

**Acta de la Presentación Oral del Trabajo Final de Graduación ante el Tribunal
Examinador para Optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de
Biosistemas**

Modalidad: Proyecto de Graduación

Lugar: Sala de Audiovisuales 1	Fecha: 29/08/2025	Hora: 09:00 am	Consecutivo: 17-2025
--	-----------------------------	--------------------------	--------------------------------

Artículo 1: Presentación de los miembros del Tribunal del Trabajo Final y de la estudiante.

Se explica el procedimiento que consiste en la presentación oral de 45 min, el espacio para preguntas, la deliberación del Tribunal y la comunicación del acuerdo, según los artículos 26 y 27 del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.

Tribunal Examinador

MIEMBROS DEL TRIBUNAL	ROL
Dr. Juan Chin Pampillo	Director TFG
Dra. Cristina Chinchilla Soto	Miembro del Comité Asesor
M.Sc. Mayela Monge Muñoz	Miembro del Comité Asesor
Dra. Marianela Alfaro Santamaría	Lectora Invitada
Dra. Alejandra Rojas González	Presidente

Artículo 2: Exposición oral del estudiante

Se realiza presentación en un tiempo entre 30 a 45 min máximo.

Nombre del Trabajo Final de Graduación: Evaluación de las ecuaciones de pedotransferencia para determinar el umbral de agua útil en suelos cafetaleros, en la finca La Hilda, Poás de Alajuela.

NOMBRE DEL POSTULANTE	CARNÉ
Grattia Corrales Arias	B92364

Artículo 3: Sesión de preguntas sobre aspectos propios del trabajo presentado.

Cada uno de los miembros del Tribunal realizan preguntas a la persona sustentante.

Artículo 4: Deliberación del Tribunal.

Sale de la sala de sesiones el sustentante para la deliberación del Tribunal. Se le avisará a la persona sustentante vía llamada telefónica o medio acordado.

Observaciones:

No se tienen.

Producto de la deliberación se realiza la votación pública:

Votación pública obteniendo: 5 votos a favor y
0 votos en contra.

Voto disidente: N/A

Calificación del Trabajo Final de Graduación:	Aprobado	X	No aprobado	
Aprobación con distinción el Trabajo Final de Graduación:	Sí	X	No	

Artículo 5: Comunicación del resultado de la deliberación a la persona sustentante

La persona que preside el Tribunal comunica a la persona postulante el resultado de la deliberación y se le declara acreedora al grado de **Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas**. Se le indica la obligación de presentarse al acto público de graduación, para ser juramentada y recibir el diploma correspondiente.

Se da por concluida la sesión y firma la persona que preside el Tribunal Examinador a las:

Diez horas con cincuenta minutos.

 Dra. Alejandra Rojas González, persona que preside

***Nota:** De conformidad con los artículos 28, 29 y 36, el estudiante deberá entregar las copias con la versión final, incluyendo las modificaciones formuladas en ocasión de la presentación pública, un resumen de 200-500 palabras y la autorización de publicación del trabajo en el repositorio Kérwá. El director del trabajo final de graduación será responsable de que se realicen las correcciones propuestas en la presentación pública y de que la versión final del documento quede debidamente confeccionada.*

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

EVALUACIÓN DE LAS ECUACIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA
DETERMINAR EL UMBRAL DE AGUA ÚTIL EN SUELOS CAFETALEROS, EN LA
FINCA LA HILDA, POÁS DE ALAJUELA

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado y título académico de Licenciatura en
Ingeniería de Agrícola y de Biosistemas

GRATTIA DAYELI CORRALES ARIAS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2025

Dedicatoria

A mi madre Doña Kenia,

Gracias mami, durante estos años de no haber sido por tu amor y tu apoyo incondicional, la historia se hubiese contado distinta. Gracias por cuidar de mí, por siempre orar por mí, de ti aprendí lo que es ser esforzado, tenaz y a no rendirme nunca, aun cuando he sentido mi mundo derrumbarse, el regalo más grande que obtengo con la culminación de esta etapa es poder compartirla contigo.

A mi mamá Xinia,

Ma hoy ya no estás, pero sé que tu corazón siempre ha estado conmigo, parte de lo que soy es gracias a lo que tu fuiste, tu amor siempre me acompaña y sé que donde quiera que tu estes, celebras conmigo.

A mi tía Ka,

Gracias, tía, por tenerme fe, por ofrecerme siempre tu amor, tu consejo y tu abrigo, por sostener mi mano y nunca soltarme.

A mi papá Don Martín,

Gracias por cuidar de mí, te admiro muchísimo y agradezco tu guía, tu acompañamiento, tu ayuda y tu amor.

A ustedes les honro finalizando esta etapa académica tan preciada, deseo poder seguir compartiendo con ustedes cada alegría que me repare la vida, los amo infinitamente, son el motor de mi vida.

Agradecimientos

A Finca La Hilda y el Grupo Santa Eduvigis, en especial a *Mariano Vargas* por su colaboración durante toda la investigación.

A la Universidad de Costa Rica por el financiamiento mediante el Proyecto C3467: *Propuesta de una herramienta para mapear la resiliencia a la sequía agrícola a partir de técnicas espectrales para la determinación in situ de materia orgánica en el suelo (PETRICOR)*, el cual se desarrolla en el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA).

A mi director de tesis el Dr. *Juan Salvador Chin Pampillo*, por su apoyo incondicional, por siempre creer en mí, por su excepcional atención y conocimiento, por su apoyo en el trabajo de campo y sin duda, por ofrecerme la oportunidad de trabajar en el área de suelos y formando parte del *Centro de Investigación en Contaminación Ambiental CICA*.

A mi comité asesor conformado por la MSc. *Mayela Monge Muñoz* y la Dra. *Cristina Chinchilla Soto*, por sus contribuciones académicas, por su apoyo indudable en el trabajo de campo y por su excepcional guía en el proceso.

A mi profesora la Dra. *Marianela Alfaro Santamaria*, a través de ella descubrí mi gusto por el área académica de suelos, ha sido una maestra excepcional y la aprecio profundamente.

A mi profesor, MSc. *Sergio Rojas Montero*, un amigo y un colega increíble, que sin duda fue una pieza fundamental en el desarrollo de mi trabajo.

A mí, hoy para mi dicha, mejor amiga *Valeria Bustamante Bolaños*, sin duda, fue mi mejor compañera de estudio y de carrera, gracias por sostenerme y siempre ofrecerme tu apoyo y cariño incondicional, parte de este logro es tu mérito también.

A mis amigos y compañeros de laboratorio *Marino* y *Nicole*, sin duda, contar con ustedes facilitó este proceso y me siento profundamente agradecida por su ayuda y acompañamiento.

A *Rubén*, gracias por creer en mí, definitivamente tus palabras siempre lograron ofrecerme fortaleza y mucha tranquilidad.

A mis amigos que siempre estaban ahí para ofrecerme un abrazo, una buena conversación, un café... los quiero (Nan, Cami, Sebas, Esteban, Celinne)

Esta tesis fue aprobada por el Tribunal Examinador, como requisito parcial para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

PhD. Juan Salvador Chin Pampillo

Director de tesis

PhD. Cristina Chinchilla Soto

Asesora

PhD. Alejandra Rojas González

Presidenta del Tribunal

MSc. Mayela Monge Muñoz

Asesora

PhD. Marianela Alfaro Santamaría

Lectora invitada

Índice de contenido

1	Resumen.....	9
2	Introducción	10
3	Objetivos	11
3.1	Objetivo General.....	11
3.2	Objetivos específicos	11
4	Marco Teórico	11
4.1	Antecedentes.....	11
4.2	Parámetros de evaluación	12
4.2.1	Textura.....	12
4.2.2	Materia orgánica.....	13
4.2.3	Densidad aparente	13
4.2.4	Capacidad de campo y punto de marchitez permanente.....	13
4.3	Conceptos teóricos.....	13
4.3.1	Agua útil.....	13
4.3.2	Sequía agrícola	13
4.3.3	Andisoles.....	14
4.4	Curvas de retención de humedad en suelos	14
4.5	Modelos de predicción del contenido de humedad en el suelo.....	15
4.6	Modelación geoespacial.....	19
4.6.1	Modelo de Interpolación Kriging	19
4.7	Análisis Estadístico.....	20
5	Metodología	21
5.1	Descripción del sitio de estudio	21
5.2	Objetivo 1: Determinación de las variables de entrada.....	22
5.2.1	Textura.....	23
5.2.2	Densidad Aparente	24
5.2.3	Contenido de Materia Orgánica.....	24
5.2.4	Punto de Marchitez Permanente	24
5.2.5	Contenido de humedad a Capacidad de Campo	25
5.3	Diseño del muestreo.....	26
5.3.1	Análisis descriptivo de los datos:	26
5.3.2	Evaluación de las PTFs:	27
5.3.3	Análisis de correlación:	27
5.4	Objetivo 2: Validación de las PTFs	27

5.5	Objetivo 3: Umbral de agua útil.....	28
5.5.1	Índice de Sequía por humedad del suelo (SODI <i>por sus siglas en inglés</i>)	28
6	Resultados	29
6.1.1	Resultados: Determinación de las variables de entrada.....	29
6.1.2	Resultados: Validación de las PTFs	35
6.1.3	Resultados: Umbral de agua útil	44
7	Discusión.....	48
7.1.1	Determinación de las variables de entrada	48
7.1.2	Validación de las PTFs.....	49
7.1.3	Umbral de agua útil (UAU).....	51
8	Conclusiones	54
9	Recomendaciones.....	55
10	Bibliografía	56
11	Anexo	65
11.1	Evaluación de las PTFs.....	65
11.2	Validación de las PTFs.....	71

Índice de figuras

Figura 1.	Sitios de investigación y puntos de muestreo (identificados con triángulos verdes) ubicados en finca La Hilda, Poás de Alajuela.	22
Figura 2.	Ollas de succión a 15000 hPa para la determinación de punto de marchitez permanente.	25
Figura 3.	Equipo de caja de arena para la estimación de capacidad de campo a 330 hPa.	26
Figura 4.	Cilindros con muestras de suelo previamente pesadas con malla y con liga para medición de capacidad de campo a 330 hPa.	26
Figura 5.	Análisis de correlación entre las variables independientes y dependientes.	30
Figura 6.	Relación entre la textura (arenas, limos y arcillas) en función de la humedad volumétrica a capacidad de campo (% v/v) y punto de marchitez permanente (% v/v).	33
Figura 7.	Relación entre el MO y la DA en función de la humedad volumétrica a capacidad de campo (% v/v) y punto de marchitez permanente (% v/v).....	34
Figura 8.	Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a capacidad de campo (% v/v) por el modelo propuesto por Chakraborty et al. (2011).	35
Figura 9.	Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a punto de marchitez permanente (%v/v) por el modelo propuesto por Chakraborty et al. (2011).	36
Figura 10.	Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v) obtenido por el modelo Chakraborty et al. (2011).....	37
Figura 11.	Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a punto de marchitez permanente (% v/v) obtenido por el modelo Chakraborty et al. (2011).	37
Figura 12.	Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a capacidad de campo (% v/v) por el modelo propuesto por Peralta & Barrios. (2006).....	38

Figura 13. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a punto de marchitez permanente (% v/v) por el modelo propuesto por Peralta & Barrios. (2006). ...	39
Figura 14. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v) obtenido por el modelo Peralta & Barrios. (2006).	40
Figura 15. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a punto de marchitez permanente (% v/v) obtenido por el modelo Peralta & Barrios. (2006).	40
Figura 16. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a capacidad de campo (% v/v) por el modelo propuesto.	41
Figura 17. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a punto de marchitez permanente (% v/v) por el modelo propuesto.	42
Figura 18. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v) obtenido por el modelo propuesto.	43
Figura 19. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a punto de marchitez permanente (% v/v) obtenido por el modelo propuesto.	43
Figura 20. Distribución de umbral de agua útil (% v/v) según piso altitudinal.	45
Figura 21. Representación del umbral de agua útil para piso alto en Finca La Hilda, Poás, Alajuela.	46
Figura 22. Representación del umbral de agua útil para piso medio en Finca La Hilda, Poás, Alajuela.	47
Figura 23. Representación del umbral de agua útil para piso bajo en Finca La Hilda, Poás, Alajuela.	47

Índice de tablas

Tabla 1. Variables dependientes e independientes para la determinación de la humedad a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente por la aplicación de ecuaciones de pedotransferencia.	27
Tabla 2. Estadística descriptiva de los datos de campo, para los tres pisos altitudinales. Valores promedio $\pm$ desviación estándar de los datos empleados para la validación de modelos (n=36).	29
Tabla 3. Valores de significancia ($p < 0.05$) para la correlación entre variables de estudio.	31
Tabla 4. Ecuaciones de prueba para determinar el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.	32
Tabla 5. Umbral de agua útil determinado para los puntos de muestreo en el transepto longitudinal. Valor promedio $\pm$ desviación estándar.	44
Tabla 6. Clasificación textural por piso altitudinal según el triángulo textural del Soil Science Society of America (SSSA).	45
Tabla 7. Parámetros hídricos del suelo e índice SODI en los pisos alto, medio y bajo de la finca. .	46

Índice de figuras de anexo

Figura A1. Evaluación del modelo propuesto por Arruda et al. (1987), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	65
Figura A2. Evaluación del modelo propuesto por Lal. (1978), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	65

Figura A3. Evaluación del modelo propuesto por Tomasella and Hodnett. (1998), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).....	66
Figura A4. Evaluación del modelo propuesto por Adhikary et al. (2008), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	66
Figura A5. Evaluación del modelo propuesto por Chakraborty et al. (2011), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	67
Figura A6. Evaluación del modelo propuesto por Rawls y Brakensiek. (1985), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	67
Figura A7. Evaluación del modelo propuesto por Delgado y Barreto. (1988), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	68
Figura A8. Evaluación del modelo propuesto por Pecorari. (1988), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	68
Figura A9. Evaluación del modelo propuesto por Malavé. (1991), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	69
Figura A10. Evaluación del modelo propuesto por Peralta y Barrios. (2006), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).	69
Figura A11. Evaluación del modelo propuesto por Chicas et al. (2014), a partir de los datos experimentales para la determinación de CC (%v/v) y PMP (%v/v).	70

Índice de tablas de anexo

Tabla A1. Valores teóricos y predichos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenidos con el modelo ajustado de Chakraborty et al. (2011).	71
Tabla A2. Valores teóricos y predichos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenidos con el modelo ajustado de Peralta & Barrios. (2006).....	72
Tabla A3. Valores teóricos y predichos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenidos con el modelo propuesto.....	73

1 Resumen

Se evaluó la aplicabilidad de las ecuaciones de pedotransferencia para la estimación de la humedad volumétrica a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), así como la determinación del umbral de agua útil (UAU), en un suelo dedicado al cultivo de café, en la Finca La Hilda, en Poás de Alajuela.

La investigación incluyó la recolección de datos de campo, el análisis de variables edafológicas, la determinación de las variables de entrada, la evaluación del desempeño de modelos PTF estandarizados, y el ajuste de modelos con base en datos locales. Las ecuaciones evaluadas incorporaron variables físicas y químicas del suelo, entre ellas el contenido de arcilla, arena, materia orgánica (MO) y densidad aparente (DA). Su desempeño fue evaluado mediante coeficiente de determinación (R^2) y raíz del error cuadrático medio (RMSE), complementados con análisis de correlación y de residuales.

Los resultados mostraron que las variables con mayor asociación lineal con la humedad del suelo fueron la arcilla, la DA, el porcentaje de arenas y la MO. Sin embargo, las ecuaciones evaluadas no lograron representar adecuadamente la dinámica de la humedad en los suelos estudiados, debido a diferencias estructurales, texturales y mineralógicas con respecto a los suelos utilizados en su calibración original. El modelo propuesto ajustado a partir de datos locales mostró una mejor capacidad de predicción, aunque limitada por la alta variabilidad espacial de los datos de campo. Los resultados obtenidos para las ecuaciones ajustadas se encontraron en un rango de R^2 de 0.10 – 0.12 para CC y un rango de R^2 de 0.10 – 0.42 PMP.

La estimación del umbral de agua útil, calculado como la diferencia entre CC y PMP, reveló una alta heterogeneidad espacial entre los puntos de muestreo, asociada a las propiedades físico-químicas específicas de los Andisoles del área de estudio. En este contexto, se complementó el análisis con el cálculo del Soil Drought Index (SODI *por sus siglas en inglés*), indicador que, a diferencia de los índices climáticos tradicionales, incorpora propiedades intrínsecas del suelo y permite reflejar la disponibilidad efectiva de agua a nivel de sitio. Los resultados mostraron contrastes en la disponibilidad relativa de humedad en el perfil, desde condiciones favorables para la retención de agua hasta estados cercanos al equilibrio hídrico, donde el recurso podría convertirse en un factor limitante para el cultivo. En conjunto, estos hallazgos evidencian que las características particulares de los Andisoles desempeñan un papel determinante en la dinámica de la humedad y en la resiliencia frente a periodos secos.

Palabras clave: ecuaciones de pedotransferencia, andisoles, contenido de humedad, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, sequía agrícola, materia orgánica.

2 Introducción

La determinación experimental de las propiedades hídricas del suelo requiere una gran cantidad de muestreos debido a la alta variabilidad espacial, por lo que resulta laboriosa y de alto costo (Bejar et al., 2020). El interés en aplicaciones agrícolas, ambientales y de ingeniería, como la estimación del índice de humedad disponible en suelo, la porción de agua que absorben las plantas, los valores de humedad característicos de la relación suelo-agua-planta (capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), la detección de cambios en la estructura del suelo y la estimación de la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas (Fernández, 1995), ha motivado la investigación en la búsqueda de métodos de estimación indirecta para determinar dichas propiedades (Matula et al., 2007). Entre estos métodos destacan las ecuaciones de pedotransferencia (PTFs, *por sus siglas en inglés*). Las PTFs se refieren a relaciones empíricas, las cuales permiten predecir propiedades hidráulicas del suelo a partir de propiedades físicas y químicas, cuya determinación es relativamente más fácil, tales como la textura, la densidad aparente (DA) y contenido de carbono orgánico (CO) (Honett & Tomasella, 2002). Las PTFs predicen tanto valores de potencial matricial, como de contenido de agua o la cantidad de agua disponible y parámetros de ecuaciones como las de Brooks & Corey y la de Van Genuchten que describen la curva de retención de humedad (Honett & Tomasella, 2002). Las características de retención y conductividad hidráulica (CH) del suelo son parámetros clave en el modelado del régimen de agua en el suelo (Kupiec et al., 2015). Estas propiedades permiten explicar las relaciones entre el contenido de humedad y el potencial matricial del suelo, y, reflejan la capacidad de retención de humedad en función de la succión, factores que se asocian a la porosidad del suelo (Bejar et al., 2020). La curva de retención de humedad (CRH) representa la relación que existe entre el contenido de agua y el potencial hídrico, que puede determinarse a partir de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, además, ofrece información relevante sobre la absorción del agua a través de las raíces y la evaporación (Pan et al., 2019).

Las PTFs son una propuesta estandarizada aplicable en cualquier tipo de suelo y en cualquier región geográfica, no obstante, la mayoría de estas ecuaciones fueron desarrolladas principalmente en zonas templadas, por lo que su aplicación en el trópico es limitada. La evaluación de las PTFs se ha dirigido a estudiar el comportamiento variando datos de entrada, bases de datos y procedimientos matemáticos y no en la validación de estos modelos, es decir, en evaluar la relación entre métodos de referencia. (Coronado & González, 2009b).

El objetivo del presente estudio es evaluar ecuaciones de Pedotransferencia, lo que involucra el análisis de propiedades físicas del suelo (textura, densidad aparente y contenido de carbono orgánico) para predecir el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de campo (CC) para suelos tropicales, a partir de datos empíricos en un transecto longitudinal, a una profundidad de 0-20 cm de suelo, en una zona cafetalera ubicada en Poás de Alajuela, Costa Rica.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar las ecuaciones de pedotransferencia para mejorar la comprensión de la disponibilidad de agua en el suelo de la finca La Hilda, ubicada en Poás de Alajuela.

3.2 Objetivos específicos

Determinar las variables de entrada para las ecuaciones de pedotransferencia para estimar el contenido de agua útil para los tres pisos altitudinales en la finca La Hilda, Poás, Alajuela.

Validar el modelo de predicción contra los valores de referencia para los tres pisos altitudinales en la finca La Hilda, Poás, Alajuela.

Utilizar los datos generados de las ecuaciones para determinar umbrales de sequía agrícola en la finca La Hilda, Poás, Alajuela.

4 Marco Teórico

4.1 Antecedentes

En los últimos años, diversos estudios han destacado la importancia de contar con estimaciones confiables de propiedades hidráulicas clave del suelo, fundamentales para determinar el agua disponible para las plantas. Sin embargo, su medición directa suele ser costosa y laboriosa, especialmente en estudios de escala regional. Ante esta limitación, las PTFs han surgido como una herramienta eficaz para estimar estas propiedades de forma indirecta.

En este contexto, Hodnett & Tomasella (2002) detallan que la mayoría de las PTFs disponibles para estimar parámetros hidráulicos, como los modelos de Brooks y Corey (BC) o la ecuación de van Genuchten (vG), fueron desarrolladas a partir de bases de datos extensas provenientes de suelos en regiones templadas (Hodnett & Tomasella 2002). De manera similar, Van den Berg et al. (1997) señalaron que las relaciones empíricas comúnmente empleadas para predecir la capacidad de agua disponible (CAD) resultaron inadecuadas para Ferralsoles y suelos relacionados, caracterizados por su alto contenido de arcillas de baja actividad, por lo que desarrollaron una PTF específica para este tipo de suelos.

La ecuación desarrollada por Van den Berg et al. (1997), junto con las de Tomasella & Hodnett (1998) y Tomasella et al. (2000) para suelos brasileños, han sido derivadas exclusivamente a partir de datos de suelos tropicales. Además, se ha documentado que, independientemente de la metodología utilizada, las predicciones de las PTFs disminuyen su precisión al aplicarlas en suelos cuyas propiedades y condiciones no se encuentran dentro del rango para las que fueron calibradas originalmente. Por ejemplo, la función de Rawls & Brakensiek (1985) es válida para suelos con contenidos de arcilla entre 5 y 60 % y de arena entre 5 y 70 % (Hodnett & Tomasella, 2002). Sin embargo, en ambientes tropicales existen suelos como los caoliniticos y ferralsoles, con contenidos de arcilla superiores al 70 %, que presentan características mineralógicas, estructurales y funcionales distintas. Aunque desde la perspectiva de suelos templados este rango indicaría una textura pesada y una CAD moderada a alta, en suelos tropicales altamente meteorizados este comportamiento no se mantiene, dado que la densidad aparente es baja ($0,9-1,2 \text{ Mg m}^{-3}$), la permeabilidad es alta y la CAD es, en realidad, baja (Hodnett et al., 1995; Hodnett & Tomasella, 2002).

Estudios realizados por Tomasella et al. (2000) demostraron que una PTF derivada exclusivamente de datos de suelos brasileños generó predicciones significativamente mejores que aquellas

desarrolladas con datos de suelos templados, al aplicarla en un conjunto independiente de suelos de Brasil. Por su parte, Botula et al. (2012) señalaron que las PTFs calibradas para suelos templados resultan poco confiables en suelos tropicales húmedos, debido a marcadas diferencias físico-químicas y mineralógicas. Por ello, recomendaron desarrollar PTFs específicas para estos ambientes y validar su desempeño localmente antes de incorporarlas en modelos hidrológicos, con el fin de optimizar el uso del recurso hídrico en agricultura frente a desafíos como el cambio climático, la contaminación de suelos y el incremento en los costos de riego. En este contexto, evaluaron PTFs ampliamente documentadas, tanto de zonas templadas como tropicales, para predecir la retención de agua en CC y PMP en la región del Bajo Congo, África.

Myeni et al. (2021) priorizaron la medida de CC y PMP como propiedades hidráulicas críticas para determinar el agua disponible para las plantas, aunque su medición directa resulta costosa y laboriosa, especialmente en estudios regionales. Myeni et al. (2021), postularon el uso de una base de datos de 7219 horizontes de suelo de 2800 perfiles en Sudáfrica y desarrollaron nuevas PTFs mediante regresión lineal múltiple, seleccionando como variables explicativas los porcentajes de arena, limo, arcilla y carbono orgánico del suelo (COS). Los resultados indicaron que las nuevas PTFs superaron en desempeño a cinco PTFs bien establecidas (Arruda et al., 1987; Chakraborty et al., 2011; Dijkerman, 1988; Lal, 1972; Pidgeon, 1972), obteniendo valores de R^2 de 0,77 para CC y 0,82 para PMP. Además, confirmaron que las PTFs derivadas localmente a partir de bases de datos amplias y diversas proporcionan estimaciones más precisas en regiones con condiciones edáficas y climáticas específicas.

Las PTFs desarrolladas por Santra et al. (2018), para estimar la retención de agua en CC y PMP en suelos áridos del oeste de India, emplearon una base de datos de 370 perfiles. Las PTFs se evaluaron mediante validación cruzada y conjuntos de datos independientes, reportando valores de R^2 de 0,87 para CC y 0,92 para PMP. También comprobaron que las PTFs desarrolladas en su base local superaron a las funciones tradicionales al aplicarlas en suelos áridos de India, aunque los autores recomendaron utilizar modelos globales calibrados para diferentes ambientes áridos al aplicarlos en suelos de otras regiones, como en Estados Unidos.

En suelos con propiedades edáficas particulares, como los Andisoles, la aplicación de PTFs desarrolladas en otras regiones puede resultar inadecuada, debido a diferencias significativas en su composición y comportamiento hidráulico. Bejar et al. (2020), señalaron que los estudios sobre estimación indirecta de CC, PMP y agua disponible (AD) en suelos Andisoles son limitados. En su investigación, desarrollaron y evaluaron PTFs a partir de variables edafológicas como materia orgánica, densidad aparente y textura, determinando estas propiedades mediante métodos estándar. Los resultados indicaron que el modelo de Rawls & Brakensiek (1985) presentó el mejor ajuste, con valores de cuadrado medio del error (CME) y coeficiente de determinación (R^2) superiores al resto de los modelos evaluados. No obstante, se reconoció que ciertos modelos, como el de Peralta & Barrios (2006), mostraron un desempeño limitado, lo cual refuerza la necesidad de validar previamente las PTFs en suelos con características distintas a las de sus bases de calibración.

4.2 Parámetros de evaluación

4.2.1 Textura

La textura del suelo se refiere a la proporción relativa de partículas minerales con un diámetro inferior a 2 mm —arena, limo y arcilla— presentes en los distintos horizontes del perfil edáfico (Ibáñez & Moreno, 2010). Este atributo puede variar de un horizonte a otro, por lo que su análisis debe realizarse de manera individual (Ibáñez & Moreno, 2010). La textura es determinante en el comportamiento físico y químico del suelo, ya que influye en sus propiedades directamente en la fertilidad, la

capacidad de retención de agua, la aireación, el drenaje y el contenido de materia orgánica en el suelo (FAO, 2006).

4.2.2 Materia orgánica

La materia Orgánica (MO) del suelo constituye una fracción fundamental del sistema edáfico, ya que incide directamente en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Según Julca et al. (2006), la MO comprende la fracción orgánica del suelo, una parte importante de esta fracción es el humus, definido como las sustancias orgánicas oscuras, de color pardo o negruzco, que resultan de la descomposición y transformación de residuos orgánicos, principalmente de origen vegetal (Julca et al., 2006). El humus cumple funciones esenciales en la dinámica del suelo, permite la formación de agregados y proporciona estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio que permite la infiltración del agua y su retención, lo que disminuye la erosión y favorece el intercambio gaseoso (Julca et al., 2006).

4.2.3 Densidad aparente

La densidad de volumen o densidad aparente (DA) del suelo se define como el peso del suelo seco por unidad de volumen de suelo sin perturbar, tal cual se encuentra en su entorno natural, incluyendo el espacio poroso (Rubio, 2010). La DA se emplea principalmente para calcular la porosidad total del suelo y, por ende, es importante en estudios de relación suelo-agua (Alvarado & Forsythe, 2005). Además, es un parámetro importante para la descripción de la calidad del suelo y la función del ecosistema. Altos valores de DA están asociados principalmente a procesos de compactación, lo cual resulta en un medio limitante para el crecimiento de raíces (Vargas, 2022)

4.2.4 Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

La capacidad de campo (CC) se define como la cantidad de agua retenida en los poros del suelo una vez que el exceso de agua gravitacional se ha drenado y antes de que se escurra o evapore el agua (Berbegall, 2017). Este estado hídrico corresponde a una condición de equilibrio entre el agua y el aire en el suelo, y, en términos de potencial mátrico, se considera que ocurre aproximadamente a una tensión de 330 hPa.

Por otro lado, el punto de marchitez permanente (PMP) se refiere al contenido de humedad del suelo en el que las plantas ya no son capaces de extraer agua suficiente para mantener la transpiración y la turgencia celular (Parker & Patignani, 2021). En este estado, las raíces no pueden extraer el agua que se encuentra retenida en el suelo, lo que provoca un estrés hídrico y marchitamiento irreversible del tejido vegetal (Berbegall, 2017). Este umbral se asocia comúnmente con una tensión del agua en el suelo de aproximadamente 15000 hPa.

4.3 Conceptos teóricos

4.3.1 Agua útil

El agua útil, también conocida como agua disponible para las plantas, es la fracción de agua retenida en el suelo que las raíces pueden absorber fácilmente, sin que se genere ninguna restricción para el crecimiento de la planta (Umaña, 2019). Este intervalo hídrico se encuentra comprendido entre dos límites definidos por la succión del agua en el suelo, el límite superior (correspondiente a la CC, 330 hPa) y el límite inferior (correspondiente al PMP, 15000 hPa) (Umaña, 2019).

4.3.2 Sequía agrícola

La sequía agrícola (SE) se manifiesta cuando la humedad disponible en el suelo resulta insuficiente para satisfacer las demandas hídricas de los cultivos, generando un estrés hídrico prolongado y severo que provoca una disminución notable en el rendimiento de los cultivos. Este fenómeno ocurre cuando el agua almacenada en el suelo apenas puede satisfacer una fracción mínima

de las pérdidas por evapotranspiración potencial, lo que limita los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (SENAMHI, 2021b). La SE puede originarse tanto por una disminución en la precipitación como por un incremento excepcional en la demanda atmosférica de humedad, favorecida por condiciones de alta temperatura, radiación solar y déficit de presión de vapor. Estas condiciones pueden ocasionar en las plantas un estrés térmico intenso e hídrico combinado, que afecta funciones clave como la fotosíntesis, la apertura estomática y la eficiencia en el uso del agua, comprometiendo el crecimiento, la productividad y la calidad de los cultivos (SENAMHI, 2021b).

La evaluación de la sequía agrícola no solo depende de las condiciones climáticas, sino también de la interacción entre la dinámica del suelo, la atmósfera y la planta. En este contexto, se han desarrollado índices específicos que integran variables edáficas e hídricas, siendo uno de los más relevantes el Soil Drought Index (SODI *por sus siglas en inglés*). A diferencia de otros índices basados únicamente en balances hídricos o déficit de precipitación, el SODI incorpora explícitamente la textura del suelo, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y la densidad aparente, lo que permite estimar de manera más realista la disponibilidad de agua para las plantas (Sridhar et al., 2008; Ajaz et al., 2019). Esta integración de propiedades físico-hídricas lo convierte en una herramienta más representativa para caracterizar la sequía agrícola, ya que refleja con mayor precisión las limitaciones de retención y liberación de agua en distintos tipos de suelos y cultivos.

4.3.3 Andisoles

Los Andisoles son suelos derivados de materiales volcánicos recientes, formados principalmente a partir de cenizas, lapilli y otros depósitos piroclásticos ricos en vidrio volcánico (Uehara, 2005). Su origen está estrechamente relacionado con procesos de rápida meteorización química en condiciones húmedas, lo que favorece el desarrollo de materiales de orden corto como minerales no cristalinos como la alófana, la imogolita, y óxidos hidratados de hierro y aluminio de baja cristalinidad, los cuales carecen de una estructura cristalina ordenada y presentan una elevada superficie específica (hasta $1000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), así como una gran afinidad por el agua (Regalado et al., s.f.).

Estas características explican su notable capacidad de retención hídrica, así como su baja DA. Además, los Andisoles suelen poseer una estructura granular bien desarrollada, elevada porosidad (superior al 60 %), baja densidad aparente (comúnmente inferior a 0.9 g cm^{-3}) y altas concentraciones de oxihidróxidos de hierro y aluminio, que les confieren propiedades fisicoquímicas particulares, tales como una alta capacidad de intercambio catiónico dependiente del pH, fuerte retención de fósforo, elevada adsorción de agua y formación de agregados estables (Uehara, 2005; Regalado et al., s.f.). Estas propiedades hacen que los Andisoles se comporten de forma diferente frente a técnicas estándar de estimación de humedad, como la ecuación dieléctrica de Topp, cuyo uso ha demostrado ser inadecuado en estos suelos debido a su comportamiento dieléctrico atípico (Regalado et al., s.f.). Asimismo, su elevada capacidad de retención de agua puede verse modificada por el uso del suelo, como lo demuestra Bejar et al. (2020), quienes identificaron diferencias significativas en la retención hídrica de un Andosol bajo condiciones de bosque y distintos cultivos agrícolas.

4.4 Curvas de retención de humedad en suelos

La capacidad de retención de agua del suelo es una propiedad importante para comprender las relaciones suelo-agua-planta, ya que regula la disponibilidad hídrica para el desarrollo vegetal (Pineda & Vilorio, 2011). El movimiento y almacenamiento del agua en el suelo están determinados por gradientes de potencial hídrico, en particular el potencial mátrico, que representa la energía con la que el suelo retiene el agua dentro de su estructura porosa (Pan et al., 2019).

Las curvas de retención de humedad (CRH), también conocidas como curvas característica suelo-agua, describen la relación entre el contenido de humedad y el potencial matricial del suelo. Estas curvas reflejan la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión, lo que permite estimar la disponibilidad hídrica para las plantas y caracterizar el comportamiento hidráulico del suelo (Bejar et al., 2020).

La forma de la CRH depende de diversos factores edáficos, como la textura, estructura, contenido de MO, la distribución de los tamaños de poro, entre otros constituyentes del suelo (Tuller, 2005). Por tanto, la CRH, es una relación que permite caracterizar el comportamiento hídrico del suelo y estimar propiedades como la capacidad de retención de agua y la disponibilidad hídrica, siendo clave para interpretar procesos como la infiltración, escorrentía, evaporación y el intercambio de energía en el sistema suelo-planta-atmósfera (Pan et al., 2019).

Las CRH permiten determinar parámetros hidráulicos esenciales, como la CC y el PMP, y, por tanto, el agua disponible para las plantas. Además, son útiles para detectar alteraciones en la estructura del suelo, evaluar la eficiencia de prácticas de manejo y establecer relaciones entre la tensión de humedad y otras propiedades físicas del suelo (Fernández, 1995). Debido a su importancia, se emplean ampliamente en simulaciones agrícolas, modelación hidrológica, manejo de suelos y recursos hídricos y otras evaluaciones medioambientales (Matula, Mojrová & Spongrová, 2007).

La determinación de la curva de retención de humedad del suelo (CRH) puede realizarse tanto *in situ* como en laboratorio. En campo, esto implica la instalación de sensores que permitan medir simultáneamente el contenido volumétrico de agua y el potencial mátrico en un mismo volumen de suelo, como los basados en tecnología de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y sensores dieléctricos de potencial hídrico (Zeitoun et al., 2021). Para la medición de humedad, se emplean técnicas como la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR, *por sus siglas en inglés*), el aspensor de neutrones o la atenuación de rayos gamma. Sin embargo, los métodos nucleares presentan riesgos de radiación, por lo que, requieren calibración específica para cada sitio y son sensibles a las propiedades edáficas (Bravo et al., 2009).

El control de potencial mátrico en campo implica mayor complejidad, ya que, las mediciones psicrométricas conciernen solamente a la fase gaseosa del suelo, por lo que es necesario alcanzar el equilibrio entre las fases líquida y gaseosas (Fernández, 1995). Aunque la determinación de la CRH *in situ* tiene como ventaja el estudio de los procesos en condiciones no alteradas, también presenta dificultades a nivel técnico y teórico, además, del tiempo que requiere su realización (Fernández, 1995).

Por su parte, los métodos de laboratorio estándar, aunque son más controlados, resultan laboriosos, y, a menudo, ofrecen conjuntos de datos incompletos en el rango de potencial de interés (Norouzi, 2023). Estos métodos incluyen la columna de agua colgante, el aparato de placa de presión de Richards y las células de Tempe, que permiten establecer pares de datos humedad-potencial bajo condiciones estandarizadas y reproducibles. (Norouzi, 2023).

4.5 Modelos de predicción del contenido de humedad en el suelo

El suelo es un sistema conformado por una matriz sólida y un espacio poroso, que puede ser ocupado por fases líquidas y gaseosas (Sánchez et al., 2020). Durante el proceso de infiltración, el agua ocupa parcial o totalmente este espacio poroso, no obstante, los fenómenos físicos que determinan el comportamiento del agua en el suelo son en su mayoría difíciles de estudiar en condiciones de campo, debido a la alta variabilidad espacial y temporal de las propiedades edáficas, así como también por el tipo de muestreo realizado (alterado o inalterado) y el volumen utilizado para el análisis

(Sánchez et al., 2020; Romero et al., 2020). Por eso, se han desarrollado herramientas de modelado matemático que permiten predecir el contenido de agua en el suelo con base en propiedades físicas y químicas fácilmente medibles (Romero et al., 2020).

Entre estas herramientas destacan las ecuaciones de pedotransferencia (PTFs, *por sus siglas en inglés*), definidas por Botula, Vans & Cornelis (2014), como métodos de predicción de propiedades hidráulicas del suelo, como la CRH o la conductividad hidráulica (CH), a partir de variables como la textura, DA, MO, y CO (Coronado & González, 2009).

Las PTFs permiten "transferir" datos fácilmente accesibles en campo o laboratorio hacia propiedades más complejas de medir (Coronado & González, 2009) y se clasifican en dos grupos principales:

1) PTFs de clases: agrupan suelos con propiedades similares y asignan valores representativos de parámetros hidráulicos. Suponen que los suelos con características texturales o estructurales similares comparten también funciones de retención comparables. (Coronado & González, 2009).

2) PTFs continuas: generan estimaciones a través de modelos de regresión (lineales o no lineales), que predicen directamente parámetros de funciones hidráulicas en función de variables edáficas continuas (Coronado & González, 2009).

Las PTFs continuas permiten un mayor grado de precisión y flexibilidad, especialmente cuando se incorporan variables adicionales como DA, contenido de MO o puntos específicos de la CRH. En este contexto, han surgido enfoques más avanzados basados en inteligencia artificial, como las redes neuronales artificiales, que han mostrado mejoras significativas en la capacidad predictiva frente a métodos tradicionales (Coronado & González, 2009).

Desde el punto de vista estadístico, las PTFs de clase se basan en regresiones por puntos, donde se estiman directamente contenidos de humedad para determinados valores de succión, aunque esto puede conllevar errores significativos e incluso predicciones físicamente inviables. Por el contrario, las PTFs continuas se apoyan en regresiones paramétricas, modelando toda la curva de retención a partir de funciones como las de Brooks & Corey (1964) o van Genuchten (1980) (Coronado & González, 2009).

El desarrollo de PTFs ha sido objeto de amplio interés, especialmente en regiones como Estados Unidos, Europa, América del Sur y Sudáfrica, con el fin de mejorar la estimación de propiedades hidráulicas en diversos contextos geográficos y edáficos. Sin embargo, la mayoría de estas funciones han sido calibradas con suelos de climas templados, limitando su aplicabilidad en zonas tropicales (Coronado & González, 2009).

Las PTFs pueden ser empleadas para predecir valores puntuales, tal como el contenido de agua en un potencial matricial específico (Pidgeon, 1972; Lal, 1979; Van den Berg et al., 1997) o para estimar propiedades como la capacidad de agua disponible (Batjes, 1996; Van den Berg et al., 1997).

Los primeros modelos PTFs fueron desarrollados por Cosby et al. (1984) y Rawls y Brakensiek (1985), quienes propusieron ecuaciones de regresión empleando como datos de entrada la textura del suelo (arenas, limos y arcillas), MO, DA, PMP y CC (Botula, Van & Cornelis, 2014). La PTF de Rawls y Brakensiek, por ejemplo, es válida para suelos con contenidos de arcilla del 5 al 60% y un contenido de arena entre 5 a 70% (Lee et al., 2022).

Para suelos de Brasil Tomasella y Hodnett (1998), desarrollaron PTFs para estimar el contenido de agua en el suelo a nueve potenciales mátricos, empleando como datos de entrada la textura y el

contenido de MO del suelo (Botula, Van & Cornelis, 2014). Esta ecuación ha sido validada para describir la CRH en condiciones tropicales (ecuación 4) (Hodnett & Tomasella, 2002b).

$$\theta p = a(\%MO) + b(\%limo) + c(\%arcilla) + d \quad [1]$$

donde:

θp : contenido de agua en el suelo ($m^3 m^{-3}$)

a: constante asociada al contenido de % CO

% CO: porcentaje de CO

b: constante asociada a % arcilla

% arcilla: porcentaje de arcilla

% limo: porcentaje de limo

c: constante asociada a % limo

d: intercepto en el eje “x”

Gupta y Larson (1979), desarrollaron una PTF empleando un análisis de regresión para estimar el contenido volumétrico de agua a 12 diferentes niveles de succión, correspondientes a potenciales mátrico entre 40 y 15000 hPa. En su estudio, identificaron que el contenido de humedad a 1500 kPa se relaciona directamente con el contenido de arcilla y el contenido de MO. Además, indican que las características de retención de agua de entre 330 hPa y 15000 hPa se puede estimar a partir de un análisis del tamaño de partículas del suelo (ecuación 5) (Gupta & Larson, 1979; Botula, Van & Cornelis, 2014).

$$\theta p = a(\% arena) + b(\% limo) + c(\% arcilla) + d(\% MO) + e(DA, Mgm^{-3}) \quad [2]$$

donde:

θp : contenido de agua en el suelo ($m^3 m^{-3}$)

a: constante asociada al contenido de arenas

% arena: porcentaje de arena

b: constante asociada contenido de limo

% limo: porcentaje de limo

c: constante asociada contenido de arcillas

% arcilla: porcentaje de arcillas

d: constante asociada al contenido de MO

e: constante asociada a la DA

Da: (g/cm³)

La mayoría de las PTFs integran variables como el tamaño de partículas, así como el contenido y la composición de MO, la DA, la retención de agua y la conductividad hidráulica, debido a su influencia directa sobre la estructura del suelo (Pachepsky & Van Genuchten, 2011). La inclusión de variables hidráulicas medidas, como la humedad a CC (330 hPa) y el PMP (15000 hPa), mejora significativamente la precisión de las predicciones, al estrechar la relación entre el contenido de agua observado y estimado. Esto permite una parametrización más ajustada de la CRH (ecuación 6) (Rawls & Brakensiek, 1985; Pachepsky & Van Genuchten, 2011).

$$\theta p = a + b(\% arena) + c(\% limo) + d(\% arcilla) + e(\% MO) + f(DA, Mgm^{-3}) + g\theta_{-33kPa} + h\theta_{-1500 kPa} \quad [3]$$

donde:

θp : contenido de agua en el suelo (m³ m⁻³)

a: intercepto en “x”

b: constante asociada al contenido de arenas

% arena: porcentaje de arena

c: constante asociada contenido de limo

% limo: porcentaje de limo

d: constante asociada contenido de arcillas

% arcilla: porcentaje de arcillas

e: constante asociada al contenido de MO

f: constante asociada a la DA

Da: densidad aparente (g/cm³)

g: constante asociada al contenido de humedad a 330 hPa

θ_{-33kPa} : contenido de humedad del suelo a 330 hPa

h: constante asociada al contenido de humedad a 15000 hPa

$\theta_{-1500kPa}$: contenido de humedad del suelo a 15000 hPa

La evaluación de las PTFs se puede realizar desde distintos enfoques. Según Tietje & Tapkenhinrichs, (1993), la aplicabilidad de una función se evalúa por el rango de suelos para los cuales puede ser utilizada de manera confiable. Si bien algunas PTFs se proponen como funciones estandarizadas, pueden arrojar datos erróneos dado que la aplicabilidad de las PTFs, está restringida al grupo específico de datos de suelo para los cuales fueron desarrolladas (Tietje & Tapkenhinrichs, 1993).

Otra forma común de evaluar las PTFs es mediante la comparación entre los contenidos de agua medidos y estimados, ya que, representan una medida directa de validación de la función, especialmente para aquellas ecuaciones que predicen en base al método de regresión puntual (Tietje & Tapkenhinrichs, 1993). Adicionalmente, comparar los parámetros derivados de funciones de retención —por ejemplo, de modelos como van Genuchten (1980)— con los parámetros medidos o estimados, permite detectar posibles desviaciones funcionales. Estas desviaciones pueden ser positivas o negativas, dependiendo del rango del potencial mátrico analizado (Tietje & Tapkenhinrichs, 1993).

La ecuación de van Genuchten es una de las más utilizadas para describir la curva de retención de humedad en suelos, al modelar la relación entre el contenido de agua y el potencial mátrico. Sin embargo, su aplicación requiere estimar varios parámetros que suelen depender de mediciones detalladas y costosas. Ante esta limitación, las ecuaciones de pedotransferencia (PTFs) se han desarrollado como herramientas para predecir dichos parámetros a partir de propiedades físicas y químicas del suelo más fácilmente medibles. No obstante, la precisión del modelo depende en gran medida de la calidad y representatividad de los datos utilizados: la ausencia de datos en rangos de baja tensión (por encima de la capacidad de campo), o una escasa cantidad de puntos en la curva, puede afectar la calibración y limitar la validez del modelo (Tietje & Tapkenhinrichs, 1993). Por ello, la implementación de PTFs debe considerar cuidadosamente las variables de entrada y realizar una evaluación rigurosa de su desempeño en distintos contextos edáficos.

4.6 Modelación geoespacial

4.6.1 Modelo de Interpolación Kriging

El kriging es una técnica de interpolación geoestadística basada en la teoría de las funciones regionalizadas, la cual permite estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir de observaciones puntuales, considerando la dependencia espacial entre ellas. A diferencia de métodos deterministas como el Inverse Distance Weighting (IDW) o los splines, kriging incorpora un modelo estocástico que proporciona estimaciones insesgadas de mínima varianza y cuantifica la incertidumbre asociada a cada predicción (Lafond et al., 2015). Dentro de sus variantes, el Ordinary Kriging (OK) y el Kriging with External Drift (KED) son ampliamente utilizados en estudios de suelos agrícolas y evaluación de variables continuas como la humedad o el agua disponible, debido a su capacidad para capturar la estructura espacial residual incluso en condiciones de alta heterogeneidad y baja densidad muestral (Lafond et al., 2015). En contextos con muestreos limitados, Wadoux et al. (2019) destacan la importancia de emplear un diseño de muestreo que combine puntos dispersos con pares cercanos (alrededor del 10 % del total), lo cual mejora significativamente la precisión y reduce la varianza de las estimaciones. Si bien se recomienda trabajar con más de 30 puntos para una caracterización robusta, se ha demostrado que con al menos seis puntos por lote y una distribución eficiente es posible obtener resultados útiles para aplicaciones agronómicas, especialmente si se complementa con validación cruzada y análisis de errores (Wadoux et al., 2019).

4.7 Análisis Estadístico

Coefficiente de Determinación R^2 : Indica la proporción de la varianza en la variable dependiente (observada) que es explicada por la varianza de las variables independientes (estimadas por el modelo) (ecuación 4). Un valor de R^2 cercano a 1 indica un alto poder explicativo y, por tanto, una mejor capacidad predictiva del modelo. En el contexto de PTFs, un R^2 elevado sugiere que el modelo logra representar adecuadamente la relación entre las propiedades del suelo y su contenido de humedad (Myeni et al., 2021).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [4]$$

donde:

y_i : valor observado

$\hat{y}_i$: valor predicho

$\bar{y}$: media de los valores observados

n : número total de observaciones

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): El RMSE es una métrica de precisión que refleja la magnitud promedio del error en las predicciones (ecuación 5). Valores bajos de RMSE, cercanos a cero, indican un alto grado de ajuste entre las predicciones y los valores observados (Urzúa, 2013; Myeni et al., 2021).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad [5]$$

donde:

y_i : valor observado

$\hat{y}_i$: valor predicho

n : número total de observaciones

Análisis de Correlación: El coeficiente de correlación cuantifica la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables. Su valor absoluto oscila entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una asociación fuerte, y valores cercanos a 0 reflejan una relación débil o nula. El signo del coeficiente

indica la dirección de la relación: positiva (relación directamente proporcional) o negativa (relación inversamente proporcional) (Camacho, 2008).

Regresión lineal múltiple: La regresión lineal múltiple (RLM) es un método estadístico utilizado para modelar la relación entre una variable dependiente y múltiples variables independientes. Este enfoque permite estimar la influencia de varios factores edáficos (como textura, densidad aparente o materia orgánica) sobre una propiedad hidráulica específica del suelo, como el contenido de agua a diferentes tensiones (Montero, 2016).

Análisis de residuales: El análisis de los residuos (diferencia entre los valores observados y los predichos), permite evaluar la adecuación del modelo a los datos. Un modelo bien especificado genera residuos que se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero, por el contrario, la presencia de patrones sistemáticos (tendencias, curvaturas o agrupamientos) puede indicar problemas como omisión de variables relevantes, incumplimiento de supuestos estadísticos (como homocedasticidad o normalidad) o errores de especificación del modelo, tales como sobreajuste o subajuste (Carrasquilla et al., 2016; Verma, 2025).

Mínimos cuadrados ordinarios no lineales: El método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) se emplea exclusivamente para la estimación de modelos de dependencia lineal, este método puede utilizarse en modelos de ecuaciones que pueden transformarse en funciones lineales (Parra, 2008).

Para modelos que no presentan una estructura lineal, se recurre al método de Mínimos Cuadrados No Lineales (MCNL) (Parra, 2008). Esta técnica permite estimar parámetros en ecuaciones de regresión no lineales sin requerir que el modelo sea transformable a una forma lineal (Parra, 2008). El MCNL, al igual que el modelo lineal equivalente, busca reducir la suma de los errores al cuadrado del modelo (Parra, 2008).

5 Metodología

5.1 Descripción del sitio de estudio

La investigación se llevó a cabo en la finca La Hilda, en Poás de Alajuela (10.0893° N, 84.235088° W), ubicada al este del Valle Central, Costa Rica, entre 1000 y 1500 msnm. La zona se caracteriza por una marcada estación seca (de diciembre a abril) y una estación lluviosa (de mayo a noviembre), con una precipitación media anual de 2380 mm, siendo enero el mes más seco (<15 mm) y octubre el más lluvioso (>500 mm) (Chinchilla et al., 2021).

El estudio se realizó en tres sectores de la finca (Figura 1). Las parcelas de estudio y los puntos de muestreo fueron establecidos por el equipo de investigación del Proyecto C3467: *Propuesta de una herramienta para mapear la resiliencia a la sequía agrícola a partir de técnicas espectrales para la determinación in situ de materia orgánica en el suelo (PETRICOR), el cual se desarrolla en el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA)*. Las parcelas se clasificaron por pisos altitudinales en alto, medio y bajo. Los lotes de investigación presentaron las mismas condiciones de cultivo (café a pleno sol). El piso alto se ubicó a una altitud de 2873 msnm, el piso medio a 2207 msnm y el piso bajo a 2062 msnm (Figura 1). El suelo del área de estudio fue clasificado como Andisol, *Dystric Haplustands*, según la clasificación realizada por Monge y Alpizar (2022).

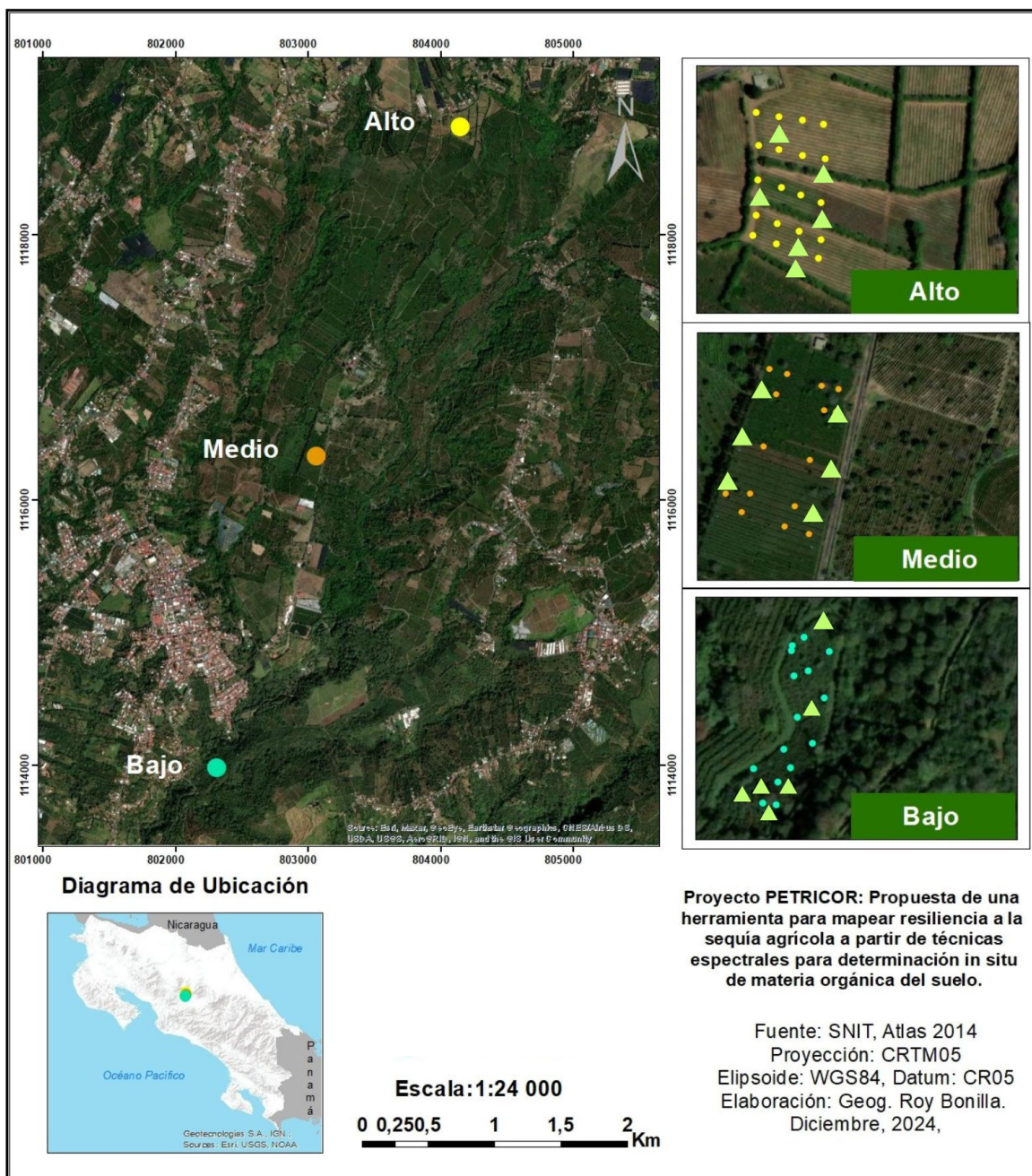


Figura 1. Sitios de investigación y puntos de muestreo (identificados con triángulos verdes) ubicados en finca La Hilda, Poás de Alajuela.

5.2 Objetivo 1: Determinación de las variables de entrada

Para la determinación de las características físicas del suelo (textura, MO) se realizó un muestreo por duplicado en seis puntos representativos de cada piso altitudinal, a una profundidad de 0-20 cm. En cada punto se recolectaron muestras compuestas con un barreno, dentro de un radio de 40 cm del punto de muestreo. Para la determinación de la DA, PMP, CC se obtuvieron muestras no disturbadas mediante cilindros metálicos de volumen conocido (ver secciones 5.2.1, 5.2.3, 5.2.4).

5.2.1 Textura

La determinación de la textura se realizó mediante la metodología de Bouyoucos (Mwendwa, 2022). Para ello, se pesaron 75 g de suelo y se tamizaron a 2 mm. Posteriormente, se secaron en una estufa durante 24 h a 105 °C. Una vez transcurrido este periodo, se recuperaron las muestras de la estufa y se dejaron reposar durante 15 minutos, para luego ser pesadas y registrar el dato correspondiente.

Seguidamente, se depositó la muestra en un beaker de 600 mL, al cual se le agregaron 45 mL de peróxido de hidrógeno al 30 % y 30 mL de agua destilada. Se agitó cuidadosamente la mezcla, asegurando una distribución homogénea del peróxido y evitando una reacción violenta. Este procedimiento permitió la eliminación de la MO contenida en la muestra, la cual podría interferir en el análisis textural (Mwendwa, 2022; Vargas, 2022).

Una vez que la muestra se estabilizó, se cubrió con papel aluminio y se dejó reposar durante una noche. Posteriormente, se calentó en una plantilla por un tiempo no mayor a 2 h, sin exceder una temperatura de 80 °C. Cuando cesó la liberación de gases o efervescencia, se retiró la muestra de la plantilla y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Este paso favoreció la culminación de la reacción del peróxido de hidrógeno con la MO presente en la muestra (Mwendwa, 2022; Vargas, 2022).

A continuación, se secó nuevamente la muestra durante 24 h a 105 °C. Una vez seca, se pesaron 50 g en un beaker de 600 mL, registrando la cantidad exacta utilizada. Luego, se añadieron 200 mL de agua destilada y 10 mL de hexametafosfato de sodio. La mezcla se transfirió a una jarra metálica y se agitó durante 15 minutos (Mwendwa, 2022; Vargas, 2022).

Transcurrido este tiempo, se vertió el contenido en una probeta de 1 L y se aforó hasta completar dicho volumen con agua destilada. Posteriormente, se agitó vigorosamente de forma manual 20 veces con un agitador metálico y, tras un periodo de reposo de 2 horas, se realizó la primera medición, introduciendo el hidrómetro hasta alcanzar el equilibrio. Se registró la lectura correspondiente y se midió la temperatura de la muestra, anotando ambos valores. Además, se preparó un blanco con agua destilada y hexametafosfato de sodio, registrando su lectura y temperatura para cada muestra (Mwendwa, 2022; Vargas, 2022). Finalmente, se corrigieron las lecturas del hidrómetro según la temperatura del blanco.

- Se añade 0.36 unidades de lectura por cada grado superior a los 19.4 °C
- Se resta 0.36 unidades de lectura por cada grado inferior a los 19.4 °C

Para el cálculo de proporción de partículas de limos, arenas y arcillas se emplean las ecuaciones [6], [7],[8] y [9].

$$\text{Material en suspensión} = \left(\frac{\text{Lectura corregida del hidrómetro a los 40 s}}{\text{Peso de la muestra}} \right) 100 \quad [6]$$

$$\text{Arena} = (100 - \% \text{material en suspensión}) \quad [7]$$

$$\text{Arcilla} = \left(\frac{\text{Lectura corregida del hidrómetro a las 2 h}}{\text{Peso de la muestra}} \right) 100 \quad [8]$$

$$\text{Limo} = 100 - (\% \text{arena} + \% \text{arcilla}) \quad [9]$$

5.2.2 Densidad Aparente

Por cada lote se muestrearon seis puntos a una profundidad de 0-5 cm y por cada punto se recolectaron en cilindros de 100 cm³, suelo sin disturbar por duplicado para la profundidad de estudio (Vargas, 2022). El suelo contenido en los cilindros se secó en la estufa a una temperatura de 105°C durante un periodo de 24 h, cumplido este periodo, se dejaron enfriar a temperatura ambiente en una desecadora por 1-2 h y luego, se registró el peso seco del suelo. La densidad aparente se determinó a partir de la relación entre la masa seca (105°C) y el volumen de la muestra extraída a partir de la ecuación [10] y [11] (Vargas, 2022).

$$DA = \left(\frac{P_{ss}}{V_{total}} \right) \quad [10]$$

donde:

DA: densidad aparente (g/cm³)

P_{ss}: peso suelo seco (g)

V_{total}: ($\pi r^2 h$)

[11]

π : 3.14159

r: radio del cilindro (cm)

h: altura del cilindro (cm)

5.2.3 Contenido de Materia Orgánica

Para la determinación del contenido de la MO, las muestras se procesaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) mediante la metodología principio de calcinación a temperaturas muy elevadas (DUMAS), la cual consiste en pesar de 120-150 mg de suelo, previamente secada a 50°C y tamizada a 2 mm, y posteriormente, la muestra es analizada en el equipo autoanalizador Elemental Vario Macro Cube, bajo el principio DUMAS el cual determina el, para obtener el valor porcentual de MO, se aplicó la siguiente ecuación

$$MO = COT * 1.43 \quad [12]$$

donde:

MO: contenido de materia orgánica (%)

COT: carbono orgánico total (%)

1.43: factor de corrección

5.2.4 Punto de Marchitez Permanente

Por cada lote se muestrearon seis puntos a una profundidad de 0-5 cm, en anillos de 2 cm de altura por duplicado, posteriormente, el contenido de agua a un potencial mátrico de 15000 hPa se determinó mediante un proceso de desecación en un aparato de placa de presión Richards. Luego, las muestras se pesaron para obtener el peso del suelo húmedo (PSH) y se sometieron a un proceso de secado en estufa a 105 °C durante 24 horas, con el fin de registrar el peso de suelo seco (PSS) (Vargas, 2022). El PMP se determinó a partir de la ecuación [13].

$$PMP = \left(\frac{PSH - PSS}{PSS} \right) 100 \quad [13]$$

donde:

PMP: punto de marchitez permanente (% v/v)

PSH: peso del suelo húmedo a 15000 hPa (g)

PSS: peso suelo seco (g)



Figura 2. Ollas de succión a 15000 hPa para la determinación de punto de marchitez permanente.

5.2.5 Contenido de humedad a Capacidad de Campo

Para la determinación del contenido de humedad a CC se muestrearon seis puntos a una profundidad de 0-5 cm de suelo sin disturbar en cilindros de 100 cm³ por duplicado por cada profundidad, posteriormente, en el laboratorio al cilindro se le colocó una malla en el fondo sujeta con una liga y se registró el peso de la muestra con la liga y la malla previo a la saturación. Las muestras pesadas se saturaron por 24 h (Vargas, 2022). Se realizaron tres ciclos de hidratación y drenaje, con agua destilada por un periodo de 15 minutos para desplazar el aire en el interior del sustrato y así evitar que se formen burbujas (Soto, Betancourt & Vega, 2021).

El punto de saturación (330 hPa) se alcanzó cuando se observó un brillo metálico en la superficie del sustrato, sin que se presentara flujo de agua libre (Soto, Betancourt & Vega, 2021). Posteriormente, las muestras se pesaron para obtener el peso de suelo húmedo (PSH) y se sometieron a un proceso de secado en estufa a 105 °C durante 24 horas, con el fin de registrar el peso de suelo seco (PSS) (Vargas, 2022). El CC se determinó a partir de la ecuación [14].

$$CC = \left(\frac{PSH - PSS}{PSS} \right) 100 \quad [14]$$

donde:

CC: capacidad de campo (% v/v)

PSH: peso del suelo húmedo a 330 hPa (g)

PSS: peso del suelo seco (g)



Figura 3. Equipo de caja de arena para la estimación de capacidad de campo a 330 hPa.



Figura 4. Cilindros con muestras de suelo previamente pesadas con malla y con liga para medición de capacidad de campo a 330 hPa.

5.3 Diseño del muestreo

Se evaluó la humedad del suelo a lo largo de un transecto longitudinal mediante el uso de PTFs. Para ello, se determinaron las propiedades del suelo que intervienen en la retención de agua, incluyendo MO, DA y textura. El transecto longitudinal se definió en base a la evaluación de perfiles del suelo a través de calicatas ubicadas en función del gradiente de la pendiente del terreno, permitiendo capturar posibles variaciones en las propiedades edáficas debidas a la topografía. Esto garantizó que los puntos de muestreo reflejen la influencia del relieve en la distribución de la humedad del suelo en caso de que la haya. Los puntos de muestreo se seleccionan de manera aleatoria dentro del transecto, asegurando una adecuada representación de la variabilidad espacial.

5.3.1 Análisis descriptivo de los datos:

Se ordenó, resumió y analizó el conjunto de datos de forma preliminar, a fin de representar las características de la muestra, de tal forma que se puedan realizar inferencias sobre el comportamiento

de los datos (Dytham, 2010). En este caso los valores que se determinaron fueron el promedio, la desviación estándar, el mínimo y el máximo para cada variable de estudio.

5.3.2 Evaluación de las PTFs:

Se estimaron los valores de CC y PMP de ecuaciones estandarizadas de tipo clase, a fin de evaluar su aplicabilidad en los suelos de la zona de estudio. Las ecuaciones se evaluaron mediante el valor RMSE y del R^2 .

Tabla 1. Variables dependientes e independientes para la determinación de la humedad a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente por la aplicación de ecuaciones de pedotransferencia.

Variables Independientes	Variables dependientes
Materia orgánica (%)	
Densidad aparente (g/cm^3)	Contenido de humedad a CC (%)
Arena (%)	
Limo (%)	Contenido de humedad a PMP (%)
Arcilla (%)	

5.3.3 Análisis de correlación:

Se realizó un análisis de correlación con el objetivo de determinar la existencia de una asociación lineal entre variables cuantitativas, específicamente entre las variables dependientes e independientes (Camacho, 2008). Además, para cada coeficiente de correlación de Pearson (R), se aplicó una *prueba t* con el fin de evaluar la significancia estadística de las correlaciones observadas, considerando un valor $p < 0.05$ como umbral para definir relaciones estadísticamente significativas (Dytham, 2010). Ambos procedimientos fueron implementados mediante un código desarrollado en Python, lo que permitió automatizar el cálculo de los coeficientes, sus respectivos valores p y la interpretación de la significancia estadística.

5.4 Objetivo 2: Validación de las PTFs

Se seleccionaron dos ecuaciones específicas para una evaluación detallada. La selección se basó en la naturaleza y número de variables que cada modelo incorpora. La primera ecuación se seleccionó en función del número de propiedades del suelo relacionadas directamente con la retención de agua, tales como la MO, la DA y la textura. Esta amplitud de variables permite representar de forma más completa el comportamiento hídrico del suelo. En contraste, la segunda ecuación incorpora únicamente variables texturales (porcentaje de arena, limo y arcilla), lo cual permite evaluar la capacidad predictiva de un modelo con menor complejidad paramétrica.

Esta estrategia de selección permite comparar el desempeño entre modelos con diferentes niveles de complejidad y tipos de variables, facilitando la valoración de su aplicabilidad en contextos con disponibilidad limitada de datos.

Posteriormente, se realizó el ajuste de dos PTFs a los datos obtenidos en campo, con el objetivo de evaluar su capacidad predictiva en las condiciones locales del estudio. Asimismo, se desarrollaron PTFs nuevas, como una propuesta para estimar la humedad del suelo a CC y PMP para el sitio de estudio, mediante regresión lineal múltiple. En este caso, la humedad del suelo a CC o a PMP fue empleada como variable dependiente y se modeló en función de los porcentajes de arena, limo, arcilla, DA y MO.

Las PTFs se ajustaron mediante RLM, cuyos parámetros se estimaron a través del método de MCNL, utilizando un algoritmo iterativo de minimización de la suma de residuos cuadráticos. La función ajustada relacionó la humedad volumétrica a 330 hPa (CC) y 15000 hPa (PMP) con variables edáficas como porcentaje de arenas, contenido de MO y DA (Parra, 2008; Montero, 2016). Los modelos con el mejor ajuste se seleccionaron en función del valor R^2 más cercano a 1 y la validación del modelo

mediante análisis de residuales. Enfoque que se alinea con los métodos comúnmente aceptados para el desarrollo y validación de PTFs (Myeni et al., 2021).

El ajuste y la validación de los modelos se llevaron a cabo mediante un código desarrollado en Python, lo que permitió estimar los parámetros, calcular los errores asociados y evaluar el desempeño de cada modelo de forma automatizada

5.5 Objetivo 3: Umbral de agua útil

Se utilizaron datos de los puntos de muestreo georreferenciados, distribuidos en los tres pisos altitudinales denominados piso alto, piso medio y piso bajo. A partir los datos obtenidos de CC y PMP, se estimó el umbral de agua útil (UAU) mediante la diferencia entre ambos valores, según la siguiente expresión:

$$UAU = CC - PMP \quad [18]$$

donde:

UAU: (% v/v)

CC: (% v/v)

PMP: (% v/v)

Se construyó una tabla de atributos en excel, que incluyó el identificador (ID) del punto, las coordenadas geográficas (latitud, longitud –grados decimales–), el estrato altitudinal correspondiente, los valores de CC, PMP y el UAU calculado. Esta tabla fue importada al software ArcGIS Pro 3.2, donde se generó una capa de puntos a partir de las coordenadas.

Para facilitar el análisis espacial, se crearon polígonos de área de influencia para cada piso altitudinal mediante la herramienta *New Feature Class (Create)*. Con el fin de generar superficies continuas de UAU mediante el método de interpolación de *Kriging* y representar espacialmente su distribución, la cual fue recortada según los polígonos de influencia mediante la herramienta *Extract by Mask*.

Las superficies generadas fueron utilizadas para elaborar mapas de calor del umbral de agua útil, aplicando esquemas de color secuenciales y clasificando los valores mediante intervalos iguales, según la distribución de los datos interpolados. Finalmente, se ajustaron los elementos cartográficos de los mapas, incluyendo leyenda, escala gráfica, flecha norte y proyección adecuada.

5.5.1 Índice de Sequía por humedad del suelo

El índice de Sequía por humedad del suelo (SODI, Soil Drought Index, por sus siglas en inglés,) se calculó a partir de la relación entre la humedad observada en el suelo y la capacidad de retención de agua, considerando la Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente. La humedad gravimétrica del suelo se determinó mediante el método de secado en estufa. Las muestras se pesaron inicialmente para obtener el peso húmedo y posteriormente se secaron a 105 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Luego, se registró el peso seco y la humedad gravimétrica se calculó con la expresión:

$$Hg = \frac{Ph - Pss}{Pss} * 100 * Da \quad [19]$$

donde:

Hg: Humedad gravimétrica (%v/v)

Ph: peso húmedo (g)

Pss: peso seco (g)

Da: densidad aparente (g/cm³)

Posteriormente, se determinó el índice SODI con la siguiente expresión:

$$SODI = \frac{Hg - PMP}{CC - PMP} \quad [20]$$

donde:

SODI: índice de Sequía por humedad del suelo

Hg: humedad gravimétrica (%v/v)

PMP: punto de marchitez permanente(%v/v)

CC: capacidad de campo (% v/v)

6 Resultados

6.1.1 Resultados: Determinación de las variables de entrada

La DA presentó valores entre 0.48 y 1.04 g/cm³, con un promedio de 0.70 ± 0.14 g/cm³. El contenido de arcilla varió de 6.14 a 41.29 %, con un promedio de 16.86 ± 10.84 %. Los limos oscilaron entre 31.33 y 48.59 %, con un valor promedio de 38.35 ± 4.63 %, mientras que las arenas fluctuaron entre 25.19 y 60.38 %, con un promedio de 44.79 ± 9.40 %. La MO presentó valores de 3.85 a 16.77 %, con un promedio de 9.43 ± 3.81 % (Tabla 2).

En cuanto a las variables de retención de humedad, la CC varió de 28.94 a 51.00 hPa, con un promedio de 37.94 ± 5.25 hPa, y el PMP presentó valores entre 20.72 y 38.99 hPa, con un valor medio de 26.78 ± 4.38 hPa (Tabla 2).

Tabla 2. Estadística descriptiva de los datos de campo, para los tres pisos altitudinales. Valores promedio ± desviación estándar de los datos empleados para la validación de modelos (n=36).

Piso	Densidad (g/cm ³)	Arcilla (%)	Limos (%)	Arenas (%)	MO (%)	CC (hPa)	PMP (hPa)
Alto	0.65±0.06	9.07±2.08	40.89±4.23	50.03±5.31	13.90±2.50	39.04±6.71	29.13±4.48
Min--max	0.57-0.77	6.14-12.29	32.41-48.59	42.21-60.38	10.07-16.77	28.94-51.00	24.97-38.99
Medio	0.58±0.07	12.40±2.97	39.10±4.38	48.50±4.20	8.05±1.69	36.92±4.65	22.50±2.00
Min--max	0.48-0.72	8.36-17.00	34.00-46.29	42.50-54.97	5.35-10.27	29.19-48.28	20.72-26.11
Bajo	0.86±0.09	29.12±9.93	35.04±2.73	35.84±9.52	6.34±1.33	37.86±3.39	28.70±2.11
Min - Max	0.72-1.04	9.22-41.29	31.34-40.84	25.19-54.26	3.85-7.54	33.11-43.50	25.91-31.76
Promedio general	0.70±0.14	16.86±10.84	38.35±4.63	44.79±9.40	9.43±3.81	37.94±5.25	26.78±4.38

La matriz de correlación evidenció que la variable contenida de arenas presentó los coeficientes de correlación más altos en valor absoluto respecto a CC (r = -0.23) y PMP (r = -0.34) (Figura 6). Estos resultados la posicionan como la variable independiente con mayor relación lineal con ambas variables explicativas.

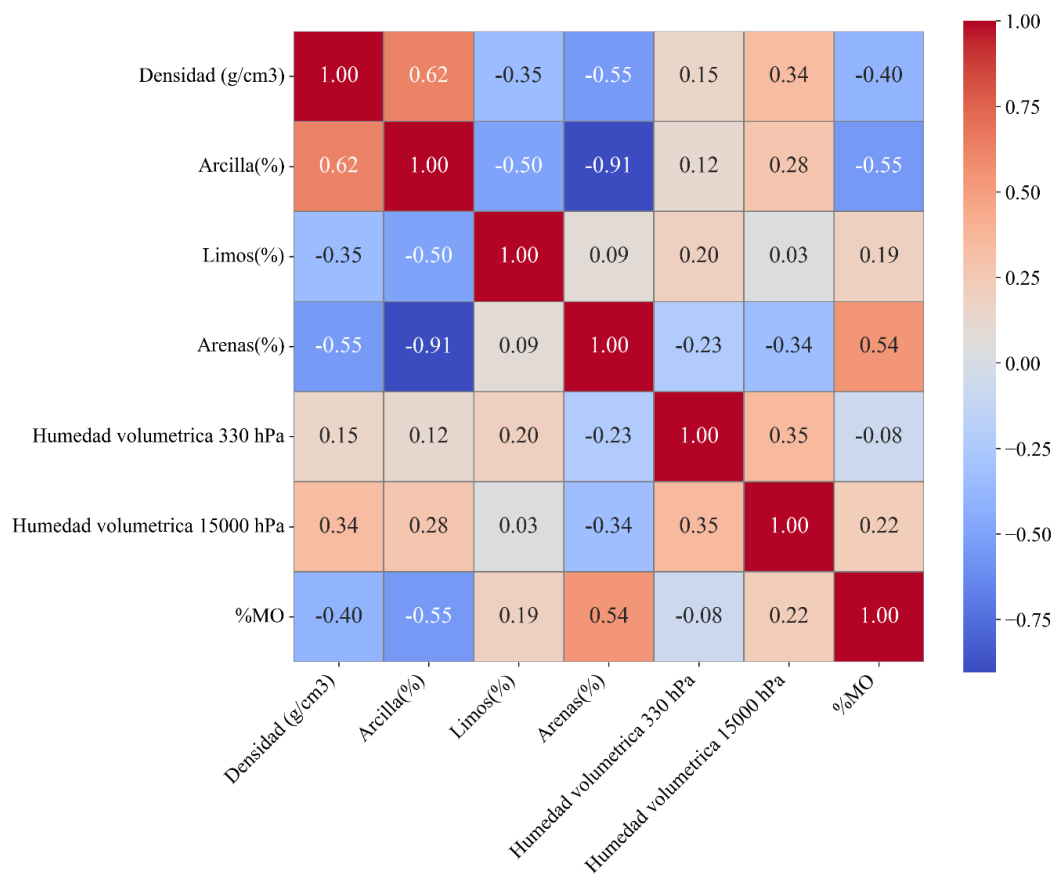


Figura 5. Análisis de correlación entre las variables independientes y dependientes.

En la matriz de valores de significancia p (Tabla 3) para las correlaciones entre las variables de estudio, se identificaron relaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$). La DA mostró correlaciones significativas con el contenido porcentual de arcillas, arenas, MO, así como con el contenido de humedad a PMP. Asimismo, el contenido porcentual de arcillas presentó correlaciones significativas con limos, arenas y MO.

El PMP, se relacionó significativamente con DA, arenas y CC. No obstante, variables como la CC y el contenido de limos no mostraron asociaciones estadísticamente significativas ($p > 0.05$) en la mayoría de sus interacciones. Esta ausencia de correlación podría explicarse por la alta dispersión de los datos o por la presencia de relaciones no lineales entre las variables.

Tabla 3. Valores de significancia ($p < 0.05$) para la correlación entre variables de estudio.

	DA (g/cm³)	Arcilla (%)	Limos (%)	Arenas (%)	CC (% v/v)	PMP (% v/v)	MO (%)
DA (g/cm³)							
	0.000	0.000	0.036	0.001	0.383	0.042	0.014
Arcilla (%)							
	0.000	0.000	0.002	0.000	0.502	0.100	0.000
Limos (%)							
	0.036	0.002	0.000	0.613	0.238	0.847	0.268
Arenas (%)							
	0.001	0.000	0.613	0.000	0.173	0.044	0.001
CC (hPa)							
	0.383	0.502	0.238	0.173	0.000	0.039	0.660
PMP (hPa)							
	0.042	0.100	0.847	0.044	0.039	0.000	0.189
MO (%)							
	0.014	0.000	0.268	0.001	0.660	0.189	0.000

Los resultados de la evaluación de las PTF mostraron valores bajos de R^2 (cerca de 0) y elevados de RMSE para todas las ecuaciones aplicadas a la estimación de CC y PMP. Además, se observó que los valores de RMSE fueron consistentemente inferiores para PMP en comparación con CC, indicando menores errores de predicción en las estimaciones de PMP (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones de prueba para determinar el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Autor	Ecuaciones	R ²	RMSE
Arruda et al., 1987	$CC = 0.29 \times (A + L) + 9.93$	0.04	20.74
	$PMP = 0.27 \times (A + L) + 1.07$	0.14	16.11
Lal, 1978	$CC = 0.065 + (0.004 \times A)$	0.02	38.19
	$PMP = 0.006 + (0.003 \times A)$	0.10	27.08
Tomasella and Hodnett, 1998	$CC = 4.046 + 0.426 \times L + 0.404 \times A$	0.06	11.81
	$PMP = 0.91 + 0.15 \times L + 0.396 \times A$	0.10	14.30
Adhikary et al., 2008	$CC = 56.37 - 0.51 \times B - 0.27 \times L$	0.03	16.16
	$PMP = 0.71 + 0.44 \times A$	0.08	19.42
Chakraborty et al., 2011	$CC = 27.447 + 0.078 \times A + 0.248 \times L - 0.241 \times B$	0.05	19.75
	$PMP = 20.695 + 0.021 \times A - 0.028 \times L - 0.179 \times B$	0.14	18.78
Rawls y Brakensiek, 1985	$CC = 0.026 + 0.005 \times A + 0.0158 \times MO$	0.02	21.02
	$PMP = 0.2576 - 0.002 \times B + 0.0036 \times A + 0.0299 \times MO$	0.33	11.14
Delgado y Barreto, 1988	$CC = 16.55 - 0.174 \times A - 0.164 \times L + 0.154 \times B + 1.24 \times MO$	0.01	26.57
	$PMP = 29.06 - 0.290 \times A - 0.253 \times L + 0.135 \times B + 2.56 \times MO$	0.32	6.69
Pecorari, 1988	$CC = 4.04 + 0.252 \times A + 0.206 \times L$	0.04	22.37
	$PMP = 6.85 + 0.360 \times A + L$	0.08	25.02
Malavé, 1991	$CC = 16.1608 - 0.1877 \times B + 1.0528 \times MO$	0.03	26.31
	$PMP = 23.953 - 0.2228 \times B + 4.6436 \times MO$	0.24	15.58
Peralta y Barrios, 2006	$CC = 15.691 + 0.566 \times B + 0.092 \times L + 1.787 \times MO - 8.412 \times DA$	0.00	8.46
	$PMP = 5.387 + 0.469 \times B - 0.020 \times L + 0.6909 \times MO - 4.949 \times DA$	0.02	8.27
Chicas et al., 2014	$CC = 55.05 - 28.97 \times DA - 0.23 \times A$	0.00	17.99
	$PMP = 67.3 - 33.77 \times DA - 0.23 \times A$	0.01	4.50

donde: CC = (% v/v), PMP = (% v/v), A= Arcilla (%), L = Limos (%), B=Arenas (%), MO=Materia Orgánica (%), DA= Densidad Aparente (g/cm³).

La representación gráfica de las variables independientes (% arcilla, % limo, % arena, % MO y DA) respecto a las variables explicativas PMP y CC evidenció una dispersión elevada de los datos en todos los casos, sin que se identificaran patrones o relaciones consistentes (Figura 6 y 7).

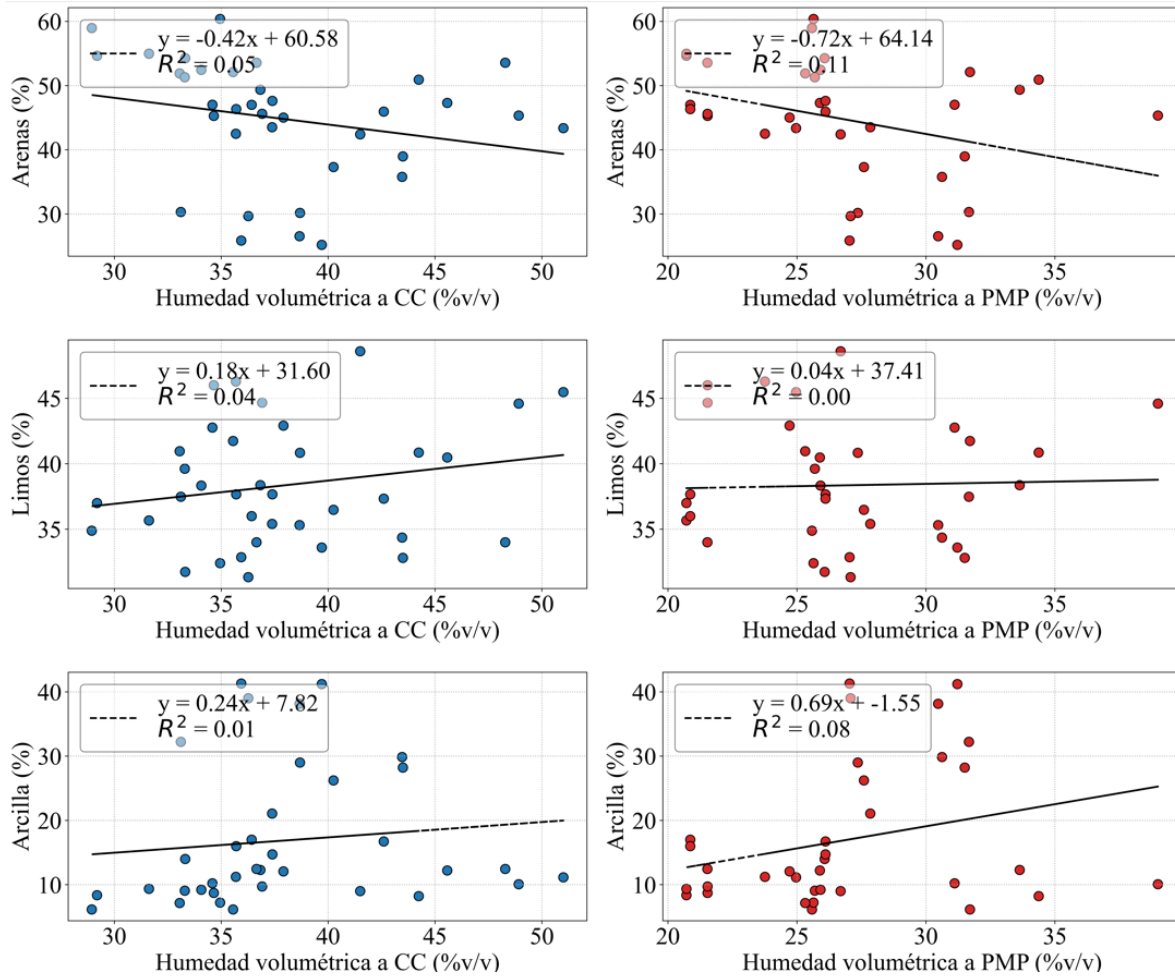


Figura 6. Relación entre la textura (arenas, limos y arcillas) en función de la humedad volumétrica a capacidad de campo (% v/v) y punto de marchitez permanente (% v/v).

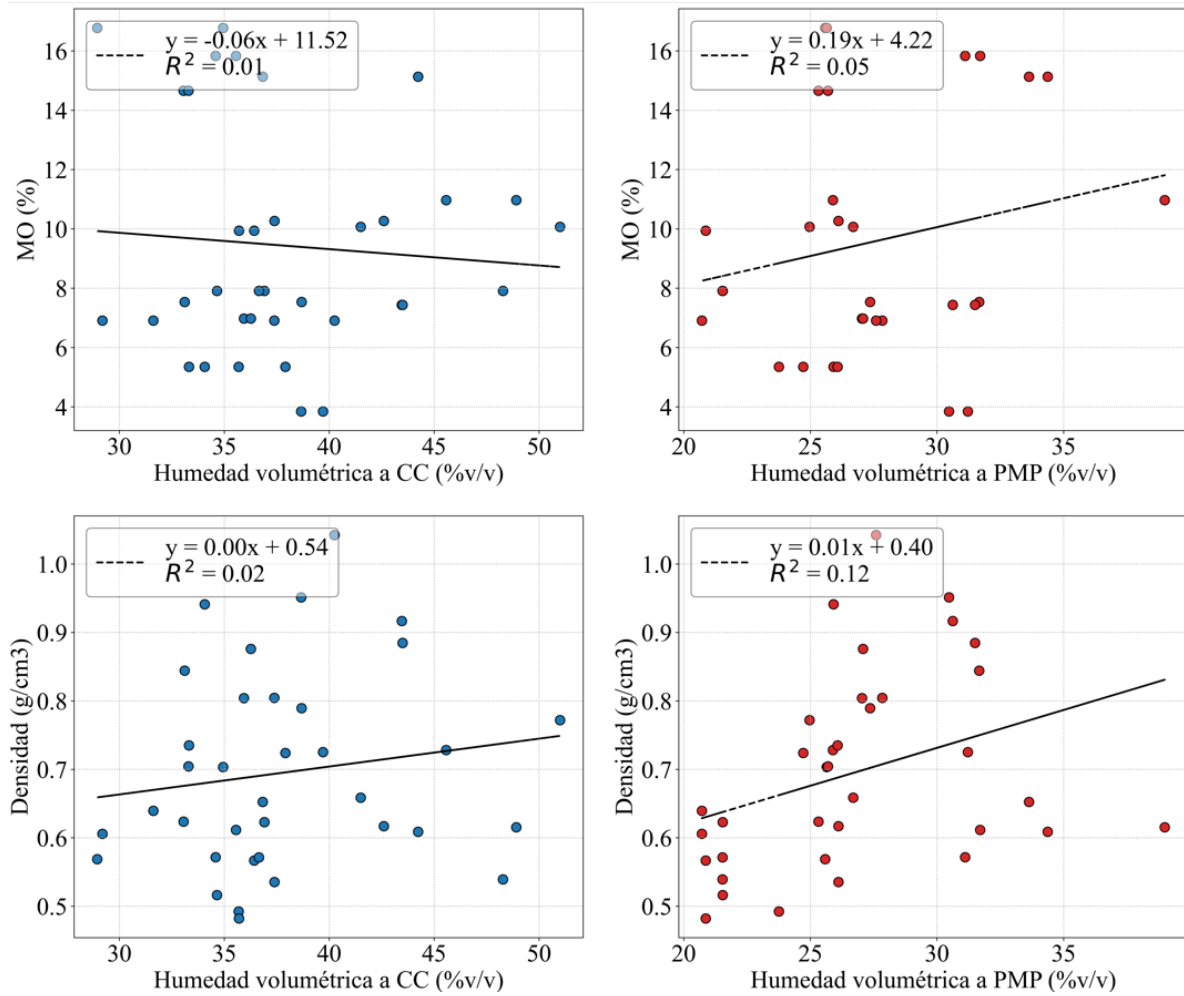


Figura 7. Relación entre el MO y la DA en función de la humedad volumétrica a capacidad de campo (% v/v) y punto de marchitez permanente (% v/v).

6.1.2 Resultados: Validación de las PTFs

Para la validación de los modelos se seleccionaron dos modelos específicos. El modelo Chakraborty et al. (2011) incorpora solo variables asociadas a textura, mientras que, el modelo Peralta & Barrios. (2006), incorpora, además, la MO y la DA. Esta amplitud de variables permite representar de forma más completa el comportamiento hídrico del suelo en contraste la primera ecuación.

El modelo ajustado por Chakraborty et al. (2011) para la estimación de la capacidad de campo (Figura 8) presenta un ajuste limitado ($R^2 = 0.10$), evidenciando una baja capacidad explicativa sobre la variabilidad de los datos experimentales.

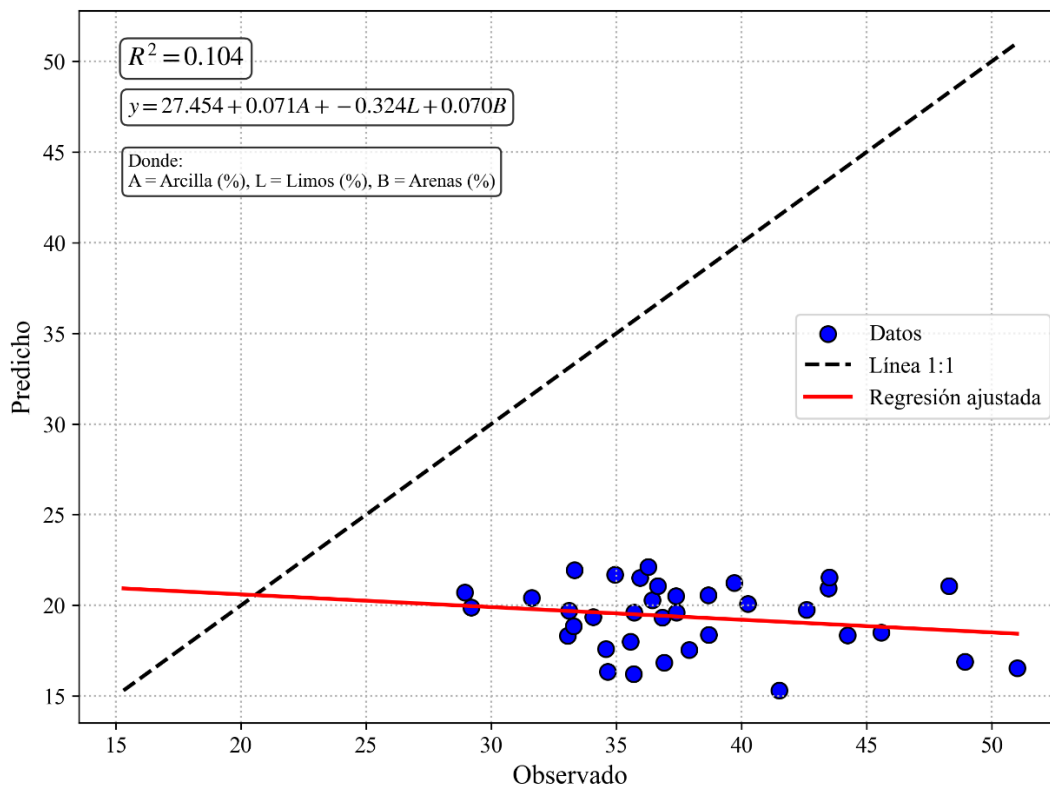


Figura 8. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a capacidad de campo (% v/v) por el modelo propuesto por Chakraborty et al. (2011).

El modelo ajustado de Chakraborty et al. (2011) (Figura 9), para la estimación del PMP, muestra un ajuste equivalente ($R^2=0.12$) respecto del modelo ajustado para CC. Los resultados reflejan una baja capacidad explicativa y un desempeño deficiente en la predicción de ambas variables.

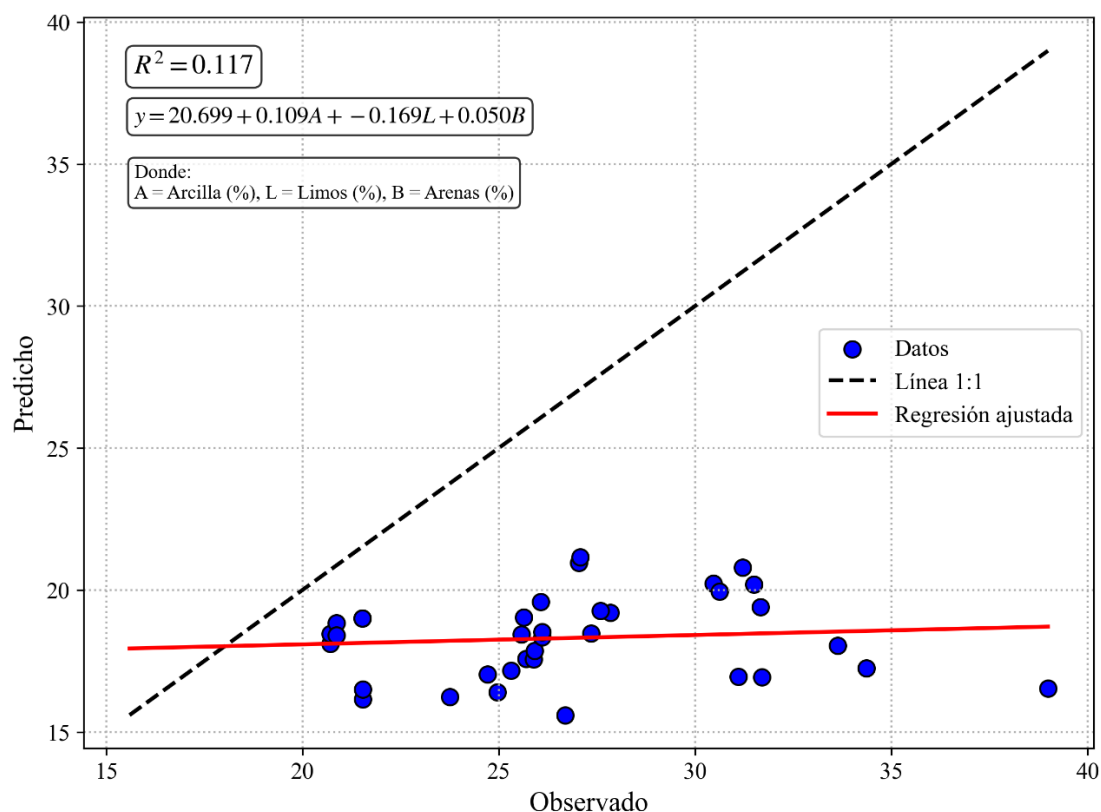


Figura 9. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a punto de marchitez permanente (%v/v) por el modelo propuesto por Chakraborty et al. (2011).

El análisis de residuales (Figuras 10 y 11) mostró que, aunque los errores se distribuyen de forma aleatoria alrededor de cero, presentan alta dispersión y no siguen una distribución normal, evidenciando un ajuste deficiente del modelo para CC y PMP.

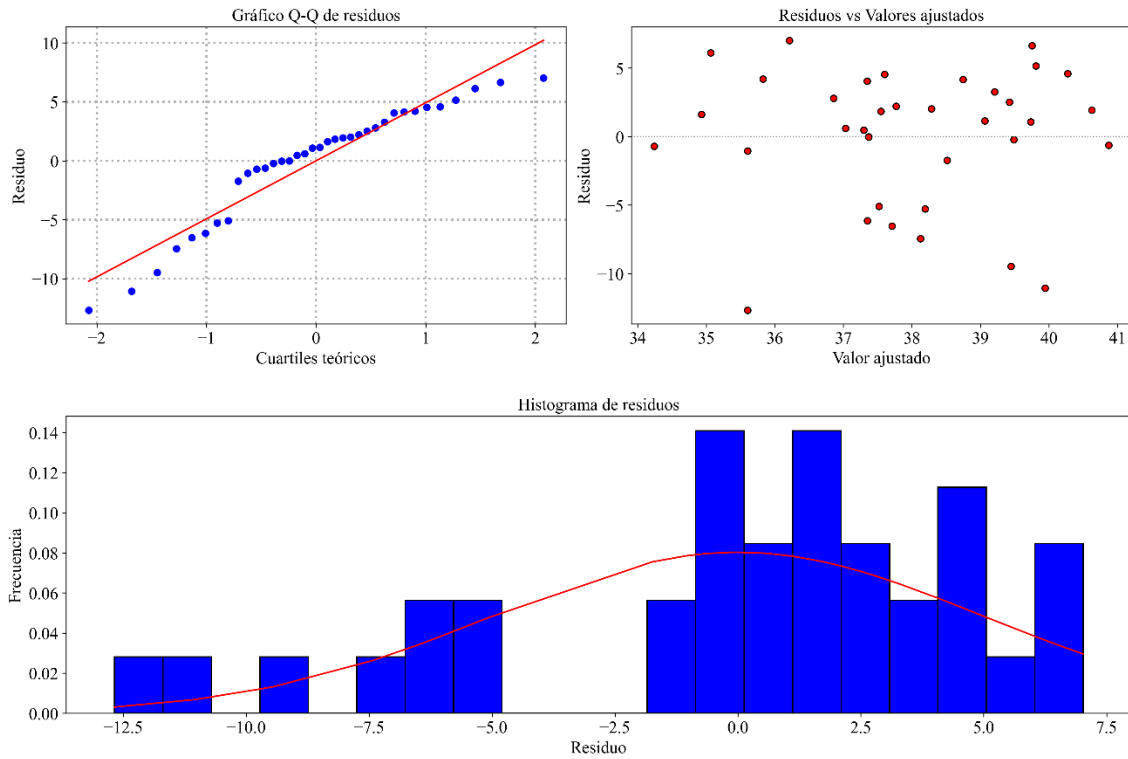


Figura 10. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v) obtenido por el modelo Chakraborty et al. (2011).

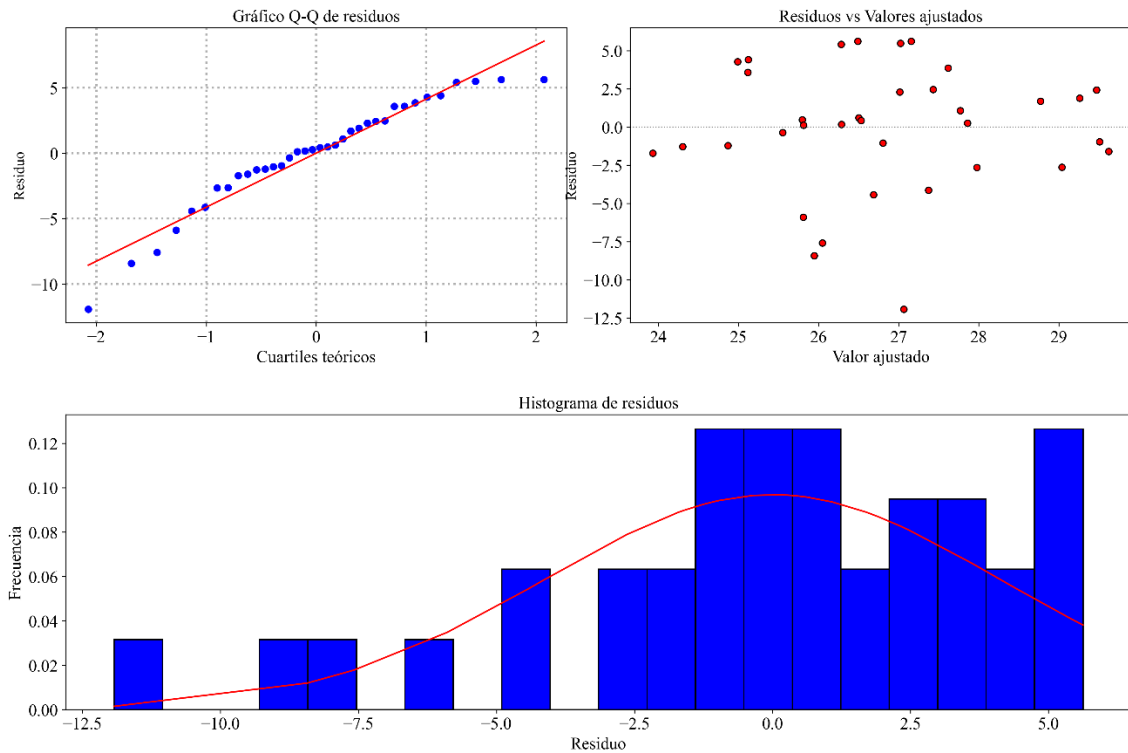


Figura 11. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a punto de marchitez permanente (% v/v) obtenido por el modelo Chakraborty et al. (2011).

El modelo ajustado de Peralta & Barrios. (2006) para la estimación de CC presentó un ajuste deficiente ($R^2 = 0.12$) (Figura 12), lo que evidencia una capacidad explicativa limitada del modelo para la predicción de la variable.

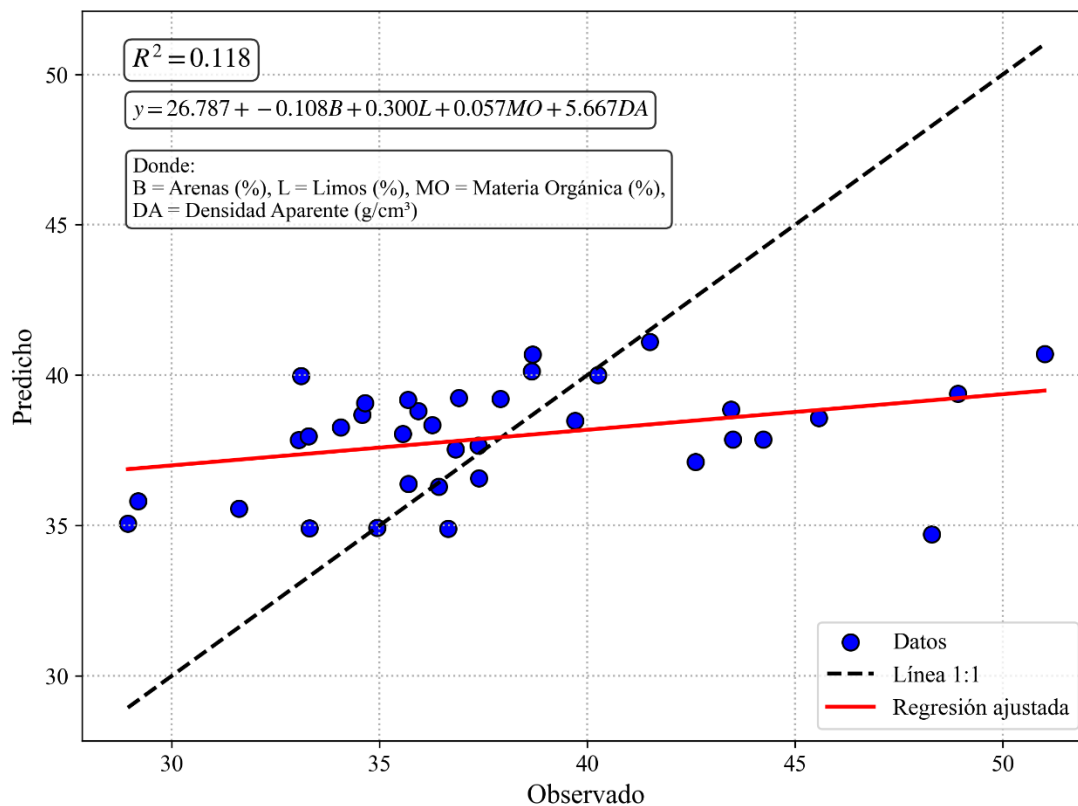


Figura 12. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a capacidad de campo (% v/v) por el modelo propuesto por Peralta & Barrios. (2006).

El modelo ajustado de Peralta & Barrios. (2006) (Figura 13) para la estimación de PMP mostró un ajuste superior al obtenido para CC ($R^2 = 0.42$); no obstante, el valor obtenido indica una capacidad predictiva moderada y limitada.

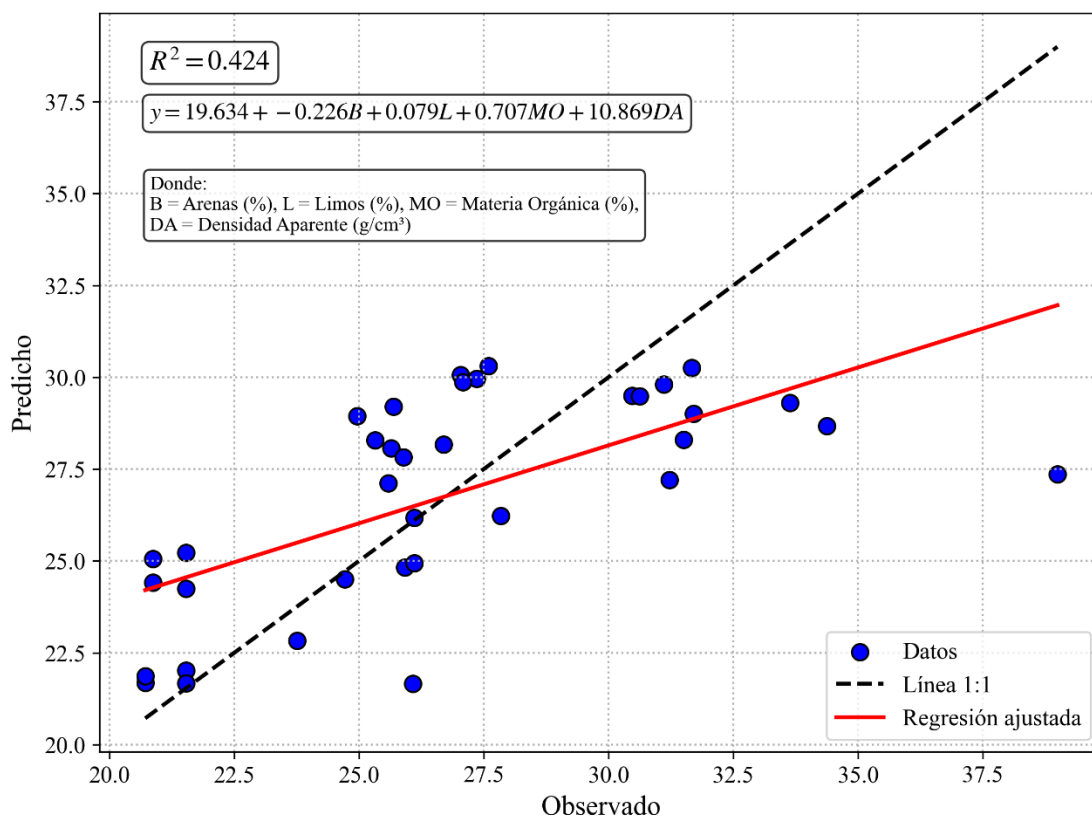


Figura 13. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a punto de marchitez permanente (% v/v) por el modelo propuesto por Peralta & Barrios. (2006).

El análisis de residuales para los modelos ajustados de Peralta & Barrios (2006) (Figuras 14 y 15), mostraron que, aunque los errores se distribuyen de forma aleatoria alrededor de cero, presentan alta dispersión y no siguen una distribución normal, evidenciando un ajuste deficiente del modelo tanto para CC como para PMP.

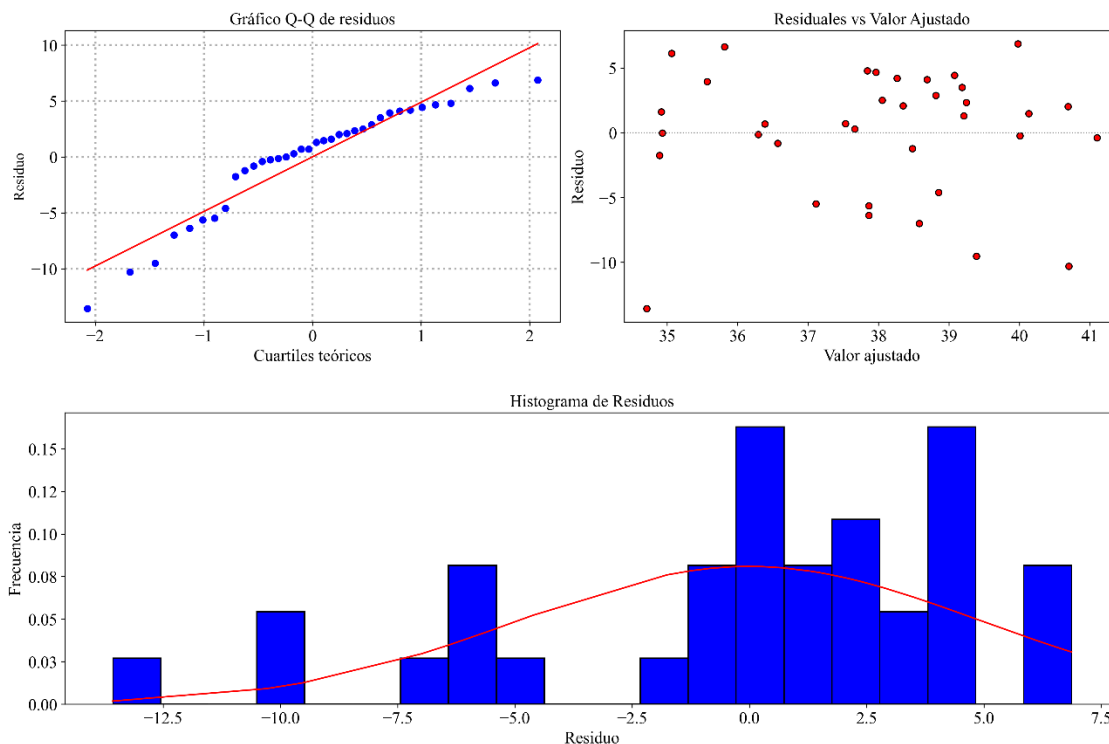


Figura 14. Análisis de residuos para la estimación del contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v) obtenido por el modelo Peralta & Barrios. (2006).

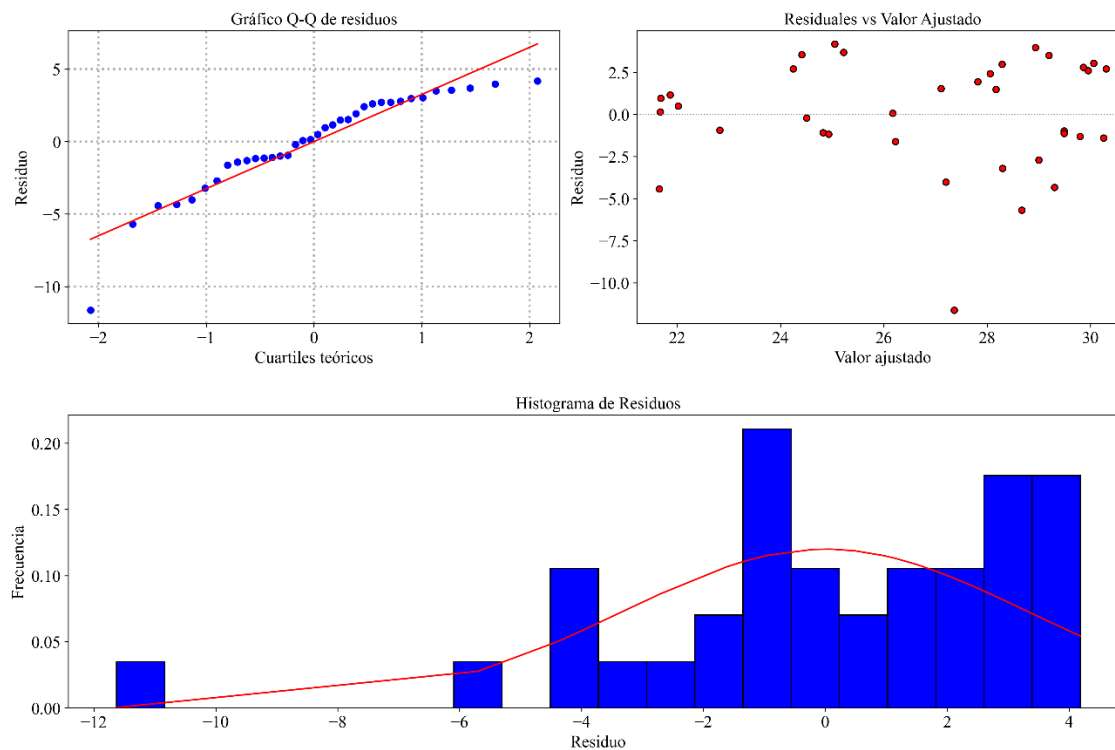


Figura 15. Análisis de residuos para la estimación del contenido de humedad a punto de marchitez permanente (% v/v) obtenido por el modelo Peralta & Barrios. (2006).

El modelo propuesto para la estimación de CC mostró un ajuste deficiente ($R^2 = 0.12$) (Figura 16), coincidiendo con los resultados obtenidos para los modelos de Chakraborty et al. (2011) y Peralta & Barrios. (2006), reflejando en todos los casos una capacidad predictiva limitada.

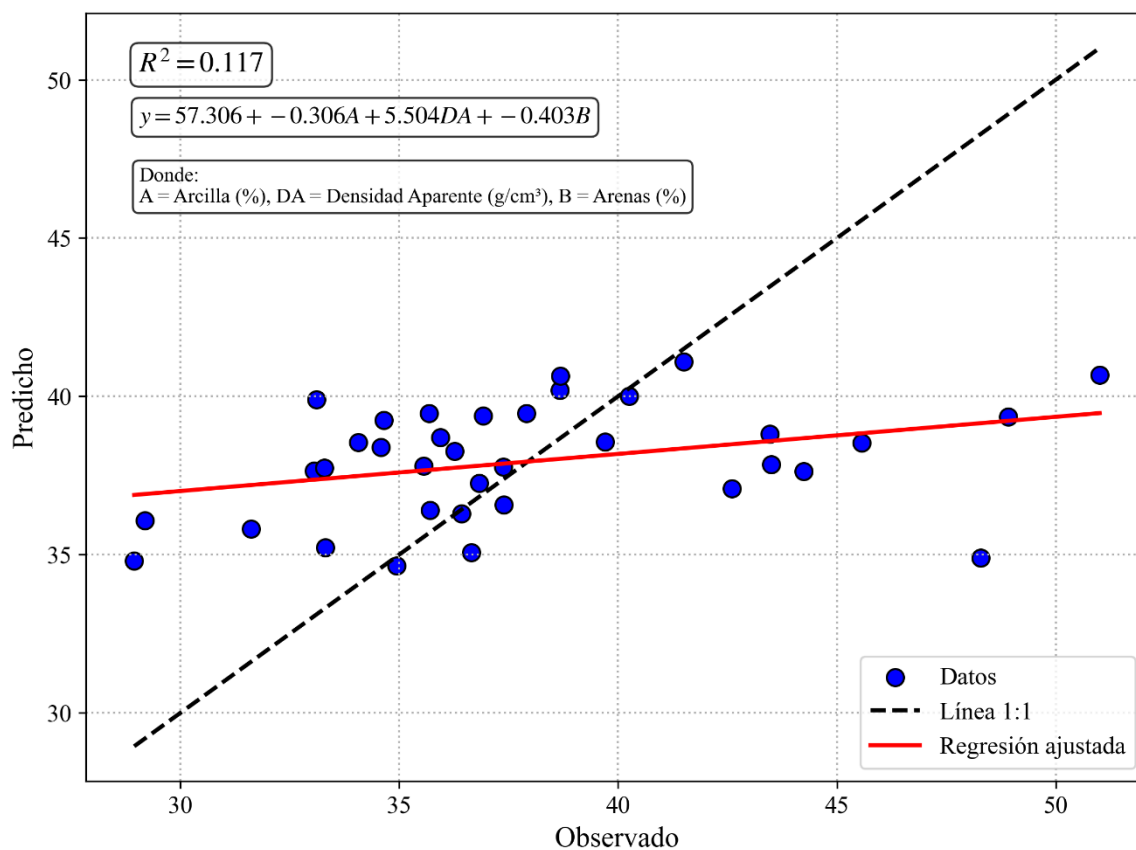


Figura 16. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a capacidad de campo (% v/v) por el modelo propuesto.

El modelo ajustado propuesto (Figura 17) para la estimación de PMP presentó un ajuste superior al registrado para CC ($R^2 = 0.42$), comportamiento similar al reportado por Peralta & Barrios. (2006), aunque ambos modelos evidenciaron una capacidad predictiva moderada y limitada.

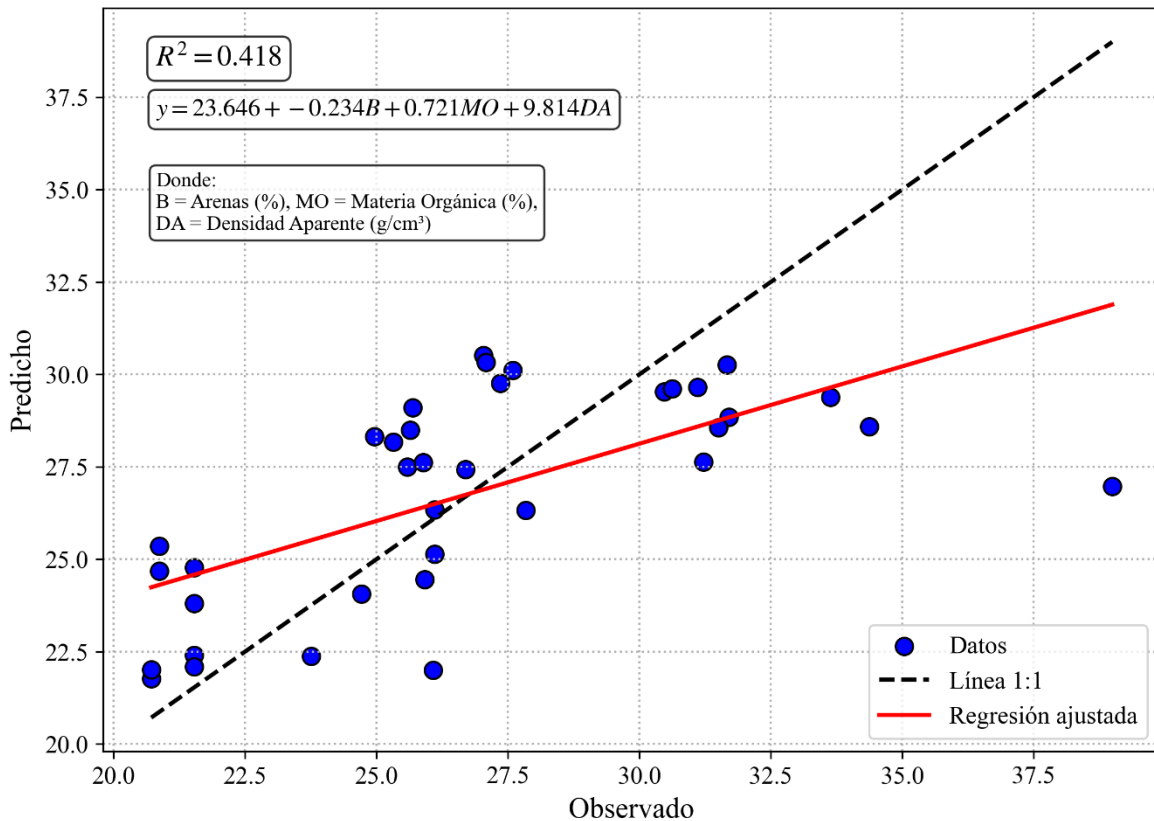


Figura 17. Valores predichos vs observados para la estimación de contenido de humedad en suelo a punto de marchitez permanente (% v/v) por el modelo propuesto.

El análisis de residuales para el modelo propuesto (Figuras 18 y 19) presentó un comportamiento similar al de los modelos de Chakraborty et al. (2011) y Peralta & Barrios (2006), caracterizado por errores aleatorios, alta dispersión y distribución no normal, evidenciando un ajuste deficiente tanto para la estimación de CC como para PMP.

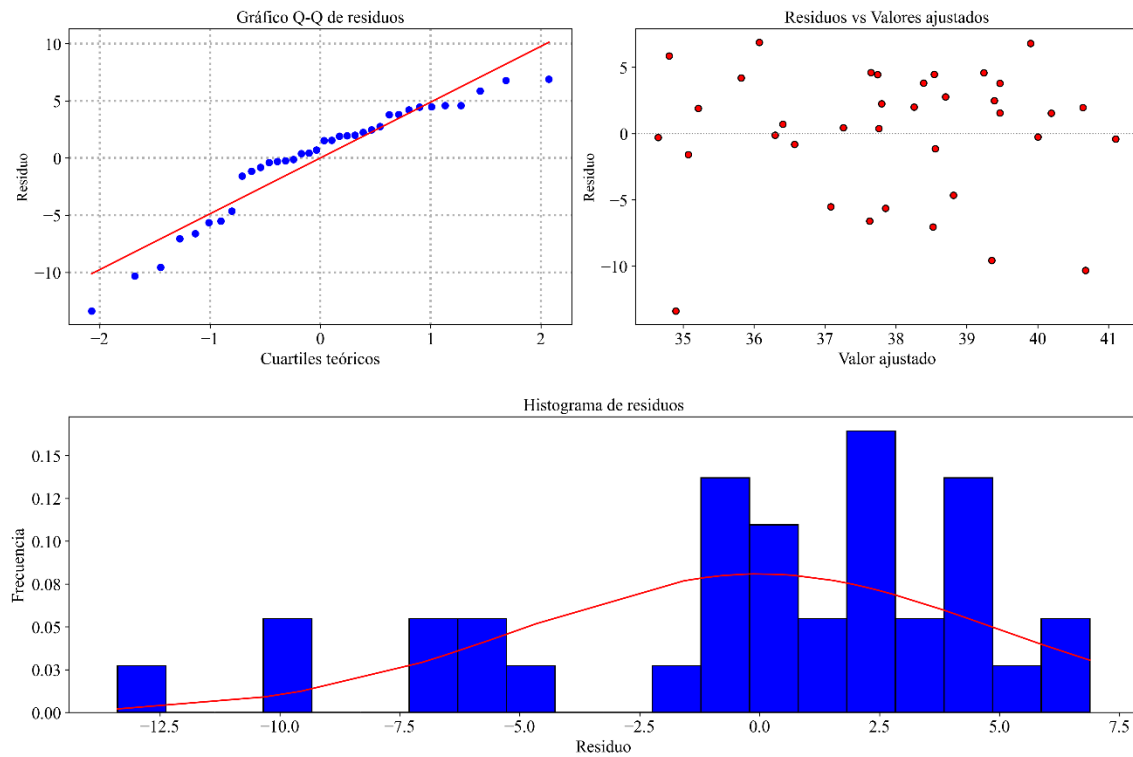


Figura 18. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a capacidad de campo (% v/v) obtenido por el modelo propuesto.

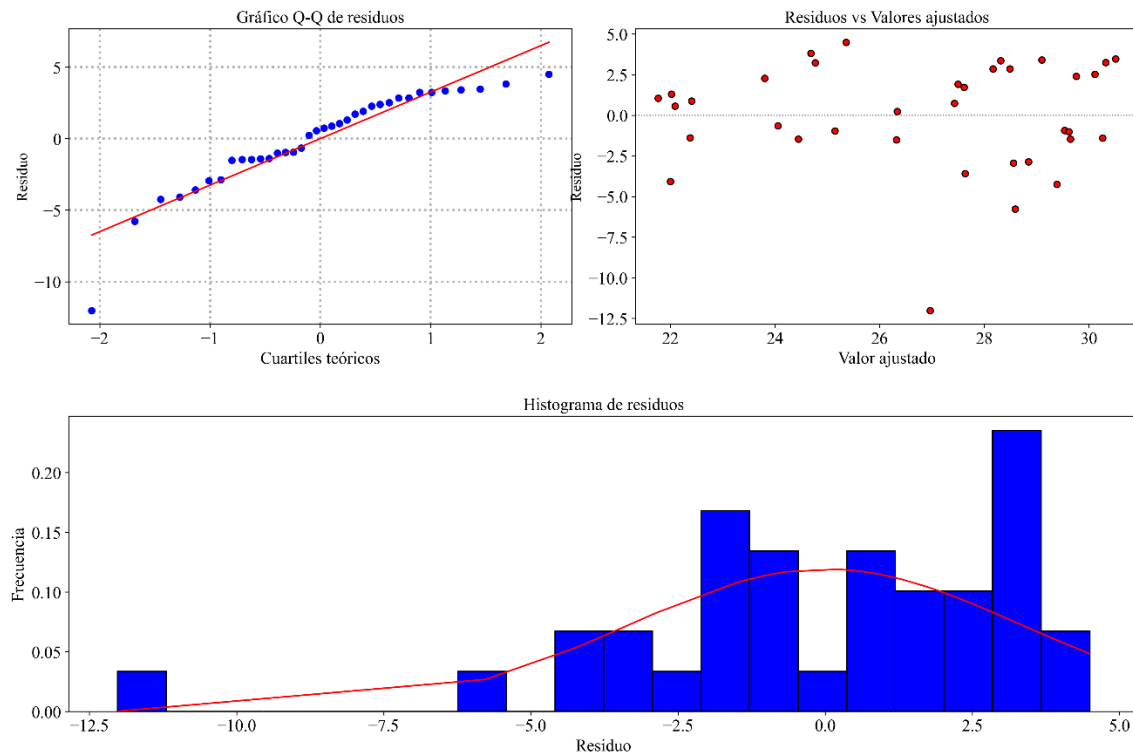


Figura 19. Análisis de residuales para la estimación del contenido de humedad a punto de marchitez permanente (% v/v) obtenido por el modelo propuesto.

6.1.3 Resultados: Umbral de agua útil

En este apartado se determinó el umbral de agua útil en los tres pisos altitudinales evaluados. Se incluye una tabla que resume los valores determinados para el UAU tanto experimentales como predichos con el modelo propuesto. Estos valores están asociados a cada ubicación referenciada y categorizados según el punto altitudinal. Asimismo, se presenta un boxplot que muestra las medias de UAU para cada piso altitudinal, junto con la clasificación textural asociada a cada uno. Finalmente, se presentan mapas de calor que muestran la distribución espacial del umbral de agua útil en los tres pisos altitudinales evaluados (Figuras 21, 22, 23). Los mapas permiten visualizar las variaciones en la capacidad de retención de agua útil según la altitud y ubicación específica.

Los valores estimados de UAU oscilaron entre 1.19 y 26.04 % v/v, con un promedio de 11.88 ± 5.18 , mientras que los valores predichos variaron entre 6.73 y 13.65 % v/v, con un promedio de 10.63 ± 1.82 . Se evidenció una mayor dispersión en los valores estimados, especialmente en el piso alto, donde se registró el valor máximo (26.04 % v/v), en contraste con una menor variabilidad en las predicciones generadas mediante la PTF aplicada (Tabla 5).

Tabla 5. Umbral de agua útil determinado para los puntos de muestreo en el transepto longitudinal. Valor promedio $\pm$ desviación estándar.

ID	Lote	UAU Estimado (% v/v)	UAU Predicho (% v/v)
A02	Alto	1.19	6.73
A08	Alto	3.48	8.85
A09	Alto	26.04	8.85
A12	Alto	7.60	13.01
A15	Alto	9.87	13.01
A19	Alto	9.92	10.92
B02	Bajo	8.15	8.84
B07	Bajo	8.19	8.84
B11	Bajo	11.32	10.13
B12	Bajo	12.66	10.13
B18	Bajo	12.00	11.65
B19	Bajo	8.90	13.65
SL02	Medio	11.92	13.65
SL10	Medio	11.28	10.79
SL12	Medio	8.47	10.79
SL13	Medio	15.56	10.77
SL4	Medio	15.38	10.54
SL9	Medio	15.12	10.54
Promedio general		10.95 $\pm$ 5.18	10.65 $\pm$ 1.82

El valor más alto capacidad de almacenamiento de agua útil correspondió al piso medio, seguido por los pisos bajo y el alto (Figura 20).

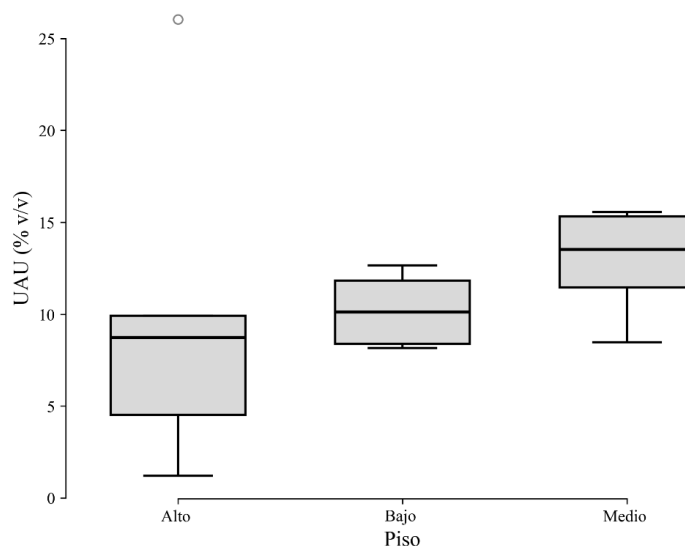


Figura 20. Distribución de umbral de agua útil (% v/v) según piso altitudinal.

Los pisos alto y medio presentaron texturas Franco, con contenidos de arcilla de 9.07 % y 12.40 %, limo de 40.89 % y 39.10 %, y arena de 50.03 % y 48.50 %, respectivamente. Por su parte, el piso bajo se clasificó como Franco Arcilloso, con un mayor contenido de arcilla (29.12 %), limo de 35.04 % y arena de 35.84 % (Tabla 5).

Tabla 6. Clasificación textural por piso altitudinal según el triángulo textural del Soil Science Society of America (SSSA).

Piso	Arcilla (%)	Limos (%)	Arenas (%)	Clasificación textural
Alto	9.07	40.89	50.03	Franco
Medio	12.40	39.10	48.50	Franco
Bajo	29.12	35.04	35.84	Franco arcilloso

La Tabla XXX muestra los promedios de CC, punto de marchitez permanente (PMP), humedad observada y el índice SODI para los diferentes pisos de la finca. Se observa que el piso Alto presenta los valores más altos de humedad observada (46.83 %v/v) e índice SODI (1.79), mientras que el piso Bajo registra los valores más bajos de humedad observada (37.18 %v/v) e índice SODI (1.03).

Tabla 7. Parámetros hídricos del suelo e índice SODI en los pisos alto, medio y bajo de la finca.

Piso	Promedio CC (%v/v)	Promedio PMP (%v/v)	Promedio Humedad Obss (%v/v)	Índice SODI
Alto	39.04	29.13	46.83	1.79
Medio	36.92	22.50	41.32	1.31
Bajo	36.92	29.06	37.18	1.03

En el Piso Alto, el UAU presentó valores que variaron entre 1.22 y 26.02% v/v, registrándose en este sector la mayor amplitud de rango y los valores más altos obtenidos (Figura 21). En el Piso Medio, los valores de UAU oscilaron entre 8.51 y 15.55% v/v, destacando como el segundo rango más amplio observado (Figura 22). Por último, en el Piso Bajo, el UAU se ubicó entre 8.62 y 11.28% v/v, mostrando la menor variabilidad espacial y el rango más estrecho de los tres pisos altitudinales evaluados (Figura 23).

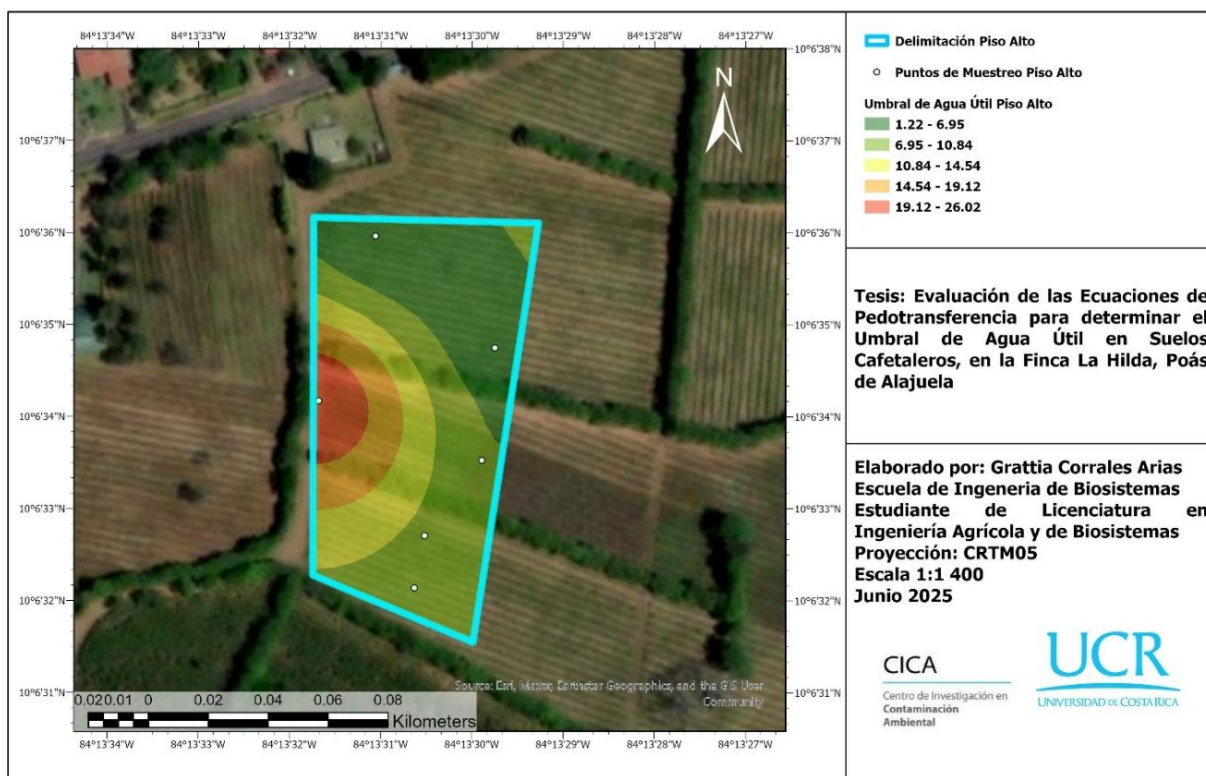


Figura 21. Representación del umbral de agua útil para piso alto en Finca La Hilda, Poás, Alajuela.

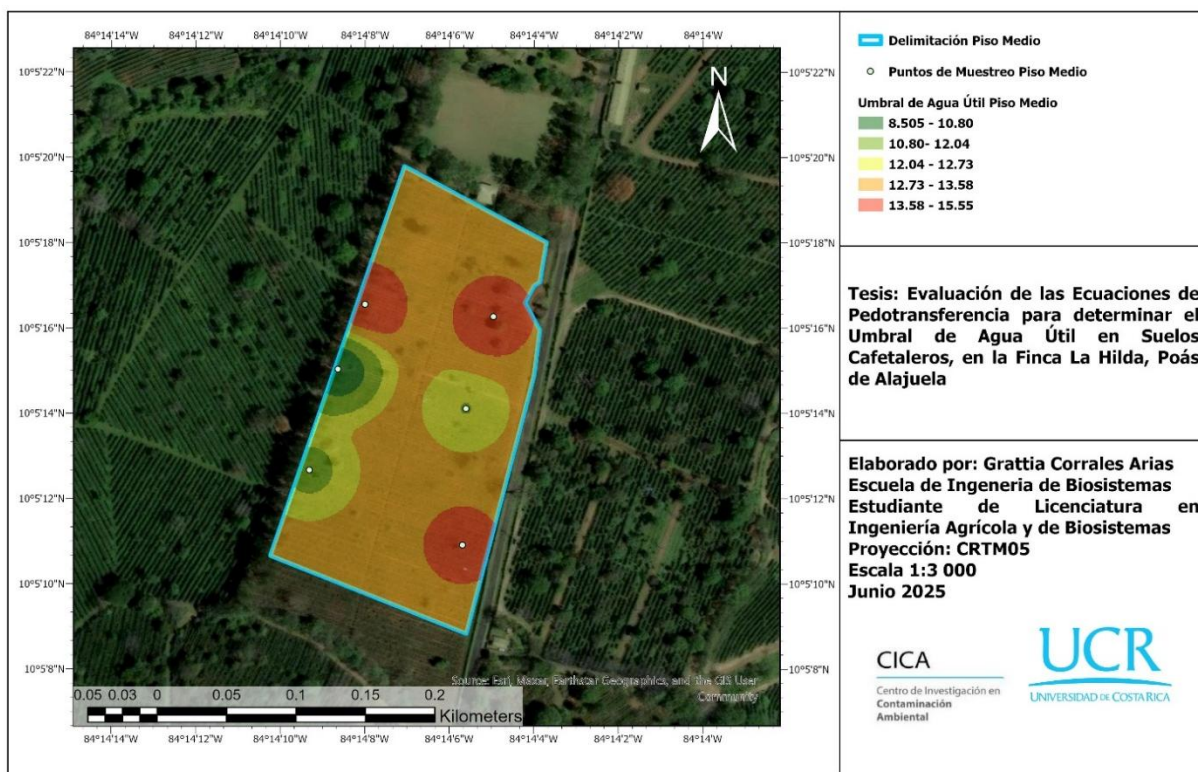


Figura 22. Representación del umbral de agua útil para piso medio en Finca La Hilda, Poás, Alajuela.

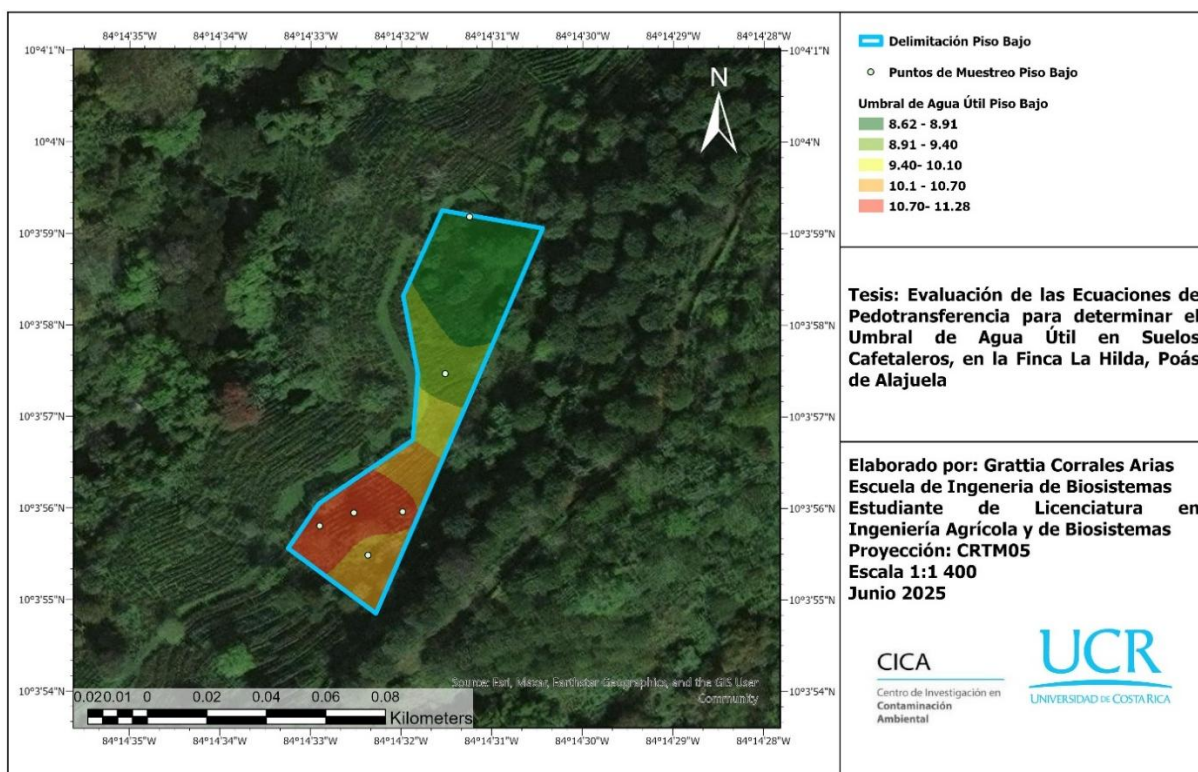


Figura 23. Representación del umbral de agua útil para piso bajo en Finca La Hilda, Poás, Alajuela.

7 Discusión

7.1.1 Determinación de las variables de entrada

En el análisis de correlación realizado para seleccionar las variables de entrada más relevantes en la modelación del contenido de humedad del suelo, se identificaron relaciones estadísticamente significativas entre variables edáficas clave.

La correlación positiva moderada entre la DA y el contenido de arcilla ($r = 0.62$, $p < 0.05$) (Figura 5), puede explicarse por el empaquetamiento denso de las partículas finas en suelos con mayor proporción de arcilla, lo cual reduce el espacio poroso total e incrementa la DA. Esto es consistente con lo reportado por Salamanca y Sadeghian. (2005), quienes señalaron que los suelos con alta fracción arcillosa tienden a mostrar mayores valores de DA debido a una disminución en la macroporosidad.

Por el contrario, la relación negativa entre la DA y la MO ($r = -0.40$, $p < 0.05$), concuerda con lo señalado por Salamanca y Sadeghian. (2005), quienes indican que un incremento en la MO favorece la mejora en la estructura del suelo y un aumento en la proporción de macroporos, lo cual se asocia con una disminución en la DA (Figura 5).

Del mismo modo, se observó una correlación inversa entre la DA y el contenido de arenas ($r = -0.55$, $p < 0.05$) (Figura 5). Este comportamiento puede atribuirse a la alta porosidad y una baja DA, características de suelos con fracciones arenosas predominantes, especialmente en Andisoles como lo señala Bejar et al. (2020).

En cuanto al comportamiento hídrico, se identificó una correlación negativa entre el contenido de arenas y la humedad volumétrica, tanto a CC ($r = -0.23$, $p > 0.05$) como a PMP ($r = -0.34$, $p < 0.05$) (Figura 5). Este patrón responde a la capacidad limitada de las partículas gruesas para retener agua, debido a una menor área superficial y la predominancia de poros de mayor tamaño, que se relaciona con la liberación de grandes cantidades de agua a muy bajas presiones mátricas, en suelos como los Andisoles (Bejar et al., 2020).

Por otro lado, el porcentaje de arcillas mostró una correlación positiva con la humedad volumétrica tanto a CC ($r = 0.12$, $p > 0.05$) como a PMP ($r = 0.28$, $p > 0.05$) (Figura 5). Este comportamiento se relaciona con la formación de microporos y meniscos capilares en la matriz del suelo, los cuales incrementan el potencial de retención hídrica. Asimismo, la alta superficie específica de las partículas de arcilla potencia los procesos de adsorción de agua (Reichert et al., 2009). Ambos procesos —capilaridad y adsorción— están relacionados con el potencial mátrico y, por ende, regulan la retención de humedad en el suelo. Suelos con estas características físicas presentarán una mayor capacidad de retención de agua (Reichert et al., 2009).

No obstante, al evaluar la capacidad predictiva de las ecuaciones de PTFs estandarizadas, se obtuvieron bajos valores de R^2 , lo que evidencia un ajuste insuficiente para describir adecuadamente los datos experimentales (Tabla 4) (sección 11.1 anexos). Esto sugiere que las PTFs aplicadas no logran representar el comportamiento del agua en el suelo en esa condición específica, posiblemente debido a diferencias en propiedades como textura, estructura y contenido de MO, con respecto a los suelos utilizados para calibrar dichas ecuaciones (Hodnett & Tomasella, 2002).

Los altos valores de RMSE (Tabla 4) indicaron una alta magnitud de error en las predicciones, confirmando la elevada dispersión entre los valores estimados y observados (Urzúa, 2013; Myeni et al., 2021). Esta dispersión también fue evidente en los gráficos de dispersión (Figura 6 y 7), donde no se identificaron patrones definidos ni tendencias claras. Los puntos se distribuyeron de forma

aleatoria en el plano cartesiano, sin relaciones lineales, curvilíneas ni agrupamientos que indicaran asociación entre las variables (Figura 6 y 7). Esta dispersión refleja la variabilidad inherente de los datos de campo y de las predicciones generadas por las ecuaciones aplicadas, comportamiento coherente con los bajos valores de R^2 obtenidos (sección 11.1 anexos). Además, este resultado es consistente con la heterogeneidad de las propiedades edáficas reportadas (Tabla 2), donde se observa una considerable dispersión en variables como textura y humedad volumétrica, factores que inciden directamente en la precisión de los modelos de predicción (Rawls & Brakensiek 1985; Pachepsky & Van Genuchten, 2011).

7.1.2 Validación de las PTFs

Los resultados de la validación del modelo ajustado propuesto por Chakraborty et al. (2011) indican una baja capacidad explicativa para las tensiones de humedad evaluadas. Los valores del coeficiente de determinación fueron bajos tanto para CC (0.10) como para PMP (0.12) (Figuras 8 y 9), lo cual indica una capacidad limitada del modelo para explicar la variabilidad del contenido de humedad en los suelos evaluados.

Según Hodnett y Tomasella. (2002), la precisión de las predicciones generadas por una ecuación de pedotransferencia (PTF) disminuye notablemente cuando se aplica fuera del rango de condiciones edáficas y climáticas para las cuales fue calibrada. En este caso, la zona de estudio se asocia a suelos Andisoles de origen volcánico, caracterizados por su alta porosidad, densidades aparentes muy bajas (inferiores a 0.5 g/cm^3) y contenidos de humedad gravimétrica que pueden superar el 100%. Pese a su alta retención de humedad, estos suelos presentan baja disponibilidad de agua, debido a la fuerte adsorción de agua en los minerales amorfos predominantes, como alofana e imogolita, y a su elevada microporosidad. Estas condiciones, junto con su rápida lixiviación de bases y sílice, limitan la aplicabilidad de modelos de predicción calibrados para suelos de regiones templadas (Uehara, 2005).

Las variables explicativas del modelo Chakraborty et al. (2011), porcentaje de limos, arcillas y arenas, mostraron correlaciones débiles con las variables dependientes. El análisis de correlación (Figura 6), mostró valores bajos entre las fracciones texturales y la humedad volumétrica a CC (% arcilla $r = 0.20$, % limo $r = 0.12$ y % arena $r = -0.23$), y PMP (arcilla $r = 0.03$, limo $r = 0.28$ y arena $r = -0.34$), lo que concuerda con los bajos valores de R^2 obtenidos.

El análisis de residuos del modelo ajustado de Chakraborty et al. (2011) (Figuras 10 y 11) mostró desviaciones significativas en el gráfico de probabilidad normal, indicando la posible presencia de valores atípicos “outliers” (mediciones menores o mayores que la mayoría de las observaciones) o un ajuste inadecuado del modelo (Cousineau & Chartier, 2010; Verma, 2025).

En el gráfico de residuos frente a valores ajustados (Figuras 10 y 11), no se observaron patrones claros, lo cual sugiere una distribución aleatoria, lo que respalda la suposición de homocedasticidad (igualdad de varianzas en los errores) y una relación correctamente modelada (Verma, 2025). Sin embargo, los altos rangos de error tanto para CC ($\epsilon = 5$ a -11) y para PMP ($\epsilon = 5$ a -12.5) (sección 11.2 anexos), indican una alta variabilidad y una posible presencia de valores atípicos o deficiencias en el ajuste del modelo. El histograma de residuales mostró asimetrías y colas largas, lo que refuerza que el modelo no representa adecuadamente el comportamiento del contenido de humedad del suelo (Verma, 2025).

En el caso del modelo de Peralta & Barrios (2006), se observó una mejor capacidad predictiva para el PMP ($R^2 = 0.42$) que para la CC ($R^2 = 0.12$) (Figuras 12 y 13). Esta mejora se atribuye a la incorporación de variables que mostraron mayor correlación con el contenido volumétrico de humedad a PMP en la zona de estudio, tales como densidad aparente ($r = 0.34$) y porcentaje de arenas

($r = -0.34$) (Figura 6). Los suelos Andisoles evaluados, presentan estas características, un alto contenido de arenas y bajas densidades aparentes, asociadas con la liberación de agua a bajas presiones debido a un mayor volumen de macroporos (Salamanca & Sadeghian, 2005; Bejar et al., 2020).

El análisis de residuales de este modelo (Figura 13 y 14), mostró un comportamiento similar al reportado para el modelo Chakraborty et al. (2011). Las desviaciones en el gráfico de probabilidad normal respecto a la línea teórica indican deficiencias en el ajuste, mientras que los gráficos de residuales frente a valores ajustados no se identificaron patrones definidos, lo cual sugiere que los errores se distribuyen aleatoriamente, respaldando la suposición de homocedasticidad y una adecuada especificación de la relación entre variables (Verma, 2025). Sin embargo, la distribución de errores no se centra en cero y exhibe rangos de error muy amplios, tanto para CC ($\epsilon = 5$ a -11) (sección 11.2 anexos). como para PMP ($\epsilon = 3$ a -11) (sección 11.2 anexos). El histograma de residuales, evidencia asimetría y presencia de colas prolongadas, lo que sugiere que el modelo no logra representar completamente el comportamiento de los datos (Verma, 2025).

El modelo propuesto (Figura 16 y 17) incorpora variables edafológicas obtenidas directamente de los datos de campo, incluyendo contenido de arcilla, arena, DA y MO, seleccionadas por su alta capacidad explicativa según el análisis de correlación (Figura 5). El modelo propuesto mostró un ajuste comparable con el de Peralta & Barrios (2006), con valores de R^2 de 0.12 para CC y 0.42 para PMP. La exclusión de la fracción limo, que mostró correlaciones muy bajas ($r = 0.20$ para CC y $r = 0.03$ para PMP), no afectó significativamente el ajuste, confirmando su escasa influencia en las condiciones específicas del área de estudio (Figura 5).

A pesar de haber sido ajustado con datos locales, el modelo propuesto también mostró limitaciones en su capacidad predictiva, probablemente debido a la elevada variabilidad espacial de los suelos Andisoles o del reducido número de datos. El análisis de residuos (Figuras 18 y 19) confirmó las mismas tendencias observadas en modelos anteriores, con desviaciones respecto a la línea teórica en los gráficos de probabilidad normal, errores que no se distribuyen de forma simétrica alrededor de cero, y valores extremos significativos, lo cual indica que el modelo aún no logra captar completamente la complejidad del comportamiento hidráulico de estos suelos.

La limitada capacidad de predicción de los modelos se debe a que, los Andisoles, particularmente los de la zona de estudio, se distinguen por su elevado contenido de arenas, altos contenidos de MO, alta porosidad y baja DA, lo que favorece una rápida liberación de agua a presiones bajas (330 hPa – CC) (Uehara, 2005; Bejar et al., 2020). Según Coronado & González. (2009), la capacidad predictiva de los modelos puede mejorarse incorporando información como el contenido de MO, debido a que, favorece la formación de agregados estables mediante su interacción con las partículas de arcilla, conformando el complejo de cambio. Este complejo mejora la infiltración y retención de agua en el suelo (Julca et al., 2006), lo que explicara la mejora en el ajuste de las estimaciones para el PMP respecto al modelo Chakraborty et al. (2011).

Comparando los dos modelos ajustados para CC (Chakraborty et al., 2011; Peralta & Barrios, 2006), respecto al modelo propuesto, se evidencia, de igual forma una alta dispersión de errores (rango de $\epsilon = 5$ a -11) (sección 11.2 anexos). En contraste, para PMP, los tres modelos presentan un comportamiento más uniforme, aunque aún con errores considerables (Figuras 15, 16 y 19). En todos los casos, los histogramas de residuales muestran asimetrías y colas largas, evidenciando que ninguno de los modelos logra ajustar adecuadamente la distribución real de los datos (Verma, 2025).

Finalmente, como demostraron Tomasella et al. (2000), las PTFs desarrolladas y calibradas a partir de datos locales tienden a producir estimaciones más precisas en comparación con aquellas derivadas de bases de datos de suelos de otras regiones. Sin embargo, incluso modelos basados en información edafológica local, como el del modelo postulado, pueden presentar limitaciones si no se consideran adecuadamente las interacciones no lineales, la heterogeneidad del sistema suelo:agua y la representación de minerales específicos, como los minerales amorfos predominantes en Andisoles.

7.1.3 Umbral de agua útil (UAU)

La determinación del UAU, evidenció una alta variabilidad entre los puntos de muestreo. En particular, los lotes clasificados como “Medio” y “Bajo” presentaron los valores máximos de 15.56 y 15.38% v/v, respectivamente (Tabla 4). Estos resultados sugieren condiciones edáficas, estructurales y texturales, favorables para el almacenamiento de agua.

En contraste, los puntos de muestreo en el lote “Alto” reportaron valores más bajos de contenido de agua (1.19 % v/v). Este resultado puede atribuirse a procesos de compactación superficial, los cuales limitan la retención de humedad en el perfil del suelo. Durante el muestreo, se observó la presencia de cobertura herbácea entre las calles de café, lo que, junto con una mayor resistencia al momento de extraer las muestras, sugiere un grado de compactación más alto en la capa superficial. Según Mosquera et al. (2020), la compactación en los horizontes superiores de suelos Andisoles afecta negativamente la dinámica hídrica, disminuyendo su capacidad de almacenamiento efectivo

Cabe señalar, el valor excepcionalmente alto registrado en A09 (26.04 % v/v), el cual puede estar relacionado a una densidad muy baja, alto contenido de MO y microporosidad en ese punto específico. Estos factores, según Buytaert et al. (2006) y Mosquera et al. (2020), son determinantes en la alta capacidad de retención de humedad en los Andisoles, atribuido principalmente a la presencia de minerales arcillosos amorfos, como la alofana y la imogolita. La alta proporción de partículas finas (arcilla, limo y MO), junto con una baja DA, elevada porosidad y amplia superficie específica, les confiere una notable capacidad de retención hídrica.

Los mapas generados permiten evidenciar patrones espaciales diferenciados en la distribución del UAU entre los tres pisos altitudinales evaluados. En el Piso Alto, se observó la mayor variabilidad espacial, con zonas que alcanzaron valores máximos superiores a 26 % v/v, lo que refleja una marcada heterogeneidad en la capacidad de retención hídrica del suelo. Este comportamiento resulta coherente con la capacidad de *kriging* para capturar áreas con diferencias abruptas (Kumar et al., 2016).

Por su parte, en el piso medio se presentó una variación intermedia, con zonas de mayor disponibilidad hídrica hacia sectores específicos y transiciones graduales entre las diferentes clases de UAU. La distribución de los valores interpolados evidenció núcleos definidos de mayor y menor capacidad de retención, lo cual refleja la capacidad del método para identificar agrupaciones de valores similares en función de la dependencia espacial existente entre los puntos muestreados (Lafond et al., 2015).

En el caso del Piso Bajo, el patrón espacial se caracterizó por una menor heterogeneidad, con valores agrupados en intervalos más estrechos y una distribución más uniforme a lo largo del lote. Este resultado es consistente con lo señalado por Wadoux et al. (2019), quienes destacan que, en zonas con baja variabilidad edáfica, *kriging* tiende a generar superficies suavizadas y continuas, manteniendo un adecuado ajuste a las condiciones observadas.

Según Houngh et al. (2013), los Andisoles, pueden alcanzar una capacidad de agua útil de aproximadamente 29% v/v, presentando valores promedio de contenido volumétrico de agua a CC de

56% v/v y 27% v/v al PMP. Esta alta retención a altas tensiones (15000 hPa) es una característica particular de los Andisoles (Houng et al., 2013). Asimismo, André da Costa et al. (2013), indican que el contenido de agua disponible tiende a ser mayor en los horizontes superficiales (0-20 cm), especialmente en aquellos con mayor proporción de limo y MO, y con texturas como franco arcilloso limosa, franco y arcillosa limosa, que favorecen una mayor capacidad de retención hídrica en la superficie.

Además, se observó que la variabilidad de los valores estimados de UAU es mayor respecto a la de los valores predichos por las PTFs. Esta dispersión es inherente a la variabilidad espacial del suelo, mientras que las estimaciones obtenidas mediante MCNL, permite minimizar la sumatoria de los errores del modelo al cuadrado acortando las distancias verticales desde cada punto hacia la recta por lo que los resultados predichos muestran una menor variabilidad respecto a los datos experimentales (Parra, 2008; Carrasquilla et al., 2016). En conjunto, estos hallazgos destacan la complejidad de modelar la humedad del suelo en Andisoles y la necesidad de considerar condiciones edáficas locales, así como los factores estructurales y texturales que inciden en la disponibilidad de agua para las plantas.

Tradicionalmente, la sequía agrícola ha sido evaluada mediante índices climáticos como el Índice de Precipitación Estándar (SPI), el Índice de Severidad de Palmer (PDSI) o el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI). Estos indicadores, aunque útiles para caracterizar déficits hídricos a escala regional, se basan principalmente en variables meteorológicas y no consideran de manera explícita la heterogeneidad edáfica ni la capacidad real del suelo para almacenar y suministrar agua a los cultivos. En contraste, el SODI integra propiedades intrínsecas del suelo —como la textura, la densidad aparente y los contenidos de agua a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP)—, lo que le permite reflejar la disponibilidad efectiva de agua para las plantas en condiciones específicas de sitio (Sridhar et al., 2008; Ajaz et al., 2019).

En los tres casos evaluados, los valores de SODI fueron 1.79, 1.31 y 1.03, lo que evidencia diferencias en la disponibilidad relativa de agua en el perfil del suelo. El valor más alto (1.79) corresponde a una condición cercana a exceso de humedad disponible respecto a la capacidad de almacenamiento, lo que indica que el suelo no presenta déficit hídrico significativo. Esta situación se ve favorecida por una textura con mayor capacidad de retención, que permite acumular agua útil para la planta. El valor intermedio (1.31) indica una reducción moderada en la disponibilidad de agua respecto al primer caso, aunque sin alcanzar condiciones de sequía extrema. Finalmente, el valor más bajo (1.03) refleja una condición cercana al equilibrio hídrico, donde la humedad observada se aproxima al nivel esperado en torno a la capacidad de campo, aunque sin estrés marcado, este valor señala un umbral donde la disponibilidad de agua podría empezar a ser limitante para el cultivo.

Estos resultados muestran que, además de los factores climáticos tradicionales, como precipitación y temperatura, las propiedades particulares de los Andisoles influyen notablemente en la disponibilidad de agua. A pesar de presentar texturas franco arenosa, su elevada porosidad, baja densidad aparente y alta superficie específica asociada a minerales como alófana e imogolita favorecen la retención de humedad en fracciones accesibles para las plantas (Uehara, 2005; Regalado et al., s.f.).

En consecuencia, los valores obtenidos de SODI reflejan que, aunque estos suelos no poseen la misma capacidad de almacenamiento que suelos más arcillosos, mantienen niveles suficientes de humedad para sustentar la actividad vegetal frente a déficits de precipitación moderados. No obstante, la variabilidad entre parcelas muestra resiliencia frente a periodos secos: mientras que el valor de

1.79 sugiere una menor vulnerabilidad inmediata, el valor de 1.03 representa una condición límite que podría evolucionar hacia estrés hídrico si la sequía se intensifica (Sridhar et al., 2008).

8 Conclusiones

1. A partir de la evaluación de distintas ecuaciones de pedotransferencia, se determinó que ninguna de las formulaciones analizadas logró representar adecuadamente la variabilidad del contenido de agua en los suelos de la finca La Hilda, ubicada en Poás de Alajuela. Los modelos evaluados presentaron coeficientes de determinación (R^2) muy bajos, lo que evidencia una capacidad explicativa limitada y una escasa exactitud en las estimaciones realizadas. Por lo tanto, las ecuaciones aplicadas no son aptas para estimar de forma confiable la disponibilidad hídrica en las condiciones edafoclimáticas del sitio de estudio.
2. Se identificó que las variables edáficas con mayor influencia la retención de humedad del suelo fueron el contenido de arcilla, la densidad aparente y el porcentaje de arenas. Estas variables mostraron los coeficientes de correlación más altos y estadísticamente significativos en relación con la humedad volumétrica a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, lo que evidencia su papel determinante en el comportamiento hídrico del suelo específicamente para los Andisoles evaluados.
3. Las ecuaciones de pedotransferencia evaluadas no lograron representar con exactitud el contenido de humedad a CC y PMP en el suelo en las condiciones evaluadas. Los bajos valores de R^2 , la alta dispersión en los errores y la ausencia de patrones definidos en los gráficos de dispersión evidencian una capacidad predictiva limitada.
4. La determinación del umbral de agua útil mostró una alta variabilidad espacial en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, asociada a las propiedades físico-químicas específicas de los Andisoles del sitio de estudio. Esta variabilidad resalta la importancia de aplicar enfoques de modelación calibrados a nivel local y con mayor sensibilidad a las condiciones específicas del tipo de suelo. Asimismo, los resultados del SODI permitieron establecer los umbrales de sequía agrícola en la finca La Hilda, evidenciando que, aunque ninguna parcela presenta condiciones de sequía severa, existen diferencias en la disponibilidad de agua y en la resiliencia frente a periodos de déficit hídrico, particularmente relacionadas con la capacidad de retención de cada suelo.

9 Recomendaciones

1. Se recomienda incrementar el número de muestras mayor para fortalecer la representatividad estadística y mejorar la precisión de los modelos de predicción del contenido de humedad. Un mayor tamaño muestra permitiría capturar mejor la variabilidad espacial y mejorar la capacidad predictiva de las ecuaciones de pedotransferencia.
2. Se recomienda establecer previamente la estructura espacial de los datos mediante el análisis del semivariograma, a fin de optimizar el rendimiento de técnicas de interpolación como *kriging*. De acuerdo con Kumar et al. (2016), una adecuada definición del modelo de semivariograma y de los parámetros de búsqueda espacial es esencial para asegurar la precisión y confiabilidad de las estimaciones, especialmente en contextos con una distribución irregular de muestreo o tamaños de muestra limitados.
3. Se sugiere explorar e implementar redes neuronales artificiales (RNA) como herramienta para el desarrollo de ecuaciones de pedotransferencia, debido a su capacidad para modelar relaciones no lineales complejas entre variables edáficas. Para un entrenamiento adecuado, se sugiere contar con al menos 70 muestras de suelo provenientes de al menos 15 perfiles, con determinaciones de arcilla, limo, carbono orgánico, carbonatos, porcentaje de saturación y densidad aparente, lo que ha demostrado ser suficiente para predecir la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente con mejor desempeño que los métodos tradicionales (Coronado & González, 2009; Sarmadian & Keshavarzi, 2010).

10 Bibliografía

- Adhikary, P. P., Chakraborty, D., Kalra, N., Sachdev, C. B., Patra, A. K., Kumar, S., Tomar, R. K., Chandna, P., Raghav, D., Agrawal, K., & Sehgal, M. (2008). Pedotransfer functions for predicting the hydraulic properties of Indian soils. *Soil Research*, 46(5), 476–484. <https://doi.org/10.1071/SR07179>
- Ajaz, A., Taghvaeian, S., Khand, K., Gowda, P. H., & Moorhead, J. E. (2019). Development and evaluation of an agricultural drought index by harnessing soil moisture and weather data. *Water*, 11(7), 1375. <https://doi.org/10.3390/w11071375>
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de Suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85-94. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6312831.pdf>
- André da Costa, A., Albuquerque, J. A., da Costa, A., Pértile, P., & Rodrigues da Silva, F. (2013). Water retention and availability in soils of the state of Santa Catarina-Brazil: Effect of textural classes, soil classes and lithology. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(5), 1535–1548. <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/kBkcyGpsYftx5yD3TMkb8mJ/?format=pdf&lang=en>
- Arruda, F. B., Zullo Junior, J., & de Oliveira, J. B. (1987). Soil parameters for calculating available water based on soil texture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 11(1), 11–15.
- Batjes, N.H., 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedo-transfer rules. *Geoderma* 71, 31–52.
- Bautista, J. I., & Hernández, J. J. A. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20-28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Bejar, S. J., Silva, I. C., Díaz, M. I. Y., & Robles, E. O. L. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista mexicana de ciencias forestales*. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666>
- Berbegall, B. F. J. (2017). Determinación y evaluación de las propiedades hidráulicas del suelo y su aplicación al estudio del balance de agua en cultivos de regadío. [Trabajo de fin de Máster]. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89742/Berbegall%20-%20Determinaci%C3%B3n%20y%20evaluaci%C3%B3n%20de%20las%20propiedades%20hidr%C3%A1ulicas%20del%20suelo%20y%20su%20aplicaci%C3%B3n%20a....pdf?sequence=1>
- Botula, Y., Van Ranst, É., & Cornelis, W. (2014b). Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 38(3), 679-698. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832014000300001>

- Bravo-Espinosa, M., Serrato-Barajas, B., Fregoso-Tirado, L., & Medina-Orozco, L.. (2009). Evaluación empírica de la reflectometría de dominio temporal para estimar la humedad en dos suelos de origen volcánico. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 171-176. Recuperado en 06 de abril de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000300001&lng=es&tlng=es.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3. Civil Engineering Dept., Colorado State Univ., Fort Collins, CO.
- Çal, S., & Barik, K. (2020b). Hydraulic Conductivity Values of Soils in Different Soil Processing Conditions. *Alinteri Zirai Bilimler Dergisi./Alinteri Zirai Bilimler Dergisi* :, 35(1), 132-138. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.740904>
- Camacho-Sandoval, J. (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Acta Médica Costarricense*, 50(2), 94–96.
- Carrasquilla-Batista, A., Chacón-Rodríguez, A., Núñez-Montero, K., Gómez-Espinoza, O., Valverde, J., & Guerrero-Barrantes, M. (2016). Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal. *Tecnología en Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión*, 29(8), 33–45. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
- Chakraborty, D., Mazumdar, S. P., Garg, R. N., Banerjee, S., Santra, P., Singh, R., & Tomar, R. K. (2011). Pedotransfer functions for predicting points on the moisture retention curve of Indian soils. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 81(11), 1030–1035. <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgs/article/view/11280>
- Chicas, R. A., Vanegas, E. A., & 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. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542014000100007&script=sci_arttext
- Chinchilla, S. C., Durán, Q. A. M., Monge, M. M., & Gutiérrez, S. M.V. (2021). Quantifying the annual cycle of water use efficiency, energy and co2 fluxes using micrometeorological and physiological techniques for a coffee field in Costa Rica. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f12070889>
- Coronado, J. G., & González, H. M. (2009b). Una revisión sobre las funciones de pedotransferencias en la determinación de las propiedades hidráulicas de suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(3), 59-62. <http://www.redalyc.org/pdf/932/93215944011.pdf>
- Cousineau, D., & Chartier, S. (2010). Outliers detection and treatment: A review. *International Journal of Psychological Research*, 3(1), 58–67. <https://doi.org/10.21500/20112084.844>
- Delgado, F., & Barreto, L. (1988). Una aproximación matemática para la elaboración de curvas de retención de humedad en suelos representativos de Los Llanos

- Occidentales. Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología, 1(2), 45–50.
<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRINVE.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=003341>
- Duque, E. G., & Escobar, P. C. E. (2016). Geomecánica. Univerisad Nacional de Colombio. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/relacionesgravimetricasyvolumetricasdelsuelo.pdf>
- Dytham, C. (2010). Choosing and Using Statistics: A Biologist's Guide (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
- FAO. (2006). Propiedades Físicas del Suelo. Portal de suelos de la fao. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Fernández, M. J. (1995). Medida de curvas de retención de humedad en el laboratorio y su estimación.
- Filho, D. B. F., Júnior, J. A. S., & Rocha, E. C. (2011b). What is R2 all about? Leviathan, 3, 60. <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2011.132282>
- Gupta, S. C., & Larson, W. E. (1979). Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resources Research, 15(6), 1633-1635. <https://doi.org/10.1029/wr015i006p01633>
- Hodnett, M. G., & Tomasella, J. (2002). Marked differences between Van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. Geoderma, 108(3-4), 155-180. [https://doi.org/10.1016/s0016-7061\(02\)00105-2](https://doi.org/10.1016/s0016-7061(02)00105-2)
- Hong, S. Y., Minasny, B., Han, K. H., Kim, Y., & Lee, K. (2013). Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. PeerJ, 1, e71. <https://doi.org/10.7717/peerj.71>
- Hong, S. Y., Minasny, B., Han, K. H., Kim, Y., & Lee, K. (2013). Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. PeerJ, 1, e71. <https://doi.org/10.7717/peerj.71>
- HORNECK, D.A. & MILLER, R.O.; 1998. Determination of total nitrogen in plant tissue. In: P.K. Kalra (ed.), Handbook of Reference Methods of Plant Analysis: 75-85. CRC Press. Boca Raton.
- Ibanez, S., Blanker, J.M., & Moreno, H. (2010). La textura del suelo. Universidad Politécnica De Valencia. Recuperado de: file:///C:/TFG/La_textura_del_suelo.pdf
- James, G., Witten, D., Hastie, T., y Tibshirani, R. (2013). "An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R." Springer. Recuperado de: <https://static1.squarespace.com/static/5ff2adbe3fe4fe33db902812/t/6009dd9fa7bc363aa822d2c7/1611259312432/ISLR+Seventh+Printing.pdf>

- Julca-Otiniano, Alberto, Meneses-Florián, Liliana, Blas-Sevillano, Raúl, & Bello-Amez, Segundo. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia* (Arica), 24(1), 49-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Kumar, K., Arora, M. K., & Hariprasad, K. S. (2016). Geostatistical analysis of soil moisture distribution in a part of Solani River catchment. *Applied Water Science*, 6, 25–34. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0202-x>
- Kumar, K., Arora, M. K., & Hariprasad, K. S. (2016). Geostatistical analysis of soil moisture distribution in a part of Solani River catchment. *Applied Water Science*, 6, 25–34. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0202-x>
- Kupec, M., Stradiot, P., & Rehák, Š. (2015). Comparison of selected pedotransfer functions for the determination of soil water retention curves. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 23(3), 33-36. <https://doi.org/10.1515/sjce-2015-0016>
- Lafond, J. A., Gumiere, S. J., Hallema, D. W., et al. (2015). Spatial Distribution Patterns of Soil Water Availability as a Tool for Precision Irrigation Management in Histosols. *Vadose Zone Journal*, 14(6). <https://doi.org/10.2136/vzj2014.10.0140>
- Lal, R. (1978). Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma*, 21(3), 209–223. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(78\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(78)90073-7)
- Lal, R., 1979. Physical characteristics of soils in the tropics: determination and management. In: Lal, R., Greenland, D.J. (Eds.), *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics*. Wiley, Chichester, pp. 7– 44.
- Lee, K., Lee, D., Jung, H., Lee, S., Ryu, J., Choi, W., Yang, J. E., & Chung, D. T. (2022). Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of AP horizon soils for various soil series of reclaimed tidal flat soil. *Agronomy*, 12(7), 1507. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071507>.
- López, C. G., Herrera, P. J., Ostos, S. A., Lizárraga, M. L., & Hernández, A. J. (2010). Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6 (1), 44-50. <file:///C:/TFG/v6-n1-5-aplicacion-de-modelos-matematicos-para-la-obtencion-de-la-curva-de-retencion-de-humedad-del-suelo.pdf>
- Malavé, N. (1991). Estudio preliminar de las relaciones entre características de retención de humedad y distribución de tamaño de partículas, materia orgánica y densidad aparente [Tesis de maestría, Universidad Central de Venezuela]. Facultad de Agronomía.
- Matula, S., Mojrová, M., & Špongrová, K. (2007c). Estimation of the soil Water Retention Curve (SWRC) using pedotransfer Functions (PTFS). *Soil and Water Research*, 2(4), 113-122. <https://doi.org/10.17221/2106-swr>

- Montero Granados, R. (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.
- Mosquera, G. M., Marín, F., Feyen, J., Céleri, R., Breuer, L., Windhorst, D., & Crespo, P. (2021). A field, laboratory, and literature review evaluation of the water retention curve of volcanic ash soils: How well do standard laboratory methods reflect field conditions? *Hydrological Processes*, 35(2), e14011. <https://doi.org/10.1002/hyp.14011>
- Mwendwa, S. (2022). Revisiting soil texture analysis: Practices towards a more accurate Bouyoucos method. *Heliyon*, 8(5), e09395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09395>
- Myeni, L., Mdlambuzi, T., Paterson, D. G., De Nysschen, G., & Moeletsi, M. E. (2021). Development and Evaluation of Pedotransfer Functions to Estimate Soil Moisture Content at Field Capacity and Permanent Wilting Point for South African Soils. *Water*, 13(19), 2639. <https://doi.org/10.3390/w13192639>
- Norouzi, S., Sadeghi, M., Tuller, M., Ebrahimian, H., Liaghat, A., Jones, S. B., & De Jonge, L. W. (2023). A novel laboratory method for the retrieval of the soil water retention curve from shortwave infrared reflectance. *Journal of Hydrology*, 626, 130284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130284>
- Pachepsky, Y., & Van Genuchten. (2011). Pedotransfer Functions.
- Pan, T., Hou, S., Liu, Y., & Tan, Q. (2019). Comparison of three models fitting the soil water retention curves in a degraded Alpine Meadow region. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54449-8>
- Parker, N., & Patrignani, A. (2021). Evaluating Traditional and Modern Laboratory Techniques for Determining Permanent Wilting Point. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 7(5). <https://doi.org/10.4148/2378-5977.8080>
- Parra Rodríguez, F. (2008). Métodos de estimación no lineales. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). <https://econometria.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/metodos-de-estimacion-no-lineales1.pdf>
- Pecorari, C. (1988). Relaciones empíricas entre contenido de agua, textura y materia orgánica en suelos representativos de la Pampa Ondulada (Informe Técnico Núm. 222, pp. 3–30). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). <https://biblat.unam.mx/es/revista/informe-tecnico-estacion-experimental-regional-agropecuaria-pergamino-inta/articulo/relaciones-empiricas-entre-contenido-de-agua-textura-y-materia-organica-en-suelos-representativos-de-la-pampa-ondulada>
- Peralta, R. B., & Barrios, D. J. (2006). Determinación de ecuaciones de capacidad de campo y punto de marchitez permanente en suelos del municipio de Corozal, Sucre [Tesis doctoral, Universidad de Sucre]. Repositorio Institucional Unisucre. <https://repositorio.unisucre.edu.co/jspui/bitstream/001/239/2/T631.4786113%20P426.pdf>

- Pidgeon, J.D., 1972. The measurement and prediction of available water capacity of ferrallitic soils in Uganda. *J. Soil Sci.* 23, 431– 441.
- Pineda, C., & Viloria, J. (2011). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de Valencia. *Venezuelos*, 5, 39-45. <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/3130/1/FUNCIONES%20DE%20PEDOTRANSFERENCIA.pdf>
- Rawls, W. J., & Brakensiek, D. L. (1985). Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. En E. E. Jones & T. J. Ward (Eds.), *Proceedings of Symposium on Watershed Management in the Eighties* (pp. 293–299). American Society of Civil Engineers. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0044472>
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320. <https://doi.org/10.13031/2013.33720>
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones, E.J., Ward, T.J. (Eds.), *Watershed Management in the Eighties*. Proc. Symp. ASCE, Denver, Colorado. 30 April– 2 May, 1985. ASCE, New York, pp. 293– 299.
- Regalado et al. (s.f.). Información sobre la superficie específica, comportamiento dieléctrico, materiales amorfos, densidad aparente, y limitaciones del modelo de Topp.
- Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Urach, F. L., & Carlesso, R. (2009). Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande Do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(6), 1547–1560. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600004>
- Romero Campos, M., Cid Lazo, G., González Robaina, F., & López Seijas, T. (2020). Curvas tensión humedad y función conductividad hidráulica en suelos Pardos. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5862/586263256004/586263256004.pdf>
- Rubio, G. A. M. (2010). LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS ALCORNOCALES. Universidad de Sevilla. Recuperado de: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>
- Salamanca j., A.; Sadeghian KH., S. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56(4):381-397. 2005. [https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/163/1/arc056\(04\)381-397.pdf](https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/163/1/arc056(04)381-397.pdf)
- Sánchez Quispe, H., Chipantiza, J., Bonilla, A., & Mendoza, J. (2020). Solución analítica de la ecuación de Richards en suelos no saturados basada en el modelo de Gardner. Caso de difusividad constante. *AVances: Investigación En Ingeniería*, 17(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953>

- Santra, P., Chopra, U. K., Chakraborty, D., & Kumar, P. S. (2018). Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot arid western India. *Journal of Earth System Science*, 127(2), 26. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-0920-2>
- Sarmadian, F., & Keshavarzi, A. (2010). Developing pedotransfer functions with artificial neural networks. *Biologia*, 64(3), 474–478. <https://doi.org/10.2478/s11756-009-0060-3>
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I., 1986. Estimating generalised soil– water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 1031– 1036.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 847–
- Scheinost, A.C., Sinowski, W., Auerswald, K., 1997. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape: I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78, 129–143.
- SENAMHI. (2021b). Caracterización de la sequía agrícola para los cultivos de papa y quinua en el departamento de Puno. (Tello, C.). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Proyecto Pachayatiña/Pachayachay. SENAMHI - HELVETAS - PREDES.
- Soil Science Society of America. (2024). Triángulo de textura del suelo [PDF]. Soils4Teachers.org. <https://www.soils4teachers.org/files/s4t/spanish/soil-texture-triangle-triangulo-de-textura-del-suelo.pdf>
- Soto, B. F., Betancourt, F. A., & Vega, G. J. (2021). Método de “Caja de Arena”. Repositorio KERWA – Universidad de Costa Rica. Recuperado de: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/85437/caja%20de%20arena%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sridhar, V., Hubbard, K. G., You, J., & Hunt, E. D. (2008). Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its “user friendliness” in severity–area–duration assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 660–676. <https://doi.org/10.1175/2007JHM892.1>
- Tietje, O., & Tapkenhinrichs, M. (1993). Evaluation of pedotransfer funtions.
- Tomasella, J., Hodnett, M.G., 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Sci.* 163, 190– 202.
- Tomasella, J., Hodnett, M.G., Rossato, L., 2000. Pedo-Transfer Functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 327– 338.
- Tuller, M., & Or, D. (2005b). Water retention and characteristic curve. En Elsevier eBooks (pp. 278-289). <https://doi.org/10.1016/b0-12-348530-4/00376-3>

- Uehara, G. (2005). Volcanic soils. En D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of soils in the environment* (Vol. 4, pp. 225–232). Elsevier.
- Umaña, M. O, A. (2019). Caracterización Física del Suelo en Fincas Productoras de Papaya de la Región del Pacífico Central Mediante el Índice Intervalo Hídrico Óptimo. [Tesis para optar por el grado de licenciatura en Agronomía, Universidad de Costa Rica]. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/11149/1/44709.pdf>
- Urzúa, J. A. L. (2013). La ética medio ambiental: principios y valores para una ciudadanía responsable en la sociedad global. *Acta Bioethica*, 19(2), 177-188. <https://doi.org/10.4067/s1726-569x2013000200002>
- Uyanık, G. K., & Güler, N. (2013). A Study on Multiple Linear Regression Analysis. *Procedia: Social & Behavioral Sciences*, 106, 234-240. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.027>
- Van den Berg, M., Klarmont, E., Van Reeuwijk, L.P., Sombroek, W.G., 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferrasols and related soils. *Geoderma* 78, 161– 180.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Vargas, G. J. (2022). Medición del efecto de dos sistemas de labranza en un cultivo de zanahoria en paso ancho de oreamuno de cartago. [Tesis para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Agrícola, Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC-Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14004>
- Vela Correa, Gilberto, López Blanco, Jorge, & Rodríguez Gamiño, María de Lourdes. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas*, (77), 18-30. Recuperado en 31 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100003&lng=es&tlng=es.
- Vereecken, H., Maes, J., Feyen, J., Darius, P., 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.* 148, 389– 403. <https://doi.org/10.1097/00010694-198912000-00001>
- Verma, V. (2025). A comprehensive framework for residual analysis in regression and machine learning. *Journal of Information Systems Engineering & Management*, 10(16), 1–18. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i31s.4958>
- Wadoux, A. M. J.-C., Marchant, B. P., & Lark, R. M. (2019). Efficient sampling for geostatistical surveys. *European Journal of Soil Science*, 70(5), 975–989. <https://doi.org/10.1111/ejss.12797>

Zeitoun, R., Vandergeest, M., Vasava, H. B., Machado, P. V. F., Jordan, S., Parkin, G., Wagner-Riddle, C., & Biswas, A. (2021). In-situ estimation of soil water retention curve in silt loam and loamy sand soils at different soil depths. *Sensors*, 21(2), 447. <https://doi.org/10.3390/s21020447>

11 Anexo

11.1 Evaluación de las PTFs

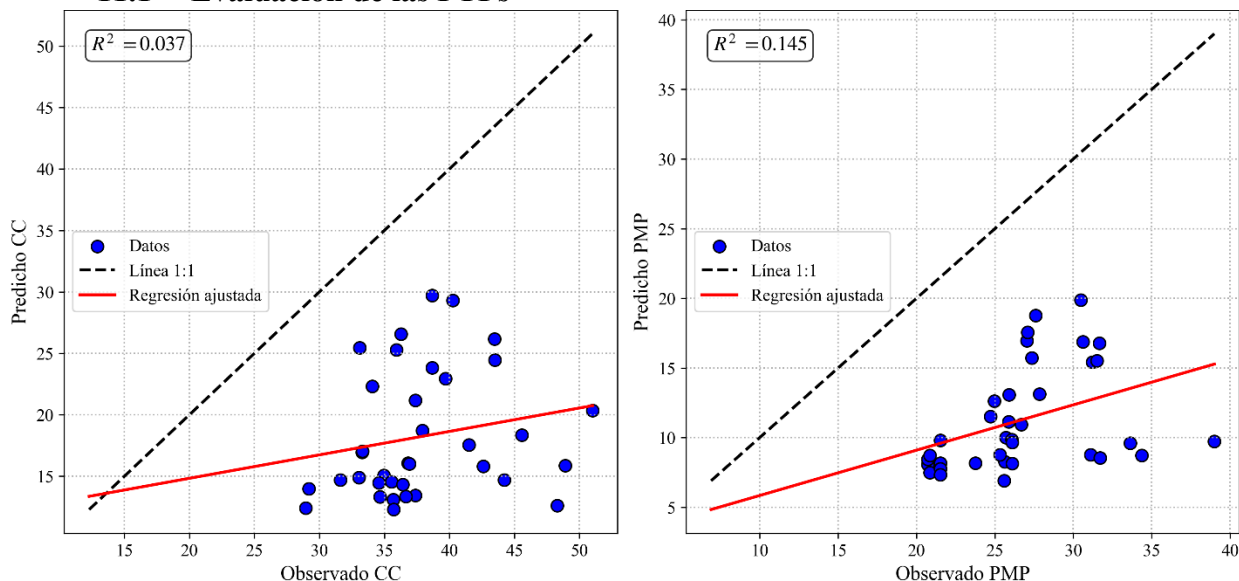


Figura A1. Evaluación del modelo propuesto por Arruda et al. (1987), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

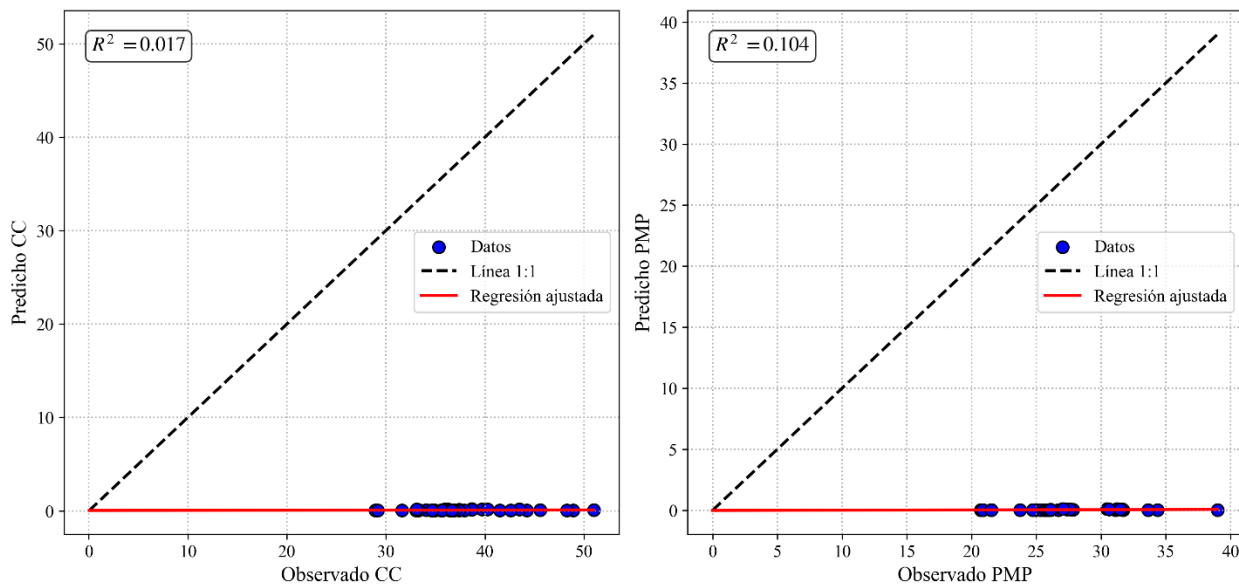


Figura A2. Evaluación del modelo propuesto por Lal. (1978), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

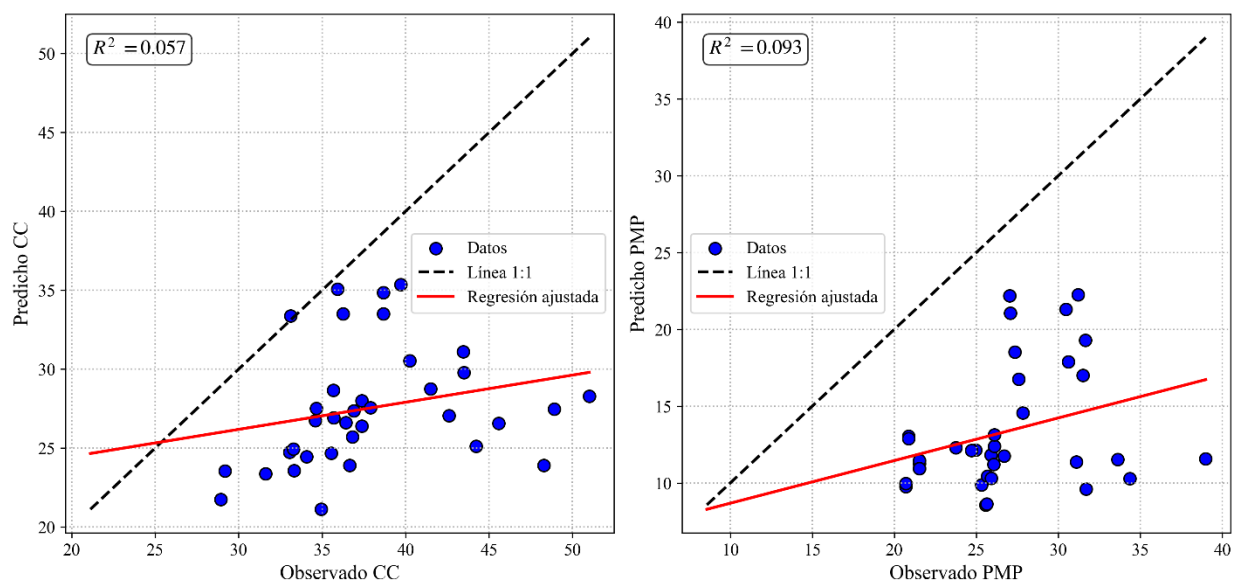


Figura A3. Evaluación del modelo propuesto por Tomasella and Hodnett. (1998), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

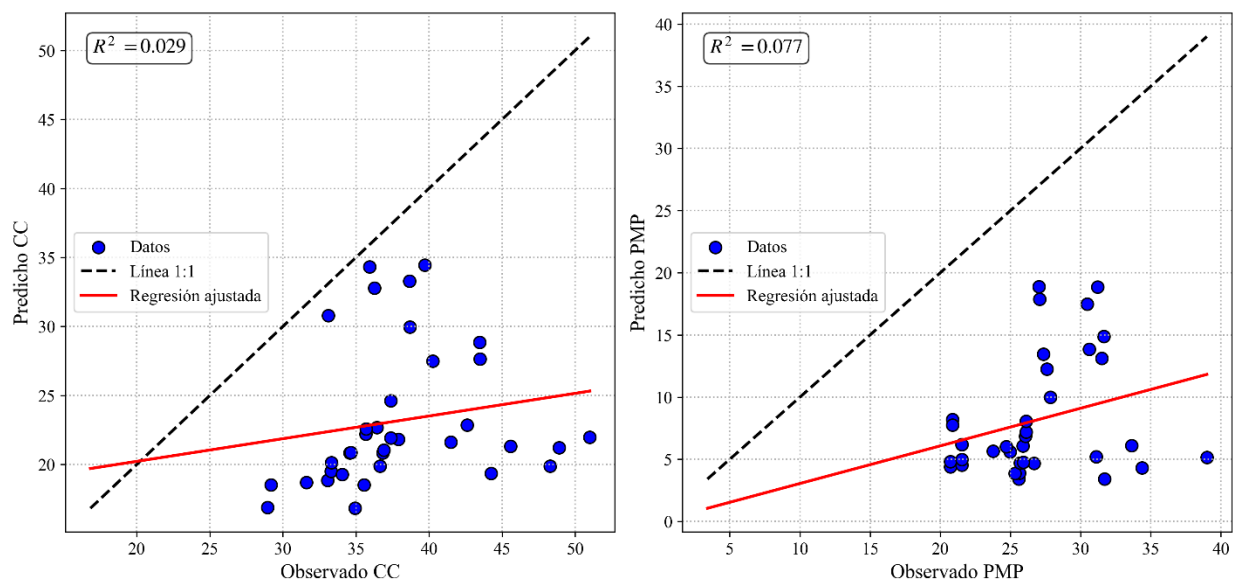


Figura A4. Evaluación del modelo propuesto por Adhikary et al. (2008), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

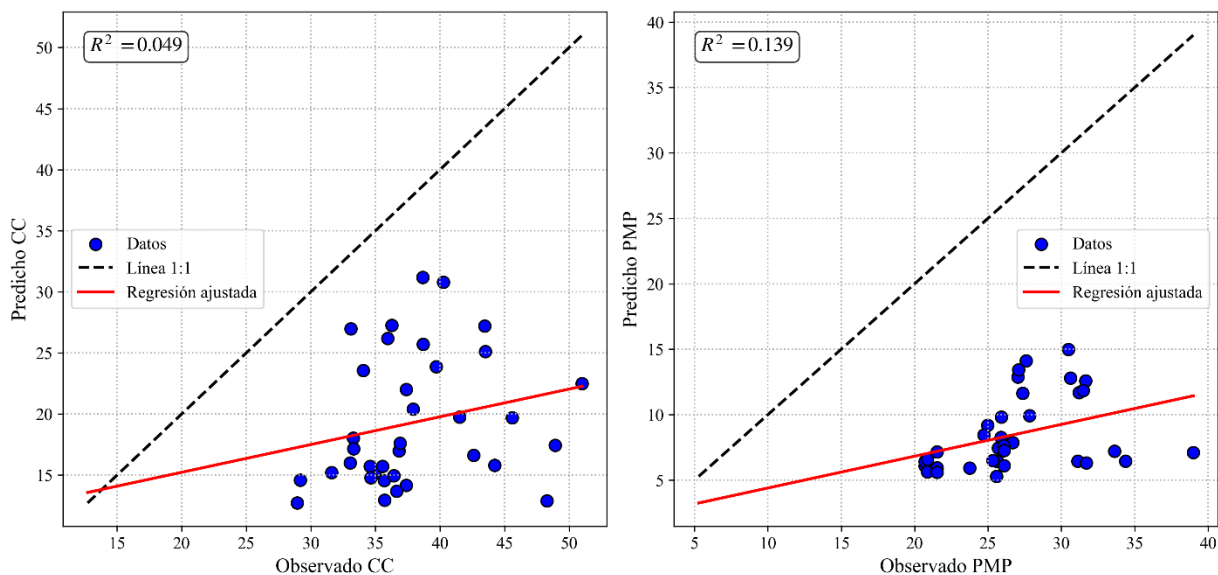


Figura A5. Evaluación del modelo propuesto por Chakraborty et al. (2011), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

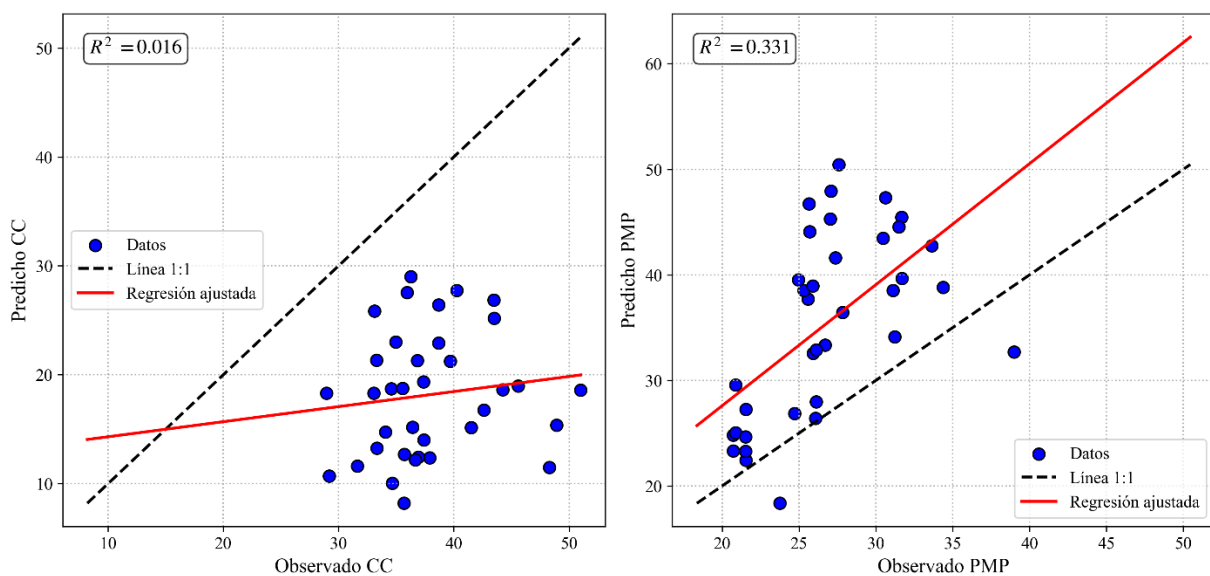


Figura A6. Evaluación del modelo propuesto por Rawls y Brakensiek. (1985), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

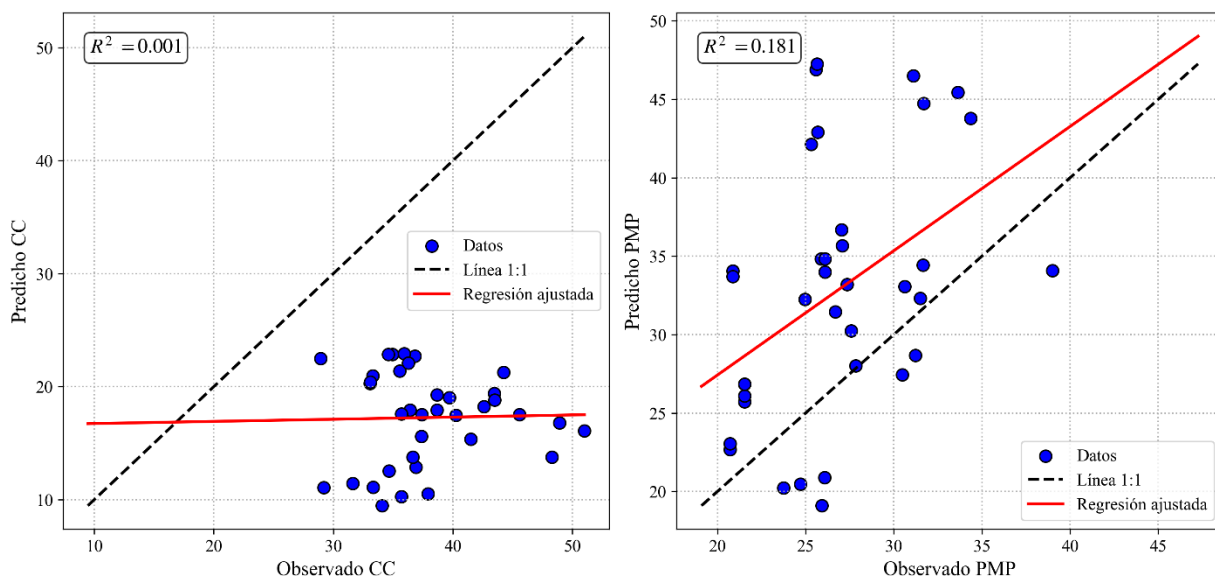


Figura A7. Evaluación del modelo propuesto por Delgado y Barreto. (1988), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

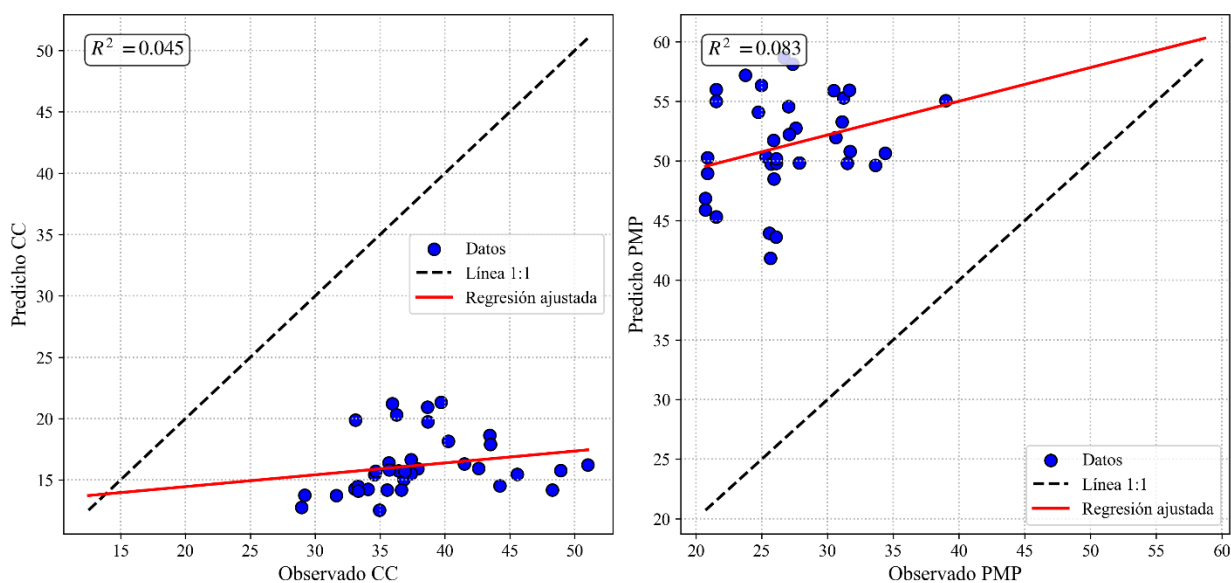


Figura A8. Evaluación del modelo propuesto por Pecorari. (1988), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

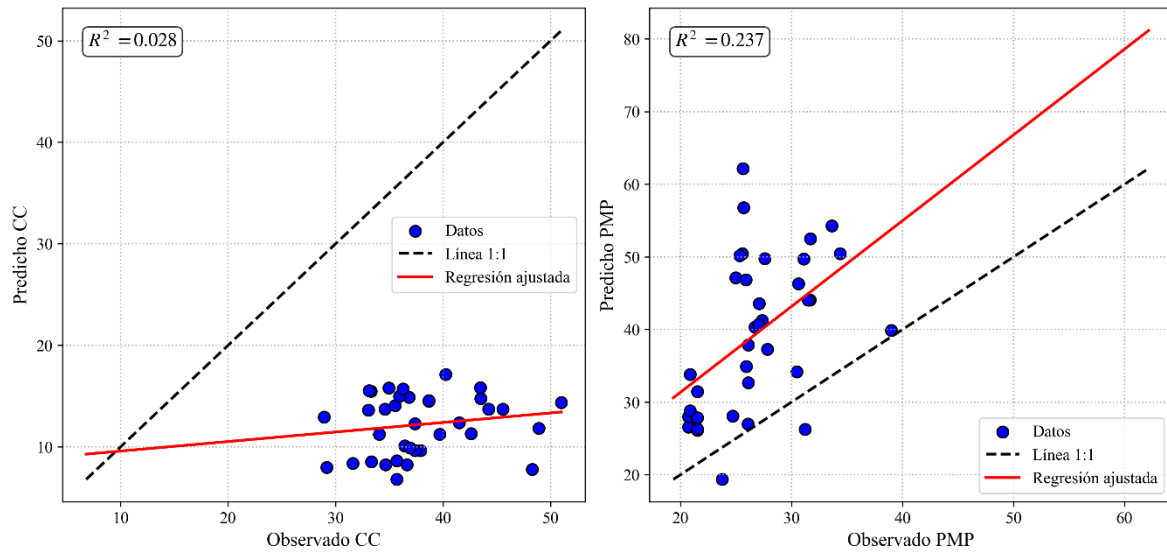


Figura A9. Evaluación del modelo propuesto por Malavé. (1991), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

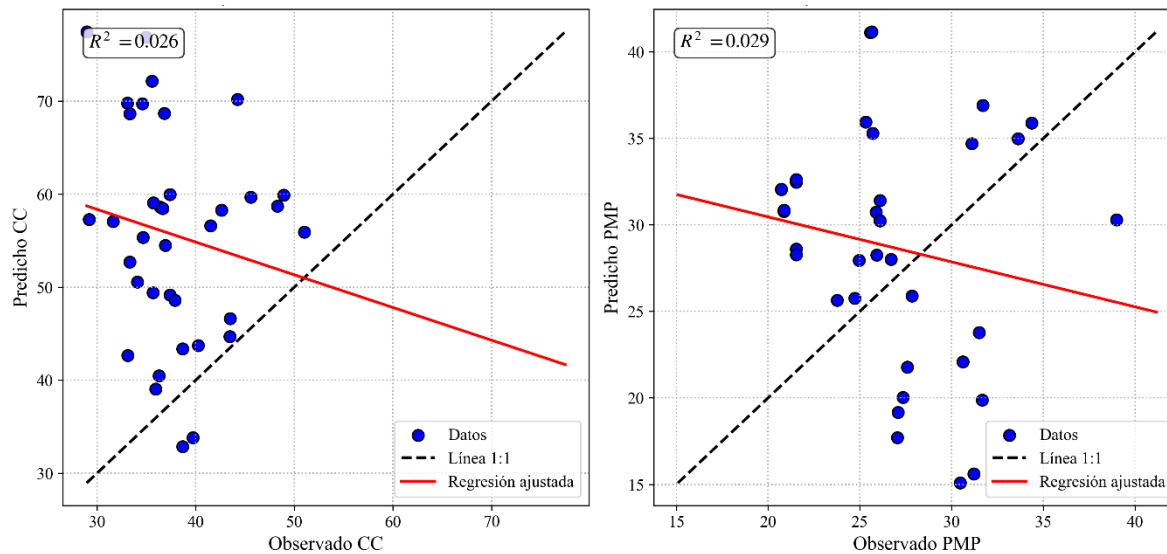


Figura A10. Evaluación del modelo propuesto por Peralta y Barrios. (2006), a partir de los datos experimentales para la determinación de capacidad de campo (%v/v) y punto de marchitez (%v/v).

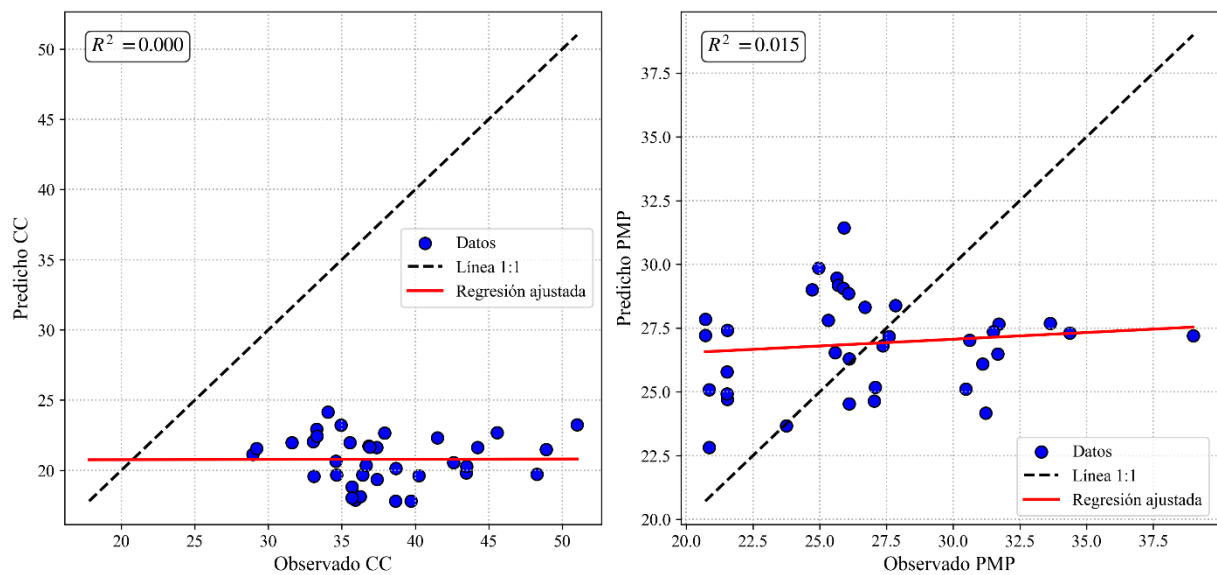


Figura A11. Evaluación del modelo propuesto por Chicas et al. (2014), a partir de los datos experimentales para la determinación de CC (%v/v) y PMP (%v/v).

11.2 Validación de las PTFs

Tabla A1. Valores teóricos y predichos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenidos con el modelo ajustado de Chakraborty et al. (2011).

Humedad volumétrica 15000 hPa (%v/v)	Predicción a 15000 hPa (%v/v)	Residuo	Humedad volumétrica 330 hPa (%v/v)	Predicción a 330 hPa (%v/v)	Residuo
25.583	24.305	-1.278	28.943	35.066	6.123
25.642	23.932	-1.710	34.945	34.240	-0.705
31.110	26.685	-4.425	34.585	38.746	4.161
31.704	25.810	-5.895	35.556	37.769	2.213
26.692	27.771	1.079	41.500	40.872	-0.628
24.965	27.429	2.464	51.003	39.945	-11.058
25.320	25.797	0.478	33.056	37.600	4.544
25.694	25.812	0.119	33.292	37.346	4.053
34.370	25.947	-8.423	44.238	37.712	-6.526
33.634	26.049	-7.585	36.828	37.300	0.472
38.993	27.064	-11.930	48.915	39.446	-9.468
25.888	26.502	0.614	45.573	38.125	-7.448
25.913	25.553	-0.361	34.066	36.858	2.792
26.075	24.869	-1.206	33.315	34.931	1.616
31.218	29.621	-1.596	39.704	39.488	-0.215
30.474	29.508	-0.965	38.664	39.735	1.070
27.359	29.261	1.902	38.682	40.626	1.944
31.665	29.037	-2.628	33.109	39.754	6.644
27.841	26.803	-1.038	37.381	37.371	-0.010
27.595	27.859	0.264	40.251	38.516	-1.735
30.622	27.976	-2.646	43.462	38.193	-5.269
31.502	27.374	-4.128	43.498	37.352	-6.146
27.038	29.471	2.433	35.935	39.207	3.272
27.079	28.771	1.693	36.264	38.286	2.022
23.758	27.618	3.860	35.682	40.275	4.592
24.715	27.013	2.298	37.909	39.063	1.154
26.107	26.285	0.179	37.391	37.369	-0.022
26.107	26.531	0.425	42.601	37.519	-5.082
20.716	25.123	4.408	29.190	36.212	7.022
20.716	24.990	4.275	31.617	35.827	4.210
20.865	26.283	5.418	36.422	37.033	0.610
20.865	26.490	5.624	35.698	37.549	1.851
21.536	27.156	5.620	34.651	39.810	5.159
21.536	27.023	5.487	36.911	39.425	2.514
21.529	25.116	3.587	36.651	35.603	-1.048
21.529	25.116	3.587	48.283	35.603	-12.680

Tabla A2. Valores teóricos y predichos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenidos con el modelo ajustado de Peralta & Barrios. (2006).

Humedad volumétrica 15000 hPa (%v/v)	Predicción a 15000 hPa (%v/v)	Residuo	Humedad volumétrica 330 hPa (%v/v)	Predicción a 330 hPa (%v/v)	Residuo
25.583	27.111	1.528	28.943	35.063	6.120
25.642	28.061	2.418	34.945	34.930	-0.015
31.110	29.801	-1.309	34.585	38.688	4.103
31.704	29.000	-2.704	35.556	38.053	2.497
26.692	28.174	1.482	41.500	41.101	-0.399
24.965	28.938	3.973	51.003	40.701	-10.301
25.320	28.289	2.970	33.056	37.842	4.787
25.694	29.196	3.503	33.292	37.964	4.672
34.370	28.674	-5.696	44.238	37.861	-6.377
33.634	29.306	-4.328	36.828	37.529	0.701
38.993	27.362	-11.631	48.915	39.389	-9.526
25.888	27.817	1.929	45.573	38.578	-6.995
25.913	24.824	-1.089	34.066	38.262	4.197
26.075	21.652	-4.423	33.315	34.917	1.602
31.218	27.201	-4.017	39.704	38.480	-1.223
30.474	29.489	-0.984	38.664	40.132	1.468
27.359	29.958	2.599	38.682	40.692	2.011
31.665	30.256	-1.409	33.109	39.979	6.869
27.841	26.226	-1.615	37.381	37.663	0.283
27.595	30.304	2.709	40.251	40.008	-0.244
30.622	29.488	-1.134	43.462	38.854	-4.607
31.502	28.297	-3.205	43.498	37.862	-5.636
27.038	30.065	3.028	35.935	38.813	2.878
27.079	29.865	2.787	36.264	38.350	2.087
23.758	22.825	-0.933	35.682	39.185	3.503
24.715	24.505	-0.210	37.909	39.210	1.301
26.107	24.933	-1.174	37.391	36.567	-0.824
26.107	26.171	0.065	42.601	37.110	-5.491
20.716	21.680	0.965	29.190	35.813	6.623
20.716	21.865	1.149	31.617	35.567	3.950
20.865	25.049	4.184	36.422	36.292	-0.130
20.865	24.412	3.546	35.698	36.386	0.687
21.536	24.244	2.708	34.651	39.080	4.428
21.536	25.221	3.685	36.911	39.247	2.336
21.529	22.021	0.492	36.651	34.891	-1.760
21.529	21.672	0.143	48.283	34.709	-13.574

Tabla A3. Valores teóricos y predichos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) obtenidos con el modelo propuesto.

Humedad volumétrica 15000 hPa (%v/v)	Predicción a 15000 hPa (%v/v)	Residuo	Humedad volumétrica 330 hPa (%v/v)	Predicción a 330 hPa (%v/v)	Residuo
25.583	27.499	1.916	28.943	34.801	5.858
25.642	28.492	2.849	34.945	34.649	-0.296
31.110	29.649	-1.461	34.585	38.389	3.804
31.704	28.845	-2.859	35.556	37.799	2.243
26.692	27.430	0.739	41.500	41.098	-0.403
24.965	28.314	3.349	51.003	40.674	-10.329
25.320	28.170	2.850	33.056	37.647	4.591
25.694	29.102	3.408	33.292	37.742	4.449
34.370	28.592	-5.778	44.238	37.629	-6.608
33.634	29.389	-4.245	36.828	37.260	0.432
38.993	26.969	-12.025	48.915	39.352	-9.562
25.888	27.614	1.726	45.573	38.524	-7.049
25.913	24.449	-1.465	34.066	38.540	4.475
26.075	22.001	-4.074	33.315	35.214	1.899
31.218	27.634	-3.584	39.704	38.555	-1.149
30.474	29.536	-0.938	38.664	40.193	1.529
27.359	29.757	2.398	38.682	40.637	1.956
31.665	30.262	-1.403	33.109	39.899	6.789
27.841	26.321	-1.520	37.381	37.761	0.380
27.595	30.114	2.519	40.251	40.003	-0.248
30.622	29.618	-1.004	43.462	38.813	-4.649
31.502	28.557	-2.945	43.498	37.853	-5.645
27.038	30.509	3.471	35.935	38.699	2.764
27.079	30.322	3.244	36.264	38.258	1.995
23.758	22.375	-1.383	35.682	39.469	3.786
24.715	24.058	-0.657	37.909	39.466	1.557
26.107	25.144	-0.963	37.391	36.573	-0.818
26.107	26.336	0.229	42.601	37.083	-5.518
20.716	21.767	1.052	29.190	36.074	6.884
20.716	22.019	1.303	31.617	35.819	4.202
20.865	25.359	4.494	36.422	36.297	-0.126
20.865	24.685	3.819	35.698	36.405	0.707
21.536	23.803	2.267	34.651	39.242	4.590
21.536	24.770	3.235	36.911	39.388	2.477
21.529	22.404	0.875	36.651	35.073	-1.578
21.529	22.089	0.560	48.283	34.896	-13.387