021).

2.4.4 Agua útil

Es la diferencia entre los contenidos de agua a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente conforme se aprecia en la figura 2. Es la que se considera como agua utilizable o potencialmente extractable por las plantas en la zona de crecimiento radicular. Esta es la fracción del agua del suelo que puede perderse por evaporación o variar por el consumo de las plantas.



Figura 2. Agua útil y no útil para las plantas

Fuente: Mendoza (2013).

La capacidad de retención de agua disponible para las plantas, es la cantidad de agua retenida por el suelo o que puede almacenar un determinado volumen (espesor) del suelo en un estado energético que haga disponible para las plantas (López et. al, 2019; Mora, 2019). Se determina mediante la siguiente expresión:

$$A\mu = Cc - PMP \quad (4)$$

Fuente: Ecuación para determinar el agua útil (Jaramillo, 2002).

Donde:

Cc = Capacidad de campo (%).

PMP = Punto de marchitez permanente (%).

2.4.5 Agua aprovechable

El agua aprovechable se define como el agua que queda entre los límites de la capacidad de campo y el punto de marchitez (Garita, 2022). El agua aprovechable es una de las variables más significativas del suelo, ya que presenta una relación directa con la productividad de los

sistemas agrícolas y forestales, esta es inherente al tipo de suelo y se modifica por las prácticas agrícolas, por lo que su valor es sitio-específico (Salcedo et. al, 2007). Se expresa de la siguiente forma:

$$Aa = (D * (Cc - PMP))/100 \quad (5)$$

Fuente: Ecuación para determinar el agua aprovechable (Jaramillo, 2022).

Donde:

Aa = Agua aprovechable

CC = Capacidad de campo.

Pm = Punto de marchitez.

D = Nivel de agotamiento, tanto por uno.

2.5 Medición de la humedad del suelo

Se define la humedad como la cantidad de agua con relación al peso o volumen de la parte seca del total de una muestra (Zapata, 2020). Entre los métodos directos se encuentra el método gravimétrico, utilizado como método estándar. Una de las desventajas de este método es que, además de requerir 24 horas para obtener los resultados, es un método destructivo, por lo que no se puede utilizar para tomar medidas de humedad del suelo en el mismo sitio.

Entre los métodos para determinar indirectamente la humedad del suelo se pueden citar las pruebas radiométricas (Sonda de Neutrones), Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) (Calva et. al 2020).

2.5.1 Método gravimétrico

La gravimetría es una medida directa de la humedad del suelo y se considera el método estándar, en el que se llevan muestras de suelo al laboratorio para medir su masa húmeda y seca. Por lo tanto, es una técnica laboriosa que no permite muestrear y medir en el mismo lugar (Barros et. al, 2019).

El método gravimétrico permite tanto el estudio de cavidades en el terreno (microgravimetría), como de la estructura entera de una cuenca sedimentaria o del sustrato del vaso de una presa. El equipo de medición (gravímetro) mide las diferencias de atracción gravitatoria de una masa conocida que se encuentra en su interior. Por lo tanto, lo que mide el gravímetro es la aceleración de gravedad sobre un terreno, y permite detectar las variaciones de densidades de materiales bajo la superficie midiendo la gravedad e interpretación de los valores registrados (Macarena, 2019).

2.5.2 Método de resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica es un método que ha sido utilizado por muchos años para determinar el contenido de humedad en el suelo. Uno de los dispositivos que utiliza la resistencia eléctrica para medir la humedad del suelo son los bloques de yeso. El principio físico de estos dispositivos es que el contenido de humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo. Entre más agua haya en la tierra, más baja es la resistencia (Martin & Muñoz, 2017).

Los bloques de yeso proporcionan un método práctico y económico de estimación del potencial hídrico del suelo. El sensor lo componen dos bloques de yeso que envuelven dos electrodos concéntricos, que hacen circular corriente por el interior del bloque. Su empleo se basa en el hecho de que la conductividad eléctrica varía en función del contenido de agua. La

conductividad de los bloques aumenta a medida que la cantidad de agua del suelo absorbida por los bloques aumenta.

El yeso presente entre los electrodos y el suelo crea un tapón contra las sales que pueden afectar la conductividad eléctrica y por tanto a la calibración del bloque. Son necesarias las recalibraciones para obtener medidas precisas del potencial hídrico. Estas calibraciones pueden ser por gravimetría o poniendo bloque en un aparato de membrana de presión. Los bloques de yeso al igual que los tensiómetros proporcionan medidas directas de potencial hídrico a través de la resistencia eléctrica, que es función de la concentración de sales en el bloque, variando con el contenido de agua en el suelo (Ruiz & Molina, 2010).

2.5.3 Métodos dieléctricos

Los métodos indirectos más difundidos se basan en la constante dieléctrica del suelo, la moderación de neutrones, la resistividad eléctrica y la conductividad térmica. Entre los métodos indirectos métodos basados en la constante dieléctrica del suelo, las principales técnicas son la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) (Barros et. al, 2019). Estos métodos se basan en la relación que existe entre la humedad del suelo y su constante dieléctrica (magnitud física que cuantifica la capacidad de un material para acumular carga eléctrica, por tanto, para conducir la electricidad, comparada con la del vacío).

2.5.3.1 Reflectometría en dominio de frecuencias (sonda FDR). El FDR tiene un funcionamiento similar al TDR, con la diferencia que mide la frecuencia de propagación de las ondas electromagnéticas. El dispositivo de medición está conformado por varias sondas FDR conectadas por cable a un dispositivo de almacenamiento. Cada sonda tiene sensores ubicados a

diferentes profundidades dentro de un tubo PVC. Este tipo de sonda ayuda a tomar decisiones de cuándo regar y cuánta agua aplicar (Zapata, 2020).

2.5.3.2. Reflectometría en dominio temporal (sonda TDR). Este método calcula la velocidad de propagación de una onda electromagnética de alta frecuencia, midiendo el tiempo de recorrido de dicha onda con ayuda de una sonda compuesta de dos varillas de acero inoxidable. El tiempo de recorrido es proporcional a la constante dieléctrica del suelo y únicamente varía con el contenido de agua del mismo (Zapata, 2020).

2.5.4 Método del Tensiómetro

Consisten en un tubo impermeable al agua que en el extremo inferior dispone de una cápsula cerámica permeable, y en la superior de un receptáculo para añadir el agua y de un indicador de vacío (vacuómetro) en el que se realizan las medidas de la presión. Esto indica el esfuerzo que han de realizar las raíces para extraer del suelo la humedad que necesitan las plantas.

La tierra a medida que se va secando extrae líquido del tensiómetro produciendo un vacío parcial en el mismo que queda reflejado en la escala del manómetro o vacuómetro. Cuanto más seca esté la tierra más alto será el valor registrado en el vacuómetro de medida. Al humedecerse la tierra, por el siguiente riego o la lluvia, el tensiómetro vuelve a absorber humedad del suelo reduciéndose la tensión.

Los tensiómetros son bastante precisos si se instalan correctamente. Tienen un coste bajo, no se ven afectados por la salinidad y no necesitan ser calibrados para cada tipo de suelo, aunque tienen un mantenimiento elevado, ya que hay que ir rellenándolos y evitar las burbujas de aire. Las mediciones es necesario hacerlas individualmente anotando el dato, día a día para poder seguir la evolución de la humedad en el suelo. Existen diferentes longitudes de tensiómetros, existiendo

de 18 pulgadas para el superficial y 24 pulgadas para el profundo. El límite de medida de estos sensores es de 85 KPa (López & Peña, 2019).

2.5.5 Teledetección

En la teledetección, la energía del espectro electromagnético, emitida o reflejada por los objetos observados, es medida a distancia por los sensores instalados a bordo de satélites. Esta información posteriormente se analiza con herramientas específicas. Hay dos grandes familias de sensores: activos y pasivos.

Los sensores activos producen su propia fuente de energía para proyectarla al objetivo. Dicho de otro modo, emiten un haz de ondas electromagnéticas dirigido hacia el objetivo y después miden la respuesta de este objetivo. Se basan en la técnica del radio detection and ranging (RADAR) o también en el light detection and ranging (LIDAR).

Por otra parte, los sensores pasivos utilizan los rayos naturales del sol como fuente de energía. Una vez que la energía es difundida por el objetivo, los sensores pasivos miden la energía reflejada. Cada objeto de la superficie terrestre tiene la capacidad de reflejar una cantidad de energía en función de su naturaleza y características intrínsecas: se trata de la firma espectral (Aran et. al, 2020).

El tratamiento y análisis de las informaciones obtenidas por los sensores de los satélites en las diferentes longitudes de onda, permiten acceder a numerosas propiedades de los objetos: forma, estructura, temperatura, composición química, etc. La selección de las imágenes de los satélites depende esencialmente de las aplicaciones que se busquen.

2.6 Compactación del suelo

Se considera suelos compactados cuando su macroporosidad es tan incipiente que restringe la aireación. El diámetro de sus poros es tan fino que impide la penetración de las raíces, la

infiltración y el drenaje. Lo cual reduce la conductividad de aire y de agua, causando efectos fisiológicos adversos en los cultivos, generando mermas considerables en la productividad (Jaramillo, 2022).

2.6.1 Causas de un enraizamiento limitado

La causa más común de un enraizamiento pobre son las restricciones físicas debido a la compactación del suelo que da lugar al colapso o disminución de los espacios de poros y a un aumento localizado de la densidad del suelo. Una vez que los poros han sido compactados a diámetros menores de 0,2 - 0,3 mm la libre penetración de las raíces a través del suelo es más difícil. Si bien la fortaleza de las capas compactadas disminuye con el aumento del agua del suelo, un alto contenido de agua del suelo puede limitar el abastecimiento de oxígeno a las raíces causando un crecimiento restringido.

La compactación a menudo reduce el tamaño de los poros en tal medida que inhibe la penetración de las raíces, sin embargo, no afecta sensiblemente el drenaje de agua del suelo. Los poros de 0,2 - 0,3 mm de diámetro pueden restringir el crecimiento de las raíces, pero el agua puede drenar por efecto de la gravedad a través de poros de solo 0,01 mm de diámetro. (Shaxson & Barber, 2005).

2.6.2 Indicadores del enraizamiento restringido

El indicador más claro de un enraizamiento restringido de las plantas es la distribución de las raíces del mismo. Cuando las raíces están físicamente restringidas por una capa densa que contiene pocos poros adecuados para su penetración a menudo desarrollan formas de crecimiento características por encima de la capa dura (Shaxson & Barber, 2005).

Las raíces se concentran sobre cualquier capa que dificulta su penetración. Como sucede frecuentemente con aquellas compactas que resultan del laboreo defectuoso. Una reducción del 10% de los espacios porosos del suelo impide normalmente el crecimiento de las raíces, lo que suele ser ocasionado por el empleo de vehículos con ruedas de goma, discos y maquinaria de laboreo sometida a vibraciones. Raíces que encuentran dificultades para su crecimiento disponen de menos suelo del que extraer la humedad y los principios nutritivos necesarios, por lo que muestran síntomas de baja fertilidad y de sequía, así como deformaciones radiculares.

Si la capa que produce las dificultades de crecimiento es a la vez causa de una capa freática temporalmente alta, se produce un problema de aireación en el suelo saturado, de lo que se deduce que la capa restrictiva es muy perjudicial. Cuando se dan las anteriores circunstancias es preciso regar con abundante dotación en el período de parada vegetativa, con el fin de almacenar agua en las capas profundas del suelo, y dar riegos más frecuentes y menos intensos durante el período de crecimiento (Israelsen & Hansen, 2021).

2.8 Relaciones matemáticas de la resistencia a la compactación y los contenidos de humedad y las propiedades físicas del suelo

Existen limitadas investigaciones realizadas que describen las relaciones matemáticas entre la resistencia a la penetración y los contenidos de humedad del suelo. Sin embargo, las investigaciones de Orellana y Pilatti (1990); Wilson et al. (2000) reportan que la función en la que obtuvieron un mayor ajuste fue una ecuación exponencial negativa, tomando lecturas de RMP a 6 MPa en suelos de características argídolo ácuico y vérticas respectivamente; y usando el contenido de humedad en estado de saturación.

Mientras que Cenara et al. (2005) realizaron su estudio en un suelo de orden vertisol, y evaluó diferentes ecuaciones de ajuste, obteniendo un mejor coeficiente de determinación bajo el

modelo de una ecuación potencial, usando el contenido de humedad relativo, esto es la diferencia entre el contenido de humedad volumétrico dividido para el contenido de humedad en saturación.

A su vez Castiglioni y Bianco (2021) en su ensayo en un suelo argiudol vértico concluyó que para los primeros 5 cm de suelo, el modelo que más se ajusta es uno de tipo lineal, mientras que, para el resto del perfil hasta los 20 cm de profundidad la eficiencia de predicción se ajusta más en el modelo potencial, esto usando el contenido de humedad gravimétrica.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

El presente estudio se realizó en los predios de la granja experimental “Santa Inés” de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala, situada en la provincia de El Oro, cantón Machala, en el Km. 5 1/2 vía Machala Pasaje.

3.2 Ubicación geográfica y caracterización de la zona de estudio

Latitud: 3°17'37.98" S

Longitud: 79°54'48.43" W

Altitud: 6 msnm.

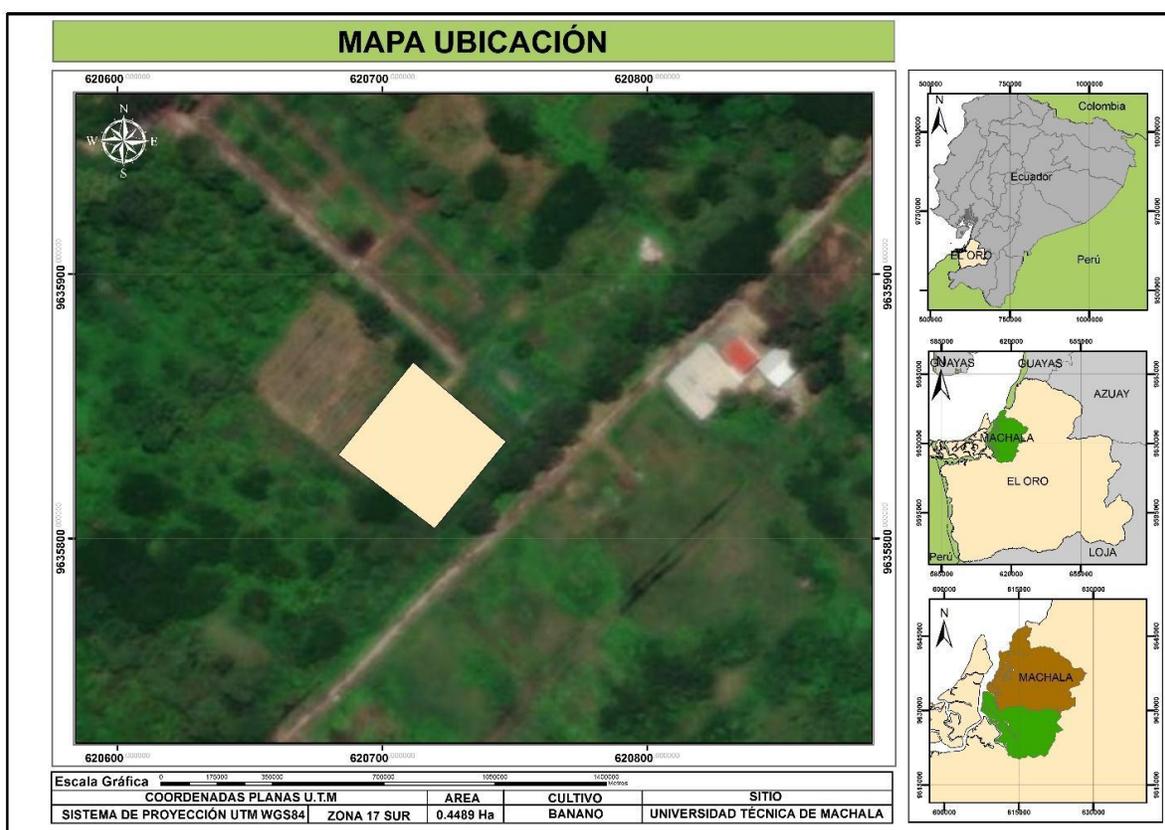


Figura 3. Ubicación geográfica del predio de estudio

El área de estudio cuenta con un clima clasificado como tropical megatérmico seco a semihúmedo, con estaciones marcadas, llegando a superar los 24°C de temperatura en la época seca. El promedio de precipitación anual está en un rango de 500 a 1000 mm (Villaseñor et. al, 2015).

3.3 Características del suelo

La clase textural de suelo que se encuentra en el área de estudio es arcilloso, franco limoso y franco arcillo limoso tal como se aprecia en la tabla 3, es de orden inceptisol y su principal uso ha sido la producción agrícola bananera y cacaotera (Villaseñor et. al, 2015).

Tabla 3. *Clases texturales del suelo de la zona de estudio*

Perfil (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase Textural
00 a 05	44.88	33.00	22.13	Arcilloso
05 a 10	44.88	32.25	22.88	Arcilloso
10 a 20	42.88	36.25	20.88	Arcilloso
20 a 30	38.63	42.75	18.63	Franco arcillo limoso
30 a 40	21.88	56.25	21.88	Franco limoso

3.4 Diseño de estudio

El diseño es no experimental, si no observacional descriptivo midiendo un grupo de variables de propiedades físicas (Manterola & Otzen, 2014). El área de investigación se dividió en enmallado en que se efectuaron 10 calicatas como puntos de muestreo que distaban 20 metros entre sí. Se tomaron muestras en el perfil de suelo de 0 a 40 cm de profundidad en estratos de 5 cm en los 2 primeros y de 10 cm los últimos, por lo que da un total de muestras de 50. Cabe destacar que únicamente para la variable de resistencia mecánica a la penetración se realizó la observación del perfil de 40 cm, dando lecturas cada de 2.50 cm.

3.5 Croquis del experimento

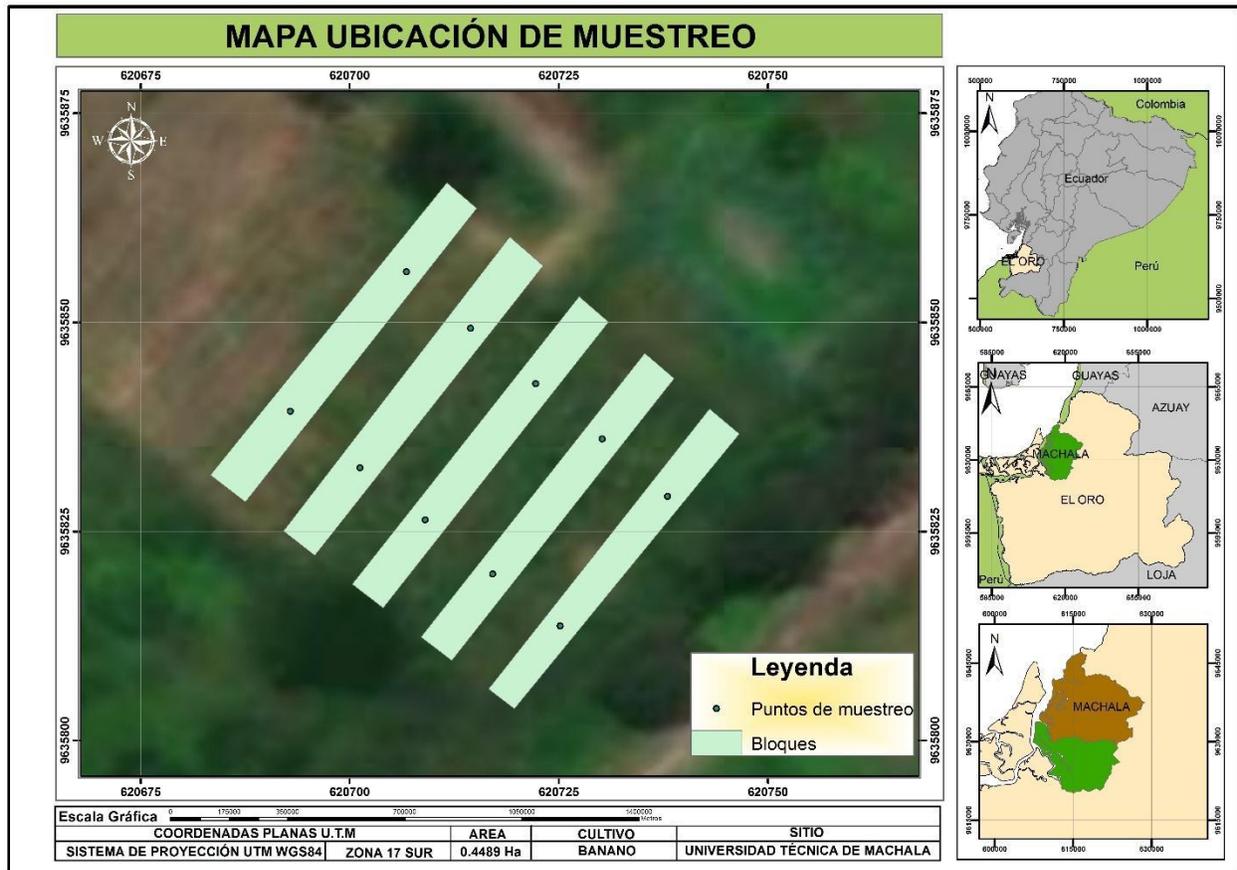


Figura 4. Croquis del experimento

3.6 Materiales y herramientas

3.6.1 Materiales y equipos de campo

- Cilindros de acero
- Plástico embalaje
- GPS
- Sonda TDR 350 Field Scout
- Penetrómetro digital Field Scout 900

3.6.2 *Materiales de laboratorio*

- Estufa
- Balones aforados de 50 ml
- Probetas de 1000 ml
- Hidrómetro
- Termómetro
- Tamiz de 2 mm

3.6.3 *Materiales de oficina*

- ArcGis 10.8
- Statgraphics
- IBM Statistics
- Exel

3.7 **Variables de estudio**

Los análisis de las muestras se realizaron en los laboratorios de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala y de la Universidad Estatal de Cuenca, mientras que otras variables se midieron in situ por medio de los equipos agrícolas, en la tabla 4 se detalla los métodos utilizados para cada variable.

Tabla 4. *Métodos de medición de las variables del estudio*

Variable	Método a utilizar	Unidad
Clase textural	Bouyoucos	Porcentaje (%)
Densidad real	Picnómetro	g cm^{-3}
Densidad aparente	Método del cilindro	g cm^{-3}

Tabla 4. Continuación

Variable	Método a utilizar	Unidad
Porosidad total	Relación de densidades	Porcentaje (%)
Saturación	Método del cilindro	cm ³ cm ⁻³
Capacidad de Campo	Membranas de Richard de 1 bar de resistencia, ollas de presión.	cm ³ cm ⁻³
Punto de marchitez	Membranas de Richard de 15 bares de resistencia, ollas de presión.	cm ³ cm ⁻³
Contenido gravimétrico de agua en el suelo	Peso de suelo seco	Porcentaje (%)
Contenido volumétrico de agua en el suelo	Peso de suelo seco y da.	Porcentaje (%)
Resistencia mecánica a la penetración	Penetrómetro digital Field Scout 900	KPa
Conductividad eléctrica	Sonda TDR 350 Field Scout	ms cm ⁻³
Temperatura	Sonda TDR 350 Field Scout	Grados Celsius (°C)

3.7.1 Textura y clase textural

- Se colocó 40 gramos de suelo (TFSA) en un vaso de vidrio de 400 a 600 ml, agregando agua hasta la mitad del mismo.
- Se vació 25 ml de oxalato de sodio saturado, con una varilla de vidrio se agitó y posteriormente se dejó reposar la mezcla durante 24 horas.
- Se vertió la mezcla en el vaso agitador y se procesó durante 3 minutos.
- Se colocó la mezcla en la probeta, removiendo todas las partículas utilizando una piceta y dejando el vaso agitador lo más limpio de suelo posible, como se observa en la figura 5.
- Se agregó agua a la probeta hasta la línea de aforo (1000 ml).

- Se agitó el cilindro, hasta lograr la remoción de todo el suelo sedimentado en el fondo.
- Se colocó la probeta sobre una superficie plana para introducir lentamente el hidrómetro en la suspensión.
- Se tomó la primera lectura del hidrómetro a los 40 segundos de iniciada la sedimentación, luego se midió con el termómetro la temperatura de la mezcla en suspensión.
- Después de esperar 2 horas se tomó y una segunda lectura de la densidad marcada por el hidrómetro, al igual que con la temperatura.
- Determinar el contenido de limo + arcilla, en %, según:

$$(\text{limo} + \text{arcilla}) \% = \frac{[La_{40s} - ((20 - t_{a40s}) \times 0,35)] - [Lb_{40s} - ((20 - tb_{40s}) \times 0,35)]}{m} \times 100 \quad (6)$$

Fuente: Ecuación para determinar el porcentaje de limo + arcilla (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

La_{40s} = lectura en $g L^{-1}$ de muestra a los 40 s.

Lb_{40s} = lectura en $g L^{-1}$ del blanco a los 40 s.

ta_{40s} = temperatura en $^{\circ}C$ de la muestra a los 40 s.

tb_{40s} = temperatura en $^{\circ}C$ del blanco a los 40 s.

0,35 = factor de corrección por temperatura.

m = masa en gramos de muestra.

- Se calculó el contenido de arcilla, en porcentaje según la siguiente expresión:

$$(\text{arcilla})\% = \frac{[La_{2h} - ((20 - t_{a2h}) \times 0,35)] - [Lb_{2h} - ((20 - tb_{2h}) \times 0,35)]}{m} \times 100 \quad (7)$$

Fuente: Ecuación para determinar el porcentaje de arcilla (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

La_{2h} = lectura en $g L^{-1}$ de muestra a las 2 horas.

Lb_{2h} = lectura en $g L^{-1}$ del blanco a las 2 horas.

ta_{2h} = temperatura en $^{\circ}C$ de la muestra a las 2 horas.

tb_{2h} = temperatura en $^{\circ}C$ del blanco a las 2 horas.

0,35 = factor de corrección por temperatura.

m = masa en gramos de muestra.

➤ Se calculó el contenido de limo en porcentaje según la siguiente fórmula:

$$\text{Limo (\%)} = (\text{limo} + \text{arcilla}) - (\text{arcilla}) \quad (8)$$

Fuente: Ecuación para determinar el porcentaje de limo (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

(Limo + Arcilla) = (limo + arcilla) % calculado.

(Arcilla) = arcilla % calculado.

➤ Se calculó el contenido de arena, en %, según la fórmula:

$$\text{Arena (\%)} = 100 - (\text{limo} + \text{arcilla}) \quad (9)$$

Fuente: Ecuación para determinar el porcentaje de arena (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

(Limo + Arcilla) = (limo + arcilla) % calculado.



Figura 5. *Determinación de clase textural en laboratorio*

3.7.2 *Densidad real*

- Se tomaron las muestras de campo, realizando una calicata y tomando 1 kilogramo de muestra por cada perfil, depositándolo en una funda negra para posteriormente disgregar la muestra en terrones pequeños, secar las muestras y tamizar (2 mm).
- Se pesó el balón de 50 ml de aforo estando seco y vacío.
- Se aforó con la piseta de agua el balón y una vez pesado, desechar el agua.
- Se colocó 5 gramos de muestra de suelo tamizado y nuevamente aforar con agua y pesarlo como se observa en la figura 6.
- Se Determinó la densidad real con la siguiente ecuación:

$$dr = \frac{b-a}{(d-a) - (c-b)} \quad (10)$$

Fuente: Ecuación para determinar densidad real (Sandoval et. al, 2011).

Dónde:

a = Peso del balón vacío.

b = Peso del balón + muestra de suelo.

c = Peso del balón + suelo + agua aforado

d = Peso del balón aforado con agua.



Figura 6. *Determinación de densidad real en laboratorio*

3.7.3 Densidad aparente



Figura 7. *Pesado de muestras no alteradas por método del cilindro*

- Se extrajo las muestras de campo, realizando una calicata y tomando un volumen fijo de suelo mediante un cilindro metálico, procurando no compactar su contenido.
- En el laboratorio se realizó el pesaje de la muestra húmeda con el cilindro y se llevó a una estufa a 105°C por 24 horas.
- Peso de la muestra en seco como se observa en la figura 7, además del peso del cilindro.
- Para determinar densidad aparente, se utilizó la siguiente fórmula:

$$da = \frac{m}{v} \quad (11)$$

Fuente: Ecuación para determinar densidad aparente (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

m = es la masa (g).

v = es el volumen del cilindro (cm⁻³)

3.7.4 Porosidad total

- Se calculó esta variable mediante la siguiente expresión:

$$Porosidad (P \%) = \left(1 - \frac{da}{dr}\right) * 100 \quad (12)$$

Fuente: Ecuación para determinar porosidad total (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

da = Densidad aparente (g cm⁻³).

dr = Densidad real (g cm⁻³).

3.7.4 Capacidad de campo

- Se tomo las muestras de campo, realizando una calicata y tomando un volumen fijo de suelo mediante un cilindro metálico, procurando no compactar su contenido.
- Se trasladó las muestras sin alterar, envueltas en plástico hasta el laboratorio de física de suelos de la Universidad de Cuenca, donde se realizaron los análisis bajo el método de Membranas de Richard de 1 bar de resistencia y ollas de presión.

3.7.5 Punto de marchitez

- Se tomo las muestras de campo, realizando una calicata y tomando un volumen fijo de suelo mediante un cilindro metálico, procurando no compactar su contenido.
- Se trasladó las muestras sin alterar, envueltas en plástico hasta el laboratorio de física de suelos de la Universidad de Cuenca, donde se realizaron los análisis bajo el método de membranas de Richard de 15 bares de resistencia y ollas de presión.

3.7.6 Saturación

- Se tomo las muestras de campo, realizando una calicata y tomando un volumen fijo de suelo mediante un cilindro metálico, procurando no compactar su contenido.
- Se trasladó las muestras sin alterar, envueltas en plástico hasta el laboratorio de física de suelos de la Universidad de Cuenca, donde se realizaron los análisis bajo el método de membranas de Richard.

3.7.8 Contenido gravimétrico de agua en el suelo

- Se extrajo muestras sin alterar de volumen de suelo para cada perfil, mediante el método del cilindro.

- Se pesó la muestra húmeda con cilindro.
- Se dejó secar las muestras en la estufa a 105°C durante 24 horas.
- Se pesó la muestra de suelo seco.
- Se calculó esta variable mediante la siguiente expresión:

$$\theta g(\%) = \left(\frac{P. \text{ húmedo} - P. \text{ seco}}{P. \text{ seco}} \right) * 100 \quad (13)$$

Fuente: Ecuación para determinar contenido gravimétrico de agua en el suelo

(Sandoval et. al, 2011).

Donde:

P. húmedo = Peso del suelo húmedo (g).

P. seco = Peso del suelo seco (g).

3.7.9 Contenido volumétrico de agua en el suelo

- Se calculó esta variable de dos maneras, mediante el análisis de muestras en laboratorio, con la siguiente expresión:

$$\theta v (\%) = \theta g * da \quad (14)$$

Fuente: Ecuación para determinar contenido volumétrico de agua en el suelo (Sandoval et. al, 2011).

Donde:

θg = Contenido gravimétrico de agua en el suelo (%).

da = Densidad aparente (g cm⁻³).

- La segunda manera de medición fue mediante la toma de lecturas en campo con la Sonda TDR 350 tal como se aprecia en la figura 8:



Figura 8. *Lectura de contenido de humedad con sonda TDR 350 Field Scout*

3.7.10 Resistencia mecánica a la penetración (RMP)



Figura 9. *Medición de la resistencia mecánica a la penetración*

- Se realizó la toma del dato in situ con ayuda de la herramienta penetrómetro digital Field Scout 900.

- Se buscó una zona regular, donde se colocó la plancha de aluminio del penetrómetro, la cual refracta el haz de luz emitido del sensor data logger, registrando la altura entre ambos a medida que se introduce el equipo.
- Se introdujo la varilla metálica con punta cónica del equipo a una velocidad constante de 7.5 centímetros por minuto, tal como se observa en la figura 9.
- Se anotaron los datos de la lectura de las profundidades de cada perfil.

3.7.11 Conductividad eléctrica

- Se obtuvieron las lecturas de cada perfil mediante el empleo de la sonda TDR 350 Field Scout.

3.7.12 Temperatura

- Se obtuvieron las lecturas de cada perfil mediante el empleo de la sonda TDR 350 Field Scout.

3.8 Análisis estadístico

Cada variable de estudio fue sometida al software IBM SPSS STATISTICS 25, se realizó un análisis descriptivo y prueba de normalidad a fin de determinar si los datos seguían una distribución normal. Así también, se efectuó un análisis de correlación de Pearson que permitió reconocer cuan asociadas están las variables entre sí.

3.9 Coeficiente de determinación (R^2)

Es el valor del coeficiente de correlación de Pearson elevado al cuadrado, ofrece la proporción de la varianza de una variable dependiente (Y) que es explicada por una variable

independiente (X), cuyo valor es el argumento para poder interpretar si el modelo tiene un ajuste perfecto al ser próximo a 1, caso contrario cuando más se aleja de este valor, su facultad predictiva decrece (Martínez, 2005).

3.10 Relaciones matemáticas

Los modelos de las ecuaciones matemáticas utilizados para las relaciones que se efectuaron son las siguientes:

Ecuación lineal: $y = a + bx$

Ecuación Logarítmica: $y = b \ln(x) + a$

Ecuación polinómica: $y = ax^2 + bx + c$

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Análisis exploratorio de las propiedades físicas del suelo

Previo a realizar la prueba de normalidad, se efectuó un análisis exploratorio de datos, a razón de identificar y eliminar los valores atípicos. En cada estrato, se analizó cada variable y se determinó la normalidad por medio del método Shapiro-Wilk como se observa en la tabla 5, puesto que el número de muestras son 50 y el valor de la significancia (sig) fueron mayores a 0,05 se comprueba la homogeneidad de los datos según como lo señala (Corre et. al, 2014).

Tabla 5. Prueba de normalidad para cada profundidad

Variables	Profundidad (cm)	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Arcilla (%)	00-05	0.814	10	0.021
	05-10	0.887	10	0.157
	10-20	0.915	10	0.318
	20-30	0.816	6	0.081
	30-40	0.972	6	0.902
Limo (%)	00-05	0.811	4	0.123
	05-10	0.840	5	0.166
	10-20	0.806	7	0.057
	20-30	0.879	10	0.127
	30-40	0.926	7	0.055
Arena (%)	00-05	0.763	4	0.051
	05-10	0.879	10	0.128
	10-20	0.911	10	0.290
	20-30	0.848	10	0.055
	30-40	0.861	7	0.098
Densidad aparente (g cm ⁻³)	00-05	0.953	10	0.706
	05-10	0.953	10	0.701
	10-20	0.878	10	0.125
	20-30	0.974	10	0.926
	30-40	0.876	10	0.117
Densidad real (g cm ⁻³)	00-05	0.866	10	0.090
	05-10	0.880	10	0.130
	10-20	0.940	10	0.552
	20-30	0.910	10	0.280
	30-40	0.874	10	0.110

Tabla 5. Continuación

Variables	Profundidad (cm)	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Porosidad (%)	00-05	0.947	10	0.636
	05-10	0.886	10	0.155
	10-20	0.864	10	0.086
	20-30	0.961	10	0.792
	30-40	0.954	10	0.721
Saturación (cm ³ cm ⁻³)	00-05	0.939	10	0.547
	05-10	0.952	10	0.688
	10-20	0.962	10	0.813
	20-30	0.951	6	0.747
	30-40	0.914	10	0.307
Capacidad de campo (cm ³ cm ⁻³)	00-05	0.905	10	0.246
	05-10	0.990	10	0.996
	10-20	0.963	10	0.819
	20-30	0.904	10	0.240
	30-40	0.851	10	0.059
Punto de marchitez permanente (cm ³ cm ⁻³)	00-05	0.852	10	0.061
	05-10	0.950	10	0.673
	10-20	0.864	10	0.086
	20-30	0.935	10	0.495
	30-40	0.801	6	0.056
Contenido gravimétrico de agua en el suelo (%)	00-05	0.877	10	0.119
	05-10	0.825	5	0.128
	10-20	0.957	10	0.756
	20-30	0.928	10	0.431
	30-40	0.856	6	0.111
Contenido volumétrico de agua en el suelo (%)	00-05	0.981	4	0.910
	05-10	0.912	10	0.295
	10-20	0.942	10	0.576
	20-30	0.913	10	0.305
	30-40	0.864	10	0.085
Conductividad eléctrica (ms cm ⁻³)	00-05	0.947	10	0.632
	05-10	0.878	10	0.125
	10-20	0.902	10	0.232
	20-30	0.938	10	0.534
	30-40	0.965	10	0.846

Tabla 5. Continuación

Variables	Profundidad (cm)	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Temperatura del suelo (°C)	00-05	0.926	10	0.408
	05-10	0.884	10	0.147
	10-20	0.874	10	0.111
	20-30	0.880	10	0.129
	30-40	0.891	10	0.173
Contenido volumétrico TDR (%)	00-05	0.978	10	0.951
	05-10	0.911	10	0.288
	10-20	0.857	10	0.071
	20-30	0.921	10	0.367
	30-40	0.858	6	0.054
Resistencia mecánica a la penetración (KPa)	00-05	0.936	10	0.505
	05-10	0.892	10	0.179
	10-20	0.915	10	0.318
	20-30	0.937	10	0.523
	30-40	0.909	10	0.272

Con el fin de poder caracterizar mejor el suelo del sitio de estudio y sus propiedades físicas, la tabla 6 demuestra la frecuencia de la clase textural según el perfil de profundidad.

Tabla 6. Distribución de frecuencia de la clase textural agrupada por profundidades

Perfil (cm)	Franco arcilloso	Franco limoso	Franco arcillo arenoso	Franco arcillo limoso	Arcilloso	Limoso	Total
00-05	1	0	0	1	7	1	10
05-10	3	0	0	0	6	1	10
10-20	1	1	0	1	6	1	10
20-30	0	2	0	0	7	1	10
30-40	0	1	1	1	2	5	10
Total	5	4	1	3	28	9	50

La tabla 7 presenta un resumen de la estadística descriptiva de 750 datos de 15 variables, tomando en cuenta todo el perfil del suelo estudiado en los 10 puntos de muestreo, se observa que la fracción arcilla presenta los valores más altos de 0.88% a 70.88% debido a que la clase textural

predominante es arcilloso (tabla 6) concordando con lo que reporta SIGTERRAS, (2007), en cuanto a las características de un suelo Inceptisol, y en menor proporción limoso y franco arcilloso, la densidad real (D_r) varía de 2.00 a 2.50 g cm^{-3} en promedio se desvían los datos con respecto a la media en 0.02 g cm^{-3} ; en densidad aparente (D_a) los datos se desvían de la media en 0.01 g cm^{-3} y su máximo y mínimo son 1.60 y 1.22 g cm^{-3} respectivamente; los valores de la porosidad fluctúan desde 20.00% a 48.76%, por lo que se infiere que no hay condiciones que restrinjan el crecimiento de las raíces según Shaxson y Barber, (2005). En cuanto a los estados de humedad del suelo; éste llevado a saturación (θ_s) presenta un máximo y mínimo de 0.74 y 0.49 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; la capacidad de campo (θ_{cc}) presenta un máximo y mínimo 0.62 a 0.42 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ y de punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) un máximo y mínimo 0.32 a 0.13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ resaltando que en ningún caso existe desviación de los datos respecto a la media.

El contenido de humedad gravimétrico (θ_g) presenta un máximo de 31.88% y un mínimo de 5.32%, los datos se desvían respecto a la media en 13.64%, en lo referente a los contenidos volumétricos de humedad del suelo determinados a partir del contenido gravimétrico presentan valores en un rango de 49.74% a 2.72%, valores que se desvían respecto a la media en 42.48%. Por otra parte, el contenido volumétrico de la humedad del suelo determinado en tiempo real a través de la sonda TDR difirió en sus contenidos presentando un máximo de 54.10% y un mínimo de 22.60%, esta variación de contenido se debió probablemente a las condiciones de riego que se efectuaban para el cultivo de banano en el sector. En la misma tabla se observan los valores de la capacidad de campo y punto de marchitez en los diferentes estratos, lo que permitió construir las curvas de retención de humedad en la que está perfectamente señalado el umbral crítico que permite establecer el agua útil y la macroporosidad existentes en los suelos y también relacionar la tensión de humedad con otras propiedades físicas del suelo, tal como se puede observar en los

ejemplos de las figuras 10, 11 y 12 correspondientes a las clases texturales limoso, arcilloso y franco arcillo limoso respectivamente.

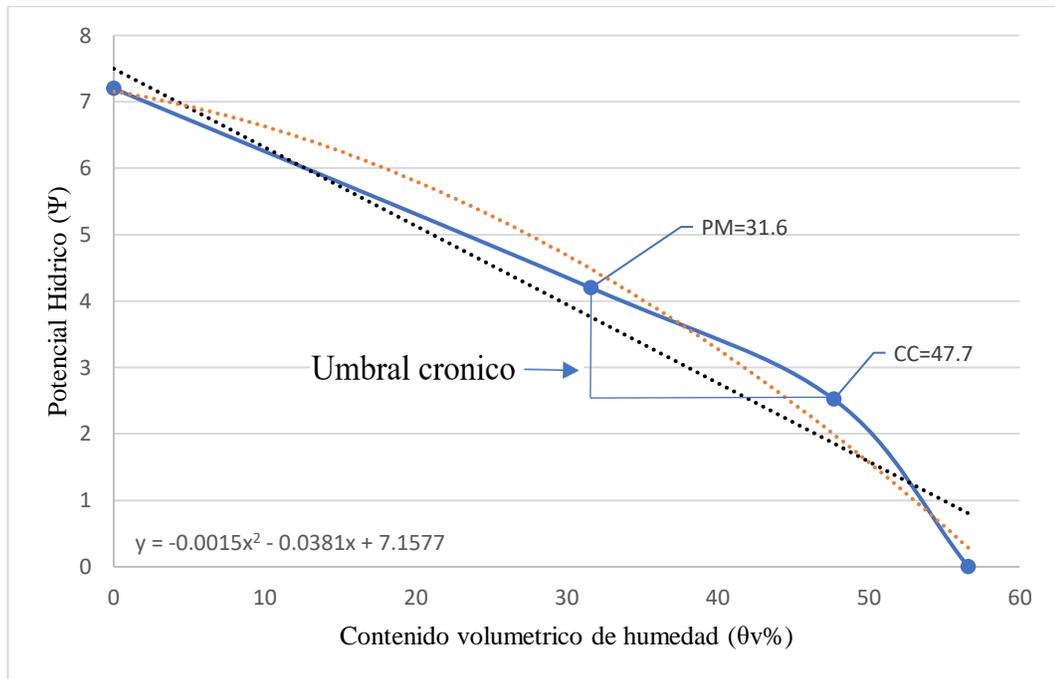


Figura 10. Curva de retención calicata 6 perfil 30 - 40 cm

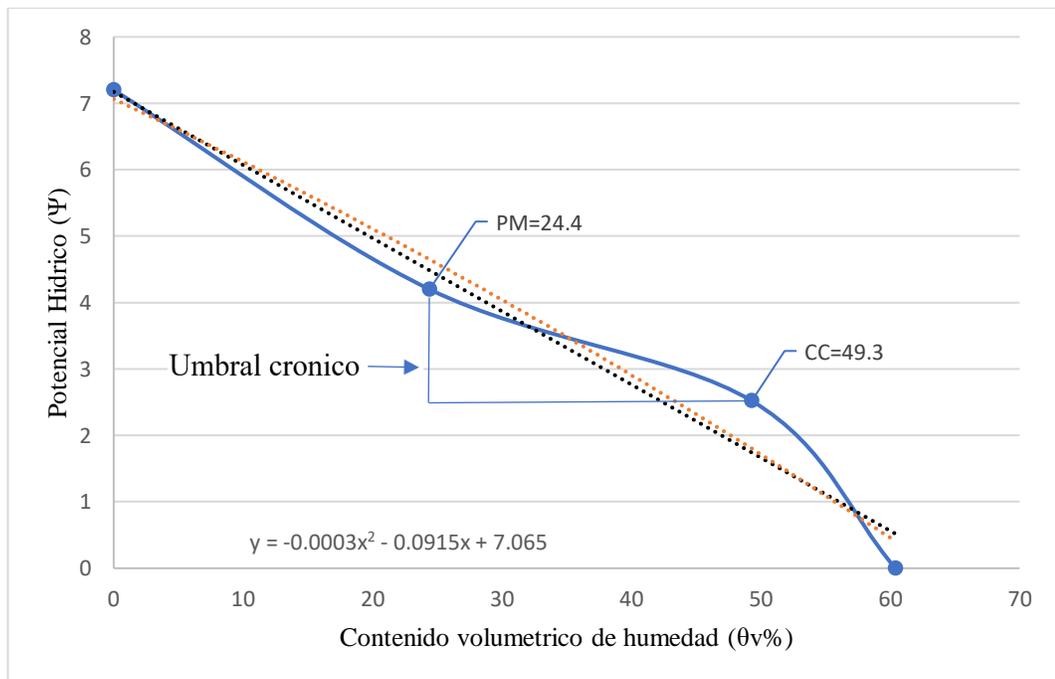


Figura 11. Curva de retención calicata 2 perfil 10 - 20 cm

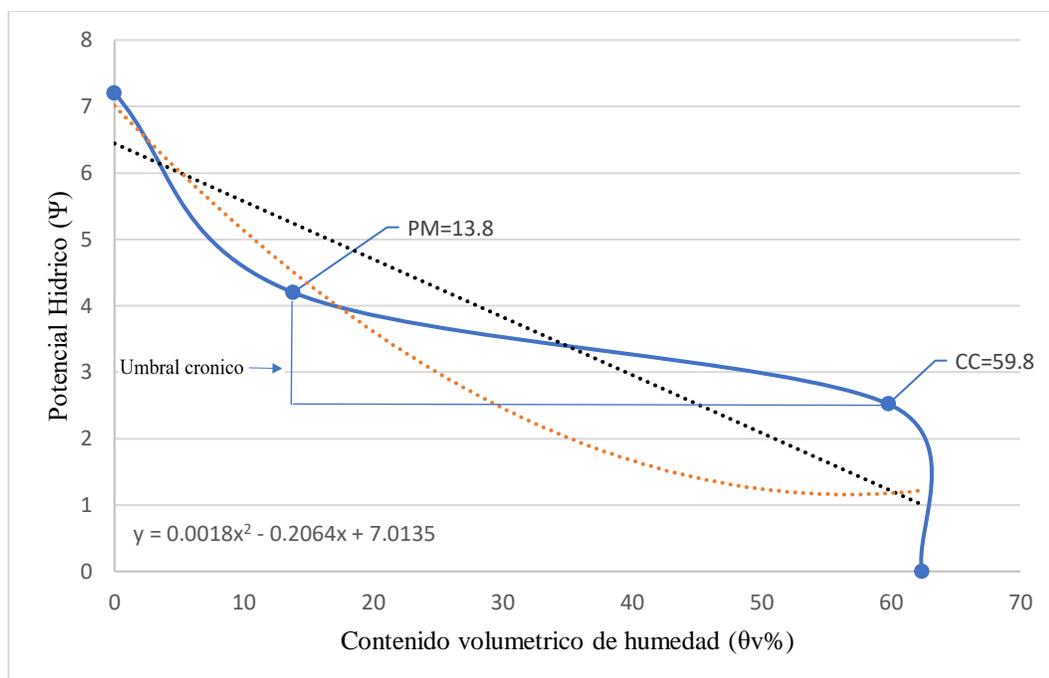


Figura 12. Curva de retencion calicata 9 perfil 30 - 40 cm

En cuando a la resistencia mecánica a la penetración (RMP) presenta un valor máximo de 344 KPa y un mínimo de 13 KPa, lo que confirma la presunción de que los riegos efectuados en el área experimental determinen valores bajos de la RMP, considerando que dadas las características del sistema radicular del cultivo de banano, estas toleran un grado de compactación del suelo de hasta 800 KPa (Chabla, 2017).

Tabla 7. Estadística descriptiva perfil de 0 a 5 cm

Variables	\bar{X}	Me	S	σ	CV	Min	Max	A	g2
Arcilla (%)	38.63	45.88	505.17	22.48	58.18	0.88	70.88	-0.65	-0.91
Limo (%)	40.10	30.00	624.22	24.98	62.31	10.00	77.50	0.80	-0.77
Arena (%)	21.28	19.13	61.48	7.84	36.85	11.63	56.63	2.45	7.90
Da (g cm ⁻³)	1.44	1.45	0.01	0.09	6.37	1.22	1.60	-0.15	-0.63
Dr (g cm ⁻³)	2.23	2.17	0.02	0.13	5.79	2.00	2.50	0.27	-0.87
Porosidad (%)	35.45	35.23	27.42	5.24	14.77	20.00	48.76	-0.16	0.89
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0.57	0.57	0.00	0.04	7.32	0.49	0.74	1.28	4.42
θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	0.49	0.49	0.00	0.04	8.00	0.42	0.62	0.77	1.55

Tabla 7. Continuación

Variables	\bar{X}	Me	S	σ	CV	Min	Max	A	g2
θ_{PMP} (cm ³ cm ⁻³)	0.23	0.25	0.00	0.06	25.64	0.13	0.32	-0.20	-1.47
θ_g (%)	17.21	16.89	13.64	3.69	21.46	5.32	31.88	0.64	5.61
θ_v (%)	24.45	24.62	42.48	6.52	26.66	2.72	49.74	0.07	6.46
T (°C)	34.34	34.30	1.67	1.29	3.76	32.80	37.80	1.11	1.03
CE (cm ³ cm ⁻³)	1.43	1.37	0.38	0.61	43.04	0.40	3.38	0.77	0.74
θ_v TDR (%)	44.67	47.50	55.51	7.45	16.68	22.60	54.10	-1.16	0.98
RMP (KPa)	209.46	213.00	6279.15	79.24	37.83	13.00	344.00	-0.30	-0.03

Nota. Significado de abreviaturas; \bar{X} : media; Me: mediana; S: varianza; σ : desviación estándar; CV: coeficiente de variación; Max: máximo; Min: mínimo; A: asimetría; g2: curtosis.

Tabla 8. Clasificación del coeficiente de variación de las propiedades físicas

Clasificación		Variables	CV (%)
< 12	Baja variabilidad	Capacidad de campo	8.00
		Densidad aparente	6.37
		Densidad real	5.79
		Temperatura	3.76
		Saturación	7.32
12 - 60	Variabilidad media	Resistencia a la penetración	37.83
		Arcilla	58.18
		Arena	36.85
		Conductividad eléctrica	43.04
		Punto de marchitez permanente	25.64
		Porosidad	14.77
		TDR	16.68
		Humedad gravimétrica	21.46
> 60	Alta variabilidad	Humedad volumétrica	26.66
		Limo	62.31

4.2 Análisis multivariado

De las variables descritas, se efectuó un análisis de correlación lineal de Pearson (Tabla 9), se determinó que se guardan las siguientes relaciones entre las variables asociadas:

Se evidencia una correlación inversa fuerte (-0.951) entre las fracciones de limo y arcilla; y una correlación inversa moderada (-0.461) entre las fracciones de arena y limo; en ambos casos

en el nivel de significancia (ns) 0.01, Cueva (2020) indica que estas relaciones explican la dinámica de variación en la proporción de las fracciones del suelo, si una variable aumenta, los valores de la otra decrecerán y viceversa.

El porcentaje de porosidad relacionado con la densidad aparente y densidad real presentan una correlación inversa alta de -0.690 y -0.647 respectivamente, en el ns: 0.01, obedeciendo a lo propuesto por Gutiérrez (2017) quien indica que, al aumentar la densidad del suelo, el espacio poroso disminuye debido a la ocupación del espacio libre por los agregados.

El contenido de humedad del suelo en saturación presenta correlaciones inversas bajas en relación con el porcentaje de arena y porosidad de -0.297 y -0.316 respectivamente, ambas en el nivel de significancia de 0.05, tal como indica Villareal (2010) mientras exista mayor espacio poroso conjuntamente a la baja capacidad de retención de agua de las partículas de arena, la humedad será inversamente proporcional y su contenido disminuirá. Siendo el caso inverso respecto a la relación entre la saturación y la densidad aparente, donde se presenta una correlación directa baja (0.380, ns: 0.05), la capacidad de retención de humedad del suelo aumenta dado a la superficie negativa que mantiene adheridas las moléculas de agua a las arcillas.

El estado de humedad del suelo en capacidad de campo y saturación presenta una correlación directa alta (0.828, ns: 0.01), según Mendoza (2013), este fenómeno se debe a que en ambos estados gran proporción del espacio poroso se encuentra ocupado por agua, por ello sus datos muestran una misma tendencia, concordando también, con que la capacidad de campo presente una correlación inversa baja con respecto a la porosidad (-0.356, ns: 0.05), es decir que en medida que la humedad sea retenida por capilaridad, la porosidad disminuirá o viceversa (Izquierdo & Arévalo, 2021).

Salamanca y Sadeghian, (2005) afirma que el agua aprovechable en el estado de humedad de capacidad de campo depende en gran parte de la densidad aparente, y a su vez, esta depende del contenido de materia orgánica, se corrobora esta relación al ver una correlación directa baja entre ambas (0.313, ns: 0.05).

Según se observa en el estado de punto de marchitez permanente, presenta una correlación directa baja con respecto a el porcentaje de limo (0.284, ns: 0.05) e inversa respecto a el porcentaje de arena (-0.303, ns: 0.05), Villarreal (2010) indica que los contenidos de humedad en este estado variarán conforme la proporción de las fracciones de estos componentes en el suelo.

El contenido de humedad volumétrico tiene una correlación inversa moderada, respecto a el porcentaje de porosidad (-0.448, ns: 0.01), Bengough et. al, (2011) explican que se debe a que en medida que el agua ocupe el espacio poroso, esta variable decrecerá. Por otro lado, el contenido de humedad volumétrico en relación al contenido de humedad gravimétrico mantiene una correlación directa muy alta (0.884, ns: 0.01), esto responde a la lógica de que uno depende del otro para su cálculo (Sandoval et. al, 2011).

Por otra parte, el contenido de humedad volumétrico medido a través de la sonda TDR 350, presenta una correlación directa baja con los contenidos volumétricos y gravimétricos calculados mediante el análisis de muestras en laboratorio, dando valores de 0.349 y 0.318 respectivamente, en el ns: 0.05. Permite comparar la relación entre métodos para la toma de datos; evidenciando mayor correlación con el método volumétrico, lo que difiere con el criterio de Castiglioni y Bianco, (2021); Cenara, (2005), quienes recomiendan el método gravimétrico, sin embargo, el uso del equipo se justifica al ofrecer datos muy aproximados en tiempo real, a menor costo y empleando menos esfuerzo (Chabla, 2017).

La humedad volumétrica determinada a través de la sonda TDR 350 presenta una correlación directa moderada de 0.545, ns: 0.01 en relación a la conductividad eléctrica, Auerswald et. al (2001), indican que se debe a que, en suelos a capacidad de campo, la conductividad eléctrica es determinada principalmente por el contenido de arcilla, concordando a lo que se evidencia en los resultados de las tablas 3 y 6, donde se demuestra que la clase textural que predomina en el suelo del area de estudio es el arcilloso.

La resistencia mecánica a la penetración y la densidad aparente presentan una correlación baja (0.297, ns: 0.05), presumiblemente el aumento de la densidad del suelo puede llegar a generar láminas de compactación según Wilson et. al, (2000), aumentando la resistencia a la penetración del suelo.

Tabla 9. Coeficientes de correlación de Pearson

		RMP	TDR	Arcilla	Limo	Arena	Da	Dr	P	θ_s	Cc	PMP	θ_v	θ_g	T	CE
RMP (KPa)	Correlación	1														
	Sig.															
TDR (θ_v %)	Correlación	-0.161	1													
	Sig.	0.264														
Arcilla (%)	Correlación	-0.166	0.129	1												
	Sig.	0.248	0.371													
Limo (%)	Correlación	0.165	-0.168	-0.951**	1											
	Sig.	0.252	0.245	0.000												
Arena (%)	Correlación	-0.049	0.163	0.163	-0.461**	1										
	Sig.	0.736	0.257	0.257	0.001											
Da ($g\ cm^{-3}$)	Correlación	0.297*	-0.043	0.129	-0.080	-0.116	1									
	Sig.	0.036	0.767	0.371	0.581	0.423										
Dr ($g\ cm^{-3}$)	Correlación	0.119	-0.166	-0.098	0.109	-0.065	0.030	1								
	Sig.	0.411	0.250	0.498	0.453	0.655	0.837									
Porosidad (%)	Correlación	-0.110	-0.052	-0.156	0.135	0.018	-0.690**	0.647**	1							
	Sig.	0.447	0.719	0.279	0.351	0.901	0.000	0.000								
θ_s ($cm^3\ cm^{-3}$)	Correlación	0.219	-0.113	-0.127	0.207	-0.297*	0.380**	-0.046	-0.316*	1						
	Sig.	0.126	0.433	0.380	0.149	0.036	0.007	0.750	0.026							
Cc ($cm^3\ cm^{-3}$)	Correlación	0.269	0.123	-0.160	0.200	-0.176	0.313*	-0.215	-0.356*	0.828**	1					
	Sig.	0.059	0.396	0.266	0.164	0.221	0.027	0.135	0.011	0.000						
PMP ($cm^3\ cm^{-3}$)	Correlación	-0.164	-0.206	-0.210	0.284*	-0.303*	0.146	0.029	-0.036	0.099	-0.060	1				
	Sig.	0.255	0.150	0.143	0.045	0.032	0.312	0.839	0.807	0.494	0.681					
θ_v (%)	Correlación	0.201	0.349*	0.083	-0.182	0.341*	0.381**	-0.213	-0.448**	-0.003	0.217	-0.258	1			
	Sig.	0.162	0.013	0.566	0.206	0.015	0.006	0.138	0.001	0.986	0.130	0.071				
θ_g (%)	Correlación	0.169	0.318*	-0.063	-0.068	0.397**	0.154	-0.261	-0.321*	-0.112	0.156	-0.257	0.884**	1		
	Sig.	0.240	0.024	0.664	0.639	0.004	0.285	0.067	0.023	0.438	0.279	0.071	0.000			
T ($^{\circ}C$)	Correlación	0.277	-0.184	-0.276	0.310*	-0.197	0.154	0.261	0.033	0.225	0.225	-0.035	-0.215	-0.155	1	
	Sig.	0.051	0.200	0.053	0.029	0.171	0.285	0.067	0.821	0.116	0.116	0.812	0.134	0.281		
CE ($cm^3\ cm^{-3}$)	Correlación	-0.009	0.545**	-0.006	-0.053	0.185	0.072	0.023	-0.044	-0.060	0.075	-0.094	0.286*	0.279	-0.071	1
	Sig.	0.952	0.000	0.969	0.716	0.199	0.617	0.875	0.759	0.680	0.605	0.518	0.044	0.050	0.624	

Nota. (*) La correlación es significativa en el nivel 0.05; (**) La correlación es significativa en el nivel 0.01.

En la tabla 10 se presentan los contenidos hídricos relevantes que corresponden a cada estrato del perfil del suelo estudiado, obtenidos por varias metodologías: membranas de Richard (θ_{CC} , θ_{PMP}); relaciones de peso (θ_s , θ_g , θ_v) y equipo de medición sonda TDR (θ_v), se observa que en medida que aumenta la profundidad, la humedad (θ) sigue el mismo comportamiento según reportan Cenara et. al, (2005); Orellana & Pilatti, (1990); Wilson et. al, (2000).

Respecto a los valores registrados de la resistencia mecánica a la penetración tomados con el suelo en estado de capacidad de campo en estratos de 2.5 cm (Figura 13), difieren con Cenara et. al, (2005), dado que la amplitud de los valores no disminuye conforme aumenta el contenido de humedad. En ningún estrato se superó el valor de 800 KPa, considerado el límite para el normal desarrollo de las raíces de banano según Chabla, (2017).

Tabla 10. Contenidos hídricos del perfil del suelo estudiado

Profundidad	θ_s $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_{CC} $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_{PMP} $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	θ_v (%)	θ_g (%)	TDR (%)
00-05	0.559	0.479	0.225	19.890	14.144	38.750
05-10	0.548	0.478	0.226	24.772	17.242	48.620
10-20	0.567	0.498	0.235	26.411	18.135	49.980
20-30	0.587	0.510	0.236	24.618	16.931	41.020
30-40	0.563	0.501	0.239	28.363	19.577	44.690

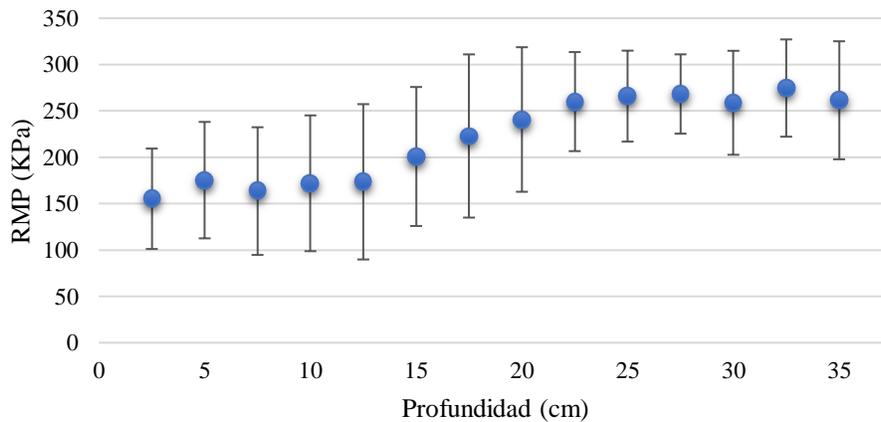


Figura 13. Perfil de RMP en condición de capacidad de campo

4.3 Relaciones matemáticas bivariadas

En la tabla 11, presenta la evaluación del ensayo entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido volumétrico obtenido a través de la sonda TDR 350, en la que constan las ecuaciones para diferentes modelos de regresión: lineal, logarítmico y polinómico. Conjuntamente con sus coeficientes de determinación que evalúa cuan fuerte es la relación entre ambas variables y la eficiencia de predicción en el análisis de tendencia (Martínez, 2005). Obteniendo que para el primer y último estrato de 00 a 05 y de 30 a 40 cm de profundidad existe un mayor grado de ajuste en el modelo logarítmico con coeficientes de determinación altos de 0.602 y 0.705 respectivamente, difiriendo con Castiglioni y Bianco (2021), quienes recomiendan un modelo lineal para los primeros 5 cm de suelo y potencial para estratos de mayor profundidad, al igual que Cenara et. al, (2005).

Para el perfil comprendido de 05 a 30 cm existe un mayor ajuste para el modelo polinomial de segundo grado, comparado con Cenara et al, (2005) quienes obtuvieron un mejor ajuste bajo un modelo potencial, pero no obteniendo coeficientes de determinación superiores a 0.63. Por otra parte, los resultados del modelo polinomial son inferiores a la propuesta de una función exponencial negativa de Wilson et. al, (2000) quienes obtuvieron coeficientes superiores, en un rango de 0.76 a 0.95.

Tabla 11. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_v TDT

Profundidad	Lineal		Logarítmica		Polinómica			R^2	R^2	R^2
	$y = a + bx$		$y = b \ln(x) + a$		$y = ax^2 + bx + c$					
	a	b	a	b	a	b	c	Lineal	Log.	Pol.
00-05	16.115	41.867	25.675	69.400	-1.546	33.115	7.867	0.556	0.602	0.586
05-10	20.983	54.750	34.024	88.330	-4.393	64.912	-25.786	0.505	0.617	0.618
10-20	26.383	42.417	13.015	113.410	-8.094	107.320	-105.980	0.467	0.595	0.692

Tabla 11. Continuación

Profundidad	Lineal		Logarítmica		Polinómica			R^2	R^2	R^2
	$y = a + bx$		$y = b \ln(x) + a$		$y = ax^2 + bx + c$					
	a	b	a	b	a	b	c	Lineal	Log.	Pol.
20-30	24.617	111.250	68.972	116.250	-9.880	123.420	-69.881	0.432	0.665	0.790
30-40	29.583	70.750	48.666	119.510	-2.627	55.850	22.595	0.626	0.705	0.651

En la tabla 12, se muestran las ecuaciones matemáticas al evaluar la relación de la resistencia mecánica a la penetración y el contenido volumétrico obtenido a través del método de diferencia de pesos. Se observa nuevamente que para los estratos de 00 a 05 y de 30 a 40 cm de profundidad el modelo con mejor ajuste es el logarítmico, siendo así también además del perfil de 10 a 20 cm, pero con una cerrada diferencia de 0.005 en comparación con el modelo polinómico; el cual, establece el mejor ajuste para los perfiles de 05 a 10 y 20 a 30 cm.

Tabla 12. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_v

Profundidad	Lineal		Logarítmica		Polinómica			R^2	R^2	R^2
	$y = a + bx$		$y = b \ln(x) + a$		$y = ax^2 + bx + c$					
	a	b	a	b	a	b	c	Lineal	Log.	Pol.
00-05	15.801	29.374	7.111	73.406	-1.33	32.136	-8.425	0.596	0.649	0.633
05-10	20.24	7.927	-14.346	91.347	-3.009	57.284	-78.344	0.458	0.503	0.562
10-20	25.933	49.222	33.226	102.4	-2.901	55.003	-4.071	0.442	0.475	0.470
20-30	25.692	81.592	36.797	122.46	-5.747	90.207	55.04	0.544	0.735	0.744
30-40	27.809	30.186	1.551	124.38	-1.789	49.835	-21.133	0.734	0.791	0.765

En la tabla 13, presenta la evaluación del ensayo entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido de humedad gravimétrico, metodología de acuerdo con Castiglioni y Bianco (2021), Se observa el mismo patrón respecto a la evaluación RMP vs TDR, se observa que el modelo logarítmico tiene el mejor ajuste para el primer y último estrato del perfil de estudio,

mientras que el modelo polinómico para los estratos comprendidos entre los 05 a 30 cm de profundidad.

Tabla 13. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_g

Profundidad	Lineal		Logarítmica		Polinómica			R^2	R^2	R^2
	$y = a + bx$		$y = b \ln(x) + a$		$y = ax^2 + bx + c$					
	a	b	a	b	a	b	c	Lineal	Log.	Pol.
00-05	15.801	29.374	7.111	73.406	-1.330	32.136	-8.425	0.596	0.649	0.633
05-10	20.240	7.927	-14.346	91.347	-3.009	57.284	-78.344	0.458	0.503	0.562
10-20	19.225	55.859	19.593	94.774	-3.259	59.258	-36.774	0.374	0.459	0.468
20-30	20.554	104.150	47.497	111.760	-5.410	87.015	-49.634	0.463	0.692	0.745
30-40	27.809	30.186	1.551	124.380	-1.789	49.835	-21.113	0.734	0.791	0.765

Finalmente, en la tabla 14 presentan los resultados entre la resistencia a la penetración y el contenido de humedad relativa (θ_v/θ_s) metodología de acuerdo con Cenara et al. (2005). Se observa una vez más el mismo patrón similar a la evaluación RMP vs TDR y RMP vs θ_g , donde el modelo logarítmico tiene el mejor ajuste para el primer y último estrato con coeficiente de determinación de 0.649 y 0.791 respectivamente, mientras que, para los estratos entre 05 y 30 cm de profundidad, existe mayor ajuste bajo el modelo de regresión polinómica.

Tabla 14. Relaciones matemáticas entre RMP y θ_v/θ_s

Profundidad	Lineal		Logarítmica		Polinómica			R^2	R^2	R^2
	$y = a + bx$		$y = b \ln(x) + a$		$y = ax^2 + bx + c$					
	a	b	a	b	a	b	c	Lineal	Log.	Pol.
00-05	15.801	29.374	7.111	73.406	-1.330	32.136	-8.425	0.596	0.649	0.633
05-10	20.240	7.927	-14.346	91.347	-3.009	57.284	-78.344	0.458	0.503	0.562
10-20	19.225	55.859	19.593	94.774	-3.259	59.258	-36.774	0.374	0.459	0.468
20-30	24.457	68.571	18.810	123.470	-5.487	92.020	-88.780	0.569	0.777	0.860

Tabla 14. Continuación

Profundidad	Lineal		Logarítmica		Polinómica			R^2	R^2	R^2
	$y = a + bx$		$y = b \ln(x) + a$		$y = ax^2 + bx + c$			Lineal	Log.	Pol.
	a	b	a	b	a	b	c			
30-40	27.809	30.186	1.551	124.380	-1.789	49.835	-21.113	0.734	0.791	0.765

4.4 Relaciones matemáticas multivariada

De acuerdo con la tabla 9, se seleccionaron las variables de las propiedades físicas del suelo que inciden en la retención de humedad, y que su coeficiente de correlación mantiene significancia con los contenidos hídricos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, relacionándolo con la resistencia mecánica a la penetración a través de una regresión múltiple en el software estadístico Statgraphics. En la tabla 15 presenta las ecuaciones obtenidas entre la RMP, la capacidad de campo (coeficiente 1) y la densidad aparente (coeficiente 2). Se obtuvieron valores de R^2 muy bajos a excepción del ultimo estrato que presenta un R^2 moderado de 0.495.

Tabla 15. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs Cc vs Da

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coficiente 1	Coficiente 2	Intercepto
00-05	0.284	-172.525	-683.095	723.007
05-10	0.150	883.939	- 128.120	-83.133
10-20	0.336	- 198.522	523.156	-466.660
20-30	0.047	110.007	105.699	55.908
30-40	0.495	206.232	443.595	-480.660

La tabla 16 constan las ecuaciones obtenidas entre la relación de la resistencia a la penetración, en el estado de capacidad de campo (coeficiente 1) y la porosidad total (coeficiente 2), en todas las observaciones se demuestran coeficientes bajos no superiores a 0.4.

Tabla 16. Ecuaciones matemáticas entre la RMP vs Cc vs Porosidad

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coefficiente 1	Coefficiente 2	Intercepto
00-05	0.399	-545.935	4.228	257.938
05-10	0.207	1168.150	4.598	-566.850
10-20	0.162	194.255	-4.630	264.738
20-30	0.056	259.100	1.283	85.927
30-40	0.077	235.377	3.460	26.700

La tabla 17 se muestran las ecuaciones matemáticas en la relación que existe entre el contenido hídrico a capacidad de campo (coeficiente 1) con la resistencia mecánica a la penetración y el contenido de humedad en saturación (coeficiente 2), reportando coeficientes de determinación no superiores a 0.166.

Tabla 17. Ecuaciones matemáticas entre la RMP vs Cc vs θ_s

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coefficiente 1	Coefficiente 2	Intercepto
00-05	0.120	-1545.85	957.366	360.206
05-10	0.166	1852.46	-1125.23	-110.39
10-20	0.137	120.949	700.247	-256.163
20-30	0.115	176.746	-272.724	240.335
30-40	0.119	641.799	-119.776	7.16433

La tabla 18 constan las ecuaciones matemáticas en la relación que existe entre el contenido hídrico en el punto de marchitez permanente (coeficiente 1) con la resistencia mecánica a la penetración y la densidad aparente (coeficiente 2), reportando un único R^2 alto de 0.808 en el estrato medio de 10 a 20 cm de profundidad, y un R^2 moderado de 0.487 en el último estrato, y bajo para las profundidades restantes.

Tabla 18. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs PMP vs Da

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coefficiente 1	Coefficiente 2	Intercepto
00-05	0.150	- 207.669	- 124.725	473.269
05-10	0.197	- 800.663	474.360	-337.333
10-20	0.808	- 976.419	807.148	-752.113
20-30	0.157	- 308.749	167.921	93.944
30-40	0.487	- 79.208	449.872	-367.401

La tabla 19 muestra las ecuaciones resultantes de la relación entre la resistencia mecánica a la penetración, el contenido hídrico en punto de marchitez (coeficiente 1), y el porcentaje de limo del suelo (coeficiente 2), se obtuvieron coeficientes bajos con excepción al estrato de 20 a 30 cm de profundidad, el cual presenta un R^2 moderado de 0.496.

Tabla 19. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs PMP vs Limo

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coefficiente 1	Coefficiente 2	Intercepto
00-05	0.140	- 117.630	0.970	149.759
5-10	0.129	- 533.753	1.091	249.508
10-20	0.224	- 318.464	- 1.207	319.507
20-30	0.496	- 144.245	- 1.519	364.976
30-40	0.375	- 546.389	1.116	329.179

La tabla 20 expresa las ecuaciones resultantes del modelo entre la resistencia mecánica a la penetración, contenido hídrico en punto de marchitez, y el porcentaje de arena del suelo, se obtuvieron coeficientes muy bajos en todos los estratos.

Tabla 20. Ecuaciones matemáticas entre RMP vs PMP vs Arena

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coefficiente 1	Coefficiente 2	Intercepto
00-05	0.165	- 3.015	- 184.356	263.510
05-10	0.174	- 1141.590	- 6.567	572.877

Tabla 20. Continuación

Profundidad	R^2	$y = ax_1 + bx_2 + c$		
		Coefficiente 1	Coefficiente 2	Intercepto
10-20	0.112	- 419.310	- 0.259	304.844
20-30	0.082	- 246.710	0.365	317.341
30-40	0.149	- 276.219	0.964	306.361

V. CONCLUSIONES

- El modelo logarítmico $y = b \ln(x) + a$ presentó mayor ajuste entre la resistencia mecánica a la penetración y los contenidos hídricos (θ_v , θ_g y θ_v/θ_s) en los estratos de 00 a 05 y de 30 a 40 cm de profundidad, con coeficientes de determinación constantes (R^2) de 0.649 y 0.791 respectivamente.
- El modelo polinómico $y = ax^2 + bx + c$ obtuvo mayor ajuste entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídricos θ_v TDR para los estratos de 05 a 10 y de 10 a 20 cm de profundidad, mostrando coeficientes de determinación (R^2) de 0.618 y 0.692 respectivamente.
- Para el estrato de 20 a 30 cm de profundidad, el modelo polinómico presentó mayor ajuste en la relación de la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico θ_v/θ_s , con un R^2 de 0.860.
- Las propiedades físicas que mostraron mayor incidencia en la retención de humedad a capacidad de campo fueron la densidad aparente y porosidad (R^2 de 0.313 y -0.356 respectivamente); la regresión múltiple entre Cc, RMP y ambas propiedades físicas mostraron ecuaciones con coeficientes de determinación heterogéneos no superiores a 0.495.
- Las propiedades físicas que mostraron mayor incidencia en la retención de humedad en punto de marchitez permanente fueron la densidad aparente y los porcentajes de limo (R^2 :0.284) y arena (R^2 : -0.303); la regresión múltiple entre PMP, RMP y estas propiedades físicas mostraron ecuaciones con coeficientes de determinación heterogéneos que varían en un rango amplio desde 0.082 hasta 0.808.

VI. Bibliografía

- Aran, M., Hay, B., & Duthoit, S. (2020). La teledetección aplicada a la viticultura. *Quaderns Agraris* Institució Catalana d'Estudis Agraris, (48), 43-57. doi:10.2436/20.1503.01.110
- Barros, A., de-Matos, R., Pessinatti, A., Pavão, G., & Constantino, G. (2019). Calibration and accuracy of two electromagnetic methods of soil moisture measurement in oxisol. *Irriga*, 24(4), 747-757. doi:10.15809/irriga.2019v24n4p747-757
- Becker, E. (2018). *Pisos industriales de hormigón: Diseño, construcción y mantenimiento*. Buenos Aires: Nobuko.
- Bengough, A., McKenzie, B., Hallet, P., & Valentine, T. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. 59-68. doi:https://doi.org/10.1093/jxb/erq350.
- Calva, A., Duarte, C., dos Santos, J., & Silva, C. (2020). Calibration of two capacitive soil moisture sensors in Ultisol. *DYNA. Revista de la Facultad de Minas*, 87(213), 75-79. doi:10.15446/dyna.v87n213.75361
- Castiglioni, M., & Bianco, T. (2021). Variacion temporal y espacial de la resistencia a la penetracion en un lote bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 39(1), 12-19.
- Campos, L., Teixeira, W., & Canuto, F. (2019). Physical attributes of a Dystroferic Red Latosol (Oxisol) under different management systems. *Revista Agrogeoambiental*, 11(1), 111-119. doi:10.18406/2316-1817v11n120191198
- Cenara, J., Wilson, M., Pozzolo, O., Battista, J., Rivarola, S., & Diaz, E. (2005). Relaciones matematicas entre la resistencia mecanica a la penetracion y el contenido hidrico en un vertisol. *Estudios de la zona no saturada del suelo*.
- Chabla, J. (2017). Efecto de mejoradores físicos, químicos y biológicos de la compactación de suelos bananeros bajo sistemas de riego. *Repositorio Universidade Da Coruña*.
- Chaico, E. (2010). Movimiento del agua en el suelo. Determinacion de la velocidad de infiltracion con cilindros infiltrometros. *Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga*.
- Chicas, R., Vanegas, E., & García, N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la subcuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 41-46.
- Correa, J., Iral, R., & Rojas, L. (2014). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*. sychology Press. Obtenido de <https://doi.org/10.4324/9781410606266>
- Cueva, E. (2020). Análisis geoestadístico y multivariado de atributos físicos de un suelo en cultivo de banano finca Márquez la Peaña cantón Pasaje. *Universidad Técnica de Machala*. Obtenido de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15537>
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia.

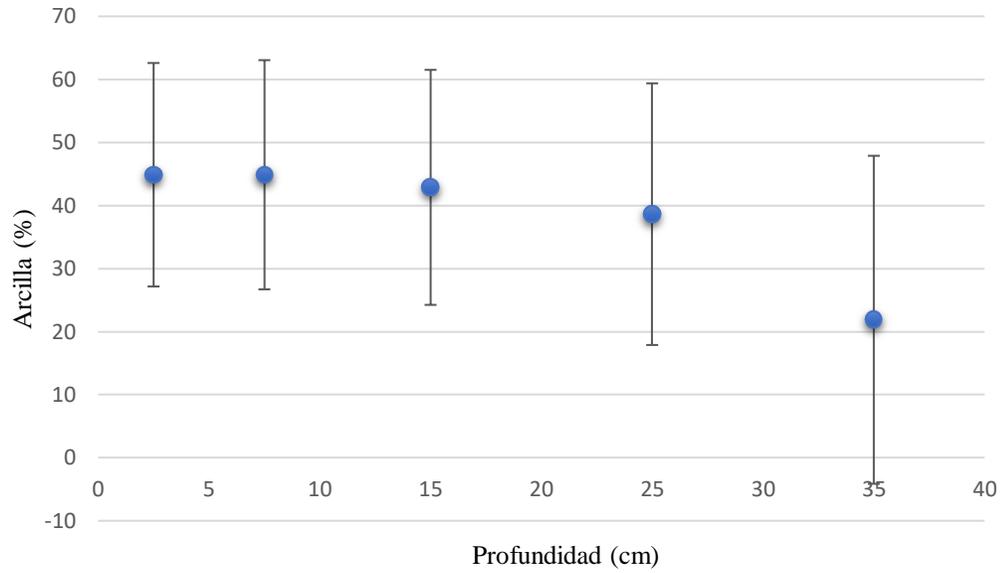
- Fernández, L., & Togores, J. (2019). Tratado de viticultura. Volumen I y II. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Gamero, A., Delgadillo, J., Cortés, J., Velasco, J., & Velasco, C. (2020). Propiedades del suelo afectadas por el tiempo de descanso en un sistema de roza-tumba-quema. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(1), 1-11. doi:10.19136/era.a7nl.2098
- Gutierrez, G. (2017). Efecto del cultivo de palma de aceite sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con la producción y la pudrición de cogollo. *Lámpsakos*, 1(17), 20-28.
- Garita, R. (2022). El Banano. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Iglesias, J., Galantini, J., Krüger, H., & Venanzi, S. (2014). Soil pore distribution as affected by cattle trampling under no-till and reduced-till systems trampling under no-till and reduced-till systems. *Agriscientia*, 31(2), 93-102. doi:10.31047/1668.298x.v31.n2.16536
- Israelsen, O., & Hansen, V. (2021). Principios y aplicaciones del riego. Barcelona: Reverté.
- Izquierdo, J., & Arévalo, J. (2021). Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación. *Revista Ingeniería y Región*, Vol. 26, 20-28. doi:10.25054/22161325.2527
- Jaramillo, D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia.
- Juan, P., Alejandrina, G., Javier, G., le, B., María, G., & Gema, P. (2019). Criterios de calidad y gestión del agua potable. Madrid: Editorial UNED.
- Leal, J., Avila, E., Lobo, D., & Hernández, Y. (2022). Los fragmentos de roca. Origen e influencia en la infiltración y propiedades hidráulicas de los suelos. Bogotá: Fondo Editorial – Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia.
- López, M., Poch, R., & Porta, J. (2019). Edafología: uso y protección de suelos. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- López, P., & Peña, M. (2019). El almendro. Guía práctica de cultivo. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Lowenfels, J., & Lewis, W. (2021). Cultivar con microbios: La guía del cultivador orgánico de la red de nutrientes del suelo. Portland: Melusina.
- Macarena, M. (2019). ¿Para qué sirve la geología?: El idioma de las piedras. Madrid: Los Libros De La Catarata.
- Martínez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*.
- Manterola, C., & Otzen, T. (2014). Estudios Observacionales. Los Diseños Utilizados Mayor Frecuencia en Investigación Clínica. *SciELO*, 32(2), 634-645. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v32n2/art42.pdf>
- Marinas, M. (2022). Preparación del medio de cultivo. La Rioja: Tutor Formación.
- Martin, E., & Munoz, C. (Febrero de 2017). College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ). Obtenido de Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. Obtenido

- de: https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/625275/az1220s-2017_0.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mattei, E., Rabello, P., Costa, C., Rocha, C., Piano, J., & da Silveira, L. (2021). Effect of intercropping between tropical fodder plants with corn and nitrogen fertilization on soil physical properties. *Revista de agricultura neotropical*, 8(4), 1-10. doi:10.32404/rean.v8i4.6318
- Medrano, H., Escalona, J., Bota, J., Gulías, J., & Flexas, J. (2002). Regulación de la Fotosíntesis de Plantas C₃ en Respuesta a Sequía Progresiva: Conductancia Estomática como Parámetro de Referencia. *Annals of Botany*, 89(7), 895–905. doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf079>
- Mendoza, A. (2013). Riego por goteo. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA).
- Mora, J. (2019). Caracterización del suelo en el parche boscoso de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA). Tesis. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ojeda, C. (2015). Efecto de un producto bioactivo compuesto por oligogalacturónidos como mitigador del estrés hídrico en variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L). La Paz: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Obtenido de https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/170/1/ojeda_c.pdf
- Orellana, J., & Pilatti, M. (1990). Aplicación de enmiendas calcicas a un horizonte B2t (1). *Ciencia del Suelo*, 8(2).
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: no dejar a nadie atrás. París: UNESCO Publishing. Obtenido de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- Ruge, J., Galvis, L., Pulgarín, L., Bastidas, J., & Olarte, M. (2021). Permeability measurement in porous media under unsaturated paths. *DYNA. Revista de la Facultad de Minas*, 88(219), 123-130. doi:10.15446/dyna.v88n219.95162
- Rui-Wamba, J. (2020). Teoría unificada de estructuras y cimientos: Una mirada transversal. Barcelona: Reverté.
- Ruiz, A., & Molina, J. (2010). Automatización y telecontrol de sistemas de riego. Barcelona: Marcombo.
- Salcedo, E., Galvis, A., Hernández, T., Rodríguez, R., Zamora, F., Bugarin, R., & Carrillo, R. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(4), 419-425.
- Sandoval, M., Dorner, J., Séguel, O., Cuevas, J., & Rivera, D. (2011). Métodos de análisis físico de suelos. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/312453440_Metodos_De_Analisis_fisicos_De_Suelos
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. Obtenido de Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo: <https://n9.cl/Ogpkvz>

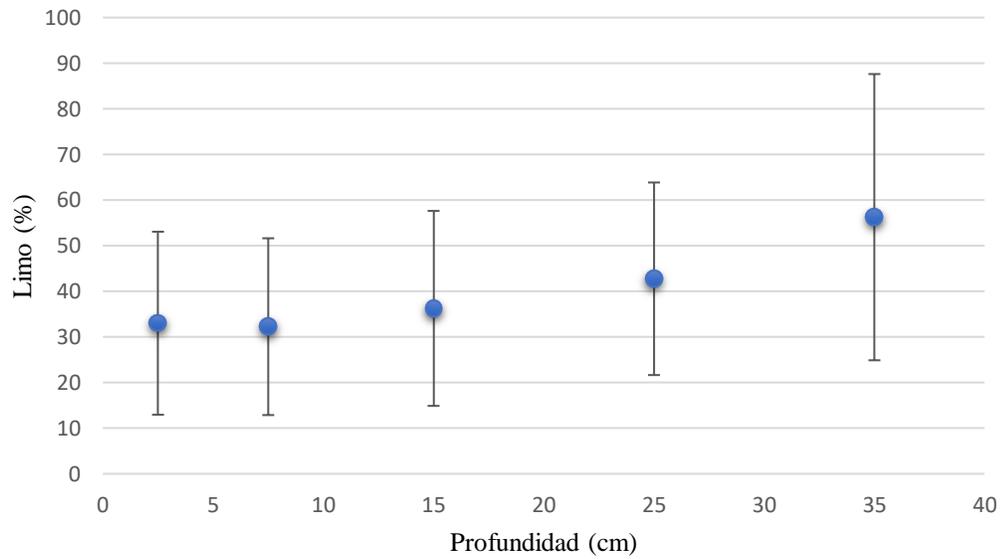
- SIGTIERRAS. (2017). Memoria explicativa del mapa de Órdenes de suelos del Ecuador. Quito, Ecuador: Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica.
- Thompson, L., & Troeh, F. (2021). Los suelos y su fertilidad. Barcelona: Reverté.
- Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la provincia de El Oro. CUMBRES, 28 - 34.
- Villareal, J. (2010). Determinación de un índice de calidad del suelo en áreas productoras de banano (musa x paradisíaca l.) de la vertiente del pacífico de panamá. Universitat de Lleida.
- Warrick, A., & Nielsen, D. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. Applications of soil physics, 319-344.
- Wilson, M., Valenzuela, Pilatti, M. & Felli, O. (2000). Relación entre el contenido hídrico y la resistencia a la penetración en un suelo con características vérticas. Facultad de Agronomía, 1(20), 69-73.
- Yáñez, M., Cantú, I., & González, H. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en las propiedades químicas de un vertisol. Terra Latinoamericana, 36(4), 369-379. doi:10.28940/terra.v36i4.349
- Zapata, A. (2020). Manual práctico de sistemas de riego localizado. Asturias: Ediciones Mundi-Prensa.

ANEXOS

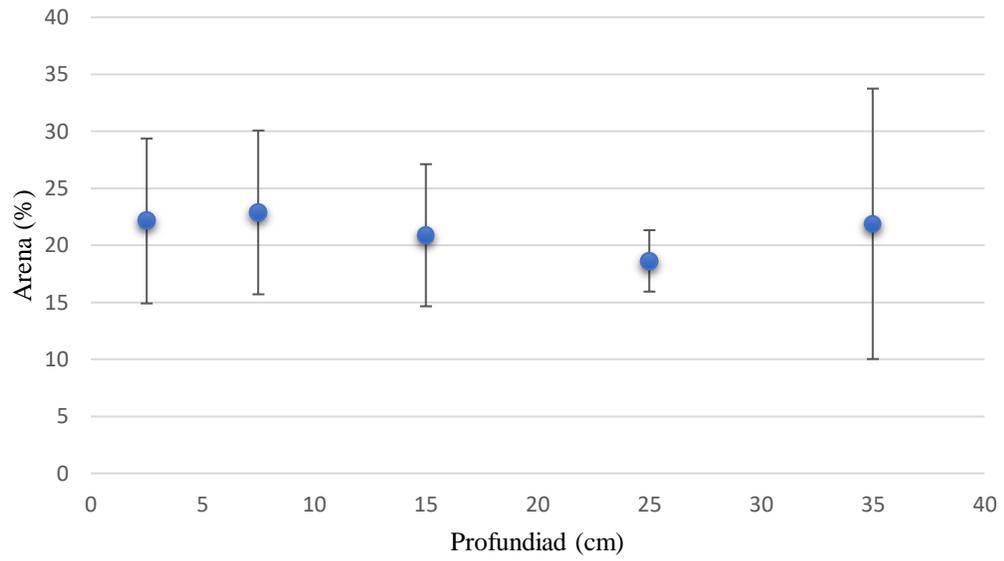
Anexo 1. Contenido de arcilla por perfil de suelo.



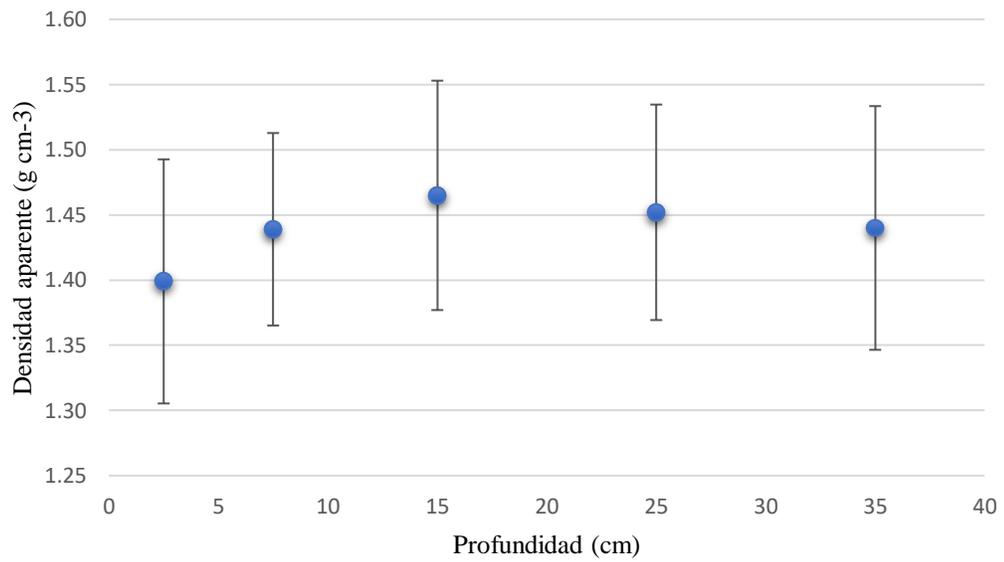
Anexo 2. Contenido de limo por perfil de suelo.



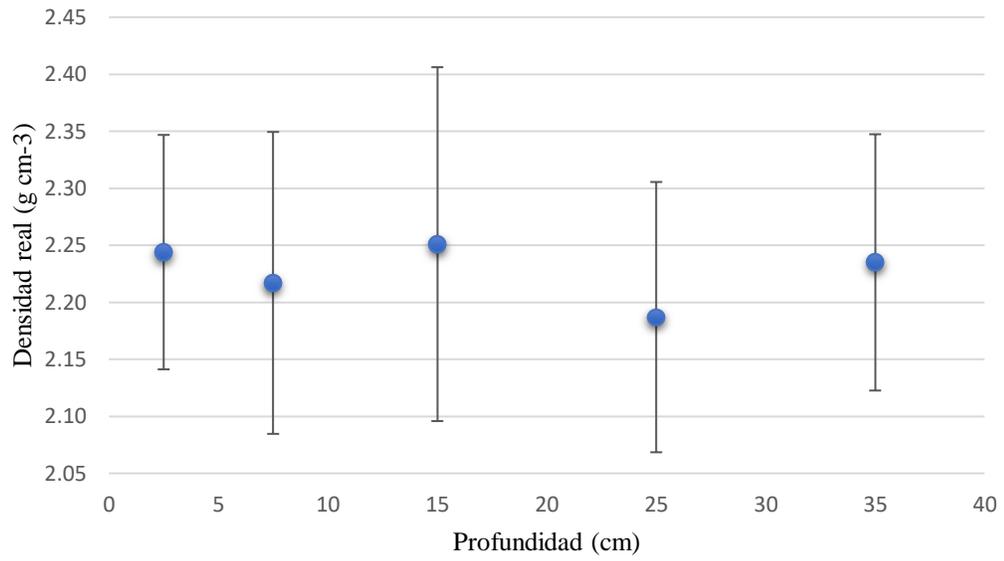
Anexo 3. Contenido de arena por perfil de suelo.



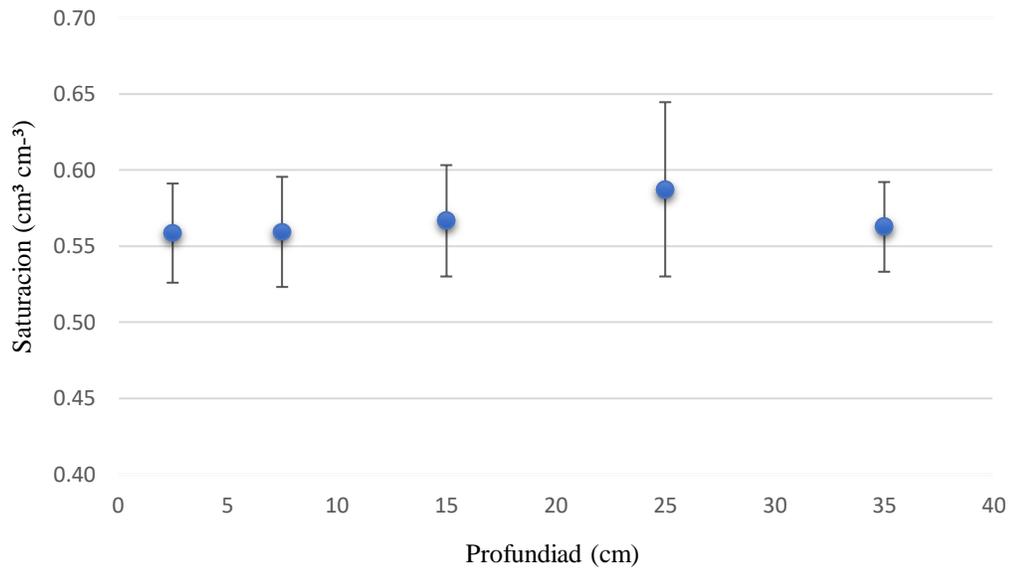
Anexo 4. Curva de densidad aparente.



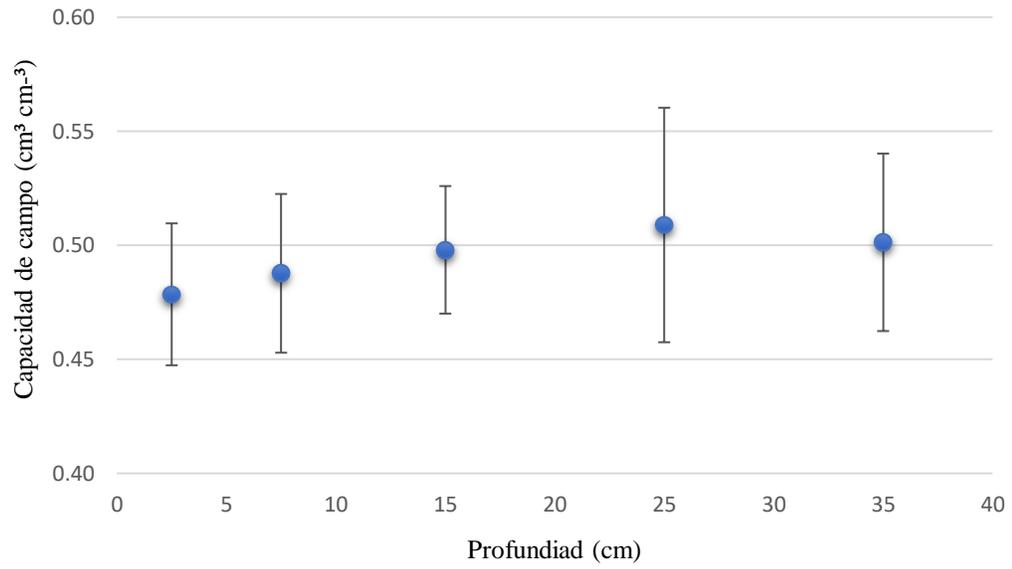
Anexo 5. Curva de densidad real



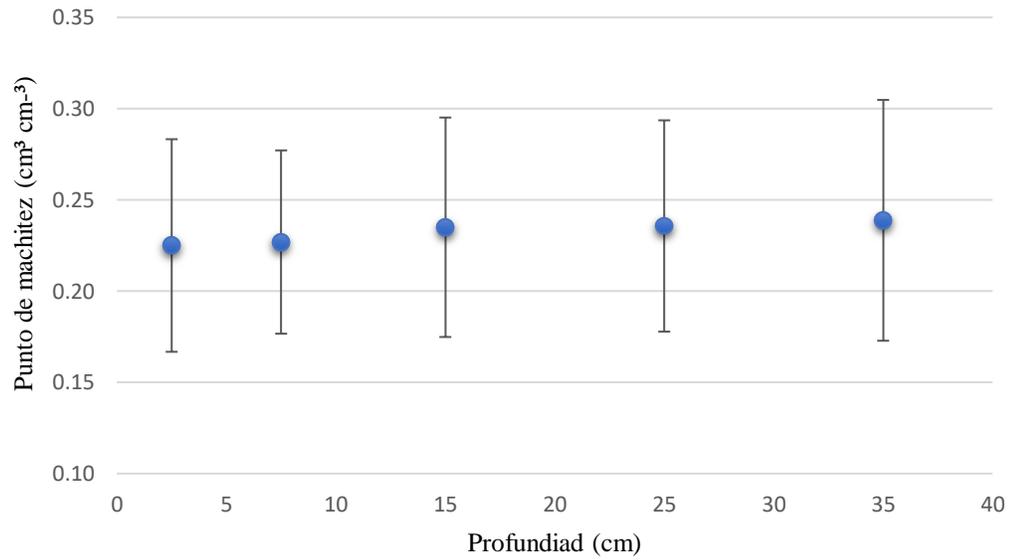
Anexo 6. Curva de contenido de humedad en estado de saturación.



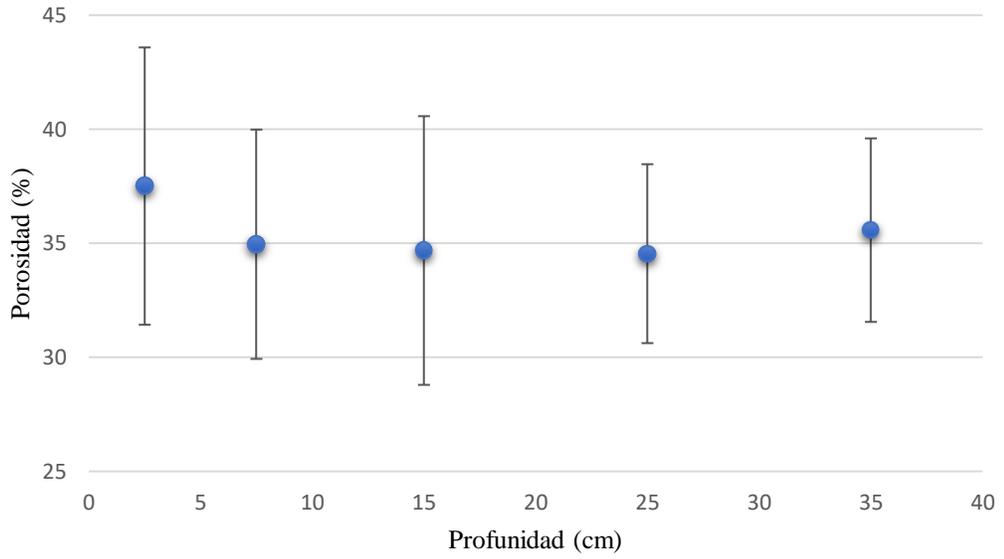
Anexo 7. Curva de contenido de humedad a capacidad de campo.



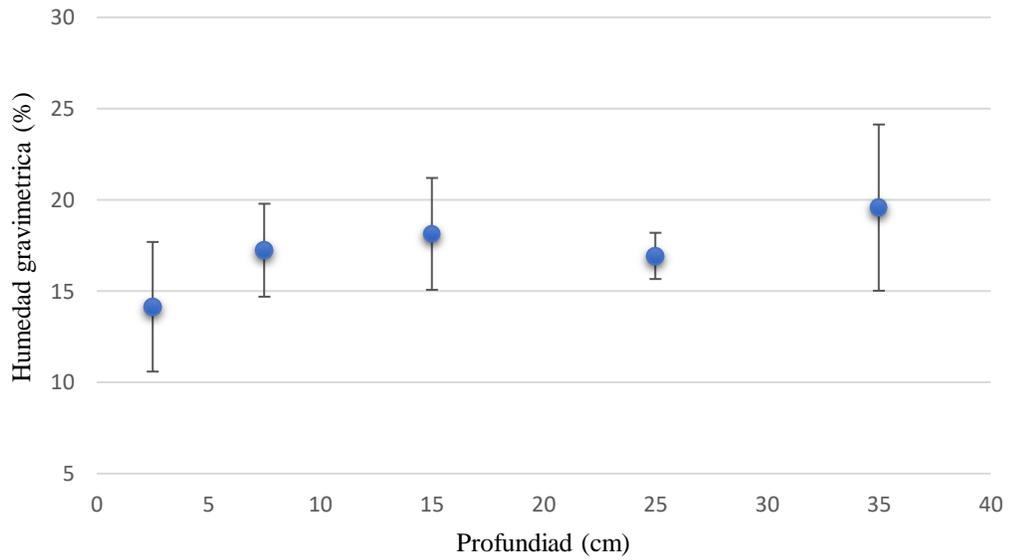
Anexo 8. Curva de contenido de humedad en punto de marchitez permanente.



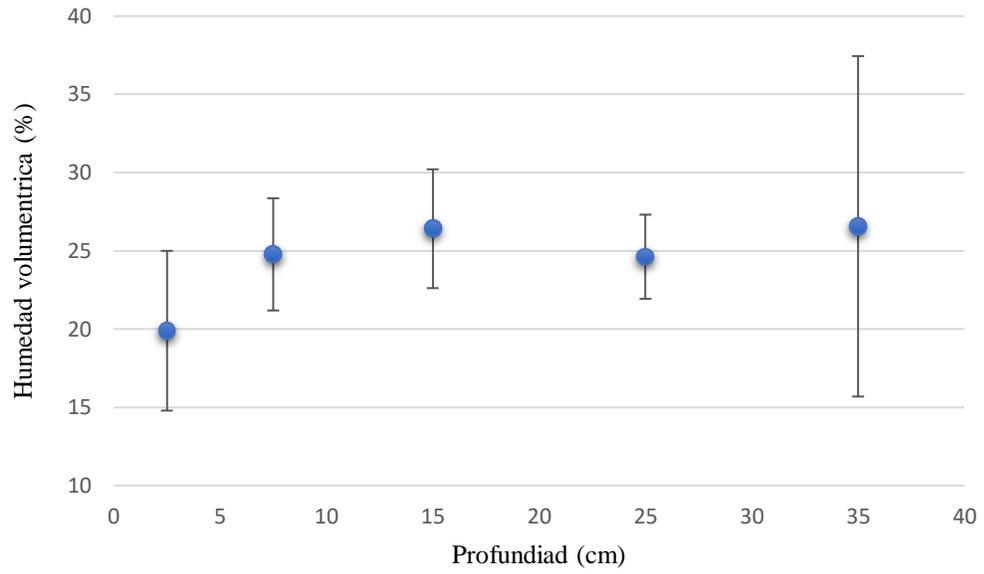
Anexo 9. Curva de porcentaje de porosidad.



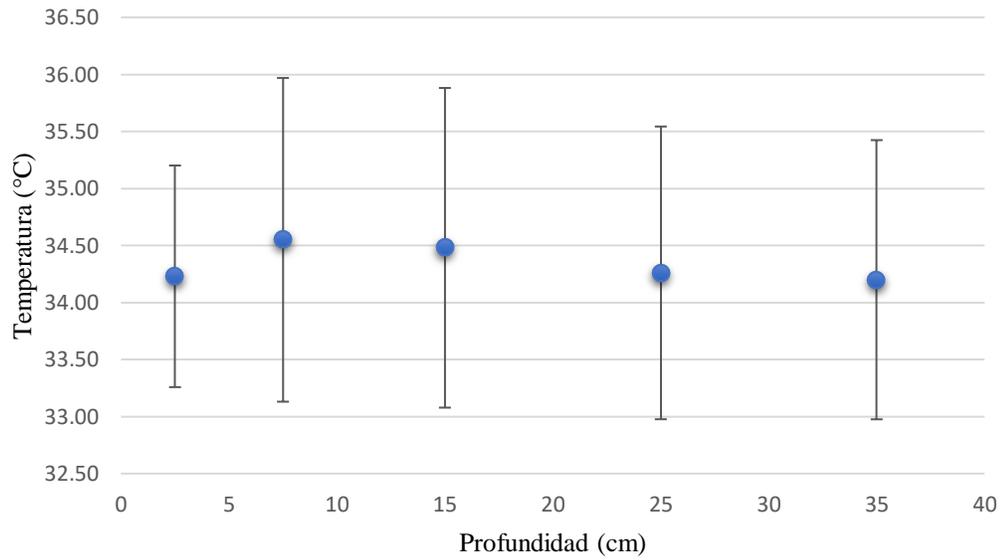
Anexo 10. Curva de contenido de humedad gravimétrica.



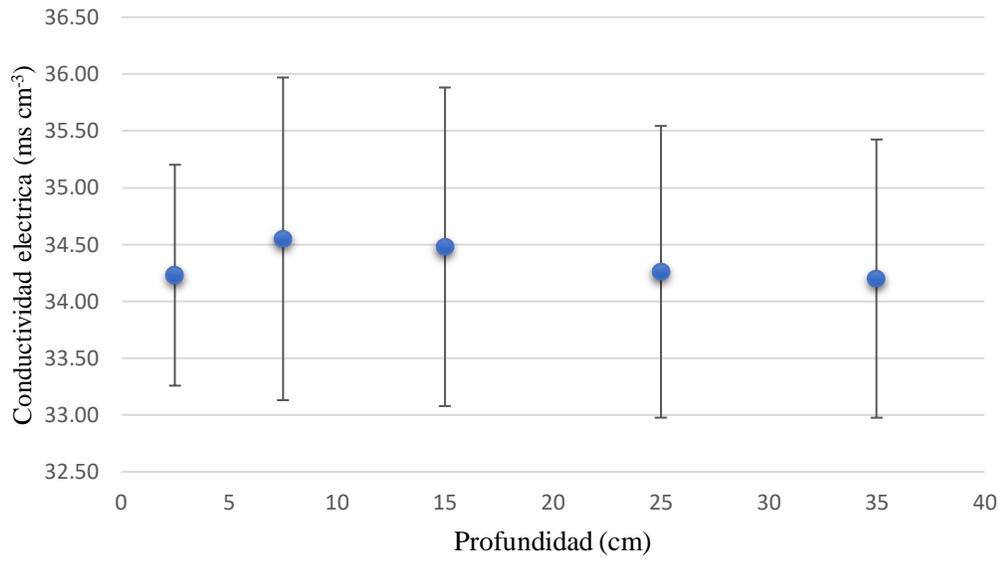
Anexo 11. Curva de contenido de humedad volumétrica.



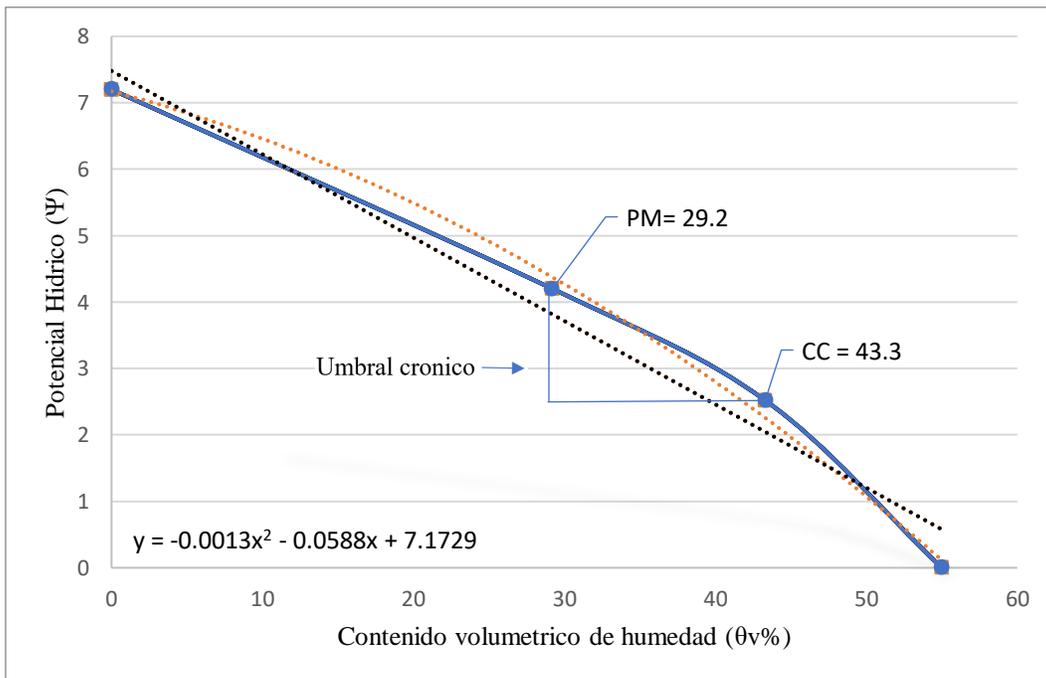
Anexo 12. Curva de temperatura del perfil del suelo.



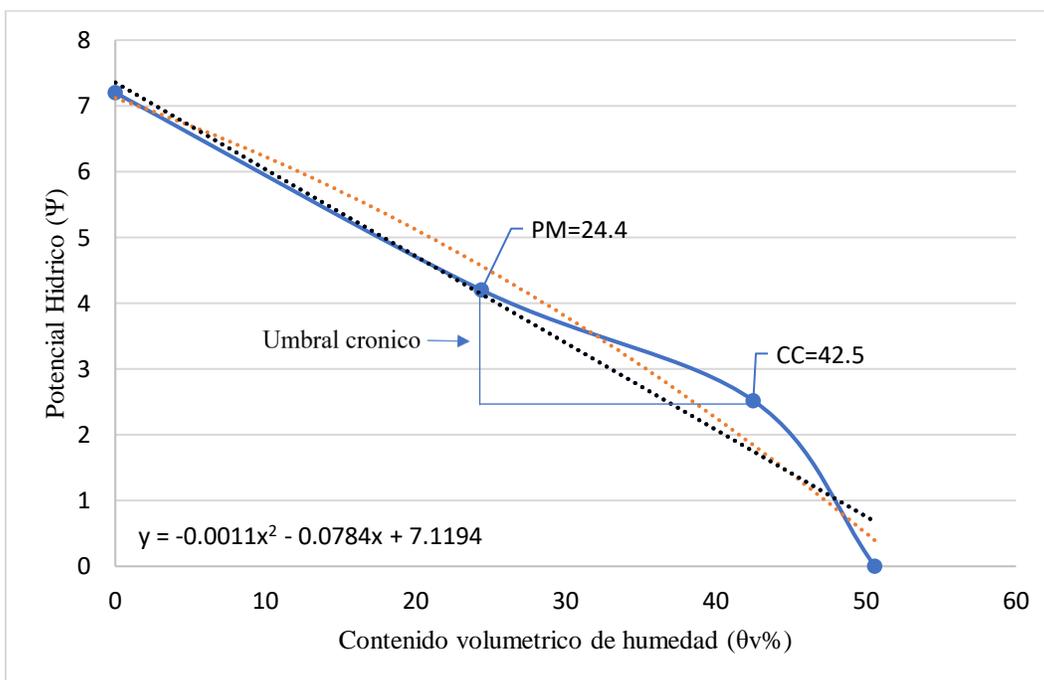
Anexo 13. Curva de conductividad eléctrica.



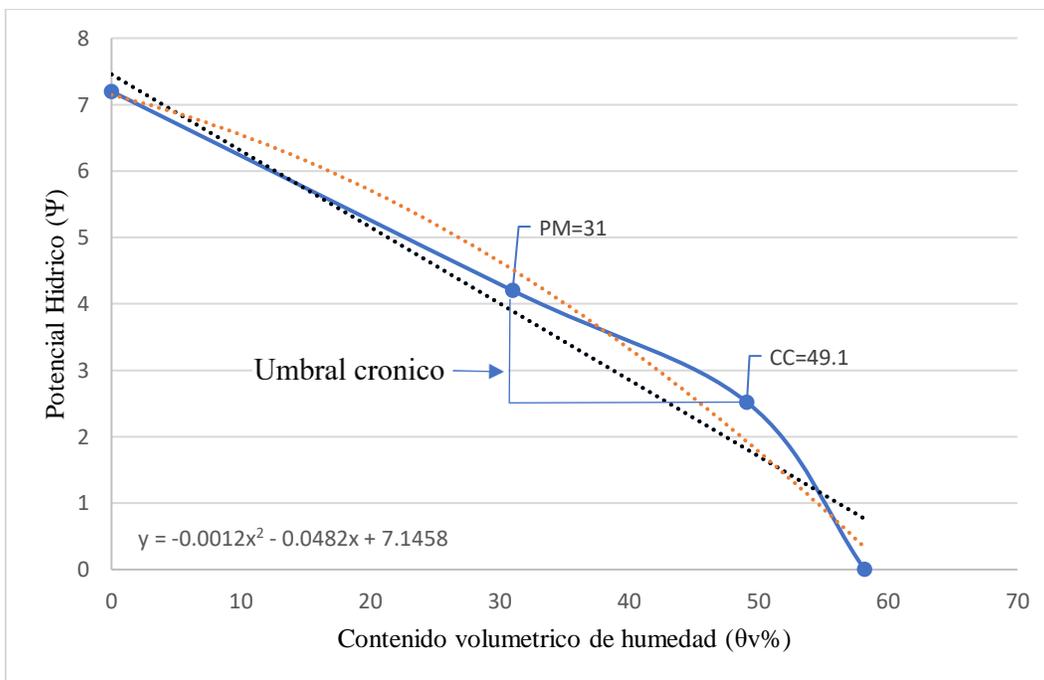
Anexo 14. Curva de retención calicata 1 perfil 00 - 05 cm.



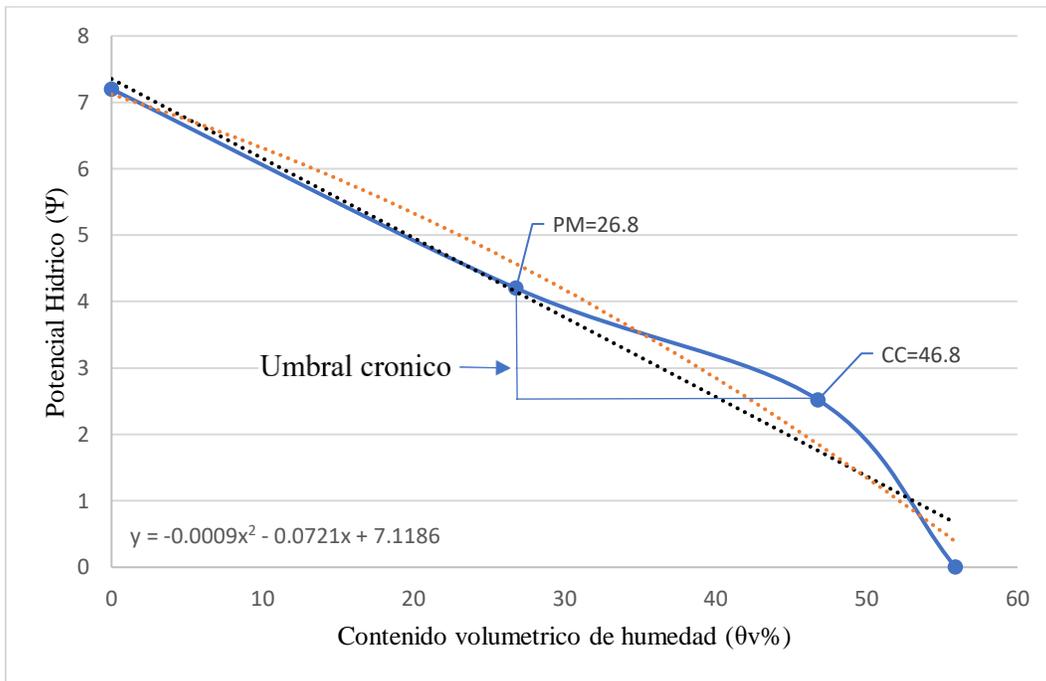
Anexo 15. Curva de retención calicata 1 perfil 05 - 10 cm.



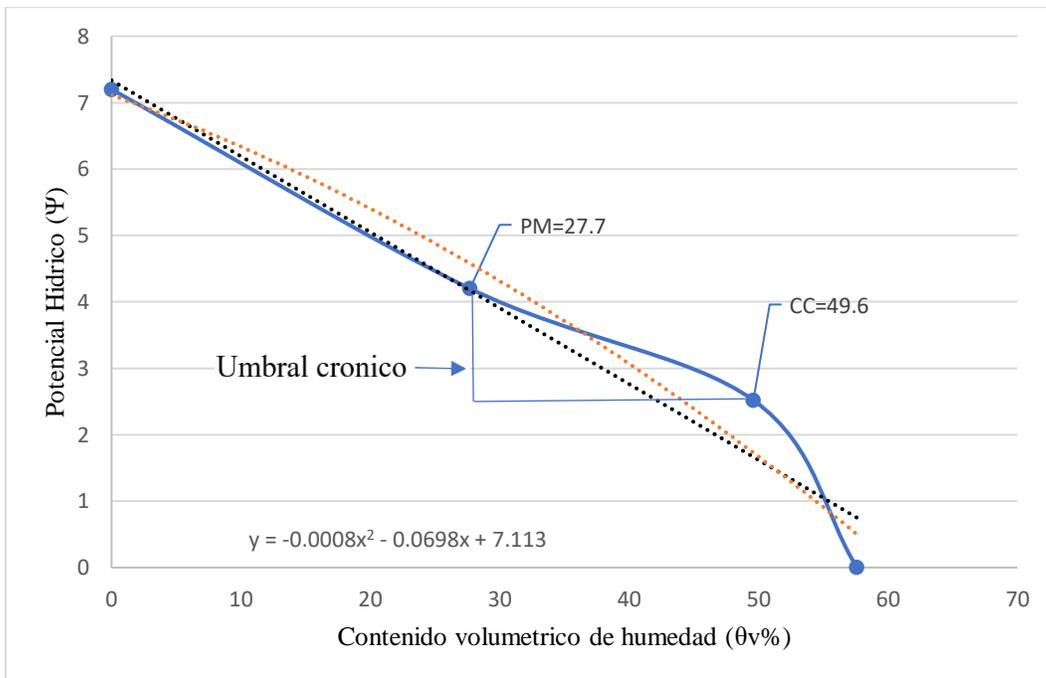
Anexo 16. Curva de retención calicata 1 perfil 10 - 20 cm.



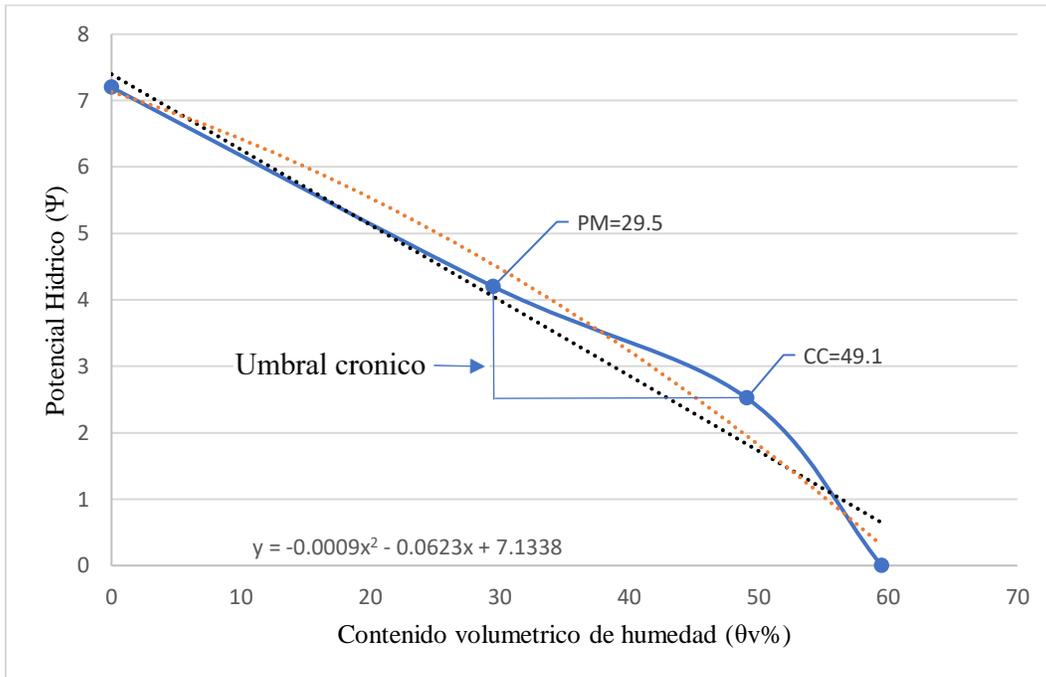
Anexo 17. Curva de retención calicata 1 perfil 20 - 30 cm.



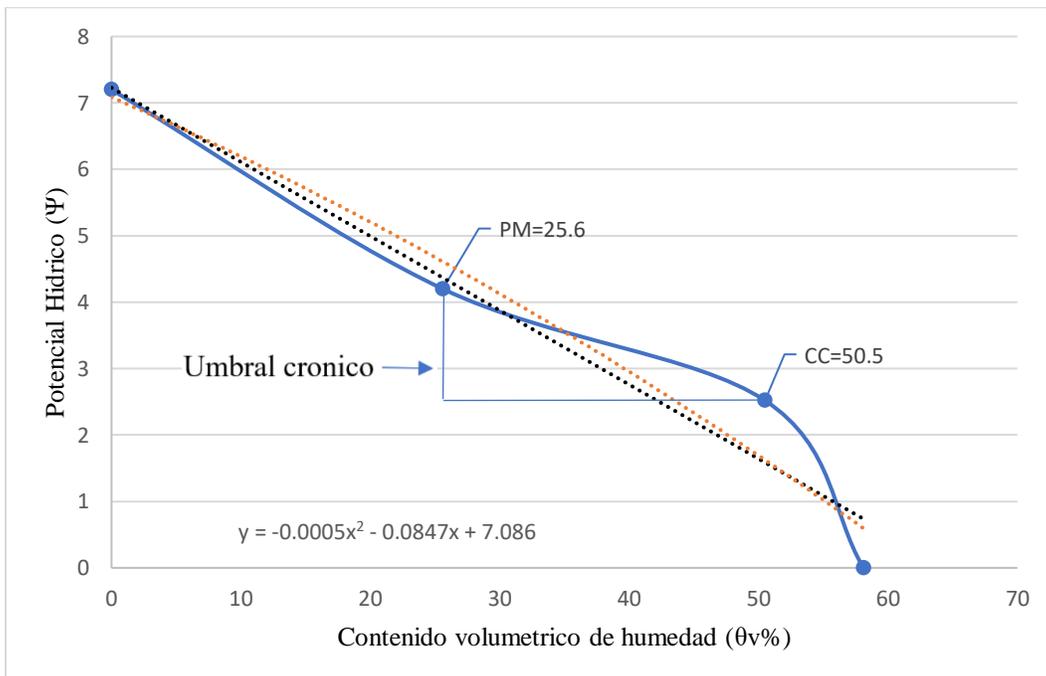
Anexo 18. Curva de retención calicata 1 perfil 30 - 40 cm.



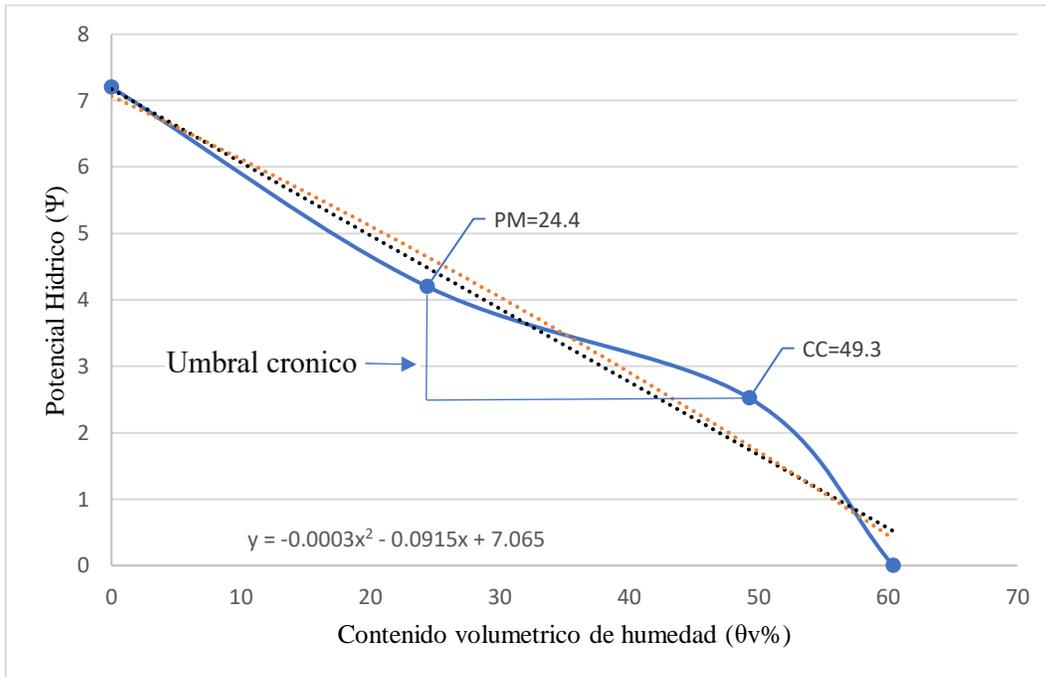
Anexo 19. Curva de retención calicata 2 perfil 0 - 5 cm.



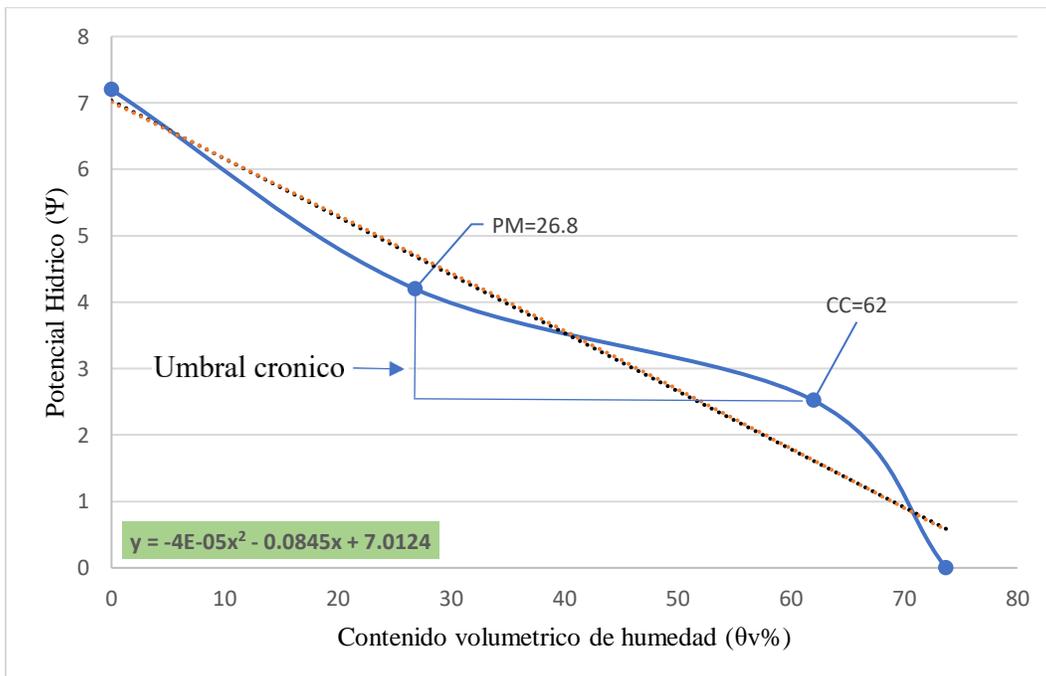
Anexo 20. Curva de retención calicata 2 perfil 5 - 10 cm.



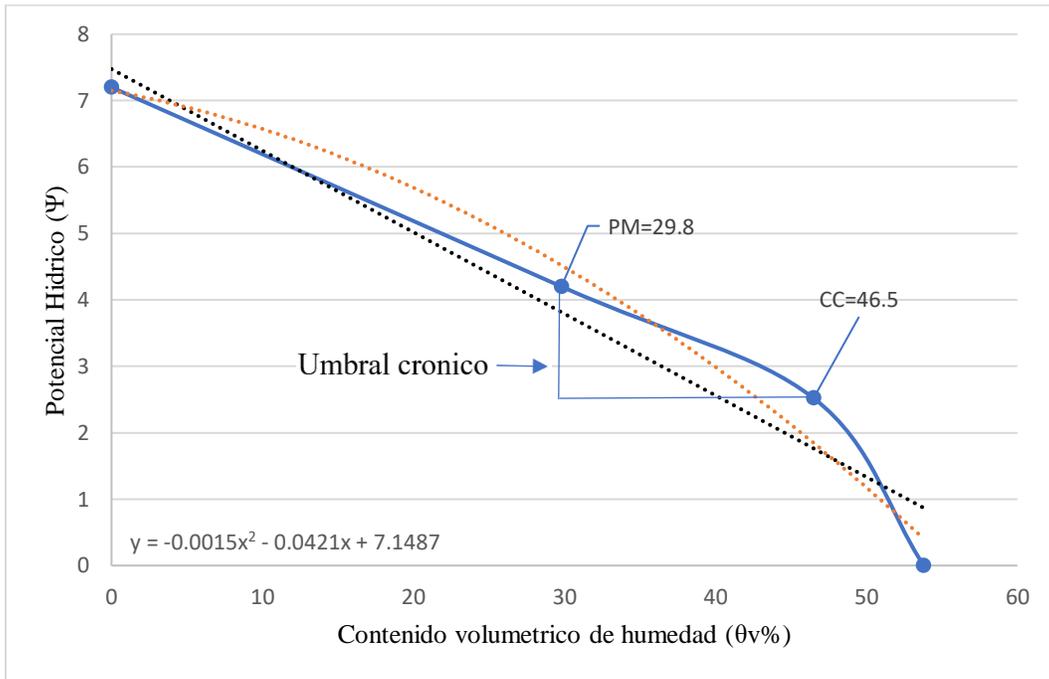
Anexo 21. Curva de retención calicata 2 perfil 10 - 20 cm.



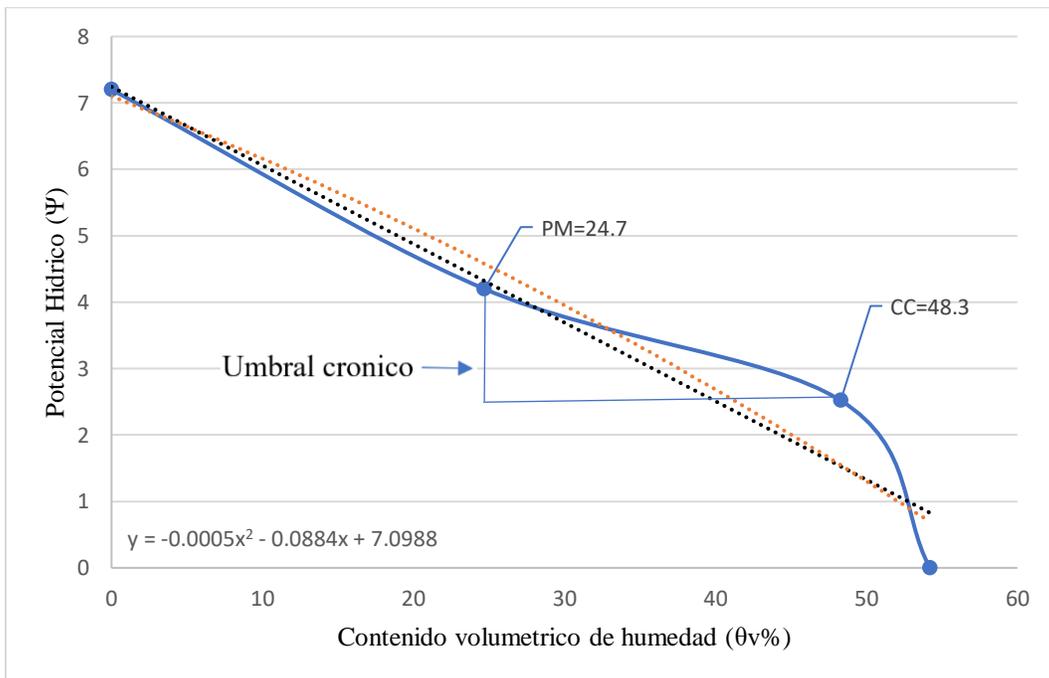
Anexo 22. Curva de retención calicata 2 perfil 20 - 30 cm.



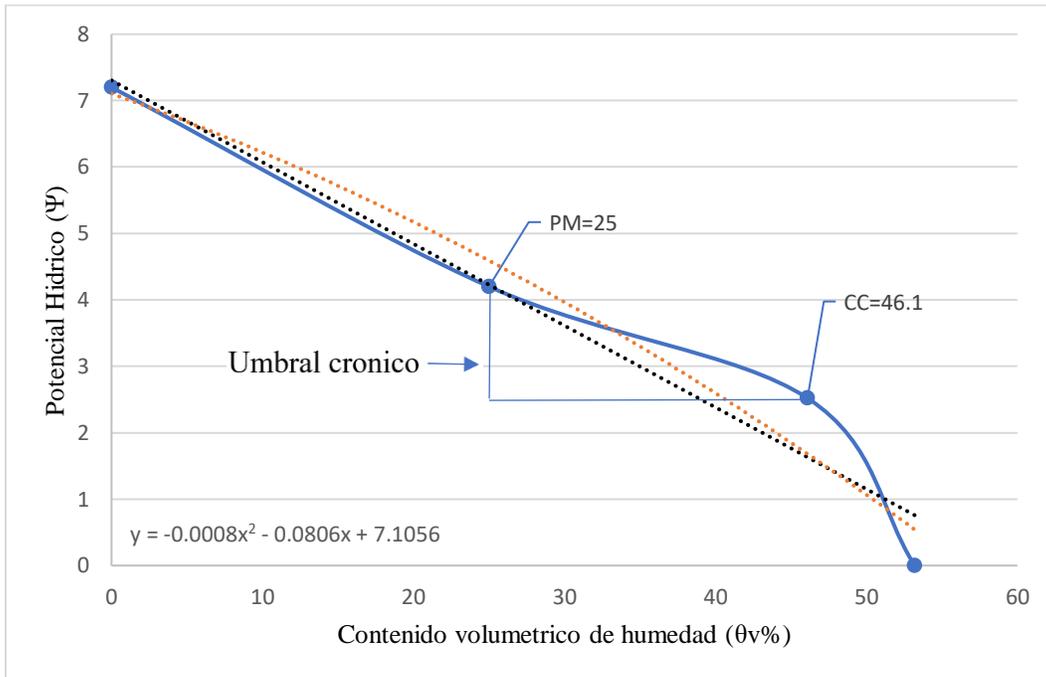
Anexo 23. Curva de retención calicata 2 perfil 30 - 40 cm.



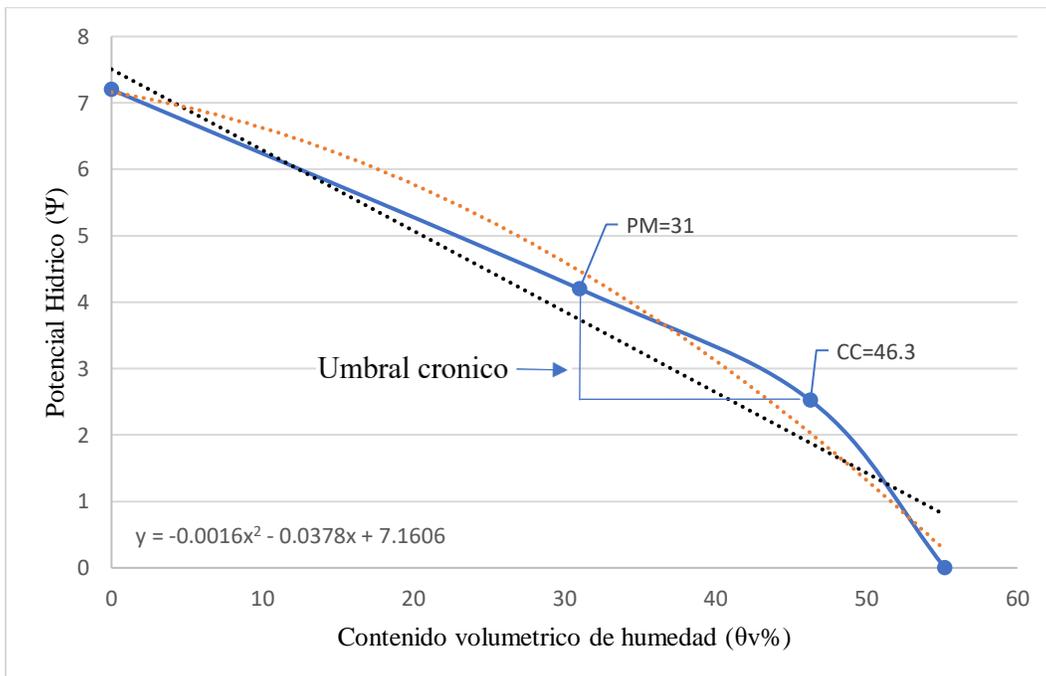
Anexo 24. Curva de retención calicata 3 perfil 0 - 5 cm.



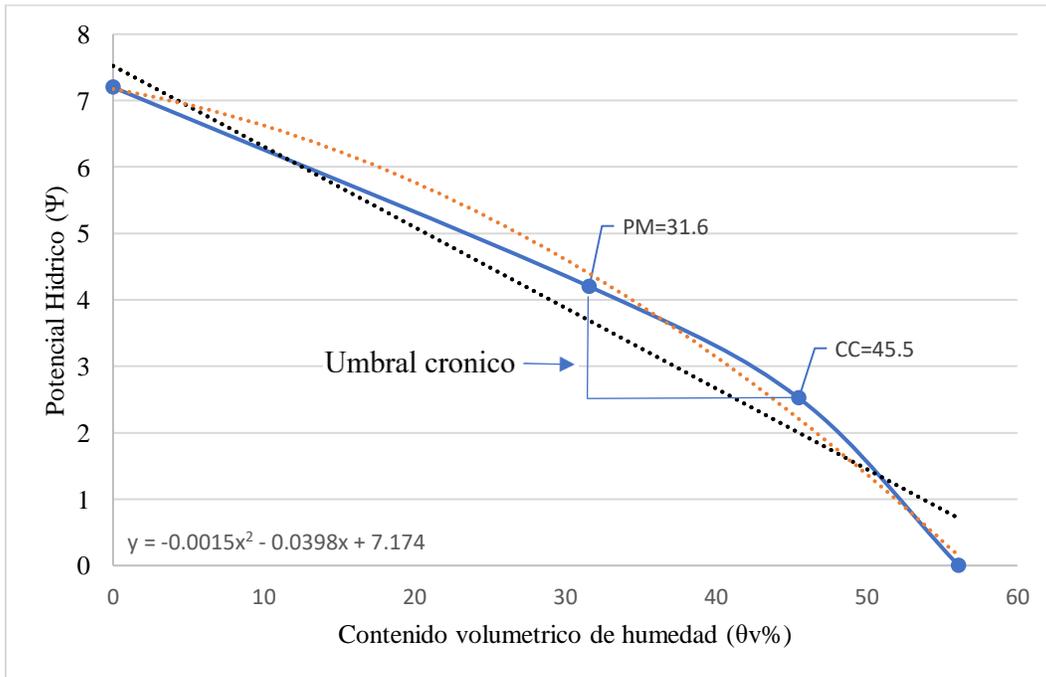
Anexo 25. Curva de retención calicata 3 perfil 5 - 10 cm.



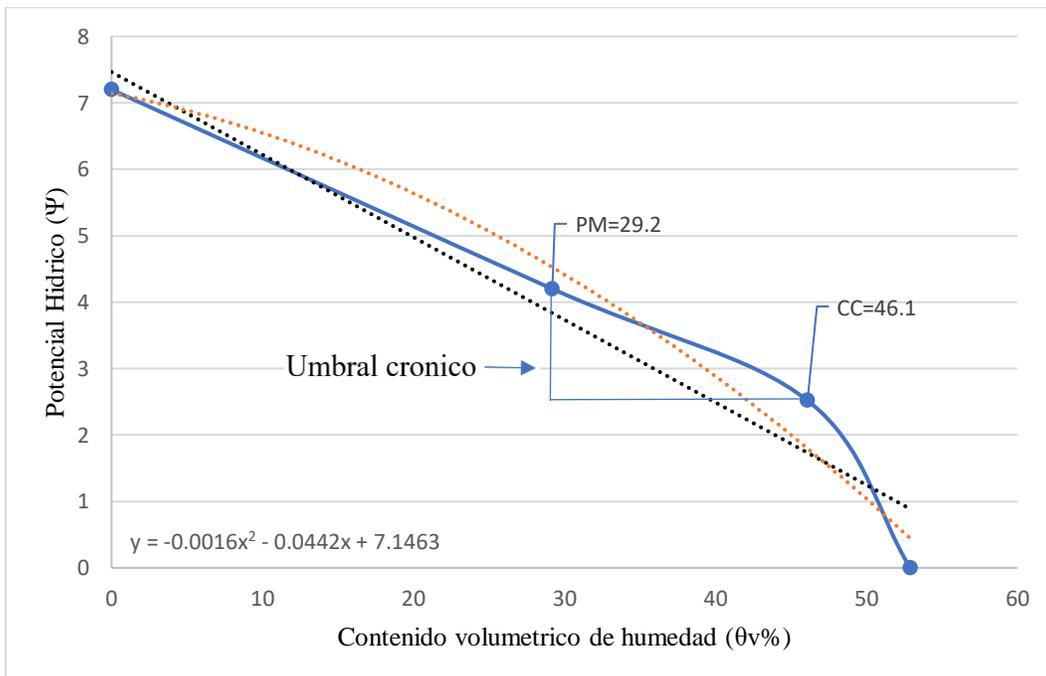
Anexo 26. Curva de retención calicata 3 perfil 10 - 20 cm.



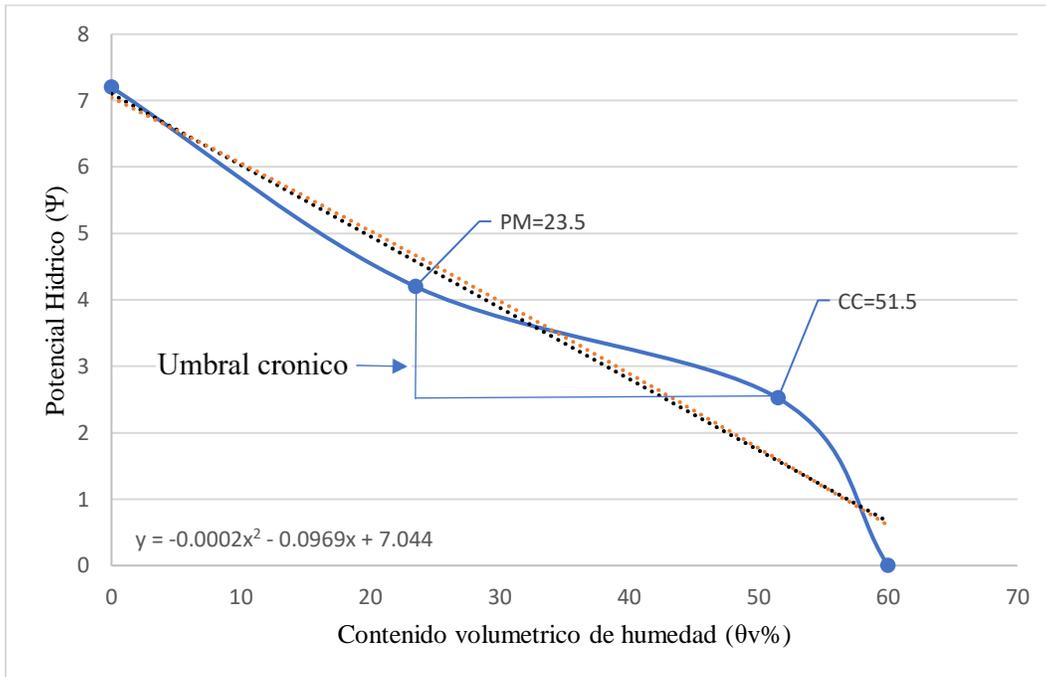
Anexo 27. Curva de retención calicata 3 perfil 20 - 30 cm.



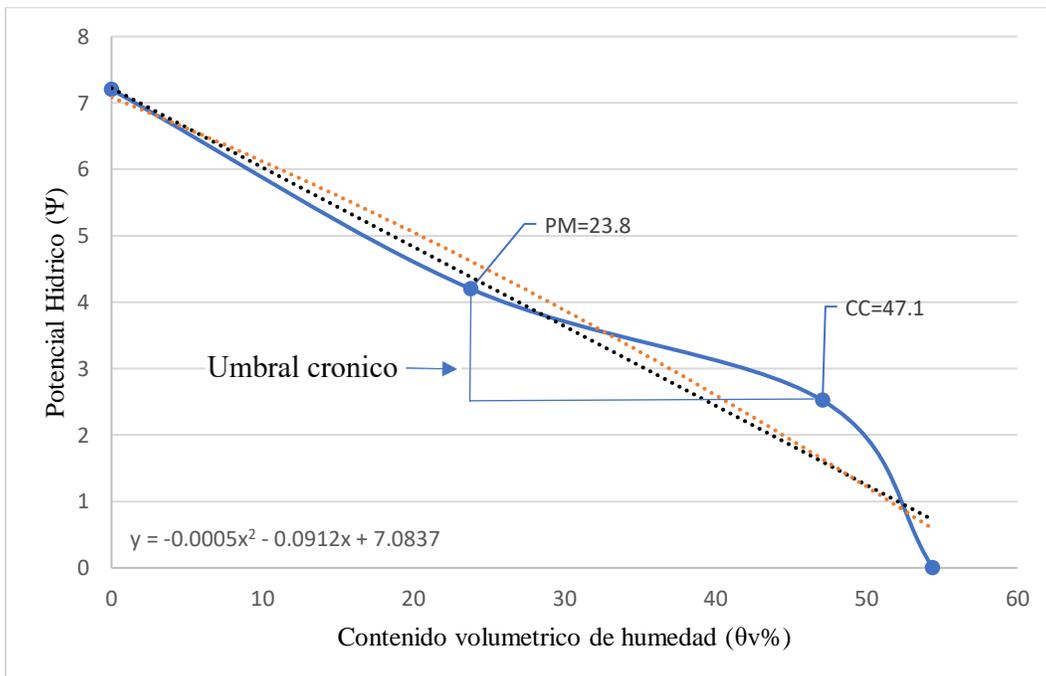
Anexo 28. Curva de retención calicata 3 perfil 30 - 40 cm.



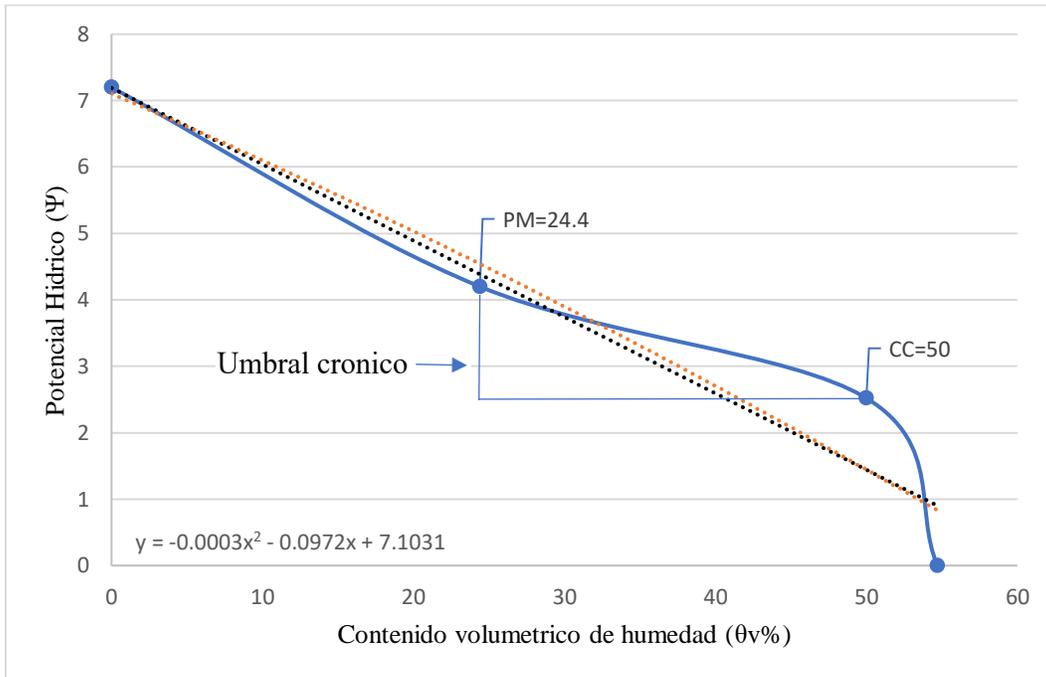
Anexo 29. Curva de retención calicata 4 perfil 0 - 5 cm.



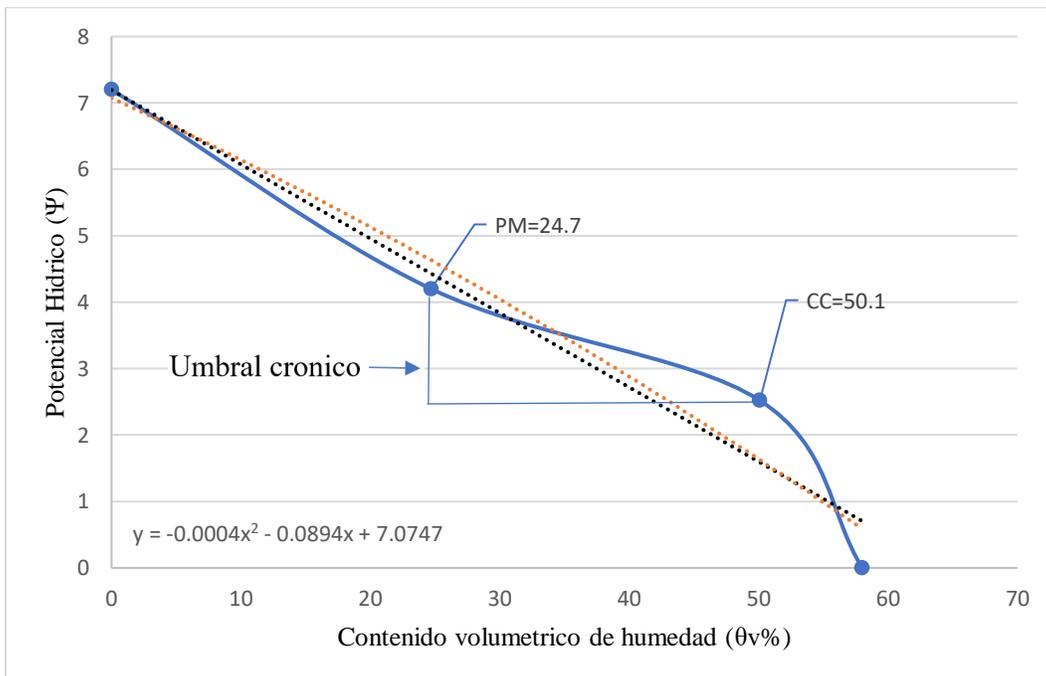
Anexo 30. Curva de retención calicata 4 perfil 5 - 10 cm.



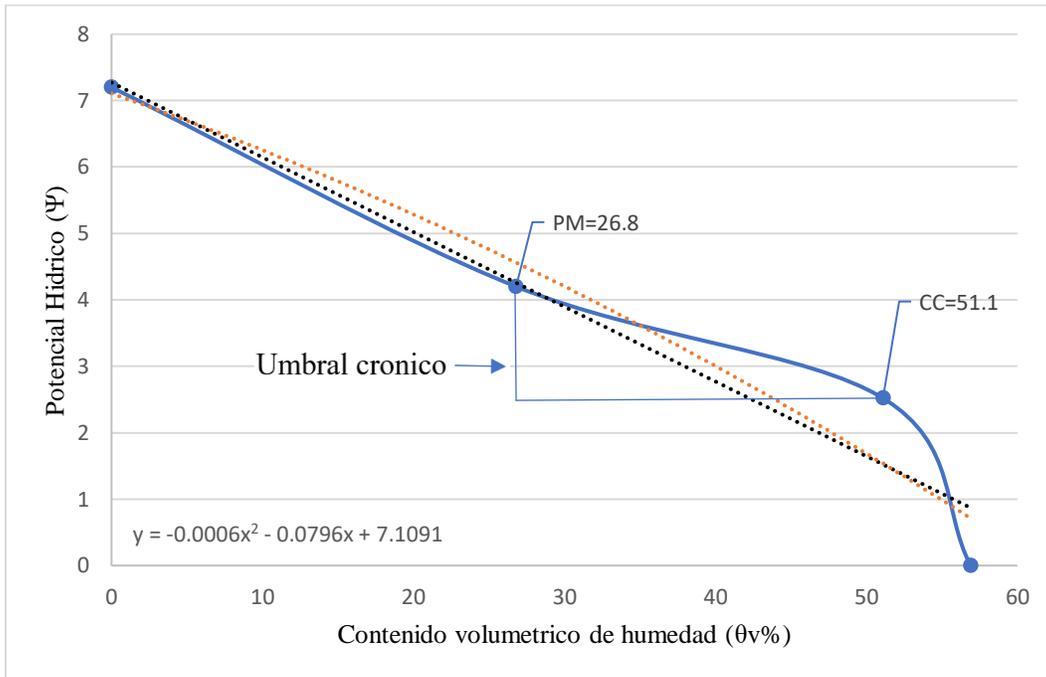
Anexo 31. Curva de retención calicata 4 perfil 10 - 20 cm.



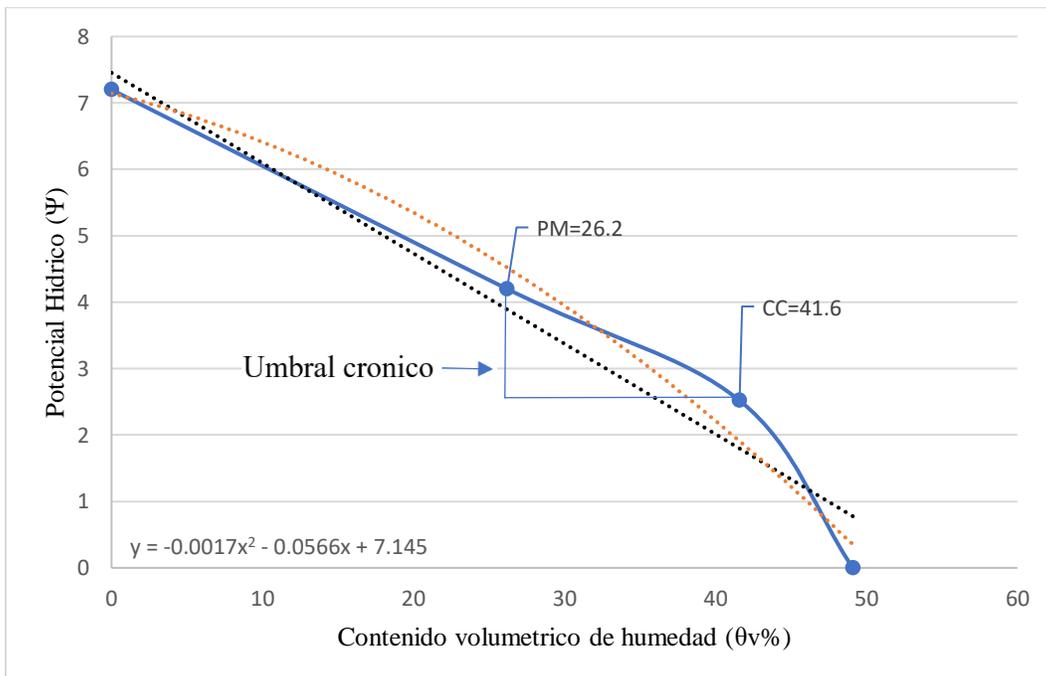
Anexo 32. Curva de retención calicata 4 perfil 20 - 30 cm.



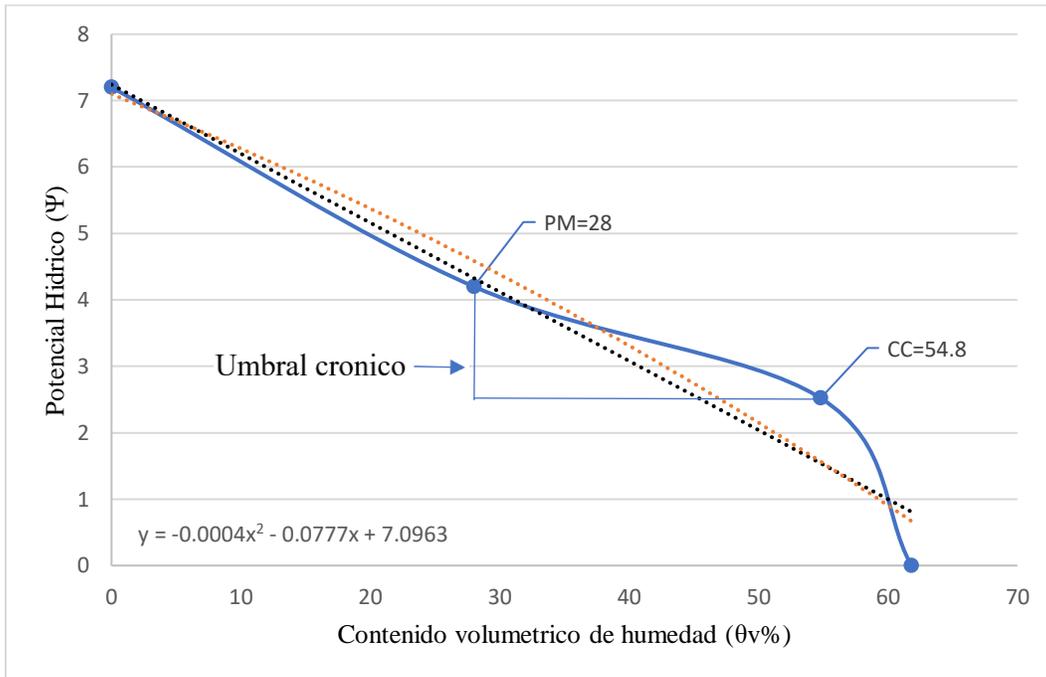
Anexo 33. Curva de retención calicata 4 perfil 30 - 40 cm.



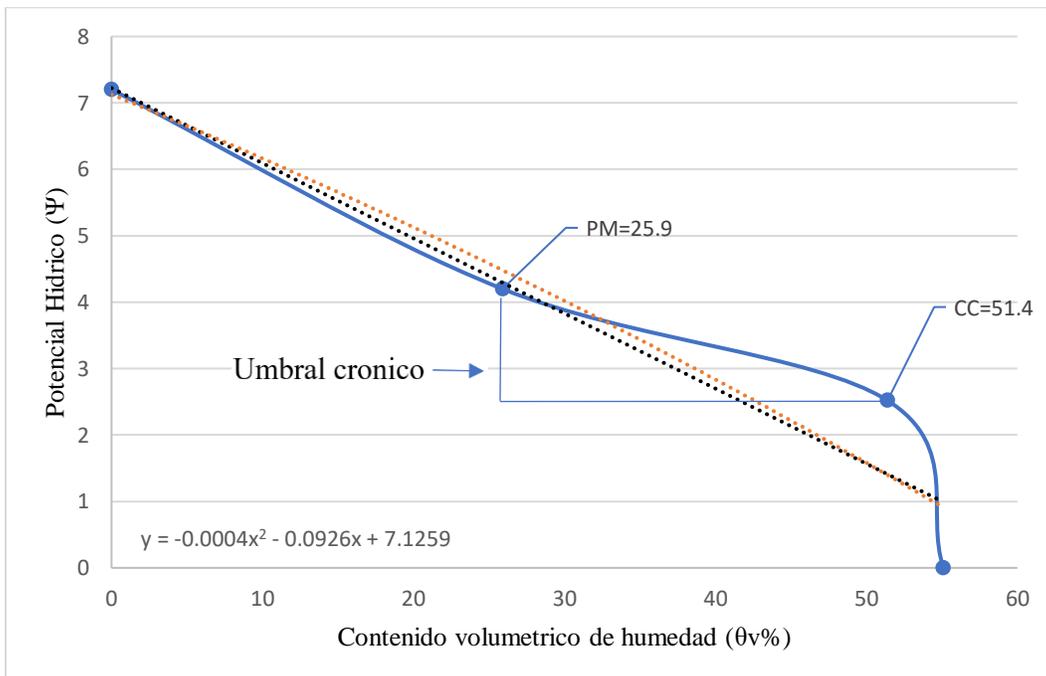
Anexo 34. Curva de retención calicata 5 perfil 0 - 5 cm.



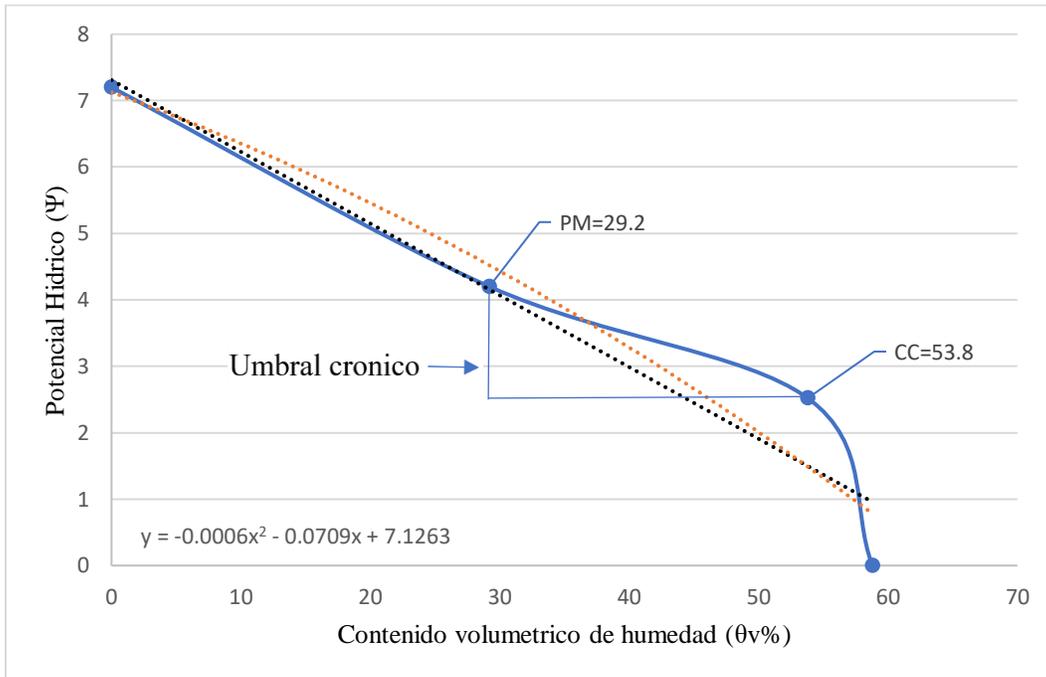
Anexo 35. Curva de retención calicata 5 perfil 5 - 10 cm.



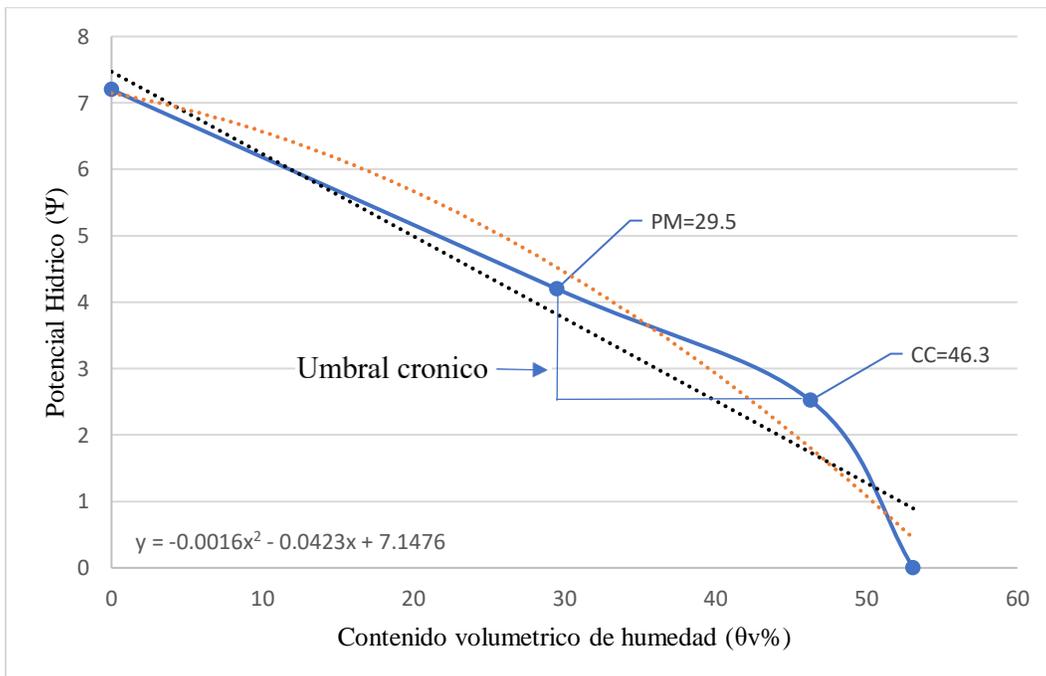
Anexo 36. Curva de retención calicata 5 perfil 10 - 20 cm.



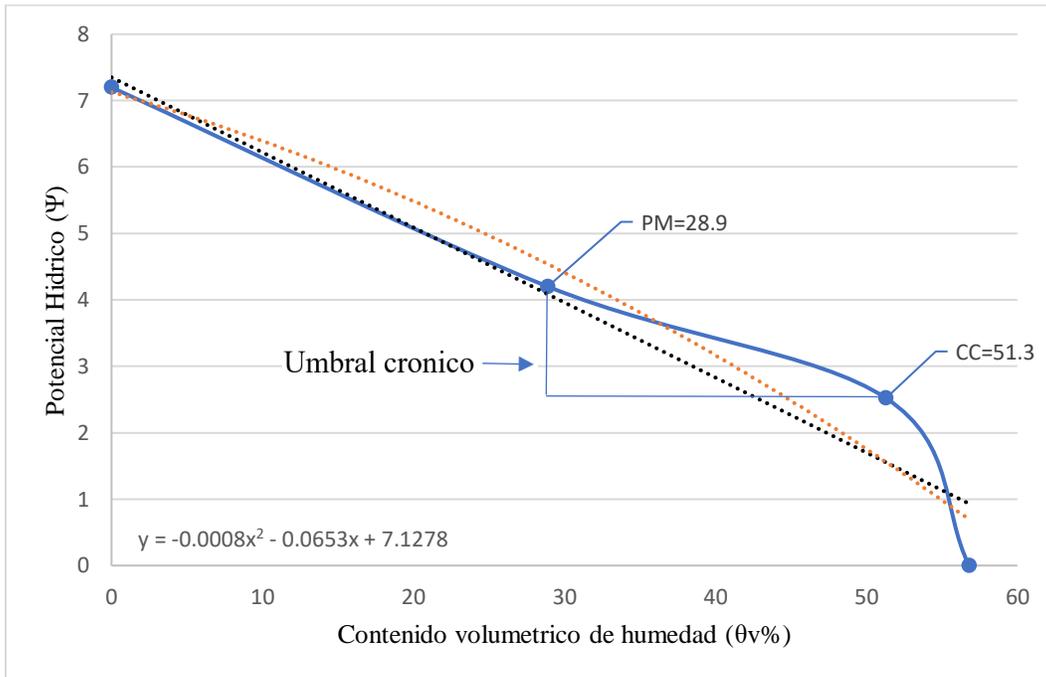
Anexo 37. Curva de retención calicata 5 perfil 20 - 30 cm.



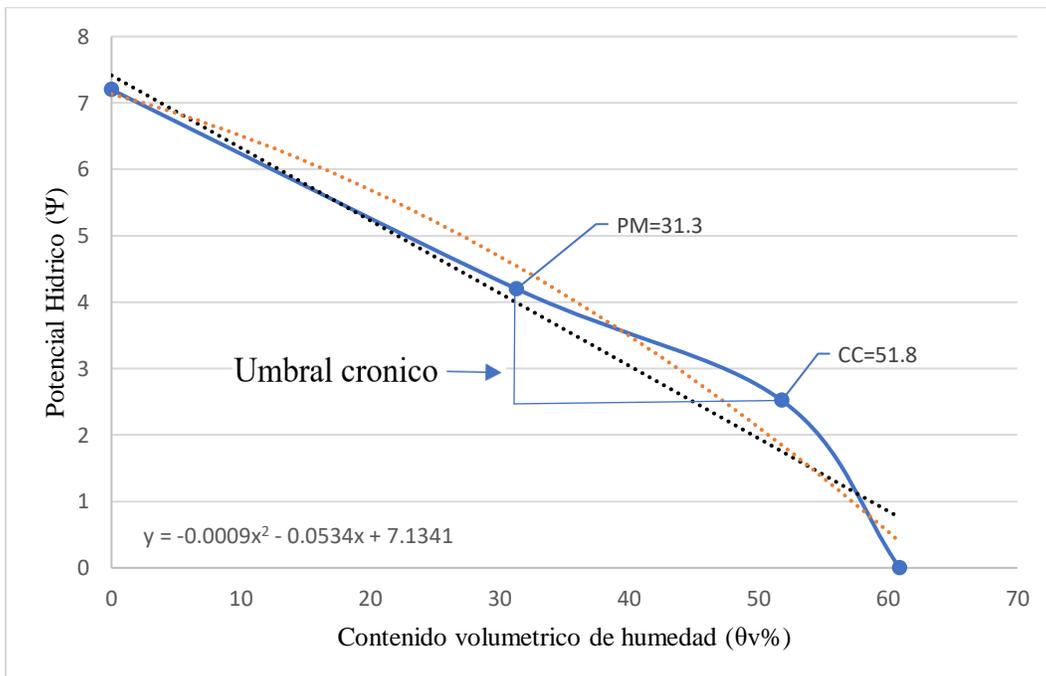
Anexo 38. Curva de retención calicata 5 perfil 30 - 40 cm.



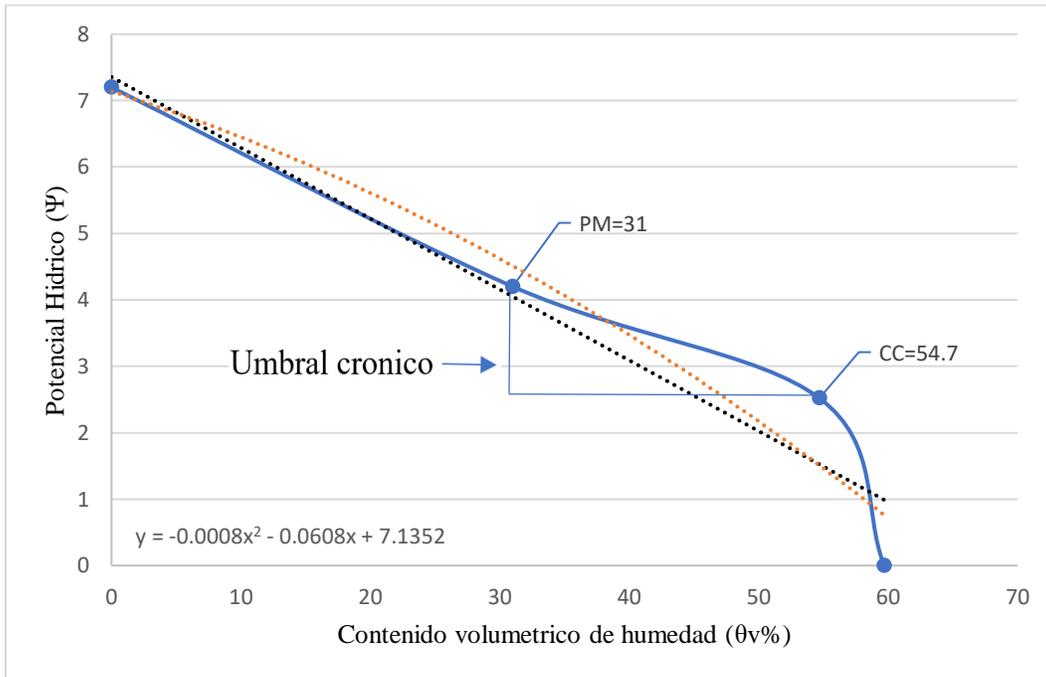
Anexo 39. Curva de retención calicata 6 perfil 0 - 5 cm.



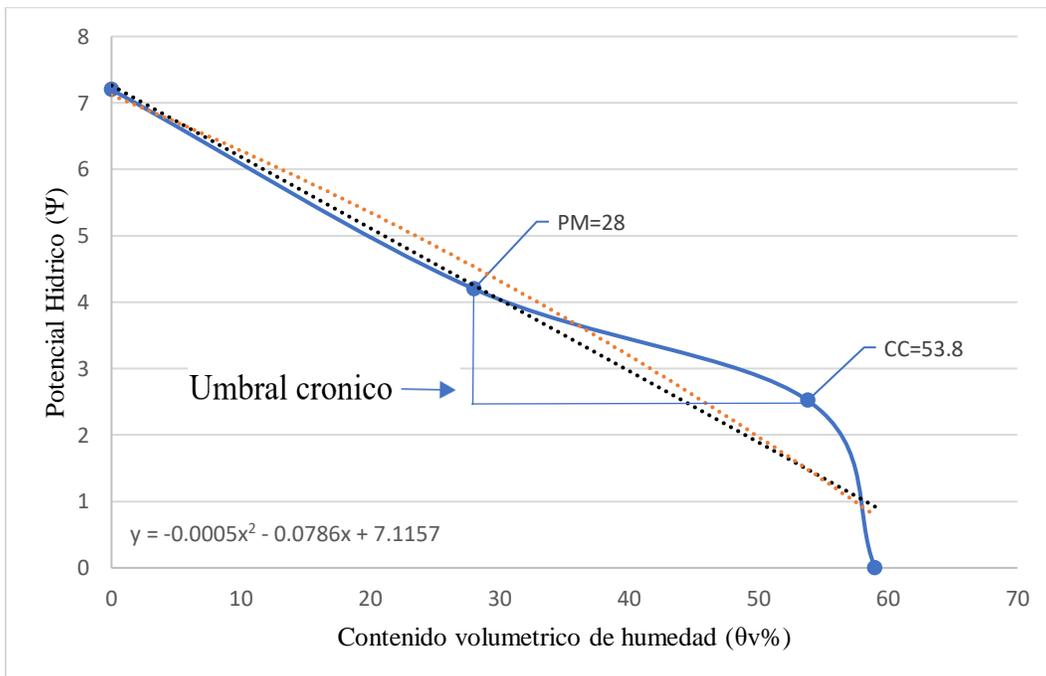
Anexo 40. Curva de retención calicata 6 perfil 5 - 10 cm.



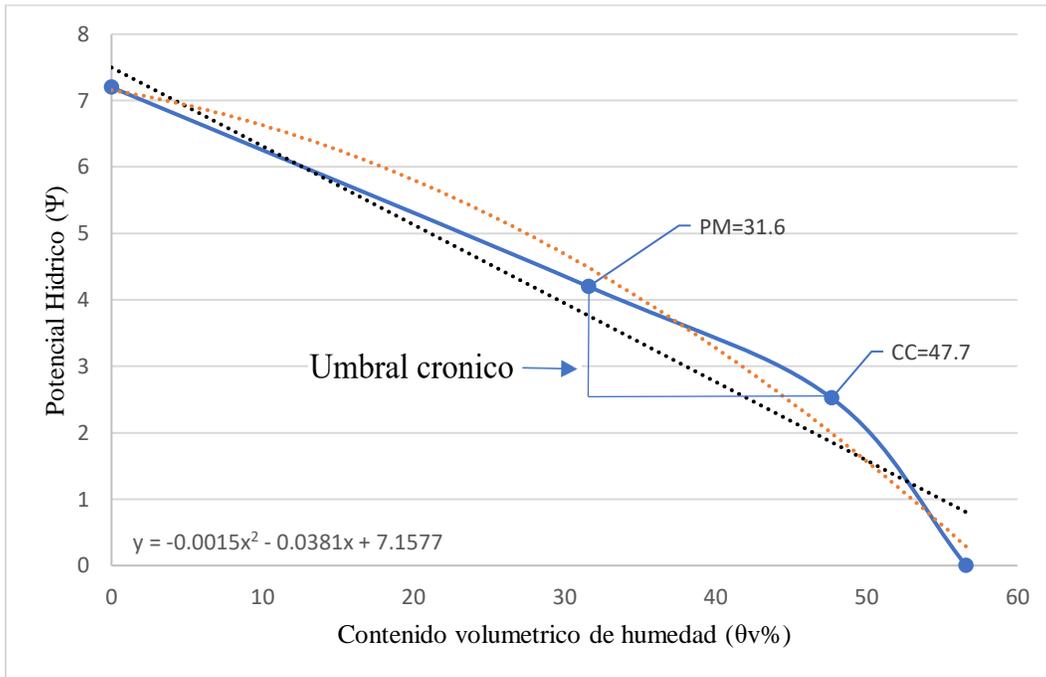
Anexo 41. Curva de retención calicata 6 perfil 10 - 20 cm.



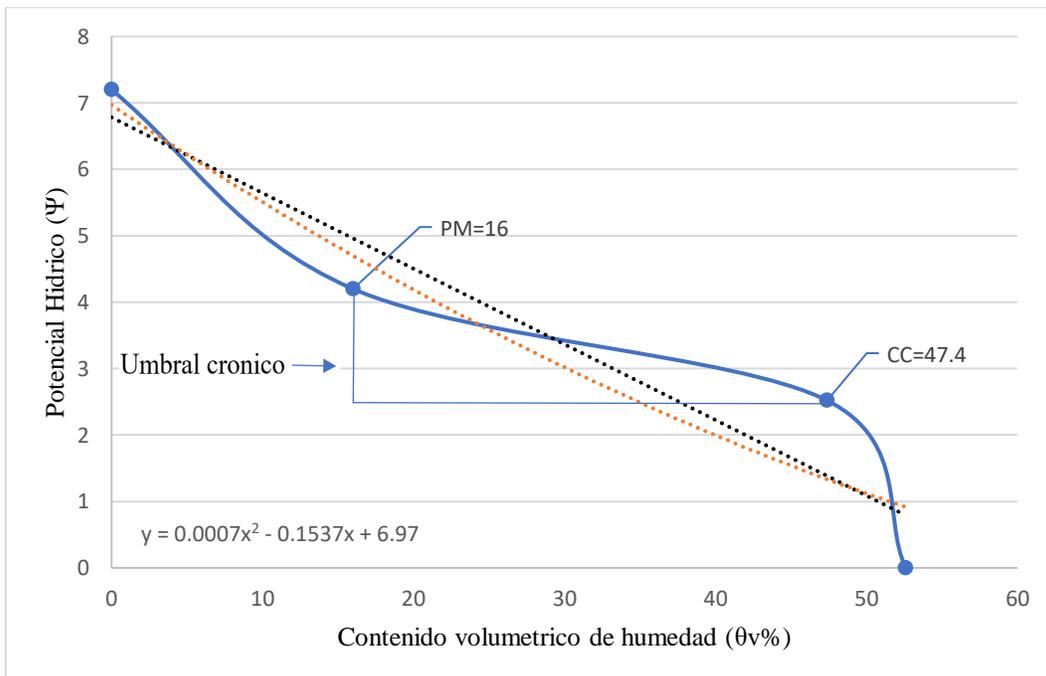
Anexo 42. Curva de retención calicata 6 perfil 20 - 30 cm.



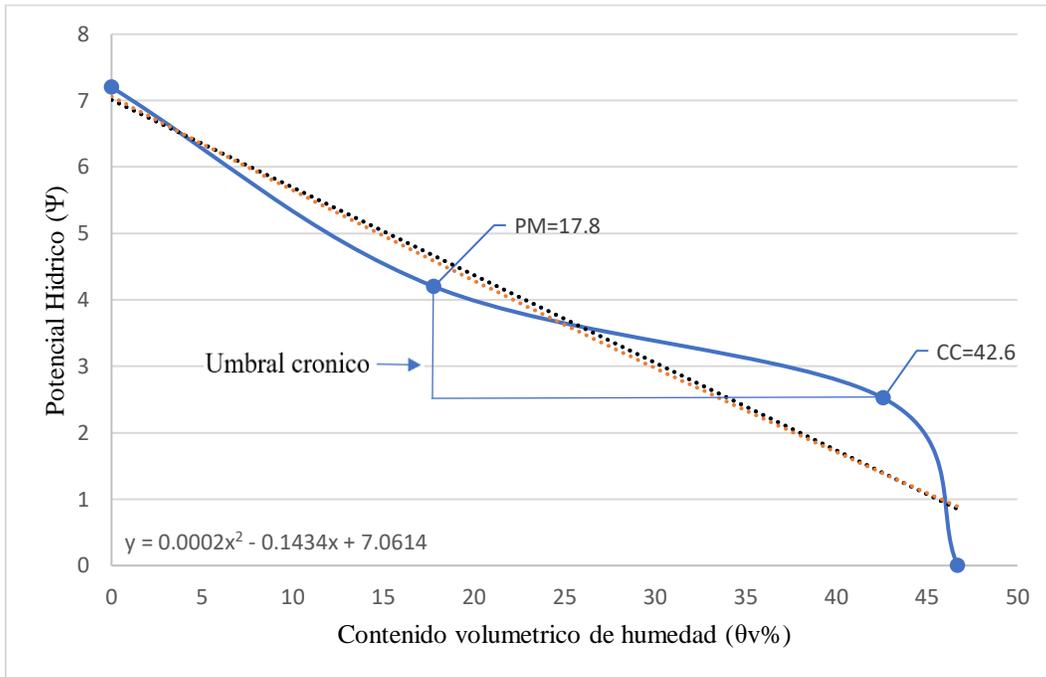
Anexo 43. Curva de retención calicata 6 perfil 30 - 40 cm.



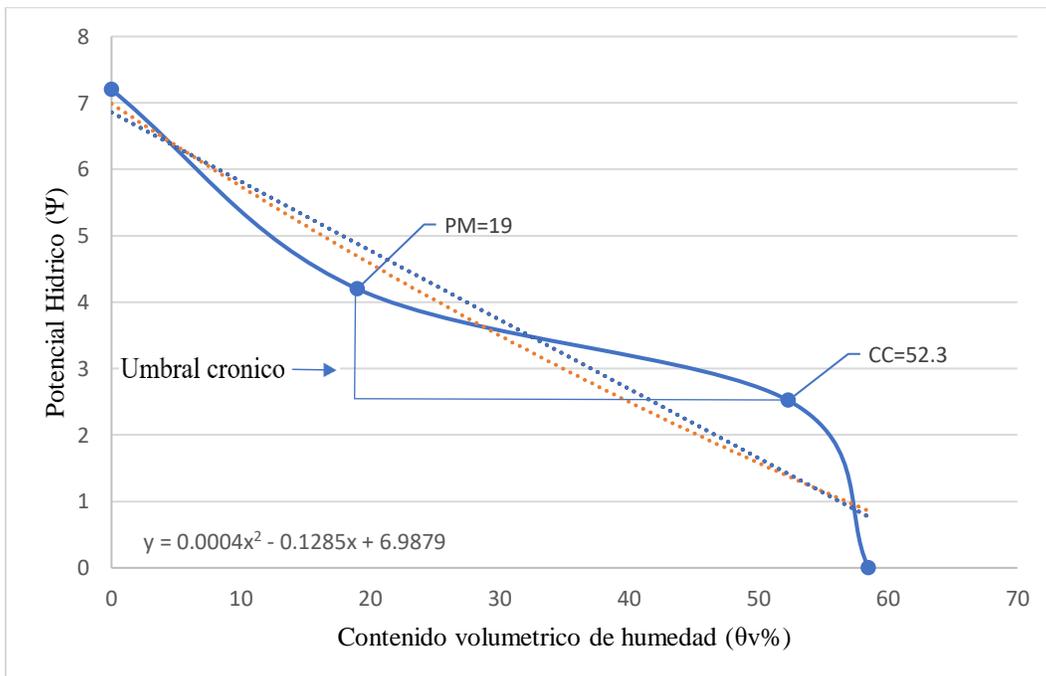
Anexo 44. Curva de retención calicata 7 perfil 0 - 5 cm.



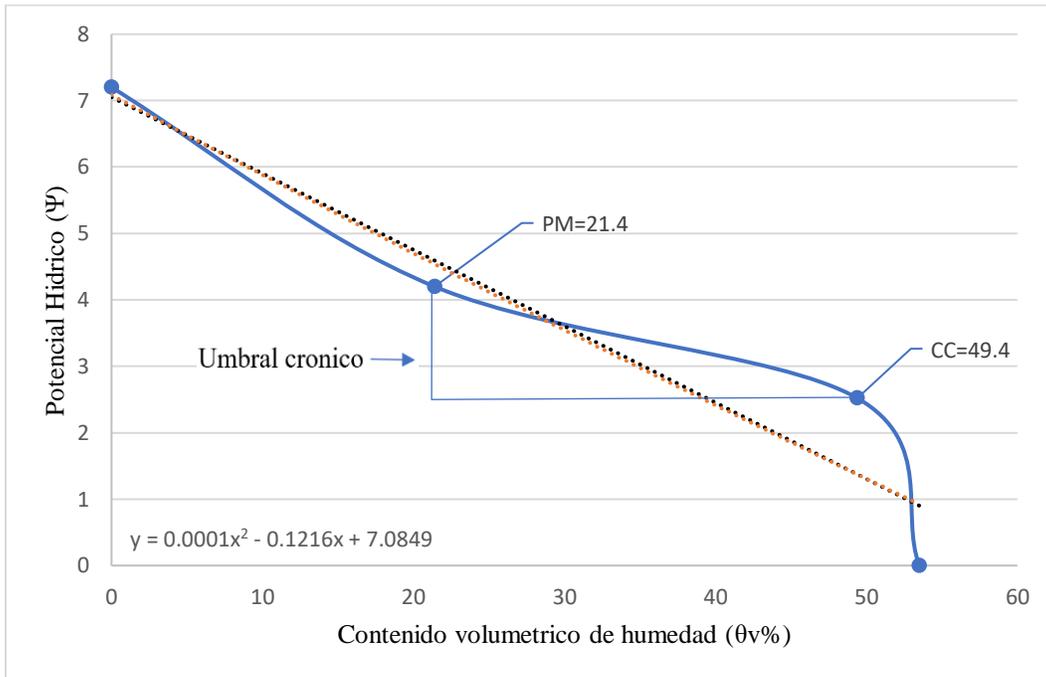
Anexo 45. Curva de retención calicata 7 perfil 5 - 10 cm.



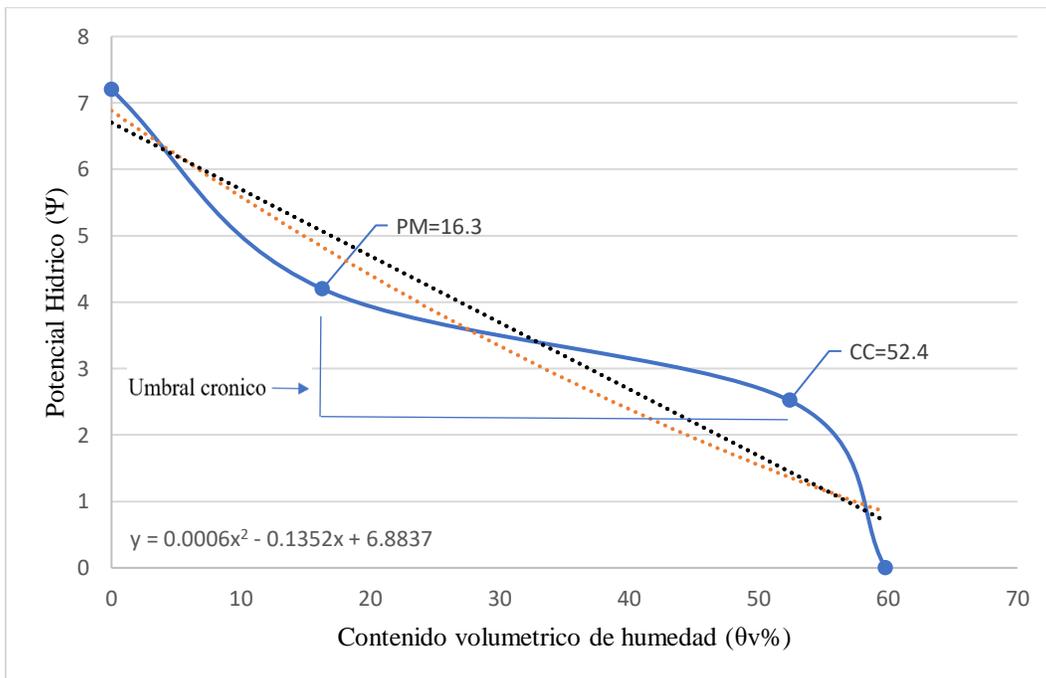
Anexo 46. Curva de retención calicata 7 perfil 10 - 20 cm.



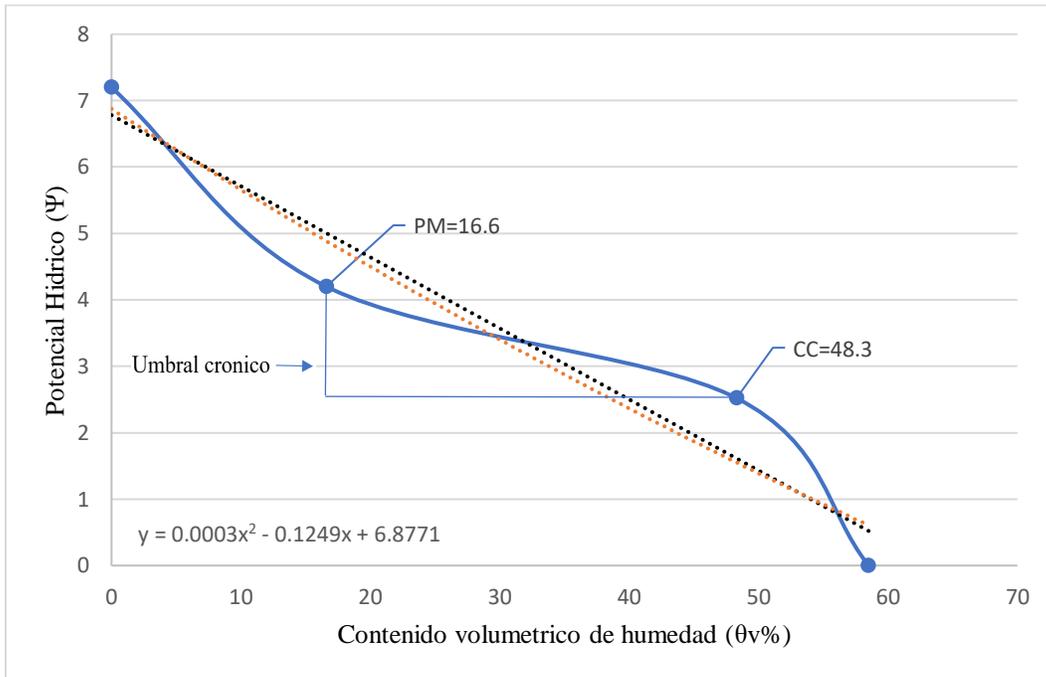
Anexo 47. Curva de retención calicata 7 perfil 20 - 30 cm.



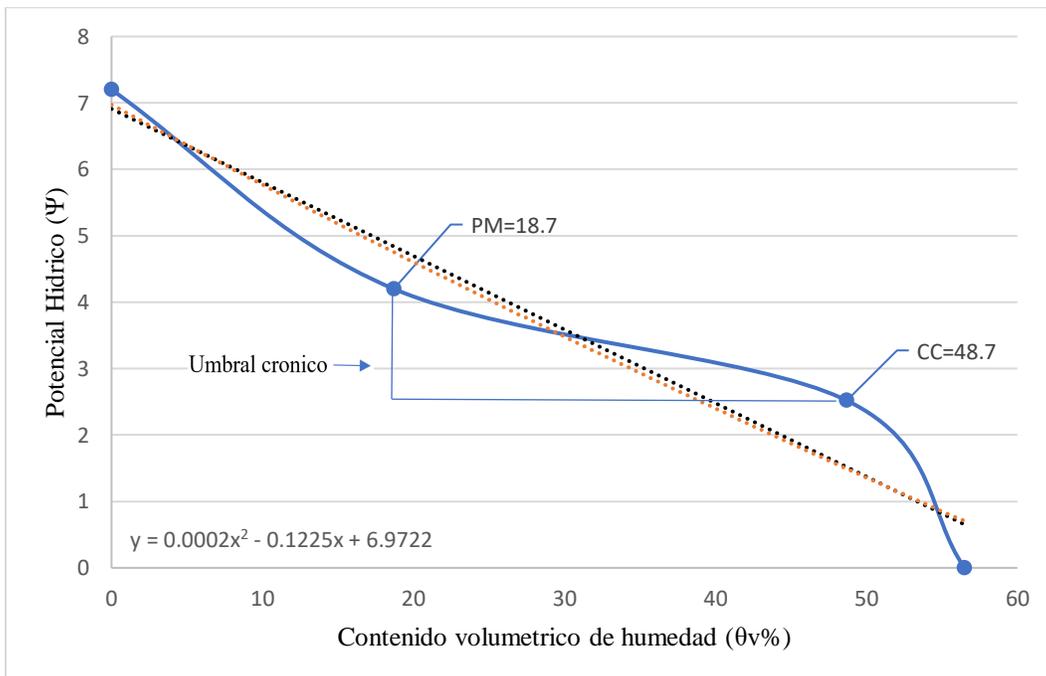
Anexo 48. Curva de retención calicata 7 perfil 30 - 40 cm.



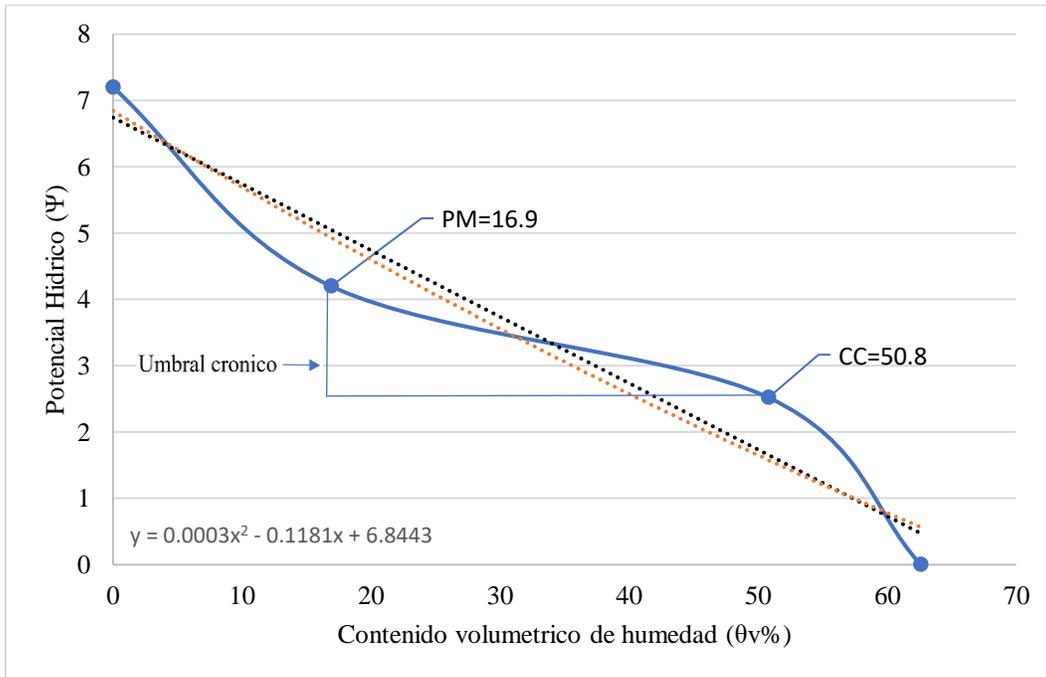
Anexo 49. Curva de retención calicata 8 perfil 0 - 5 cm.



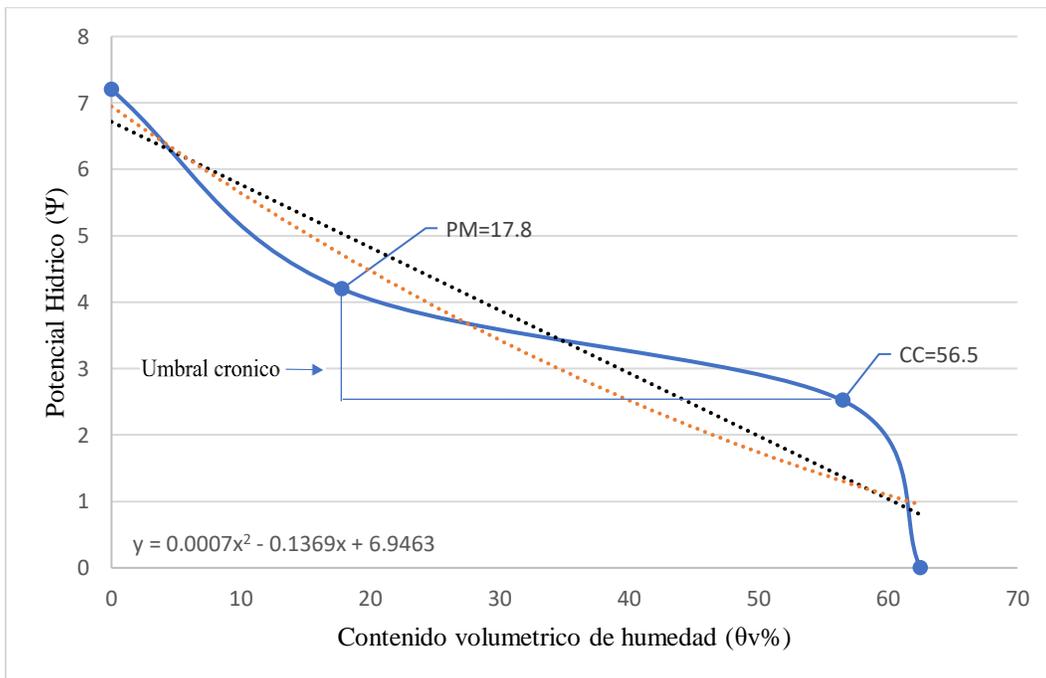
Anexo 50. Curva de retención calicata 8 perfil 5 - 10 cm.



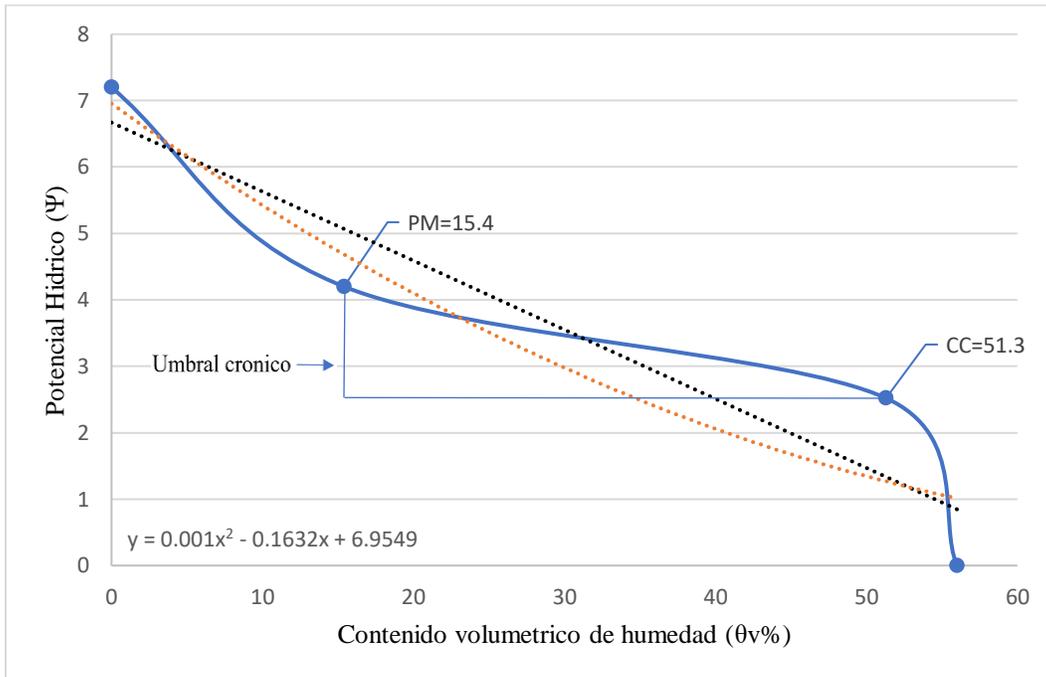
Anexo 51. Curva de retención calicata 8 perfil 10 - 20 cm.



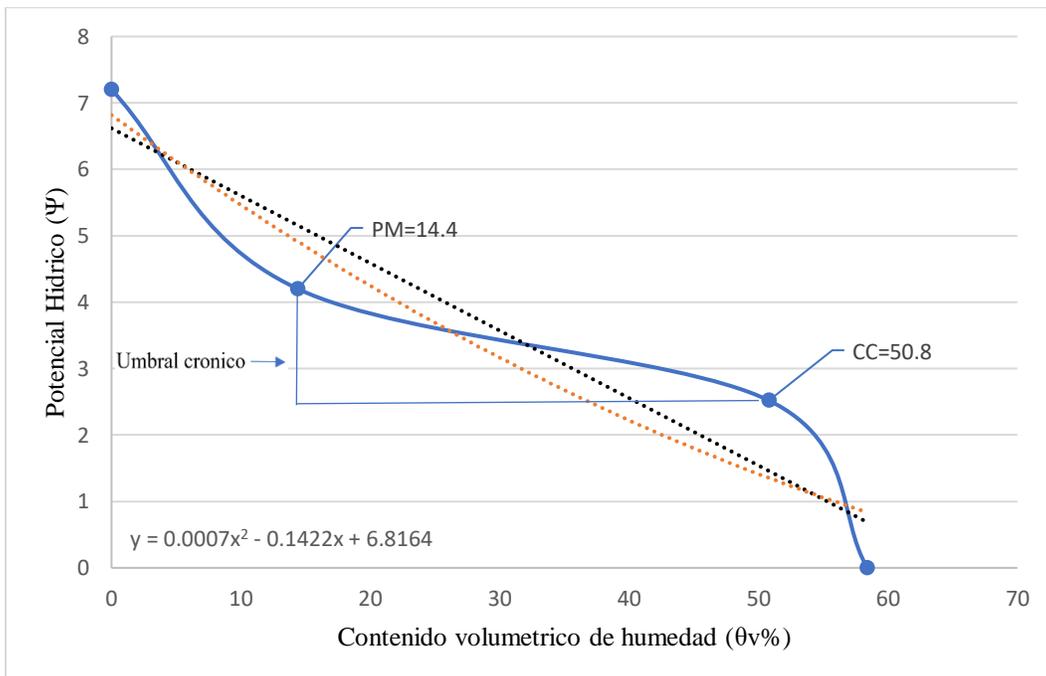
Anexo 52. Curva de retención calicata 8 perfil 20 - 30 cm.



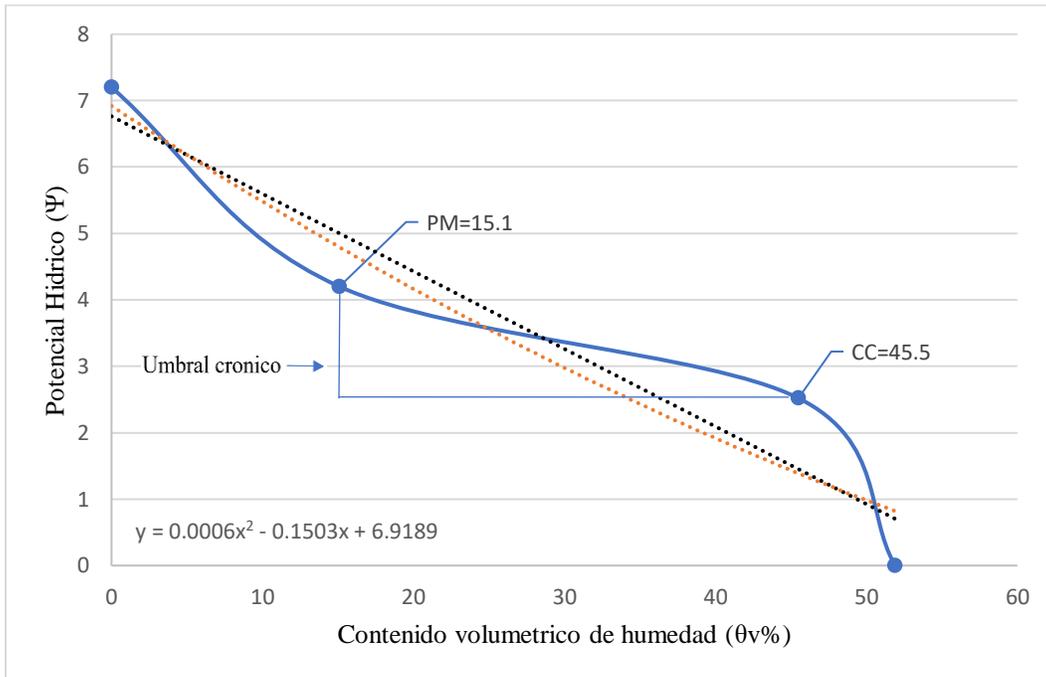
Anexo 53. Curva de retención calicata 8 perfil 30 - 40 cm.



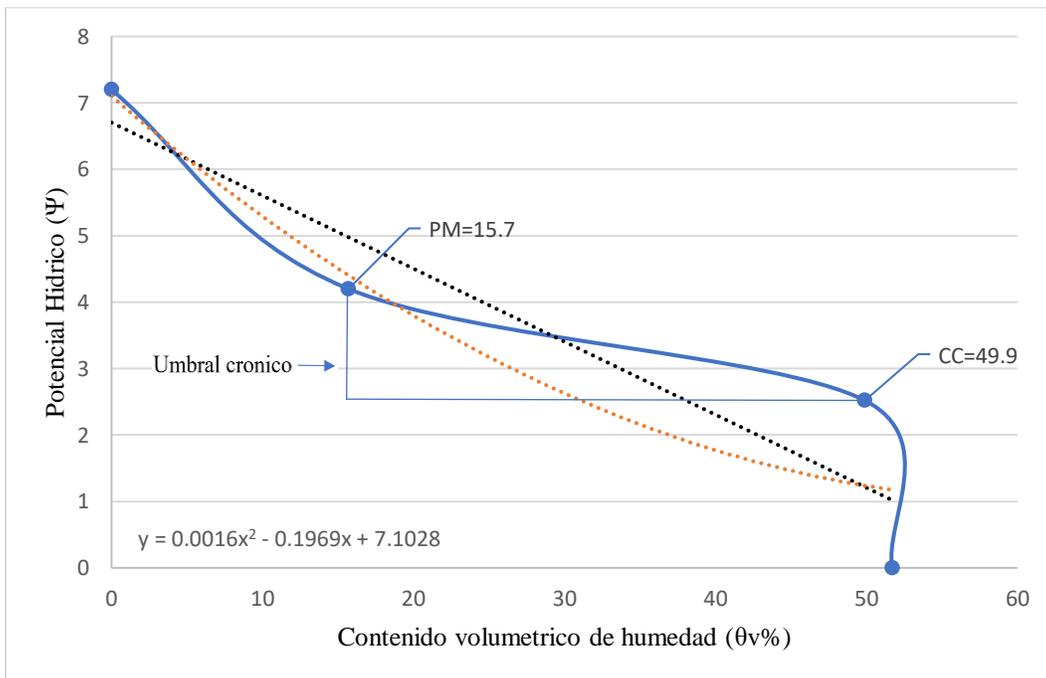
Anexo 54. Curva de retención calicata 9 perfil 0 - 5 cm.



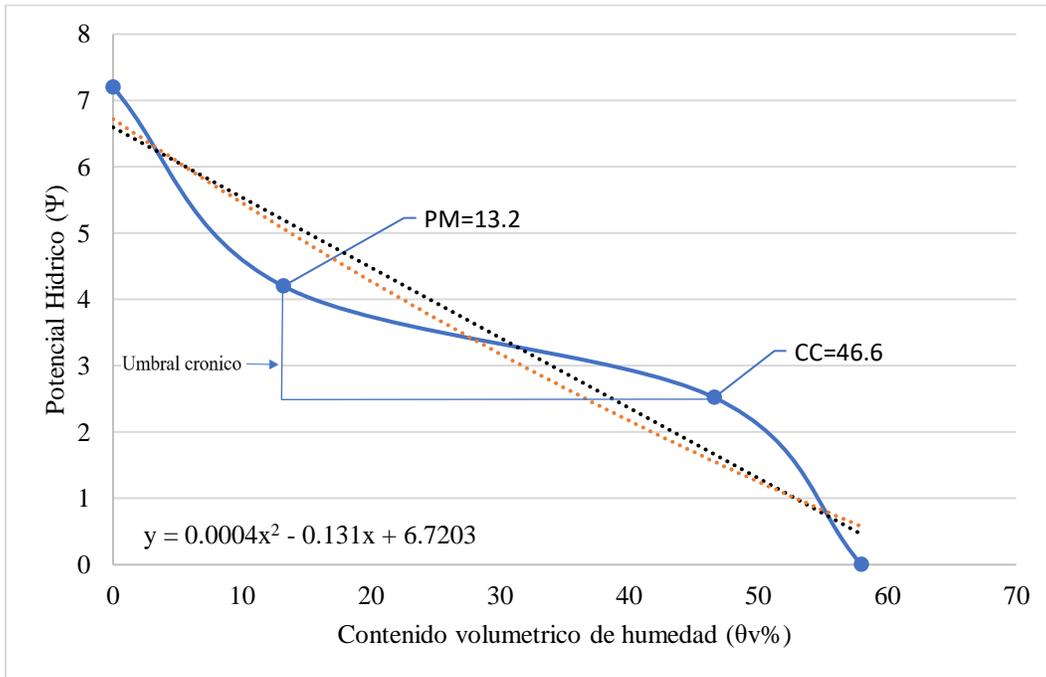
Anexo 55. Curva de retención calicata 9 perfil 5 - 10 cm.



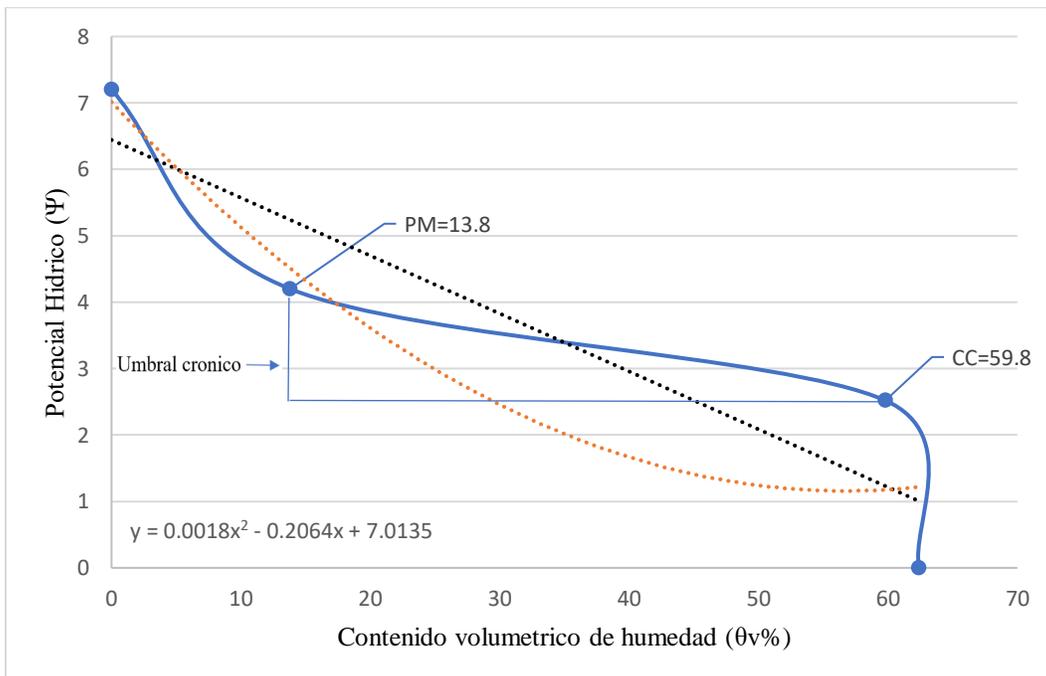
Anexo 56. Curva de retención calicata 9 perfil 10 - 20 cm.



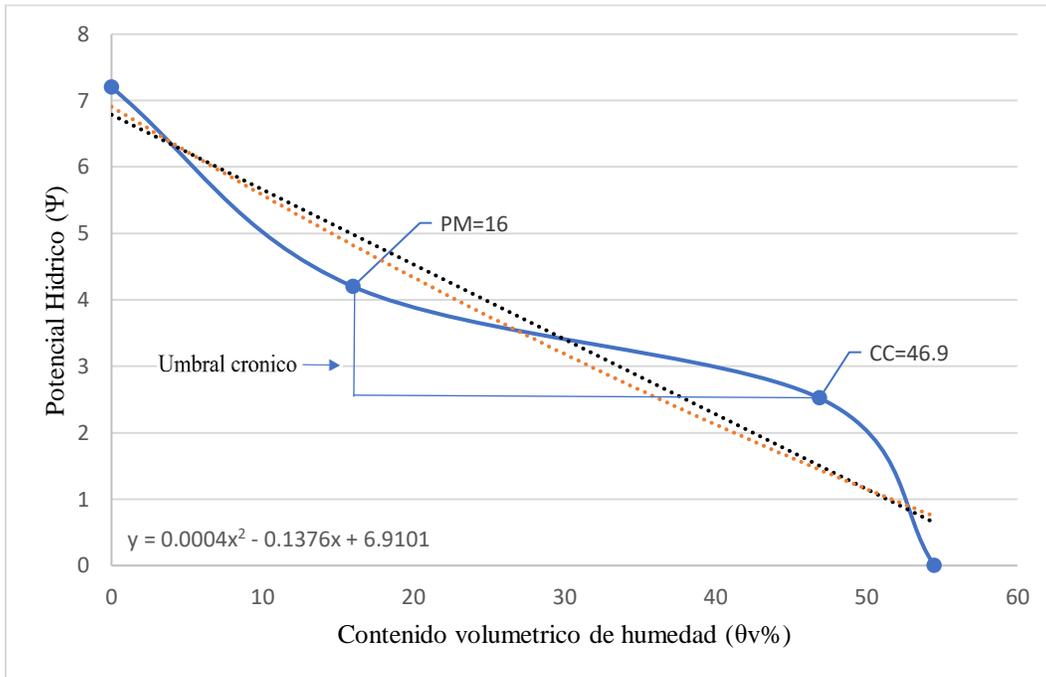
Anexo 57. Curva de retención calicata 9 perfil 20 - 30 cm.



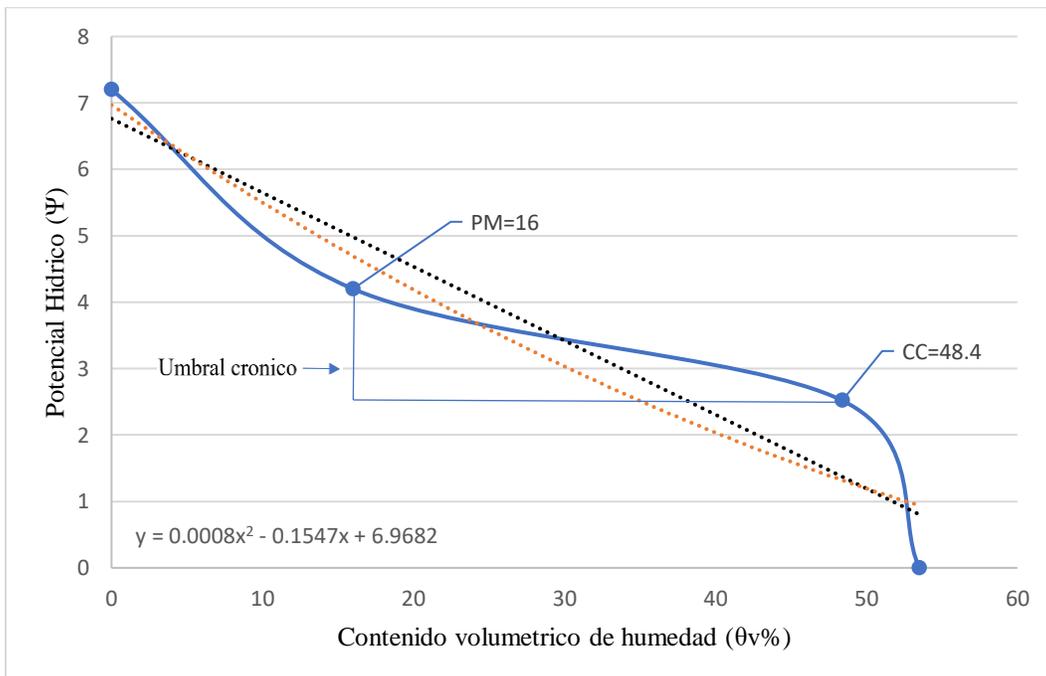
Anexo 58. Curva de retención calicata 9 perfil 30 - 40 cm.



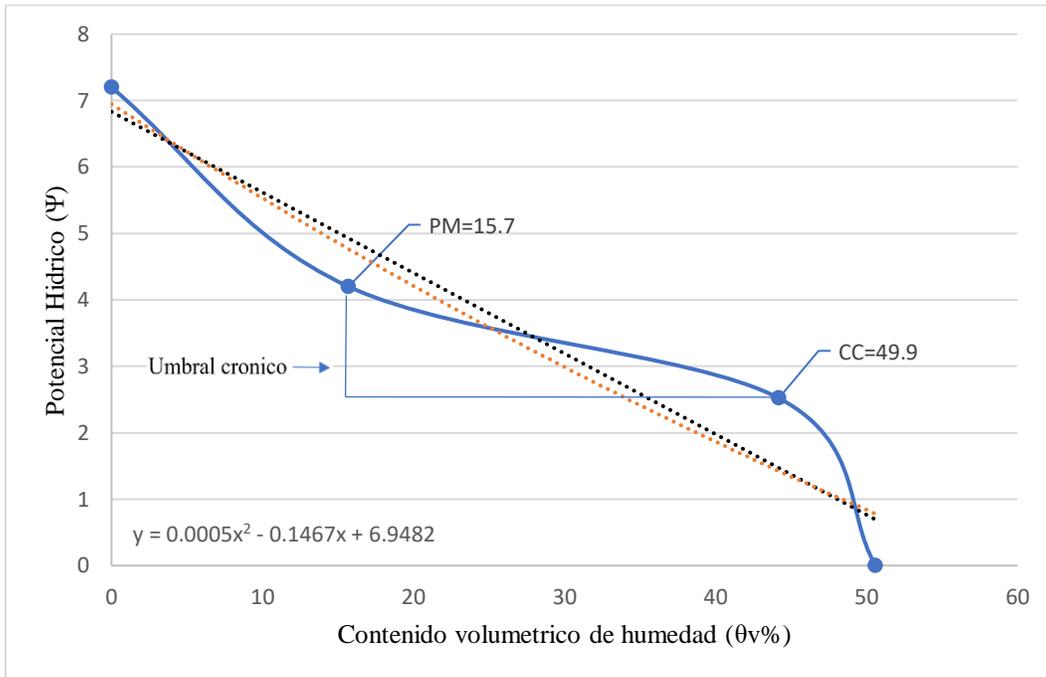
Anexo 59. Curva de retención calicata 10 perfil 0 - 5 cm.'



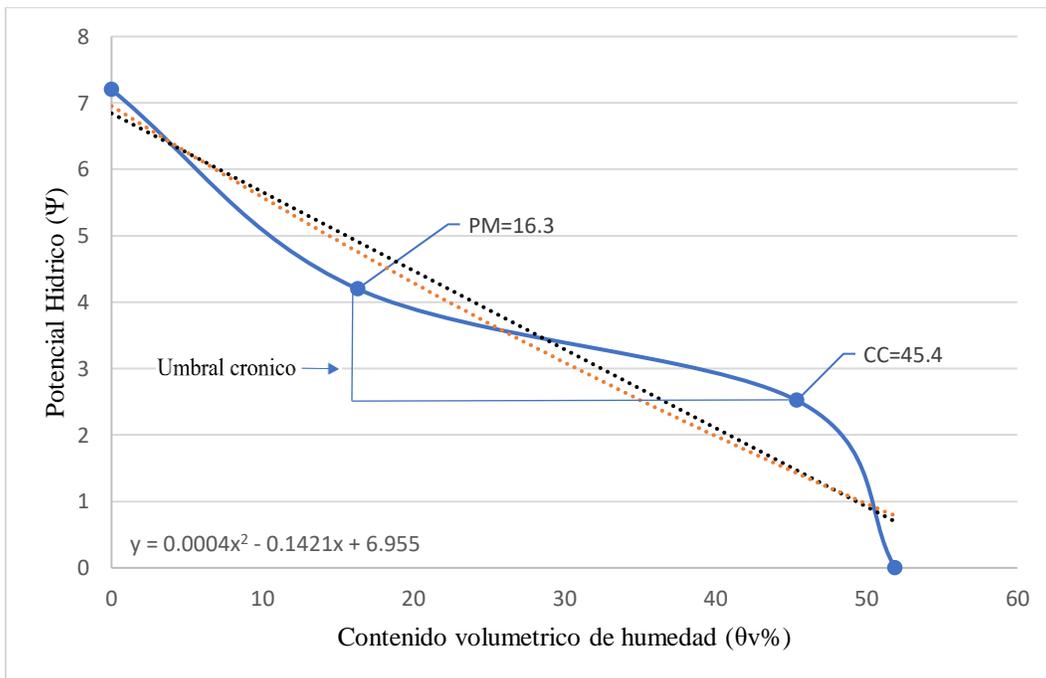
Anexo 60. Curva de retención calicata 10 perfil 5 - 10 cm.



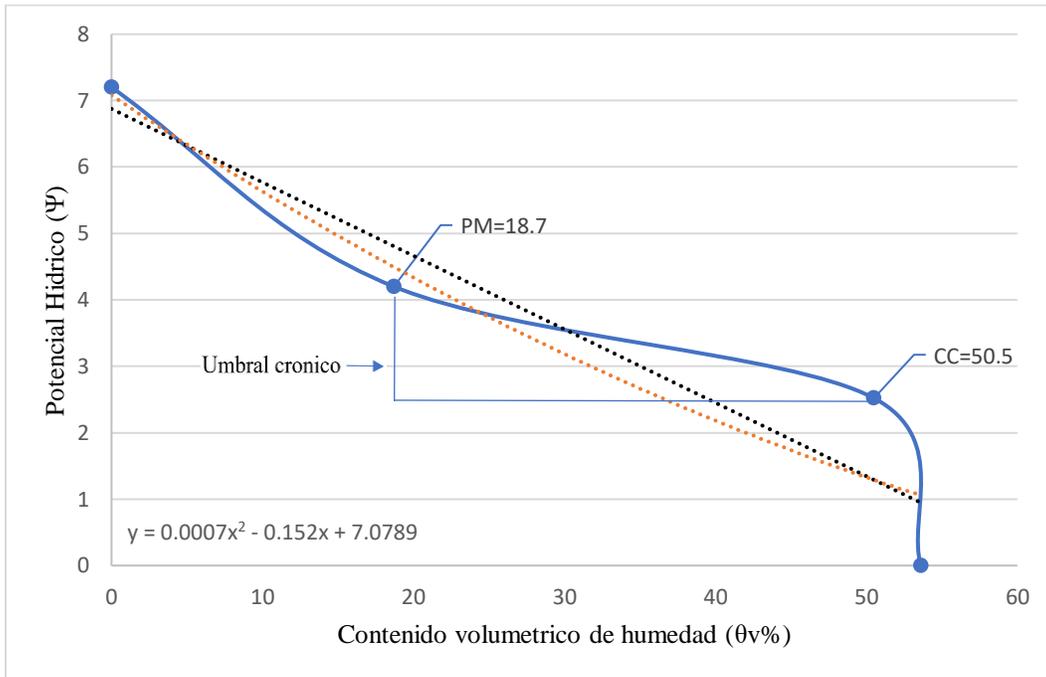
Anexo 61. Curva de retención calicata 10 perfil 10 - 20 cm.



Anexo 62. Curva de retención calicata 10 perfil 20 - 30 cm.



Anexo 63. Curva de retención calicata 10 perfil 30 - 40 cm.



Anexo 64. Resultados de análisis de muestras de laboratorio

	LABORATORIO DE FÍSICA DE SUELOS		Página: 1 de 2	
	Av. 12 de Octubre y Diego Tapia		Versión: 1	
	Teléfono: 4051000 Ext: 3541		Vigencia desde:	
	fca.labsuelos@ucuenca.edu.ec		en trámite	
Cod. UC - FCA-FORM 118		Aprobado por:		en trámite
Elaborado por: Equipo encargado del laboratorio de suelos		Revisado por: Director del laboratorio de suelos		
INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS				
Solicitante:		Luis Chuquisala Chávez		
Proyecto o institución:		Universidad Técnica de Machala		
Teléfono:				
Correo:		luislenin99@gmail.com		
Dirección:		Provincia:	El Oro	Cantón: Machala
Propiedad/Origen de la muestra:		Machala	Coordenadas X:	
Fecha de Ingreso:		13/01/2022	Y:	
Fecha de análisis:		17/10/22 - 18/02/22	Altura:	
Informe N°:		LFS- FCA-0055	Emisión:	18/02/2022

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS					
Numero	Código	Curva de Retención de humedad (cm ³ cm ⁻³)			
		Densidad aparente (g cm ⁻³)	pF 0 (Punto de saturación)	pF 2.52 (Capacidad de campo)	pF 4.2 (Punto de marchitez)
			0	2.52	4.2
1	C1(0-5cm)	1.22	0.550	0.433	0.292
2	C1(5-10cm)	1.42	0.506	0.425	0.244
3	C1(10-20cm)	1.53	0.582	0.491	0.310
4	C1(20-30cm)	1.54	0.559	0.468	0.268
5	C1(30-40cm)	1.60	0.576	0.496	0.277
6	C2(0-5cm)	1.45	0.595	0.491	0.295
7	C2(5-10cm)	1.58	0.581	0.505	0.256
8	C2(10-20cm)	1.49	0.604	0.493	0.244
9	C2(20-30cm)	1.43	0.737	0.620	0.268
10	C2(30-40cm)	1.40	0.538	0.465	0.298
11	C3(0-5cm)	1.36	0.542	0.483	0.247
12	C3(5-10cm)	1.42	0.532	0.461	0.250
13	C3(10-20cm)	1.49	0.552	0.463	0.310
14	C3(20-30cm)	1.47	0.561	0.455	0.316
15	C3(30-40cm)	1.36	0.529	0.461	0.292
16	C4(0-5cm)	1.48	0.600	0.515	0.235
17	C4(5-10cm)	1.38	0.544	0.471	0.238
18	C4(10-20cm)	1.36	0.547	0.500	0.244
19	C4(20-30cm)	1.36	0.580	0.501	0.247
20	C4(30-40cm)	1.36	0.569	0.511	0.268
21	C5(0-5cm)	1.54	0.491	0.416	0.262

Numero	Código	Curva de Retención de humedad (cm ³ cm ⁻³)			
		Densidad aparente (g cm ⁻³)	pF 0 (Punto de saturación)	pF 2.52 (Capacidad de campo)	pF 4.2 (Punto de marchitez)
			0	2.52	4.2
22	C5(5-10cm)	1.53	0.618	0.548	0.280
23	C5(10-20cm)	1.50	0.551	0.514	0.259
24	C5(20-30cm)	1.58	0.588	0.538	0.292
25	C5(30-40cm)	1.32	0.531	0.463	0.295
26	C6(0-5cm)	1.35	0.568	0.513	0.289
27	C6(5-10cm)	1.49	0.609	0.518	0.313
28	C6(10-20cm)	1.53	0.597	0.547	0.310
29	C6(20-30cm)	1.43	0.590	0.538	0.280
30	C6(30-40cm)	1.40	0.566	0.477	0.316
31	C7(0-5cm)	1.37	0.526	0.474	0.160
32	C7(5-10cm)	1.41	0.467	0.426	0.178
33	C7(10-20cm)	1.60	0.585	0.523	0.190
34	C7(20-30cm)	1.41	0.535	0.494	0.214
35	C7(30-40cm)	1.56	0.598	0.524	0.163
36	C8(0-5cm)	1.49	0.585	0.483	0.166
37	C8(5-10cm)	1.47	0.565	0.487	0.187
38	C8(10-20cm)	1.49	0.626	0.508	0.169
39	C8(20-30cm)	1.45	0.625	0.565	0.178
40	C8(30-40cm)	1.39	0.560	0.513	0.154
41	C9(0-5cm)	1.44	0.584	0.508	0.144
42	C9(5-10cm)	1.35	0.519	0.455	0.151
43	C9(10-20cm)	1.32	0.517	0.499	0.157
44	C9(20-30cm)	1.55	0.580	0.466	0.132
45	C9(30-40cm)	1.45	0.624	0.598	0.138
46	C10(0-5cm)	1.29	0.545	0.469	0.160
47	C10(5-10cm)	1.34	0.535	0.484	0.160
48	C10(10-20cm)	1.34	0.506	0.442	0.157
49	C10(20-30cm)	1.30	0.519	0.454	0.163
50	C10(30-40cm)	1.56	0.536	0.505	0.187
51	C11(0-5cm)	---	---	---	0.214
52	C11(5-10cm)	---	---	---	0.247
53	C11(10-20cm)	---	---	---	0.244
54	C11(20-30cm)	---	---	---	0.235