Incertidumbre en la Determinación y Espacialización del Régimen de Humedad del Suelo. Caso aplicado a la Altillanura plana - Departamento del Meta

Andrés Felipe Rodríguez Vásquez
Ingeniero Agrícola, Magíster en Geomática

Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá D.C
Sede Bogotá, Colombia
2026

Incertidumbre en la Determinación y Espacialización del Régimen de Humedad del Suelo. Caso aplicado a la Altillanura plana - Departamento del Meta

Andrés Felipe Rodríguez Vásquez
Ingeniero Agrícola, Magíster en Geomática

Tesis presentada como requisito parcial para optar por el título de:
Doctor en Ciencias Agrarias

Directora:
Yolanda Rubiano Sanabria. Ph. D.
Profesor Asociado - Facultad de Ciencias Agrarias
Universidad Nacional de Colombia

Codirector:
Andrés Javier Peña Quiñones. Ph. D.
Investigador Asociado Agrosavia - Bogotá D.C

Línea de investigación:
Aguas y Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá D.C
2026

Cita 01.

Autor
La Biblia

"Todo tiene su momento oportuno; hay un tiempo para todo lo que se hace bajo el cielo: un tiempo para nacer, y un tiempo para morir; un tiempo para plantar, y un tiempo para arrancar lo plantado; un tiempo para matar, y un tiempo para sanar; un tiempo para derribar, y un tiempo para construir; un tiempo para llorar, y un tiempo para reír; un tiempo para lamentarse, y un tiempo para bailar; un tiempo para esparcir piedras, y un tiempo para recogerlas; un tiempo para abrazar, y un tiempo para apartarse; un tiempo para buscar, y un tiempo para perder; un tiempo para guardar, y un tiempo para tirar; un tiempo para rasgar, y un tiempo para coser; un tiempo para callar, y un tiempo para hablar; un tiempo para amar, y un tiempo para odiar; un tiempo para la guerra, y un tiempo para la paz."

Eclesiastés 3:1-8

Declaración

Me permito afirmar que he realizado ésta tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados el presente texto. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Sede Bogotá., abril del 2026

Andrés Felipe Rodríguez Vásquez
Ingeniero Agrícola, Magíster en Geomática

Agradecimientos

Las Gracias a ***Dios*** nunca serán suficientes...

Un profundo y grato agradecimiento a la entidad que ha financiado mis investagaciones sin tener relación contratual, tanto de maestría y ahora del doctorado, a la **Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria** - AGROSAVIA, sede *La Liebrtad*, particularmente a los Doctores:

***Jaime Humberto Bernal* y**
Javier Andrés Peña Quiñones.

A mi esposa ***Yanelis***, que ha sido un pilar de resistencia y apoyo incondicional antes todas las dificultades presentadas.

A mi Padre Fernando, mis hermanos: Diego, Manuel y Sebastián y mi primo Juan, por el apoyo emocional.

De manera muy especial y que con dolor profundo, perecieron durante el tiempo de la realización de la tesis (Q.E.P.D):

Carmen Vásquez Molina. Madre. (2020)
Zoila Vásquez Molina. Tía muy cercana. (2022)
Lubín Naval Rodriguez. Abuelo. (2023)
Clemencia Vásquez Molina. Tía muy cercana. (2025)
Elvia Guerrero de Rodríguez. Abuela. (2025)

Y finalmente y no menos importante, a la persona que ha sido mi profesora (enseña), tutora (guía académica) y que con el tiempo se forjo una amistad incondicional (amiga), la Doctora:

Yolanda Rubiano Sanabria.

Fueron varios los sucesos (pandemia, accidentes, perdidas humanas y físicas, salud...) que transcurrieron del periodo 2020 al 2026, que finalmente de la mano de **adonai**, se lograron superar para dar el punto final a la tesis.

Listado de símbolos y abreviaturas

0.1 Símbolos

Símbolo	**Unidad**	**Descripción**
P	mm	Precipitación
T	°C	Temperatura media del aire
θ	mm/mm	Contenido volumétrico de agua en el suelo
θ_{SAT}	mm/mm	Humedad a saturación
θ_{CC}	mm/mm	Humedad a capacidad de campo
θ_{PMP}	mm/mm	Humedad a punto de marchitez permanente
θ_{DA}	mm/mm	Humedad disponible
h	kPa	Potencial matricial del agua en el suelo

0.2 Propiedades físicas del suelo

Abreviatura	**Unidad**	**Descripción**
DA	g cm^{-3}	Densidad aparente
DR	g cm^{-3}	Densidad real
A	%	Fracción de arena del suelo
L	%	Fracción de limo del suelo
Ar	%	Fracción de arcilla del suelo
LS	cm	Límite superior - inicio de la sección control de humedad del suelo
LI	cm	Límite inferior - final de la sección control de humedad del suelo
CC	%	Humedad gravimétrica a capacidad de campo
PMP	%	Humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente

0.3 Propiedades químicas del suelo

Abreviatura	Unidad	Descripción
MO	g/100g	Materia orgánica
P	mg kg^{-1}	Fósforo disponible
S	mg kg^{-1}	Azufre disponible
CICE	cmol(+) kg^{-1}	Capacidad de intercambio catiónico efectivo
Al	cmol(+) kg^{-1}	Aluminio intercambiable
Ca	cmol(+) kg^{-1}	Calcio intercambiable
Mg	cmol(+) kg^{-1}	Magnesio intercambiable
B	mg kg^{-1}	Boro disponible

0.4 Variables y modelos hidrológicos

Abreviatura	Descripción
RH	Régimen de humedad del suelo
SCH	Sección de control de humedad del suelo
CAD	Capacidad de agua disponible
Newhall	Modelo de balance hídrico climático
Kappa	Coeficiente de concordancia de Cohen

0.5 Datos climáticos y plataformas

Abreviatura	Descripción
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
ERA5	ECMWF Reanalysis v5
GEE	Google Earth Engine
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

0.6 Cambio climático

Abreviatura	Descripción
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
RCP	Representative Concentration Pathways
SSP5	Escenario de desarrollo basado en combustibles fósiles
RCP8.5	Trayectoria de alto forzamiento radiativo
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project Phase 6
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

0.7 Otras abreviaturas

Abreviatura	Descripción
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USDA	United States Department of Agriculture
UPRA	Unidad de Planificación Rural
WMO	World Meteorological Organization

Resumen

Incertidumbre en la Determinación y Espacialización del Régimen de Humedad del Suelo.
Caso aplicado a la Altillanura plana - Departamento del Meta

El régimen de humedad del suelo constituye un atributo fundamental para la clasificación taxonómica y para la comprensión de los procesos edafoclimáticos que regulan la disponibilidad de agua para las plantas. Sin embargo, su determinación en regiones tropicales presenta un grado considerable de incertidumbre, asociado principalmente con la limitada disponibilidad de información climática y edáfica, la variabilidad temporal de las condiciones ambientales y la simplificación de los procesos físicos representados en los modelos. En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar la incertidumbre asociada con la determinación y espacialización del régimen de humedad del suelo en la Altillanura plana de los departamentos del Meta y Vichada, Colombia, mediante la incorporación de análisis de sensibilidad climática y edáfica.

Durante un periodo de doce meses, se monitoreó el contenido de humedad del suelo en ocho sitios distribuidos a lo largo de un transecto regional, desde el sector oriental del departamento del Meta hasta el occidente del Vichada. En cada sitio se instalaron tres sensores Campbell Scientific CS616, ubicados a diferentes profundidades del perfil conforme a la textura tomada en campo. A partir de los registros diarios de humedad se determinó el régimen de humedad observado en cada localización, de acuerdo con los criterios establecidos por la taxonomía de suelos de los Estados Unidos.

Los regímenes observados se compararon con los estimados mediante el modelo determinístico edafoclimático de Newhall, desarrollado para apoyar la clasificación de los regímenes de humedad del suelo. El modelo utiliza como variables de entrada la precipitación, la temperatura del aire y la capacidad de agua disponible en la sección de control de humedad del suelo. La información climática se obtuvo de los productos CHIRPS, para precipitación, y ERA5-Land, para temperatura del aire. La capacidad de agua disponible se calculó a partir de las propiedades físicas medidas en los perfiles de los sitios instrumentados.

La correspondencia entre los regímenes de humedad observados y modelados se evaluó mediante una tabla de contingencia y el coeficiente Kappa de Cohen. Adicionalmente, se realizaron análisis de sensibilidad para determinar el efecto de la temporalidad climática y de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo sobre la clasificación obtenida con el modelo.

Para evaluar la sensibilidad frente a la temporalidad climática, se fijó una capacidad de agua disponible de 40 mm y se ejecutó el modelo utilizando diferentes periodos climáticos: octubre de 2023 a septiembre de 2024, enero a diciembre de 2023, 2024 y la normal climática 1991-2020. Por su parte, para evaluar la sensibilidad frente a la capacidad de agua disponible, se mantuvieron constantes los datos correspondientes a la normal climática 1991-2020 y se modificó la lámina de almacenamiento edáfico, considerando valores de 40, 100, 150 y 200 mm. Asimismo, se realizaron simulaciones empleando la capacidad de agua disponible calculada específicamente para cada sitio. Los resultados de cada escenario se compararon con el régimen de humedad observado.

Con base en los resultados obtenidos en los sitios instrumentados, se simuló la distribución espacial del régimen de humedad del suelo mediante la aplicación por pixel del modelo de Newhall, con una resolución espacial de 1 km^2, para los departamentos del Meta y Vichada. Para ello, se utilizaron capas ráster de precipitación y temperatura derivadas de las mismas fuentes climáticas empleadas en el análisis puntual.

La distribución espacial de la capacidad de agua disponible se estimó a partir de información proveniente

de 157 perfiles incluidos en estudios pedológicos existentes. Con estos datos se generó una superficie ráster mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada. Finalmente, para analizar los cambios espaciales en la clasificación del régimen de humedad, se compararon los mapas obtenidos para los diferentes periodos climáticos y para los escenarios con capacidades de agua disponible constantes de 40, 100, 150 y 200 mm. Este procedimiento permitió identificar áreas con clasificación estable y zonas sensibles a las variaciones climáticas y edáficas, consideradas como sectores de mayor incertidumbre espacial.

Para simular la distribución de los regímenes de humedad del suelo bajo condiciones futuras de cambio climático, se aplicó el modelo de Newhall utilizando el escenario SSP5-8.5, considerado uno de los escenarios de mayores emisiones y forzamiento radiativo. Como variables climáticas de entrada se emplearon las series anuales de precipitación y temperatura media del aire correspondientes al periodo 2021-2100, obtenidas de la Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia, elaborada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La capacidad de agua disponible del suelo se incorporó mediante la superficie ráster generada previamente a partir de la información de los perfiles de suelo. Con estos insumos, el modelo se ejecutó a escala espacial para estimar la distribución futura de los regímenes de humedad del suelo y analizar sus posibles cambios durante el siglo XXI.

Los resultados evidenciaron que el desempeño del modelo depende en gran medida de la parametrización edáfica. Bajo condiciones de diferentes láminas de capacidad de agua disponible cercanas a las observadas en campo ($\approx$ 40 mm), el modelo alcanzó una exactitud global del 75 % y un coeficiente Kappa de $\kappa =$ 0,50, indicando una concordancia moderada entre clasificaciones observadas y simuladas. Sin embargo, al incrementar la capacidad de agua disponible, el desempeño disminuyó progresivamente, con exactitudes de 63 %, 50 % y 25 %, y valores de Kappa de 0.25, 0.00 y -0.50 para escenarios de 100, 150 y 200 mm, respectivamente, evidenciando una sobreestimación sistemática de condiciones de mayor almacenamiento de agua en el suelo.

A escala espacial, la clasificación del régimen de humedad del suelo presentó variaciones de hasta 32.89 % del área en función de la capacidad de agua disponbile, confirmando la alta sensibilidad del modelo a este parámetro. En particular, el régimen údico aumentó de aproximadamente 52.46 % a más del 80 % del área bajo mayores valores de capacidad de agua disponible, mientras que el régimen ústico disminuyó de 45.94 % a menos del 20 %. Estos resultados evidenciaron que la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo constituyó el principal factor de control en la simulación del régimen de humedad con el modelo de Newhall.

Bajo el escenario de cambio climático SSP5-RCP8.5, los resultados indican una tendencia hacia la intensificación del déficit hídrico y cambios en la distribución espacial del régimen de humedad, asociados principalmente al incremento de la temperatura del aire y a modificaciones en el balance hídrico del suelo, conforme al modelo de Newhall. Estos cambios sugieren una posible transición hacia condiciones más restrictivas para la disponibilidad de agua en el suelo en determinadas zonas de la Orinoquia colombiana.

En síntesis, los resultados demostraron que la capcaidad de agua disponible fue la principal fuente de incertidumbre en la determinación del régimen de humedad del suelo, superando la influencia de los datos climáticos. Asimismo, evidencian limitaciones del modelo de Newhall para representar la complejidad edafoclimática de sistemas tropicales cuando se emplean parámetros generalizados. Este estudio aporta un marco metodológico robusto para la evaluación del humedad edáfica bajo condiciones de alta incertidumbre y resalta la necesidad de incorporar parametrizaciones edáficas específicas y escenarios climáticos para la modelación en suelos tropicales.

Palabras clave: Newhall; Orinoquia,régimen de humedad del suelo;

Abstract

Assessing Uncertainty in Soil Moisture Regime Determination and Spatial Modeling in a Tropical Savanna: The Colombian Altillanura

Soil moisture regime is a fundamental attribute in soil taxonomic classification and in understanding the edaphoclimatic processes that regulate water availability to plants. However, its determination in tropical regions is subject to considerable uncertainty, primarily because of the limited availability of climatic and soil data, the temporal variability of environmental conditions, and the simplification of the physical processes represented by existing models. Within this context, the objective of this study was to assess the uncertainty associated with the determination and spatial prediction of soil moisture regimes across the flat Altillanura of the Meta and Vichada departments, Colombia, by incorporating climatic and edaphic sensitivity analyses.

Over a 12-month monitoring period, soil water content was recorded at eight sites distributed along a regional transect extending from the eastern sector of the Meta Department to western Vichada. At each site, three Campbell Scientific CS616 sensors were installed at different soil-profile depths selected according to field-determined textural transitions. Daily soil moisture records were used to determine the observed soil moisture regime at each site in accordance with the criteria established in USDA Soil Taxonomy.

The observed regimes were compared with those estimated using the Newhall deterministic edaphoclimatic model, which was developed to support soil moisture regime classification. The model uses precipitation, air temperature, and available water capacity within the soil moisture control section as input variables. Climatic information was obtained from CHIRPS for precipitation and ERA5-Land for air temperature. Available water capacity was calculated from the physical properties measured in the soil profiles at the instrumented sites.

Agreement between the observed and modelled soil moisture regimes was evaluated using a contingency table and Cohen's Kappa coefficient. Sensitivity analyses were additionally conducted to determine the influence of climatic temporal variability and soil water storage capacity on the classifications produced by the model.

To evaluate sensitivity to climatic temporal variability, available water capacity was fixed at 40 mm, and the model was run using different climatic periods: October 2023 to September 2024, January to December 2023, January to December 2024, and the 1991-2020 climate normal. To assess sensitivity to available water capacity, climatic data corresponding to the 1991-2020 climate normal were held constant, while soil water storage capacity was varied using values of 40, 100, 150, and 200 mm. Additional simulations were conducted using the site-specific available water capacity calculated for each location. The classification obtained under each scenario was compared with the observed soil moisture regime.

Based on the results obtained at the instrumented sites, the spatial distribution of soil moisture regimes was simulated by applying the Newhall model on a pixel-by-pixel basis at a spatial resolution of 1 km^2 across the Meta and Vichada departments. Raster layers of precipitation and air temperature derived from the same climatic datasets used in the site-level analyses were employed as model inputs.

The spatial distribution of available water capacity was estimated using information from 157 soil profiles compiled from existing soil surveys. These data were used to generate a raster surface through inverse distance weighting interpolation. To assess spatial changes in soil moisture regime classification, the maps generated for the different climatic periods were compared with those obtained under scenarios assuming constant available water capacities of 40, 100, 150, and 200 mm. This procedure enabled the identification of areas with stable classifications and zones that were sensitive to climatic and edaphic variability, which were

interpreted as areas of greater spatial uncertainty.

To simulate the spatial distribution of soil moisture regimes under future climate-change conditions, the Newhall model was applied using the SSP5-8.5 scenario, which represents a very high greenhouse-gas emissions pathway and high radiative forcing. Annual time series of precipitation and mean air temperature for the 2021-2100 period were used as climatic inputs. These data were obtained from Colombia's Fourth National Communication on Climate Change, prepared by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia (IDEAM). Soil available water capacity was incorporated through the raster surface previously generated from the soil-profile dataset. Using these inputs, the model was implemented spatially to estimate the future distribution of soil moisture regimes and evaluate their potential changes throughout the twenty-first century.

The results showed that model performance was strongly dependent on edaphic parameterization. Under available water capacity values close to those observed in the field, approximately 40 mm, the model achieved an overall accuracy of 75 % and a Cohen's Kappa coefficient of $\kappa = 0.50$, indicating moderate agreement between the observed and simulated classifications. However, model performance progressively declined as available water capacity increased. Overall accuracy decreased to 63 %, 50 %, and 25 %, while Kappa values declined to 0.25, 0.00, and -0.50 under the 100, 150, and 200 mm scenarios, respectively. These results indicate a systematic overestimation of soil moisture conditions associated with greater soil water storage capacities.

At the spatial scale, soil moisture regime classification varied across as much as 32.89 % of the study area as a function of available water capacity, confirming the model's high sensitivity to this parameter. In particular, the area classified as having a udic soil moisture regime increased from approximately 52.46 % to more than 80 % as available water capacity increased, whereas the area classified as ustic decreased from 45.94 % to less than 20 %. These findings demonstrate that soil water storage capacity was the primary control on soil moisture regime simulations produced by the Newhall model.

Under the SSP5-8.5 climate-change scenario, the results indicated a trend towards an intensification of soil water deficits and changes in the spatial distribution of soil moisture regimes. According to the Newhall model, these changes were primarily associated with increasing air temperatures and subsequent modifications to the soil water balance. The projected changes suggest a potential transition towards more restrictive soil water availability conditions in specific areas of the Colombian Orinoquía.

Overall, the results demonstrated that available water capacity was the primary source of uncertainty in determining soil moisture regimes, exerting a greater influence than the climatic datasets. The findings also reveal limitations in the ability of the Newhall model to represent the edaphoclimatic complexity of tropical soil systems when generalized parameters are applied. This study provides a robust methodological framework for assessing soil moisture regimes under highly uncertain conditions and highlights the need to incorporate site-specific edaphic parameterization and climate-change scenarios into soil moisture regime modelling in tropical environments.

Keywords:Newhall model, Orinoquia, soil moisture regime;

Lista de figuras

3-1 Mapa de suelos del mundo publicado por Glinka (1906).. 7
3-2 Caracterización de la humedad en el suelo, fuente: Adaptado de Seneviratne et al. (2010). . . . 11
3-3 Esquema de la SCH definida por la Taxonomía de Suelos 16
3-4 Modelo de compartimentos de Newhall y su relación con la sección control de humedad (SCH). 22
3-5 Mapa de Regímenes de Humedad en Colombia. Fuente: IGAC (2015).. 27

4-1 Zona de estudio. 30
4-2 Metodología para modelar el régimen de humedad del suelo 33
4-3 Ejemplo de instalación de sensores de humedad (sitio: SHEEFER) 36

5-1 Ubicación de los sitios instrumentados 45
5-2 Ubicación de los perfiles de estudios existentes, agrupados por Tamaño de Partículas. 48
5-3 Sección control de humedad de 157 perfiles. 52
5-4 Humedad media diaria en sitios instrumentados. 57
5-5 Climograma y balance hídrico mensual para ARBORADA 65
5-6 Análisis de Concordancias Kappa de Cohen 69
5-7 Semivariograma de CAD en la SCH 72
5-8 Capacidad de agua disponible de la Sección Control de Humedad 73
5-9 Régimen de humedad del suelo periodo 2023-2024 74
5-10 Régimen de humedad del auelo para 2023 y 2024 75
5-11 Variación del régimen de humedad del suelo 2023-2024 76
5-12 Variación del régimen de humedad 2023-2024, 2023 y 2024 76
5-13 Régimen de humedad del suelo de 1991-2020 77
5-14 Transicion del régimen humedad del suelo 78
5-15 Régimen de humedad del suelo para diferentes láminas de CAD 80
5-16 Distribución del área por régimen de humedad bajo escenarios de CAD variable y constante. . 81
5-17 Evolución del área por clases del régimen de humedad de 2021 a 2100. 84
5-18 Régimen de humedad histórico y en cambio climático. 85

A-1 Perfil y sensor de ARBORADA. 107
A-2 Perfil y sensor de CARIMAGUA.. 108
A-3 Perfil y sensor de LALIBERTAD. 109
A-4 Perfil y sensor de MAVALLE. 110
A-5 Perfil y sensor de NUBES. 111

A-6 Perfil y sensor de SHEEFER. 112
A-7 Perfil y sensor de VEGAS. 113
A-8 Perfil y sensor de YUCAO. 114

B-1 Distribución del contenido de humedad del suelo por sitio (transformación Box-Cox). 116

C-1 Procedimiento para la clasificación de la condición de humedad.. 121
C-2 ARBORADA 122
C-3 CARIMAGUA. 122
C-4 LALIBERTAD 123
C-5 NUBES 123
C-6 SHEEFER 124
C-7 TALUMA 124
C-8 VEGAS 125
C-9 YUCAO 125

Lista de tablas

3-1 Influencia de la humedad en algunos procesos formadores del suelo . . . 12
3-2 Límites de profundidad de la SCH . . . 16
3-3 Resumen de reglas para clasificar los RH . . . 18
3-4 Prefijos asociados a los RH en los subórdenes de suelo . . . 20
3-5 Modelos complementarios para determinar RH . . . 23
3-6 Relaciones del índice de Lang y Holdridge con los RH. Fuente: IGAC (2015) . . . 26

4-1 Generalidades de los suelos de la zona de estudio . . . 31
4-2 Propiedades para Sitios de Referencia . . . 37
4-3 Variables climáticas para la modelación de los Regímenes de Humedad . . . 39
4-4 Tabla de contingencia 2 × 2: observado vs. Newhall . . . 42

5-1 Profundidades de instalación . . . 45
5-2 Características generales de los sitios de monitoreo . . . 46
5-3 Propiedades físicas por horizonte . . . 47
5-4 Propiedades de perfiles de suelo secundarios . . . 49
5-5 Límites de la SCH de los sitios . . . 50
5-6 Frecuencia de tamaño de partículas en los 157 sitios . . . 50
5-7 Estadísticas descriptivas de los límites de la SCH por TP . . . 51
5-8 Comparación de límites de la SCH con valores teóricos de la TS . . . 53
5-9 Resumen del comportamiento de la SCH por grupo textural. . . . 54
5-10 Estadísticas descriptivas de humedad del suelo . . . 56
5-11 Clasificación de régimen de humedad por sitio . . . 60
5-12 Clasificación del regímenes de humedad por sitio al 50 % de la CAD . . . 61
5-13 Capacidad de agua disponible en la SCH por sitio. . . . 63
5-14 Estadísticos descriptivos de la CAD . . . 63
5-15 Informe por sitio del reporte del modelo de Newhall . . . 64
5-16 Resumen ejecutivo del reporte del modelo de Newhall . . . 64
5-17 Datos climáticos mensuales del reporte del modelo de Newhall . . . 65
5-18 Resumen de indicadores del reporte del modelo Newhall . . . 66
5-19 Clasificación del RH por escenario . . . 66
5-20 Tabla de contingencia entre RH observado y modelado . . . 69
5-21 Resultados del test exacto de Fisher . . . 70
5-22 Concordancia por CAD . . . 70

5-23 Área y proporción del RH por periodo 78
5-24 Sensibilidad del RH por escenarios de CAD 80
5-25 Distribución del área de los regímenes de humedad para distintos periodos. 85

A-1 Características de sitios instrumentados 102
A-2 Morfología para VEGAS 104
A-3 Propiedades químicas VEGAS 105
A-4 Propiedades físicas VEGAS 105

B-1 Comparación estadística entre sitios 115
B-2 Diferencias entre profundidades dentro de cada sitio 117
B-3 Variación estacional de la humedad del suelo por sitio 118
B-4 Incremento estacional T1--T3 por sitio 120

C-1 Estadísticas de rachas por sitio, profundidad y estado de humedad. 126
C-2 Estadísticas compactas de rachas por sitio, profundidad y estado de humedad. 127
C-3 Estadísticas de rachas por sitio con CAD al 50 % 128
C-4 Estadísticas compactas de rachas con CAD al 50 % 129

D-1 Propiedades físicas en la sección control de humedad 131

E-1 Resultados puntuales del Modelo de Newhall 136
E-2 Resultados por escenarios de WHC para la normal climática 136

Contenido

Agradecimientos II

Listado de símbolos y abreviaturas III

0.1 Símbolos . . . III
0.2 Propiedades físicas del suelo . . . III
0.3 Propiedades químicas del suelo . . . IV
0.4 Variables y modelos hidrológicos . . . IV
0.5 Datos climáticos y plataformas . . . IV
0.6 Cambio climático . . . IV
0.7 Otras abreviaturas . . . V

Resumen VI

Abstract VIII

1 Planteamiento del problema 1

1.1 Antecedentes y contexto . . . 1
1.2 Planteamiento del problema . . . 2
1.3 Justificación de la investigación . . . 3
1.4 Contribuciones de la investigación . . . 4

2 Objetivos 5

2.1 Objetivo general . . . 5
2.2 Objetivos específicos . . . 5

3 Marco teórico 6

3.1 La humedad y su relación con el suelo . . . 6
3.2 Caracterización de la humedad en el suelo . . . 9
3.3 Régimen de humedad del suelo . . . 12
3.3.1 Concepto de régimen de humedad . . . 13
3.3.2 La sección control de humedad del suelo . . . 15
3.4 Clases de regímenes de humedad . . . 17
3.4.1 Régimen de humedad údico . . . 17
3.4.2 Régimen de humedad ústico . . . 18
3.4.3 Régimen de humedad arídico y tórrido . . . 19

3.5 Los regímenes de humedad para la clasificación taxonómica . . . 19
3.6 Estimación de los regímenes de humedad . . . 20
3.6.1 Modelo de Thornthwaite . . . 20
3.6.2 Modelo de compartimientos de Newhall . . . 21
3.6.3 Modelos físicos . . . 23
3.7 El régimen de humedad del suelo en Colombia . . . 24
3.8 Incertidumbre en la modelación del régimen de humedad del suelo . . . 28

4 Materiales y métodos **29**
4.1 Zona de estudio . . . 29
4.1.1 Suelos . . . 31
4.1.2 Clima . . . 31
4.1.3 Material parental . . . 32
4.2 Metodología . . . 32
4.2.1 Fase 1. Datos edafoclimáticos . . . 34
4.2.1.1 Datos edáficos medidos en sitios de referencia . . . 34
Selección de sitios de instrumentación . . . 34
Instalación de Sensores . . . 35
Caracterización del suelo . . . 36
4.2.1.2 Datos edáficos existentes . . . 36
4.2.1.3 Datos climáticos . . . 38
Series para los años 2023 y 2024 . . . 38
Series para la normal climática 1991-2020 . . . 38
Series de datos proyectados de cambio climático 2021-2100 . . . 39
4.2.2 Fase 2. Modelación de los regímenes de humedad por sitio . . . 40
4.2.3 Fase 3. Evaluación de la modelación . . . 41
Matriz de confusión y exactitud de clasificación . . . 41
Coeficiente kappa de Cohen . . . 42
Prueba exacta de Fisher . . . 42
4.2.4 Fase 4. Modelación espacial del régimen de humedad . . . 43

5 Resultados y discusiones **44**
5.1 Caracterización de suelos . . . 44
5.1.1 Sitios de monitoreo . . . 44
5.1.1.1 Instrumentación . . . 45
5.1.1.2 Características locales . . . 45
5.1.1.3 Propiedades de suelos . . . 46
5.1.2 Sitios no monitoreados . . . 46
5.1.3 Sección control de humedad del Suelo . . . 49
5.1.3.1 Límites de la SCH en los sitios de monitoreo . . . 49
5.1.3.2 Límites de la SCH para todos los perfiles de suelo . . . 50
Límite superior - inicio de la SCH . . . 51
Límite inferior - final de la SCH . . . 52
5.1.3.3 Límites de la SCH con respecto a la TS . . . 53

5.2 Modelación puntual de los regímenes de humedad del suelo . . . 55
5.2.1 Dinámica de la humedad del suelo observada 2023-2024 . . . 55
5.2.2 Clasificación del régimen de humedad del suelo . . . 59
5.2.2.1 Variación del límite de condición de humedad: seco . . . 61
5.2.3 Simulación del régimen de humedad del suelo . . . 62
5.2.3.1 Capacidad de agua disponible . . . 62
5.2.3.2 Modelación de los RH con el Modelo de Newhall . . . 64
Sensibilidad frente a la variación temporal de datos . . . 66
Sensibilidad de humedad frente a la variación de la CAD . . . 67
Consistencia de la clasificación . . . 68
5.3 Evaluación del modelo . . . 68
5.4 Modelación espacial del régimen de humedad del suelo . . . 71
5.4.1 Patrón espacial en condiciones actuales . . . 73
5.4.1.1 Periodo 2023-2024 . . . 73
5.4.1.2 Normal climática 1991-2020 . . . 77
5.4.1.3 Sensibilidad espacial del RH frente a variaciones en la CAD . . . 79
5.5 Régimen de humedad bajo condiciones de cambio climático . . . 83

6 Conclusiones **88**

7 Recomendaciones **89**

Referencias Bibliográficas **90**

A Propiedades de los suelos **101**
A.1 Sitios instrumentados . . . 101
A.1.1 Fotos Perfiles . . . 106

B Pruebas estadísticas de los datos de humedad en los sitios **115**
B.1 Comparación entre sitios . . . 115
B.2 Comparación de profundidades . . . 117
B.3 Análisis trimestral de datos de humedad en los sitios . . . 118
B.4 Magnitud del incremento trimestral . . . 119

C Clasificación de los RH a partir de datos de humedad **121**
C.1 Estados de humedad por sitio . . . 121
C.2 Conteo de días . . . 126
C.3 Conteo modificando CAD . . . 128

D Propiedades físicas en la sección control de humedad **130**

E Resultados modelo de Newhall a escala puntual **135**

1 Planteamiento del problema

1.1 Antecedentes y contexto

En Colombia, el estudio sistemático de los suelos ha sido liderado durante más de siete décadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Los levantamientos de suelos desarrollados por esta entidad constituyen un insumo fundamental para los procesos de planificación territorial, al sustentar decisiones relacionadas con el catastro, la implementación de distritos de riego y drenaje, la determinación del uso agropecuario de la tierra y, en general, cualquier temática que requiera conocer las propiedades o características físicas de un espacio geográfico.

Los estudios pedológicos en Colombia han adoptado históricamente los lineamientos metodológicos de la escuela norteamericana de levantamientos de suelos, particularmente los contenidos en el manual de levantamientos de suelos: *The Soil Survey Manual* (Staff, 2017) y en el sistema de clasificación taxonómica de suelos: *Keys to Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2022). En este marco conceptual, la caracterización del suelo se fundamenta en la interacción de los factores y procesos formadores clásicos, dentro de los cuales el clima desempeña un papel determinante, especialmente en la definición de los Regímenes de Humedad del Suelo (RH), componente esencial para la clasificación taxonómica y la interpretación funcional de los suelos.

Debido a los altos costos asociados a los levantamientos de suelos, la cobertura cartográfica del país ha sido jerarquizada por escalas. En la actualidad, Colombia cuenta con estudios de suelos a escala exploratoria (1:500.000) y general (1:100.000) para todo el territorio nacional, mientras que los levantamientos semidetallados y detallados (1:25.000) se concentran en áreas estratégicas y zonas de agricultura intensiva (IGAC, 2015).

Estos insumos constituyen herramientas técnicas para apoyar la planificación del uso y manejo sostenible del suelo. En particular, el mapa de regímenes de humedad del suelo permite caracterizar la disponibilidad y dinámica temporal del agua dentro del perfil, aportando información relevante para comprender el edafoclima de un territorio. Su integración con variables como el clima, las propiedades del suelo, el relieve, el drenaje y la cobertura terrestre fortalece los procesos de evaluación de tierras, al facilitar la identificación de áreas con diferentes niveles de aptitud para cultivos y sistemas productivos específicos. En Colombia, esta información puede complementar los estudios agrológicos desarrollados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y los procesos de zonificación de aptitud (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) [UPRA], 2018) adelantados por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria, orientados a promover el uso eficiente del suelo rural y apoyar la toma de decisiones sobre inversión y ordenamiento productivo agropecuario. Asimismo, una delimitación más precisa de los regímenes de humedad puede contribuir a identificar limitaciones por déficit o exceso de agua, orientar requerimientos de riego y drenaje, seleccionar alternativas productivas compatibles con las condiciones locales y reducir el riesgo de establecer usos agropecuarios inadecuados. En consecuencia, estos productos no deben interpretarse únicamente como representaciones cartográficas, sino como insumos para mejorar el conocimiento del territorio, sustentar la evaluación de tierras y favorecer una planificación rural ajustada a la variabilidad edafoclimática de Colombia.

La investigación nace de los objetivos concertados en el marco de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono y Resiliente al Clima del Minsiterio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el objetivo de facilitar en los diferentes ministerios la planificación, implementación y gestión de capacidades para el cumplimiento de las metas climáticas, encaminadas hacia descarbonización y la resiliencia climática, definidas en los Planes Nacionales de Desarrollo, las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, y la Estrategia Climática de Largo Plazo.

Bajo este marco es de gran interés por el financiador de la invetigación, La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), con el proyecto *Biocarbono Orinoquia*, lo cual contempla una investigación sobre los elementos del paisaje como el manejo de suelos y agua, sus relaciones con emisiones de gases de efecto invernadero y almacenamiento de carbono; gobernanza; integración de género, empleo y rentabilidad de los sistemas de producción. De esta manera, conocer los efectos de cambio climático en la Orinoaupia Colombiana, donde sectores como la altillanura plana del departamento del Meta y Vichada, caracterizada por una creciente expansión agroindustrial, la información edafológica constituye un insumo crítico para la planificación productiva y ambiental (González-Orozco et al., 2023, Rodríguez et al., 2013).

1.2 Planteamiento del problema

De acuerdo con la tradición pedológica adoptada en Colombia, los levantamientos sistemáticos de suelos han incorporado metodologías que integran relaciones ambientales, particularmente climáticas, y edafo-climáticas para la caracterización de los polipedones. Estas relaciones (ver Tabla **3-6**) han sido representadas principalmente mediante zonificaciones climáticas asociadas a un RH, como es el caso de la clasificación de Caldas-Lang, adaptada por el IGAC (IGAC, 2015).

En este enfoque metodológico, el clima se incorpora como un atributo descriptivo de las unidades cartográficas de suelos. A partir de información de variables climáticas y de la observación del uso agrícola en campo (por ejemplo, uso de la irrigación), se estiman los RH en los estudios. Mediante esta correlación, se asume en la práctica una correspondencia directa entre las condiciones climáticas regionales y la dinámica temporal y espacial de la humedad del suelo; No obstante, esta concordancia implícita entre el clima regional y los RH no ha sido verificada o aplicada en la ultima década en Colombia.

Asimismo, este enfoque no incorpora de manera explícita la definición pedológica de la sección control de humedad del suelo, lo cual hace referencia a la zona del perfil del suelo donde se monitorea la humedad del suelo para definir los RH, de acuerdo a lo establecido por la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 1975). De igual manera, no se modela la dinámica temporal de la humedad del suelo conforme a los criterios establecidos en la taxonomía. En consecuencia, los RH asignados pueden estar sujetos a múltiples fuentes de incertidumbre, asociadas a la calidad y representatividad de los datos climáticos, la escala cartográfica utilizada y los supuestos metodológicos empleados en su determinación.

Estudios clásicos, como el realizado por A. V. Wambeke (1981), utilizan el modelo de Newhall para la estimación de los RH en Colombia, empleando estaciones meteorológicas localizadas mayoritariamente en la región Andina, puesto que hace 40 años no existían las estaciones que hoy tiene Colombia. Si bien este trabajo representó un avance significativo, no abordó de manera específica regiones como la Orinoquia, ni evaluó la pertinencia del modelo para suelos tropicales.

En Colombia, una de las regiones donde la actividad agrícola se ha expandido con mayor intensidad durante la última década es la Orinoquía, particularmente la denominada Altillanura plana, localizada en los departamentos del Meta y Vichada (Rivera et al., 2020). Sin embargo, la información climática disponible para esta región continúa siendo limitada, presenta vacíos temporales significativos y carece, en muchos casos, de la continuidad requerida para validar las relaciones edafoclimáticas asociadas con los regímenes de humedad del suelo.

Esta insuficiencia de información constituye un vacío de conocimiento que limita la precisión de la clasificación de los regímenes de humedad y dificulta la comprensión de la dinámica hídrica de los suelos en una de las principales fronteras agrícolas del país. Asimismo, aunque la región cuenta con estudios edafológicos de escala general en los que los taxones modales han sido clasificados a partir de regímenes de humedad inferidos mediante su relación con las condiciones climáticas, dicha clasificación no ha sido suficientemente verificada mediante observaciones directas y continuas. En consecuencia, persiste un grado importante de incertidumbre tanto en la caracterización edafoclimática regional como en la clasificación taxonómica de sus suelos.

En los últimos 20 años, no se han publicado estudios que analicen de forma explícita las fuentes de incertidumbre en la estimación del RH para Colombia, empleando modelos edafo climáticos como el modelo de Newhall. De manera similar, no se ha evaluado de manera sistemática la respuesta de estos regímenes bajo escenarios de cambio climático, a pesar de su relevancia para la planificación territorial y la sostenibilidad de los sistemas productivos de la región.

En este contexto, se plantearon dos preguntas de investigación:

¿Es posible conocer la incertidumbre en la estimación de los regímenes de humedad del suelo en la altillanura plana del departamento del Meta?

¿Se puede conocer la variabilidad espacial de los RH en un estado actual, histórico y futuro a partir del modelo de Newhall?

1.3 Justificación de la investigación

Desde una perspectiva científica, esta investigación contribuye al fortalecimiento de la pedología aplicada en Colombia al analizar de manera sistemática las fuentes de incertidumbre asociadas a la estimación del RH, utilizando un enfoque coherente con los principios de la Taxonomía de Suelos y la modelación del RH propuesta por Newhall. El estudio aborda un vacío de conocimiento y de información para la Altillanura plana del Meta.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación propone la aplicación explícita del modelo de Newhall, cuantificando la sección control de humedad y la modelación de los RH ústico, údico o arídico, a partir de diferentes fuentes de información. Este enfoque permite evaluar la sensibilidad del RH frente a variaciones climáticas anuales y simular su comportamiento bajo escenarios de cambio climático, manteniendo coherencia con los criterios pedológicos internacionales.

En términos aplicados, los resultados de este estudio permitirán mejorar la calidad de la clasificación y cartografía de los suelos en la altillanura plana del Meta, fortaleciendo los insumos técnicos utilizados en los estudios de suelos, la zonificación agrícola, la planificación del uso del suelo y la gestión territorial. La identificación de las principales fuentes de incertidumbre contribuirá a una interpretación más robusta de los estudios de suelos existentes.

Finalmente, desde una perspectiva institucional, la investigación generará evidencia técnica que podrá ser utilizada por entidades del sector agroambiental para la revisión y ajuste de los procedimientos empleados en la determinación o uso de los RH, aportando a la modernización y mejora continua de los levantamientos de suelos en Colombia.

1.4 Contribuciones de la investigación

La presente investigación realiza los siguientes aportes originales:

1. Evaluación empírica del modelo edafoclimático de Newhall en condiciones tropicales de la Orinoquia colombiana, mediante su contraste con datos instrumentales de humedad del suelo, permitiendo identificar sus limitaciones y alcances en este contexto.
2. Identificación de la capacidad de agua disponible como la principal fuente de incertidumbre en la determinación del régimen de humedad del suelo, evidenciando su mayor influencia frente a las variables climáticas.
3. Desarrollo de un enfoque metodológico integrador que combina datos de campo, productos climáticos de reanálisis y modelación edafoclimática para la espacialización del régimen de humedad del suelo.
4. Evaluación de cambios potenciales en la distribución espacial del régimen de humedad del suelo bajo escenarios de cambio climático, con implicaciones para la planificación territorial y la gestión de suelos en la región.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar las fuentes de incertidumbre de la estimación del régimen de humedad del suelo en la clasificación y cartografía del suelo para la altillanura plana del departamento del Meta.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar la sección control de humedad en la altillanura plana del departamento del Meta.
- Determinar y modelar los regímenes de humedad del suelo en la altillanura plana del departamento del Meta.
- Espacializar y simular los regímenes de humedad bajo escenarios de cambio climático en la altillanura plana del departamento del Meta.

3 Marco teórico

3.1 La humedad y su relación con el suelo

Los sistemas de clasificación de suelos, desde el inicio incorporaron el clima como una característica importante en la definición de los taxones. Fue la escuela rusa de pedología la que acuñó la genética del suelo en la clasificación, al considerar el suelo como un cuerpo natural resultante de los factores formadores (clima, material parental y vegetación). Con el avance de la ciencia adquirieron relevancia factores, como la geomorfología y el tiempo, adoptados por el Sistema de Clasificación Taxonómica de Suelos de los Estados Unidos (The Soil Taxonomy - TS) (Soil Survey Staff, 1999). Así, quedó explícita la importancia de la humedad del suelo como una característica diferenciadora de los taxones (clases) en distintos niveles categóricos (orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie), denominada y definida como Régimen de Humedad del Suelo. Algunos sistemas de clasificación actuales no conciben el clima como característica diagnóstica, pero lo incorporan con propósitos de interpretación, como atributos pragmáticos o fases; por ejemplo, el sistema internacional de clasificación de suelos WRB (Schelling, 1970, Winzeler et al., 2013).

Determinar la humedad del suelo con fines de clasificación es una tarea compleja, derivada de su inherente heterogeneidad espacial, que hace necesaria la toma de numerosos datos temporales (horario, diario, decadal, mensual y anual). Además, es necesario incorporar factores externos e internos que inciden en su medición y que implican asociarla con patrones de profundidad, para determinar la permanencia de las condiciones de humedad en una sección del suelo (Seneviratne et al., 2010, Sidle et al., 2017, Soil Survey Staff, 1999)

Estas dificultades en la medición han llevado a los expertos a estimar los regímenes de humedad del suelo y su variabilidad espacial de manera indirecta, valiéndose de la simulación. Uno de los primeros modelos usados para hacer esta estimación fue el modelo empírico desarrollado a principios de los 70 por Franklin Newhall, quien utilizó datos de estaciones climáticas para estimar la humedad del suelo (excluyendo los suelos saturados) con base en los parámetros de clasificación de régimen de humedad y temperatura, establecidos por la clasificación taxonómica de suelos de los Estados Unidos (Figura **3-1**). (Costantini et al., 2002, Loaiza et al., 2010, Seneviratne et al., 2010, A. R. V. Wambeke, 2000).

Posteriormente, se han desarrollado otros modelos con base en el modelo de Newhall para complementar datos o representar cuantitativamente la humedad del suelo y, a partir de sus resultados, facilitar el proceso de clasificación del suelo. A continuación, se presenta una revisión cronológica que explicita la importancia del clima en la génesis del suelo.

En 1883, Vassili Vasilievich Dokuchaev, geólogo y geógrafo ruso, cimentó las bases conceptuales de la pedología, afirmó que la génesis de los suelos es parte esencial de su clasificación, y que estos son el resultado de la interacción de los factores del medio ambiente que actúan sobre el material parental a lo largo del tiempo (Bockheim et al., 2014, Calzolari & Filippi, 2016). Luego, en 1899, Dokuchaev expuso el principio de formación de suelos a partir del clima e introdujo el concepto de Zonalidad: "... los principales agentes de formación del suelo están distribuidos en la superficie de la tierra, formando bandas o zonas más o menos

paralelas a las latitudes. Como consecuencia, necesariamente los suelos deben estar también distribuidos zonalmente, en relación con el clima y la vegetación...". (Monteverde, 2014). El concepto fue aceptado por la comunidad científica y evolucionó gracias al trabajo de sus discípulos, quienes consolidaron un agrupamiento de suelos en función del clima, divididos en: suelos zonales, aquellos que se formaron por influencia de factores bioclimáticos; intrazonales, formados principalmente por factores diferentes al clima, tales como el material parental o el relieve y los azonales, suelos con un desarrollo muy incipiente. (Bockheim et al., 2014) En 1906, G. D. Glinka, discípulo de Dokuchaev, publica el primer mapa de suelos del mundo (Figura **3-1**), en el cual muestra la distribución de suelos del mundo en 18 clases, que guardan una alta relación con las zonas climáticas de la tierra (Hartemink et al., 2013).

Figura **3-1**: Mapa de suelos del mundo publicado por Glinka (1906).

En 1927, en Washington, el primer Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo propuso y aceptó las características del perfil del suelo como objeto de clasificación de suelos. (Calzolari & Filippi, 2016)

En 1938, Baldwin, Kellog y Thorp publicaron un nuevo sistema de clasificación de suelos con categorías jerárquicas de agrupación, tales como orden, suborden, gran grupo, familia y serie, manteniendo los conceptos de zonalidad, precursores del actual Sistema Taxonómico Americano. (Bockheim et al., 2014)

En 1944, Demolon publica la primera clasificación de origen francés, donde relaciona los conceptos de "suelos evolucionados" y "suelos poco evolucionados", con base en los conceptos de formación del bioclima o zonalidad (Monteverde, 2014).

Para 1956, Aubert y Duchaufour propusieron una clasificación en la que la subclase se define por factores ecológicos en la pedogénesis, especialmente por el régimen hídrico, base para la Comisión Francesa de Edafología y Cartografía (C.P.C.S., por sus siglas en francés).

Así, en 1960, en el séptimo Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) presentó la "Séptima Aproximación a la Taxonomía de Suelos" (Soil Survey Staff, 1975); esta clasificación incluyó las características internas del perfil como rasgos diagnósticos y dejó de lado las características genéticas heredadas del sistema de clasificación europeo.

El documento, que fue objeto de estudios, evolucionó, incluyendo cambios hasta la edición definitiva en 1975, con el "Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys". (Soil Survey Staff, 1975, Stolt & Needelman, 2015)

Entre tanto, en 1967, la C.P.C.S. incorporó en su clasificación el concepto de "edafoclima" en la categoría de subclase, y agrupó los suelos en 12 clases teniendo en cuenta la evolución y el desarrollo del perfil del suelo; metodología inicialmente discutida por la falta de caracterización y sustento científico para su determinación. (Monteverde, 2014).

En 1974, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) publican su sistema de clasificación de suelos, documento que fue aceptado por la comunidad internacional para estandarizar y armonizar el conocimiento de los suelos (Nachtergaele et al., 2000), tal como fue sugerido en 1960 por la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS, por sus siglas en inglés), hoy llamada Unión Internacional de la Ciencia del Suelo (Hartemink et al., 2013).

Entonces, en 1975, USDA, lanza oficialmente el libro "Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys", en el que se afianza el concepto de humedad, de una manera cualitativa y cuantitativa, con las definiciones de los regímenes de humedad y temperatura, los horizontes diagnósticos y el término "Edafón". (Soil Survey Staff, 1975, Stolt & Needelman, 2015).

Actualmente, persisten debates sobre el rol del clima en los sistemas de clasificación del suelo, especialmente en relación al material parental y el tamaño de las partículas, como por ejemplo los suelos derivados de ceniza volcánica (andisoles) y la determinación de los regímenes de humedad. Otros grupos plantean la exclusión de algunas propiedades hidrofísicas para comparar la humedad, debido a que estas afectan sustancialmente el movimiento y almacenamiento de agua en el suelo. (Quevedo-Nolasco et al., 2005). Sin embargo, al ser incluidas la humedad y la temperatura como variables claves en la distinción taxonómica, se consolida el clima como principal factor formador del suelo, conforme a lo planteado por Jenny y sus predecesores (Jenny, 1941).

Bockheim et al. (2014), encontraron que la influencia del clima está cerca del 17 % a nivel de Orden (Aridisoles y Gelisoles), 63 % a nivel de suborden y aproximadamente en un 30 % en los epipedones y endopedones; de esta manera, se confirma que el clima es el factor formador más dominante en la definición de la génesis de los suelos.

La controversia aumenta cuando se incluye la geología como otro factor en la formación del suelo, ya que influye en la humedad edáfica. Este aspecto es especialemente relevante en los Andisoles, suelos derivados de cenizas volcánicas que presentan características físicas, químicas, mineralógicas e hidromórficas especiales y diferentes a las de los demás órdenes (E. J. A. Sánchez & Rubiano, 2015), principalmente por su composición de origen ígneo, razón por la cual la taxonomía del USDA no aclara los protocolos que deberían aplicarse para la determinación de los RH en estos suelos. Monteverde (2014), afirma que esto se debió a que la estructuración de los regímenes fue realizada en Estados Unidos con bases de datos de los inventarios de suelos de ese país, donde la presencia de andisoles es proporcionalmente menor (15.6 millones de ha) (McDaniel et al., 2012), de tal forma que la determinación de los RH para este orden puede llevar a una sobre o subestimación, al aplicar los protocolos para su clasificación en este sistema.

Otro aspecto fundamental se relaciona con los métodos de determinación de los RH, tal como están definidos en la clave taxonómica de suelos de Estados Unidos. Estos métodos exígen un monitoreo y recopilación exhaustiva de datos de humedad del suelo a lo largo del tiempo, lo que resulta poco factible para la mayoría de los países donde se adoptó, por la baja cobertura de estaciones climáticas y la carencia de datos de humedad del suelo.

Esta revisión lleva a concluir que son pocos los estudios que usan efectivamente la sección control de humedad del suelo (SCH) tal como fue definida por la TS para determinar los RH. Sin embargo, sigue siendo relevante el

estudio de su variabilidad, por ser determinante para la clasificación taxonómica, la cartografía, las múltiples aplicaciones interpretativas y el manejo sostenible del recurso edáfico. La comunidad científica ha realizado aproximaciones indirectas, aplicando el concepto de "edafoclima", que establece relaciones entre datos de suelos y atmosféricos a través del tiempo, mediante modelación matemática, como el modelo propuesto por Newhall para los EE. UU. (D'Avello et al., 2019)

La complejidad asociada del proceso de cuantificación de los RH, ha generado posturas divergentes dentro la comunidad científica dedicada a la clasificación de suelos, algunas de las cuales proponen descartar o recategorizar los RH de la taxonomía de suelos. De manera similar, el sistema de clasificación de suelos de la FAO, excluyó para la clasificación internacional "World Reference Base for Soil Resources" (Spaargaren & Deckers, 1998), los parámetros climáticos en un primer nivel, bajo el argumento de que la clasificación del suelo debe basarse en sus características o propiedades intrínsecas y no en las condiciones formadoras. Esta decisión reduce el número de categorías posibles y facilita el uso de la clasificación (Nachtergaele et al., 2000, Quevedo-Nolasco et al., 2005).

3.2 Caracterización de la humedad en el suelo

El término humedad, se define como la cantidad de agua que se encuentra en el espacio poroso de la zona no saturada del suelo, que, para fines prácticos, se cuantifica en términos de volumen, humedad volumétrica θ (Hillel, 2013, Seneviratne et al., 2010) (Ecuación 3-1).

$$\theta = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{suelo}}} \tag{3-1}$$

Donde $\theta\,[\text{m}^3\,\text{agua}/\text{m}^3\,\text{suelo}]$ representa la relación del volumen del agua (V_{agua}) en el volumen del suelo (V_{suelo}). Sin embargo, cuando esta relación se expresa en términos de masa se designa ''humedad gravimétrica'' (Ecuación 3-2).

$$\theta_g = \frac{\phi_{\text{agua}}}{\phi_{\text{suelo}}} \tag{3-2}$$

Donde $\theta_g\,[\text{g agua}/\text{g suelo}]$ es la humedad gravimétrica, $\phi_{\text{agua}}\,[\text{g agua}]$ es el peso del agua contenida en la fase líquida y $\phi_{\text{suelo}}\,[\text{g suelo}]$ es el peso del suelo de la fase sólida.

La humedad del suelo puede caracterizarse en función de las interacciones suelo-agua-planta, explicadas por los estados energéticos del movimiento generado por los gradientes del suelo. De esta manera, el agua se encuentra en el suelo gracias a la acción de distintas fuerzas, tales como la gravedad, la absorción, la tensión superficial, la capilaridad, la sortividad y la higroscopía, las cuales se relacionan con propiedades físicas como la porosidad, el tamaño de los poros, el tamaño de las partículas y los solutos y la estructura del suelo, entre otras (Zhang & Lu, 2020).

La energía responsable del desplazamiento del agua en unidades de volumen o masa, incluso en cantidades infinitesimales en comparación del agua libre y pura, se denomina potencial de agua (ψ_T); al mismo tiempo, el agua se moverá de un potencial (agua pura) a uno menor (agua en solución) (Amer, 2009, Papendick & Campbell, 1981)

En el suelo, diversas fuerzas actúan como potenciales debido a los diferentes estados energéticos generados por el movimiento del agua, tales como el potencial gravitacional(ψ_g), osmótico (ψ_o), mátrico (ψ_m) y de presión (ψ_p). La suma de estos potenciales constituyen el potencial de agua en el suelo (Ecuación 3-3).

$$\psi_T = \psi_g + \psi_o + \psi_m + \psi_p \tag{3-3}$$

El potencial osmótico se genera por los solutos del suelo, ya que el agua rara vez se encuentra en estado puro. Este potencial es fundamental para el intercambio iónico con las raíces de las plantas y genera gradientes de concentración tanto en el suelo como en las plantas.

El potencial gravitacional actúa sobre las moléculas de agua debido a la fuerza de gravedad, lo que provoca el drenaje descendente a través de los poros grandes y conectados del suelo (porosidad efectiva). Así, el agua se mueve libremente sin retención. Cuando todos los poros están llenos de agua, el suelo alcanza el punto de saturación(θ_{SAT}) que corresponde al contenido de agua máximo en el suelo (Jabro et al., 2020).

Cuando ya no hay saturación, ψ_g actúa generando un drenado natural, donde el agua presente en el suelo se mueve de manera vertical descendente, zona en la cual se considera ‘‘tasa de saturación’’ (Ecuación 3-4).

$$\theta_s = \frac{\theta}{\theta_{\mathrm{SAT}}} \tag{3-4}$$

Donde θ_s es la tasa de saturación que varía entre 0 (no hay humedad) y 1 (suelo saturado) y la humedad θ varía entre 0 y θ_{SAT} (Figura **3-2**).

Cuando el suelo no está en saturación, el potencial mátrico interviene, principalmente por la capilaridad y la adsorción de los poros medios y finos del suelo.

En condiciones de no saturación del suelo, el potencial mátrico predomina debido a los efectos de la capilaridad y la adsorción en los poros de tamaño medio y fino. Este potencial adquiere valores negativos porque el agua se encuentra retenida por fuerzas que superan la gravedad, en lugar de estar libre. Los gradientes hidráulicos se establecen desde el mayor hacia el menor potencial, tomando como referencia el agua pura, libre y isotérmicamente estable, que posee el mayor potencial. Por consiguiente, el potencial del agua en el suelo es inferior a cero. (Y. Wang et al., 2016)

Cuando el potencial gravitacional deja de ser el dominante, es decir, tras el drenaje de la mayor parte del agua libre y el inicio de la retención de agua en el suelo, se alcanza la denominada *capacidad de campo* (CC). En este estado, las plantas tienen acceso al mayor volumen de agua disponible, ya que la fuerza gravitacional provoca previamente un drenaje rápido. CC se define como el contenido de humedad del suelo entre 24 y 72 horas después de un aporte de agua, ya sea por precipitación o riego. (Owen et al., 2020)

A partir de CC, la humedad del suelo disminuye debido al consumo por parte de las plantas, a la evaporación y a la adsorción en los microporos. En consecuencia, el valor absoluto del potencial mátrico aumenta ($\psi_m = 0$ en saturación) alcanzando la máxima humedad disponile para las plantas llamado el *punto de marchitez permanente* (PMP), determinado por la absorción y la elevada higroscopicidad de las partículas del suelo. En este estado, el agua se encuentra en estado gaseoso y presenta un potencial tan elevado que las plantas no pueden extraerla. Como resultado, las hojas experimentan una marchitez irreversible que conduce a la muerte. (Hillel, 2013, Papendick & Campbell, 1981).

El potencial de presión es la presión ejercida por la columna de agua en un punto de referencia. Su valor es positivo, ya que la presión hidrostática supera la presión atmosférica. Este potencial es excluyente respecto al potencial mátrico: la presencia de uno implica la ausencia del otro. (Salisbury & Ross, 1994)

El término tensión de agua se refiere a las magnitudes del potencial de agua. Las constantes de humedad se expresan en términos de tensión, y sus valores son aproximados para suelos promedio. Estas tensiones dependen de propiedades físicas del suelo, como la textura, la estructura, los agregados en la matriz y la fisiología de la planta, dado que algunas especies pueden utilizar el agua con mayor o menor facilidad según

la tensión. Generalmente, estas tensiones se cuantifican entre 10 a 33 kPa a θ_{CC} y 1500 kPa a θ_{PMP} (Liang et al., 2016, Zhang & Lu, 2020)

La diferencia entre θ_{CC} y θ_{PMP} se considera la cantidad de humedad que las plantas pueden aprovechar, denominada la *Capacidad de Agua Disponible* (CAD)o índice de disponibilidad de agua (θ_{DA}) (Ecuación 3-5). (Mohseni & Mokhtarzade, 2020)

$$\theta_{DA} = \frac{\theta - \theta_{PMP}}{\theta_{CC} - \theta_{PMP}} \tag{3-5}$$

Donde θ_{DA} varía entre 0 (el suelo se encuentra con agua no disponible) y 1 (el suelo se encuentra con la máxima humedad aprovechable para las plantas).

Los contenidos de humedad se pueden expresar en términos relativos (Ecuaciones 3-1, 3-4 y 3-5), y en términos absolutos expresados en unidades de masa [kg] o profundidad de agua (s) [mm], dadas en función a la profundidad del perfil del suelo (p) (Ecuación 3-6).

$$s = \theta\, p \tag{3-6}$$

La Figura **3-2** muestra una caracterización general de la humedad en el suelo, en función de la tensión de los puntos de contenido de agua, la tasa de saturación y el índice de humedad, a una profundidad p.

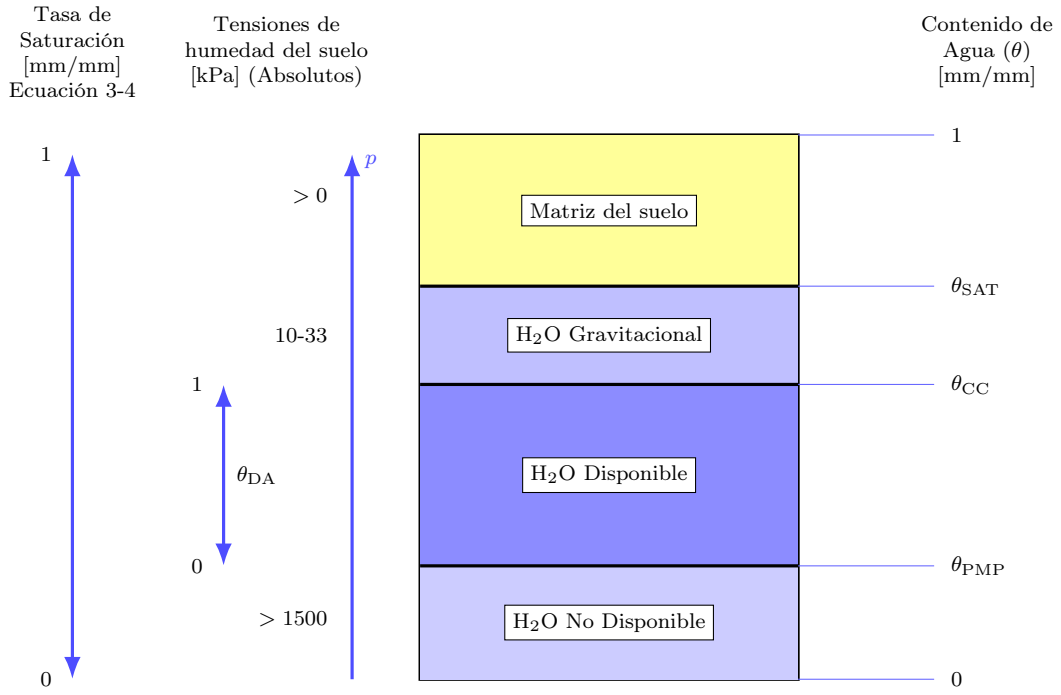

Figura **3-2**: Caracterización de la humedad en el suelo, fuente: Adaptado de Seneviratne et al. (2010)

3.3 Régimen de humedad del suelo

Tradicionalmente, la humedad del suelo se ha expresado de acuerdo con su estado y permanencia: primero, suelo saturado, referido a que todos los poros se encuentran saturados por agua; segundo, el agua empieza a desplazarse en su estado líquido a través de la matriz; y, por último, cuando el agua no fluye a través del perfil, se transporta principalmente a partir de vapor de agua (Hillel, 2013).

De acuerdo con los estados como se encuentra el agua en el suelo, ocurren procesos que dan origen a características propias de un horizonte a través del tiempo, tales como: ganancias, pérdidas, translocaciones y transformaciones, de elementos, minerales o sales del suelo (Bockheim et al., 2014); el conocimiento de los procesos descritos permite diferenciar y diagnosticar características intrínsecas del suelo para su posterior clasificación.

De manera similar, la cuantificación de la humedad del suelo se hace relevante cuando se trata de la planificación de sistemas de cultivo, ya que ésta determina procesos fisiológicos de las plantas.

En consecuencia, resulta necesario profundizar en la comprensión de la dinámica hídrica del suelo y la relación con la atmósfera para condiciones de un lugar específico, con el fin de robustecer los fundamentos pedológicos y edafológicos que sustentan la clasificación y la cartografía de suelos, y de proveer criterios técnicos para aplicaciones ingenieriles y agropecuarias. (Owen et al., 2020, Seneviratne et al., 2010)

En la Tabla **3-1** se relaciona la participación e influencia de la humedad del suelo en los principales procesos pedogenéticos de formación. Estas características evidencian la importancia del clima en la formación del suelo, de tal manera que se expresan en la clasificación de suelos con los conceptos hidrotérmicos tales como los regímenes de humedad y de temperatura, siendo el primero el que se profundiza en el documento.

Tabla **3-1**: Influencia de la humedad en algunos procesos formadores del suelo. Fuente: elaboración propia

Proceso	**Horizontes del suelo o características diagnósticas**	**Relación humedad**	**Autor**
Argiluviación	Horizontes argílicos, cutanes	Existen relaciones entre la intensidad del proceso con la conductividad hidráulica del suelo y el régimen de humedad de los suelos: arcillosos con horizontes eluviables ácidos de color claro; principalmente cuando (i) la precipitación efectiva es mayor que la evapotranspiración; (ii) se da en climas húmedos.	(Quénard et al., 2011, Zaidel'man, 2007)
Andolización	Propiedades ándicas; espódicas; epipedón melánico	Altas retenciones de humedad por sus propiedades ándicas; las tensiones son subestimadas cuando se han secado ya que no tienen el mismo proceso de humedecimiento. La génesis se desarrolla en zonas muy húmedas; y húmedas; eventualmente secas.	(E. J. A. Sánchez & Rubiano, 2015) (Lizcano et al., 2006)
Lixiviación	Horizontes argílicos, úmbricos, cálcicos y gípsicos	Movimiento de partículas finas y bases; generando acumulaciones en horizontes más profundos, presente en la mayoría de los procesos de translocación.	(Bockheim & Hartemink, 2017) (Rogobete & Grozav, 2013)
Erosión	Pérdida de suelo, materiales transportados	Asociado con excesos de humedad y parámetros de escorrentía por el flujo Hortoniano que se puede generar en los suelos.	(Calì et al., 1996) (Cartacuzencu et al., 2016)
Paludización	Materiales hísticos	Cambios en las propiedades del suelo debido a un drenado y aireación de materiales orgánicos.	(Bockheim et al., 2014)
Gleización	Reducciones; colores grisáceos	Condiciones de reducción por estar el suelo en condiciones anaeróbicas; colores grisáceos del suelo o moteados cuando hay drenajes imperfectos.	(Bockheim et al., 2014)

Continúa en la página siguiente

Proceso	Horizontes del suelo o características diagnósticas	Relación humedad	Autor
Melanización	Colores negros por impregnación de materiales orgánicos	Materiales orgánicos transportados por el movimiento del agua; materia orgánica humedecida.	(Bockheim et al., 2014)
Ferralitización	Horizontes óxicos	Relacionado con ambientes húmedos de alta meteorización; con procesos de oxidación y acumulación de Fe y Al; con suelos bien drenados.	(Long et al., 2016) (Buringh & Sombroek, 1971)
Podzolización	Álbicos, espódicos y plácico	Procesos complejos; lixiviaciones; precipitados de MO; percolación y adsorción de materiales tipo imogolita.	(Lundström et al., 2000)
Vertización	Grietas, caras de deslizamiento (slickensides)	Por acción de la presencia del agua y arcillas de alta actividad.	(Bockheim & Hartemink, 2017)
Crioturbación	Materiales gélidos	Procesos formadores por el deshielo del agua; gelisoles; clima a nivel de orden.	(Bockheim, 2015)
Salinización, alcalinización, calcificación y gipsificación	Horizontes nátricos, sálicos, cálcicos y gypsicos	Acumulación por el movimiento de agua en sales en solución; movimientos capilares; recurrencia en climas áridos.	(Litalien & Zeeb, 2020) (Bockheim & Hartemink, 2017)

3.3.1 Concepto de régimen de humedad

La TS define RH del suelo como el contenido de agua subyacente, medido en una zona específica denominada «sección control de humedad», que ha sido retenida a una tensión menor de 1500 KPa, durante un año normal (Soil Survey Staff, 2022)

El agua presente en el suelo se clasifica, mediante un balance edafoclimático, en dos estados: seco y húmedo. El estado seco corresponde al agua retenida a una tensión menor que 1500 kPa, mientras que el estado húmedo se refiere al agua retenida a una tensión mayor que 0 kPa y menor que 1500 kPa, o θ_{PMP}.

La relevancia del RH se debe a su vínculo con la fisiología vegetal, ya que es fundamental para mantener las actividades fisiológicas de las plantas mesófilas (Quevedo-Nolasco et al., 2005, Seneviratne et al., 2010, Soil Survey Staff, 1999)

Según Monteverde (2014), las clases de RH se establecieron a partir de datos de humedad recopilados de estaciones agro metereológicas de las planicies del Medio Oeste de Estados Unidos, con el objetivo de diferenciar suelos para la irrigación de cultivos como el maíz, la soya, el trigo y el sorgo. Así, se propuso una primera clasificación de RH en cinco categorías: «Seco o arídico», donde no es posible el cultivo sin riego; «Údico», donde los cultivos no requieren riego; «Ústico», una fase intermedia; «Xérico», asociado a zonas secas de clima mediterráneo; y «Ácuico», suelos saturados la mayor parte del tiempo.

Smith (1986) señala que las definiciones existentes presentan vacíos y no describen adecuadamente la diversidad de los edafoclimas. Esta observación ha permitido una mayor flexibilidad en su aplicación durante los levantamientos de suelos, lo que explica el uso de una clasificación empírica para definir los RH. Además, Smith (1986) indica que las clases no se determinan mediante un protocolo estricto, sino que requieren razonamiento y observación directa del perfil del suelo y de su entorno, considerando factores como el uso agropecuario, la vegetación y otros datos secundarios.

Son escasas las publicaciones que especifican la estimación de RH asociados con la pedología; sin embargo, de forma indirecta se realizan mediciones o determinaciones aplicando modelos o tácitamente la clave taxonómica. A continuación, se mencionan los aportes en este campo de las últimas dos décadas.

D'Avello et al. (2019) realizaron una simulación de los límites geográficos que separan los suelos *pedocal y pedalfer* en los Estados Unidos. El estudio analizó el comportamiento temporal y espacial de los RH del suelo entre 1985 y 2014. También explica los cambios pedogenéticos en los horizontes cálcicos a lo largo del tiempo, principalmente con datos climáticos y de suelos para confirmar algunas propiedades. Emplearon el modelo de Newhall para determinar los RH, que se incorporan a la planificación al relacionarlos con la humedad del suelo.

Salley et al. (2016) redefinieron los límites entre las zonas áridas y húmedas en las grandes planicies de los EE. UU. Para lograrlo, utilizaron la variabilidad anual histórica a lo largo de una serie temporal extensa para modelar la humedad del suelo y el acondicionamiento hidrológico de la zona de estudio.

Monteverde (2014) contribuyó integralmente a la investigación en la Isla de Tenerife mediante mediciones de humedad del suelo en campo y en laboratorio y el uso de un modelo para estimar los RH. También determinó la SCH comparando las metodologías propuestas por distintos autores con las recomendadas por la TS. Aplicó los conceptos estrictos de la taxonomía para definirla. Una conclusión relevante es que las SCH fueron definidas en la TS a partir de datos de suelos de EE. UU., lo que sugiere que deben ajustarse a cada territorio, con un conocimiento riguroso del comportamiento local de la humedad del suelo.

Winzeler et al. (2013) publicaron una metodología derivada del modelo de Newhall y de la aplicación de mapeo digital de suelos para examinar los cambios geográficos en el edafoclima mediante el estudio de los RH de los Estados Unidos entre 1971 y 2000. El modelo se utilizó para predecir que, para el sur de las montañas Rocky, al 2080 el área de suelos con régimen ústico aumentará a expensas de una disminución en la extensión de tierras con RH údico. Además de la predicción, fue posible analizar retrospectivamente el comportamiento del edafoclima mediante modelos matemáticos y Mapeo digital de suelos, con un alto nivel de certidumbre, en sintonía con las definiciones de la TS. El modelo fue ajustado y utilizado directamente por investigadores de EE. UU.

Bonfante et al. (2011) compararon modelos de simulación de los RH aplicados en los Estados Unidos y promueven el uso de un modelo físico alternativo definido por ICOMMOTR (por sus siglas en inglés «The International Committee on Soil Moisture and Temperature Regimes»). Este modelo, al emplear variables físicas para simular el contenido de agua en el suelo, puede lograr un mayor ajuste y, además, es complementario al modelo tradicional de Newhall por incluir un conjunto más robusto de datos climáticos. Los resultados sugieren cambios clave para la TS: primero, un nuevo sistema de clasificación de los RH, ya que la actual puede tener rangos muy amplios para zonas con diferencias significativas en características físicas de suelos; segundo, redefinir las reglas para su identificación basándose principalmente en datos de propiedades físicas; y tercero, continuar aplicando el modelo de Newhall por su simplicidad y porque permite identificar procesos edafogenéticos no evidentes en modelos anteriores.

Loaiza-Usuga y Poch (2009) evaluaron dos métodos de predicción para determinar los RH de una cuenca forestal de los Prepirineos de Cataluña. Encontraron que el modelo que mejor se ajustó a los datos medidos fue TOPLAST (*TOPMODEL based Land Surface-Atmosphere Transfer Scheme*), frente al modelo clásico de Newhall. Esta investigación aporta a la simulación de los RH: a pesar de utilizar datos medidos en solo un año, es posible aproximarse con un buen nivel de certidumbre a su determinación.

Quevedo-Nolasco et al. (2005) demostraron que los sistemas de irrigación se ven afectados cuando se modifica la SCH, por lo que esta característica debe medirse para estimar el régimen de humedad y no tomarse directamente de las reglas de la TS. Esto posiblemente se aplique a suelos en zonas aluviales, pero hay pocos reportes que permitan generalizar estos resultados, como lo confirmó (Monteverde, 2014).

Tejedor et al. (2002) estudiaron diferentes métodos de simulación. Para ellos, el método de Newhall podría ser muy simplista por no incluir mediciones de propiedades físicas en la modelación. Esto impulsa a los investigadores a estudiar el rol de las propiedades hidrodinámicas del suelo al incorporarlas en la determinación de los RH. Tejedor et al. (2002) aportaron al estudiar cómo puede un régimen arídico, según las reglas de la TS, cambiar a un régimen údico cuando se miden y se agregan propiedades físicas a la simulación. Los

resultados se confirmaron en un suelo de tefra.

Las investigaciones más frecuentes que se basan en la utilización de datos climáticos son las realizadas mediante modelos matemáticos, como los de Newhall, Billeux y Jaruta, o modelos físicos como el de ICOOMOTR (*International Committee on Soil Moisture and Temperature Regimes*) (Costantini et al., 2002) y SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) (van Dam et al., 2008), entre otros . Así, se estima y clasifica el comportamiento y almacenamiento del agua en el suelo, primero para su clasificación y luego para desarrollar investigación edafológica. Los conceptos clásicos de RH explicados con los modelos clásicos citados son recurrentes para Norteamérica, probablemente por ser los precursores de este concepto.

La crítica más acuciosa que enfrentan los ponentes de los RH se asocia con su determinación en campo, que requiere datos históricos de humedad del suelo para entender la relación de la sección control del suelo con el comportamiento de la humedad en un año normal. En síntesis, la manera en que la TS define los RH es a través de la profundidad que recorre el agua del suelo en una zona determinada del perfil del suelo, el volumen o lámina de aplicación y la tensión a la que está retenida el agua (a menos de 1500 kPa). No obstante, no se especifica bibliográficamente el porqué de algunos de sus valores; esta aclaración también la menciona Monteverde (2014).

A continuación, se describe el concepto empleado para observar la humedad en los RH, denominado «Sección Control de Humedad del suelo».

3.3.2 La sección control de humedad del suelo

La Sección Control de Humedad del suelo hace referencia a la franja del perfil (pedón) donde se retiene la humedad que almacena el suelo. Responde a la pregunta: «¿dónde se debe medir u observar la retención del agua por el suelo?» Para aplicar los protocolos de estimación de los RH, se fundamenta en conceptos asociados a la formación del suelo y su relación con el clima, la periodicidad de las sequías y la disponibilidad del agua para las plantas (Tejedor et al., 2002).

La TS parametriza la medición de la SCH como la profundidad de humedecimiento al aplicar dos láminas de agua (una de 25 mm y otra de 75 mm) a un suelo seco (no secado al aire), y a una tensión < 1500 KPa a 24 y 48 horas respectivamente (Figura **3-3**).

La SCH definida de esta forma, comprende el área de exploración radicular de diferentes especies vegetales, aunque algunas pueden estar por encima o por debajo de esta (Soil Survey Staff, 1999). No obstante, esta franja está establecida para estados ideales del suelo; sin embargo, esto puede cambiar en condiciones de suelos limitantes para la profundidad efectiva, donde se pueden presentar distintos escenarios que alteran las condiciones ideales de movimiento y almacenamiento del agua, tales como horizontes adensados, líticos o paralíticos, agrietamientos, excavaciones de animales, niveles freáticos colgantes, pedregosidad, fragmentos de roca, humedecimiento irregular y lateral, entre otros (Bardhan et al., 2007). Estas condiciones hacen que la SCH pueda variar y que se deban realizar promedios o ponderaciones en relación con la profundidad para cada situación (Soil Survey Staff, 2022)

Los parámetros establecidos por la TS para definir la SCH son estrictos y requieren procedimientos complejos para su obtención (Calì et al., 1996, Monteverde, 2014). Asimismo, estos parámetros suelen generar incertidumbre en la determinación del punto de sequedad del suelo en regiones húmedas, lo que dificulta la cuantificación precisa de los límites inferior y superior en zonas tropicales como Colombia. Por ello, para la recolección de datos, la TS recomienda utilizar límites basados en clases texturales (Tabla **3-2**), excluyendo las texturas fragmentales y esqueléticas bajo el supuesto de que las fracciones mayores a 2 mm no retienen agua.

Actualmente, son escasos los estudios que abordan la pregunta de cómo determinar en campo la SCH.

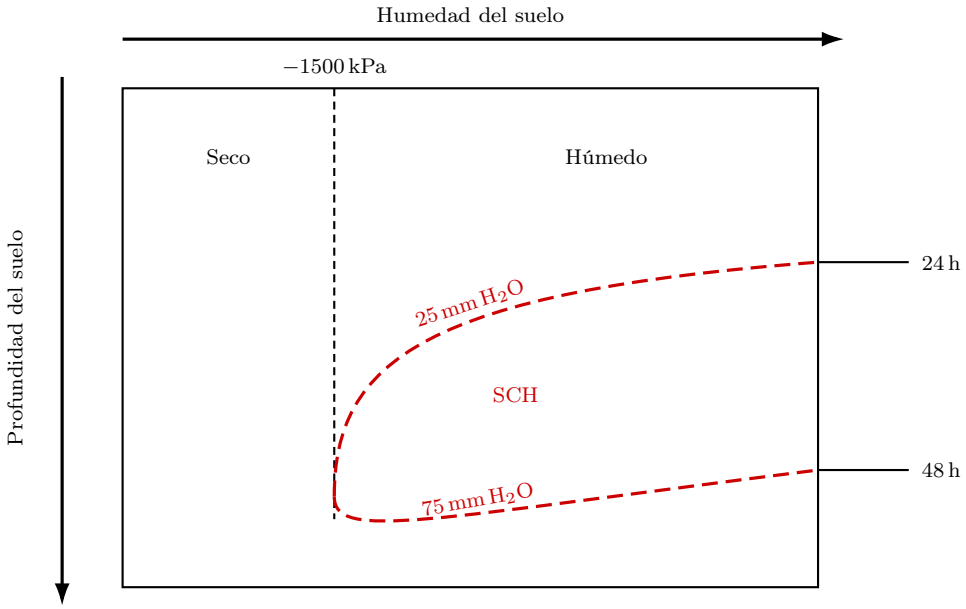

Figura **3-3**: Esquema de la SCH definida por la TS. La profundidad del suelo aumenta hacia abajo y la humedad del suelo aumenta hacia la derecha. Fuente: elaboración propia.

Tabla **3-2**: Límites de profundidad de la SCH. Fuente: Soil Survey Staff (2022)

Tamaño de partículas	**Límites (cm)**
Franco--fina, limosa--gruesa, limosa, arcillosa	10--30
Franco--gruesa	20--60
Arenosa	30--90

Monteverde (2014) obtuvo la SCH directamente en campo, dado que una parte importante de los suelos analizados fueron Andisoles o presentaron propiedades ándicas con presencia de alófanas; estos suelos, al secarse artificialmente, pueden exhibir histéresis asociada a su composición mineralógica, lo que conlleva a subestimar los resultados.

Tejedor et al. (2002) encontraron diferencias significativas en los límites de la SCH para texturas en suelos aluviales, las cuales no se corresponden con las descritas por la USDA. Los autores sustentan estas diferencias en que las recomendaciones de la TS provienen, en gran medida, de datos obtenidos para perfiles de EE. UU.

Para correlacionar los datos climáticos con los RH, la TS utiliza el concepto de «año normal», que hace referencia a la periodicidad o al tiempo en el cual la SCH se encuentra seca, húmeda o parcialmente seca (o húmeda), definida textualmente como:

> . . . 1. Una precipitación anual que es más o menos una desviación estándar de la precipitación promedio anual de una estadística de larga duración (30 años o más); y 2. Una precipitación media mensual que es más o menos una desviación estándar de la precipitación a largo plazo, para 8 de los 12 meses.

Loaiza et al. (2010) utilizaron modelos físicos para estimar los RH en la región montañosa de los Prepirineos catalanes. La investigación mostró que los modelos basados en propiedades físicas fueron más exactos que los estimados con modelos clásicos. Adicionalmente, mostraron cómo puede reducirse el tiempo de calibración

de los modelos físicos a periodos incluso de un año, lo cual supone una ventaja para su implementación en zonas donde no existen, o son escasos, datos climáticos de calidad y cantidad, indispensables para lograr certidumbre cuando se aplica el modelo de Newhall.

3.4 Clases de regímenes de humedad

Actualmente, la TS clasifica los RH en las clases: ácuico, arídico, údico, ústico y xérico, y reconoce las clases intermedias perácuico y perúdico (Soil Survey Staff, 2022).

En el RH ácuico no se establecen parámetros explícitos de permanencia temporal de humedad, pues su identificación se basa en la presencia de condiciones ácuicas. En la práctica, depende de la descripción de rasgos morfológicos redoximórficos (p. ej., moteados y depleciones) que no están directamente asociados a condiciones meteorológicas, sino que suelen estar dominados por la posición geomorfológica. En ese sentido, podría interpretarse como un régimen intrazonal, al relacionarse significativamente con el factor formador geomorfología. Esta condición no aplica en su totalidad al régimen perácuico, definido como un régimen especial en el cual la SCH permanece húmeda durante todo el año (Soil Survey Staff, 2022).

De manera similar, la humedad del suelo se correlaciona con la temperatura edáfica, medida a 50 cm de la superficie del suelo. Esta correlación condiciona algunos RH a través de los gradientes térmicos entre verano e invierno (Soil Survey Staff, 2022).

La temperatura es una variable climática que condiciona el funcionamiento de la biota del suelo (actividad microbiana) y el desarrollo de funciones fisiológicas de las plantas; ambos criterios son fundamentales para el concepto de suelo adoptado por la TS (Soil Survey Staff, 1999).

Las reglas para clasificar los RH incluyen opciones que cambian acorde con las variaciones de los gradientes edafotérmicos entre estaciones. Sin embargo, para lugares donde estas diferencias no son significativas, la TS incorpora indicaciones para zonas húmedas, subhúmedas, semiáridas, tropicales y subtropicales, particularmente en las clases údico, ústico y ácuico (Soil Survey Staff, 2022).

Con base en lo anterior, se han suscitado discrepancias para definir de manera consistente los RH ústico y údico, a diferencia de lo que ocurre con los regímenes arídico y ácuico, que presentan condiciones contrastantes y cuya clasificación requiere menos criterios. Las características específicas de los RH údico y ústico se presentan en la Tabla **3-3**.

3.4.1 Régimen de humedad údico

El RH údico (del latín *udus*, húmedo) establece que la SCH debe estar completamente húmeda o, en su defecto, que ninguna parte de ella esté seca durante más de 90 días acumulativos en un año. La TS diferencia estas condiciones cuando la temperatura edáfica es menor a 22 °C, particularmente en zonas con estacionalidad marcada (verano e invierno).

La TS indica que este régimen predomina en regiones húmedas donde la precipitación está «bien distribuida» en un año normal, de forma que el balance hídrico sea cero o positivo; es decir, que el agua en el suelo más la precipitación sea igual o mayor que la evapotranspiración (≥ 0). No obstante, la expresión «bien distribuida en el año» no es completamente precisa, puesto que dicha distribución puede ser crítica en escalas de días o meses, dependiendo del tipo de planta o cultivo. En términos operativos, la TS sugiere que la SCH debe permanecer totalmente húmeda en condiciones naturales durante un periodo ≥ 3 meses sin riego.

De lo anterior se deduce que pueden existir zonas clasificadas erróneamente como údicas si las observaciones de campo solo permiten establecer un estado parcial de esta condición. En la práctica, se recurre con frecuencia a indicadores indirectos como la cobertura vegetal y el uso del suelo, debido a su estrecha relación con la humedad del suelo. Sin embargo, al aplicar el criterio de balance hídrico ≥ 0, es posible que esta condición no se cumpla en todos los meses del año, lo que conduciría a reclasificar el régimen de údico a ústico.

Adicionalmente, propiedades del suelo como el potencial redox y el color no serían suficientes para una identificación estricta del RH údico, dado que pueden presentarse rasgos semejantes en los regímenes ústico y arídico; por el contrario, estos parámetros resultan más concluyentes para el régimen ácuico.

Tabla **3-3**: Resumen de reglas para clasificar los RH. Fuente: basado en el Soil Survey Staff (2014).

RH	**Decisión**	**SCH**				**AN**			**TMA**				**DT**	**AD**
		S	**H**	**PS**	**PH**	**180**	**90**	**45**	**1**	**5**	**8**	**22**	**6**	
Ácuico									$>$					1
Arídico	Y	X					$< C$		$>*$			$>*$		2
Údico	SI		X				$> A$			$< C$		$<$	$>*$	3
	Y	X								$>$				4
														5
Ústico	SI	X		X			$\geq A$					$\geq$	$<*$	
	Y				X	$> A$	$\geq C$							
	SI	X		X			$\geq A$					$<$	$>*$	
	Y				X	$< A$			$>*$					6
	SI		X					$\geq C$						
Xérico	Y	X							$>$		$\geq C$			3
	O				X	$> A$				$>*$		$>*$	X	$>$

Aclaraciones: SCH; S: seco; H: húmedo; PS: parcialmente seco; PH: parcialmente húmedo; AN: año normal (días); TMA: temperatura media anual [°C]; DT: delta de temperatura entre estaciones [°C].
AD: condicionantes complementarias para que se cumpla la regla: (1) hay reducción en un suelo que está libre de oxígeno disuelto; (2) propiedades físicas que permiten estar secos; (3) cuatro meses posteriores al solsticio de verano; (4) debe tener las tres fases del suelo; (5) precipitación es mayor que la evapotranspiración en todos los meses (perúdico); (6) cuatro meses posteriores al solsticio de invierno.

3.4.2 Régimen de humedad ústico

El RH ústico (del latín *ustus*, «quemado»; implica desecación) exhibe condiciones más limitantes de humedad que el údico y se considera un régimen de transición entre el arídico y el údico. En términos generales, indica una menor disponibilidad de humedad a lo largo del tiempo que en el régimen údico, pero con condiciones que aún permiten el desarrollo vegetal. Su clasificación se condiciona a la temperatura edáfica media anual y a la presencia o ausencia de estacionalidad climática; por ejemplo, la TS plantea criterios diferenciales cuando la temperatura edáfica media anual es superior o inferior a 22 °C, y cuando existen estaciones contrastantes (invierno y verano).

Para regiones tropicales y subtropicales, donde la estacionalidad climática no existe o no es significativa, el régimen ústico requiere, al menos, una estación lluviosa de tres meses o más. Esto puede corroborarse cuando el balance hídrico mensual es cero o positivo en tres meses consecutivos. En la práctica, y a modo de regla operativa, suele inferirse que un pedón tenderá a clasificarse como ústico cuando no cumple estrictamente los criterios de los regímenes arídico o údico.

Régimen de humedad xérico

Según la TS, el régimen de humedad xérico (del griego *xeros*, seco) es característico de las zonas con clima mediterráneo, definido por inviernos húmedos y frescos y veranos cálidos y secos (Soil Survey Staff, 1975). Para ser clasificado como xérico, un suelo debe cumplir condiciones estacionales específicas en años normales: la sección de control de humedad debe estar seca en todas sus partes durante 45 o más días consecutivos en los cuatro meses posteriores al solsticio de verano (aproximadamente del 21 de junio al 21 de octubre en el hemisferio norte), y húmeda en todas sus partes durante 45 o más días consecutivos en los cuatro meses posteriores al solsticio de invierno (aproximadamente del 21 de diciembre al 21 de marzo) (Soil Survey Staff, 2022). Adicionalmente, la sección de control debe estar húmeda en alguna parte durante más de la mitad de los días acumulados al año en que la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad sea superior a 6°C, o durante 90 o más días consecutivos cuando dicha temperatura sea superior a 8°C (Soil Survey Staff, 2014)

Desde el punto de vista térmico, la temperatura media anual del suelo es inferior a 22°C, y existe una marcada estacionalidad con una diferencia de 6°C o más entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno (Soil Survey Staff, 2022). La distribución geográfica de los suelos con régimen xérico está intrínsecamente ligada a los climas mediterráneos, por lo cual no aplican para suelos ecuatoriales debido a que no se presentan estacionalidades climáticas.

En la clasificación taxonómica, la presencia del régimen xérico se indica con el elemento de formación *xer*, dando lugar a subórdenes y grandes grupos como *Haploxeralfs* o *Argixerolls* (Soil Survey Staff, 1975). Desde el punto de vista pedogenético, este régimen estacional promueve la meteorización química intensa durante el invierno húmedo y la translocación de arcillas para formar horizontes argílicos, mientras que los veranos secos pueden inducir la desecación y fijación de ciertas arcillas como la halloysita (Buol et al., 2011).

3.4.3 Régimen de humedad arídico y tórrido

Para los RH arídico y tórrido (del latín *aridus*, seco, y *torridus*, caliente y seco) deben cumplirse dos requisitos de humedad en la SCH: (i) que la SCH esté seca en su totalidad durante más de 180 días acumulados en un año normal; y (ii) que esté total o parcialmente húmeda durante menos de 90 días consecutivos. Estas condiciones se presentan generalmente en zonas áridas a semiáridas, por lo cual el riego es indispensable si se desea establecer un cultivo con requerimientos hídricos típicos de plantas mesófilas.

El régimen arídico se emplea como característica diagnóstica a nivel de orden, separando los Aridisoles de otros suelos. Sin embargo, debe considerarse la temperatura edáfica y el estado del agua en el suelo; por ejemplo, en regiones frías y secas como la Antártida, los suelos pueden clasificarse como Gelisoles debido a la presencia de permafrost o materiales gélidos. (Ahrens et al., 2004)

Cuando se asigna el nombre y se clasifica un pedón de manera incorrecta, se desencadena una serie de errores en los mapas de suelos y en sus interpretaciones, lo que puede inducir decisiones equivocadas (p.ej., recomendaciones de uso y manejo, planificación del uso agrícola, riego y drenaje, entre otras). (UPRA, 2018)

3.5 Los regímenes de humedad para la clasificación taxonómica

La TS utiliza los RH como característica diagnóstica, diferenciadora o accesoria para clasificar un suelo en diferentes categorías del sistema. (Bockheim et al., 2014) mostraron cómo los regímenes de humedad y temperatura se emplean como característica diferenciadora a nivel de orden en una proporción cercana al 17 %, principalmente para separar Aridisoles y Gelisoles de los demás órdenes.

Como característica diferenciadora en la categoría de suborden de la TS, la influencia del clima (vía regímenes de humedad y temperatura) se incrementa hasta aproximadamente el 63 % en ocho órdenes (Tabla **3-4**) (Bockheim et al., 2014). En consecuencia, una clasificación inadecuada del RH podría afectar de manera significativa la asignación taxonómica en niveles categóricos altos y, en cascada, generar inconsistencias cartográficas e interpretativas que influyen en decisiones de uso y manejo del suelo (p.ej., planificación del uso agrícola, riego y drenaje, evaluación de tierras).

Tabla **3-4**: Prefijos asociados a los RH en los subórdenes de suelo.

Alf	**And**	**Ept**	**Oll**	**Ox**	**Od**	**Ult**	**Ert**
Aqu- Ust- Xer- Ud-	Aqu- Ust- Xer- Ud- Torr-	Aqu- Ust- Xer- Ud-	Aqu- Ust- Xer- Ud-	Aqu- Torr- Ust- Per- Ud-	Aqu-	Aqu- Ud- Ust- Xer-	Aqu- Xer- Torr- Ust- Ud-
4/5	5/8	4/7	4/8	4/8	1/5	4/5	5/6

Órdenes de suelos: Alf: Alfisoles; And: Andisoles; Ept: Inceptisoles; Oll: Mollisoles; Ox: Oxisoles; Od: Espodosoles; Ult: Ultisoles; Ert: Vertisoles. **Regímenes de humedad:** Aqu: Ácuico; Ust: Ústico; Xer: Xérico; Ud: Údico; Torr: Arídico; Per: Permanente húmedo o perácuico. **Fracciones:** RH / total de subórdenes. **Fuente:** Basado en el Soil Survey Staff (2014).

3.6 Estimación de los regímenes de humedad

Como se ha mencionado de manera reiterada, es necesario disponer de datos de humedad suficientes en la SCH así como las curvas características de humedad del suelo, para periodos mínimos de un año normal, con el fin de determinar de manera adecuada los RH. Sin embargo, estos datos suelen ser escasos y difíciles de adquirir debido a las técnicas exigidas para su medición (p. ej., gravimetría y ollas de presión). Por tanto, los investigadores han recurrido a datos obtenidos con sensores de humedad del suelo o, de manera indirecta, a partir de datos climáticos, adquiridos mediante técnicas estadísticas, con el fin de sustentar el proceso de modelación de la humedad del suelo (Calì et al., 1996).

3.6.1 Modelo de Thornthwaite

Para la simulación de los RH, uno de los primeros modelos utilizados fue el de Thornthwaite (1948), el cual permite realizar un balance hídrico a partir de promedios mensuales de temperatura del aire y precipitación. Thornthwaite asumió que el almacenamiento máximo del suelo era de 200 mm y que, además, la SCH debía estar parcialmente seca cuando la evapotranspiración alcanza 75 mm y totalmente seca con 125 mm.

El modelo asume que el suelo actúa como un reservorio en el que la humedad resulta del balance entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP), determinada en función de la temperatura y la latitud. Así, se impulsó la modelación de los RH durante la década de 1970, particularmente por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Survey Staff, 1975).

En su forma clásica, la evapotranspiración potencial mensual (ETP) se estima como (Thornthwaite, 1948):

$$\mathrm{ETP}_m = 16 \left(\frac{10\, T_m}{I} \right)^a \left(\frac{L_m}{12} \right) \left(\frac{N_m}{30} \right) \tag{3-7}$$

donde ETP_m [mm mes^{-1}] es la evapotranspiración potencial del mes m; T_m [°C] es la temperatura media

mensual (para $T_m > 0$; si $T_m \leq 0$, se suele tomar $\text{ETP}_m = 0$); L_m [h] es la duración media del día (fotoperiodo) del mes m en horas, función de la latitud; y N_m [d] es el número de días del mes.

El índice térmico anual (I) y el exponente a se calculan como:

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514} \tag{3-8}$$

$$a = 6{,}75 \times 10^{-7} I^3 - 7{,}71 \times 10^{-5} I^2 + 1{,}792 \times 10^{-2} I + 0{,}49239. \tag{3-9}$$

Portela et al. (2020) muestran la vigencia del uso de los conceptos postulados por Thornthwaite, con variantes y mejoras que se han ido incorporando y que se aplican hoy en hidrología. Su investigación mostró que las mejoras al modelo original de Thornthwaite arrojan resultados similares en el cálculo de la evapotranspiración, respecto de otros modelos de mayor complejidad como el de Penman--Monteith.

3.6.2 Modelo de compartimientos de Newhall

El concepto de humedad del suelo adoptado por Thornthwaite (1948) encontró contradictores, debido a que el método carece de limitantes explícitos en términos de láminas para la SCH, no se ajusta a las reglas de la TS para los RH y, además, considera la profundidad total del perfil del suelo para la modelación (A. V. Wambeke, 1981). A pesar de ello, Frank Newhall partió de este enfoque para desarrollar un modelo matemático que parametriza el movimiento del agua en el suelo empleando únicamente datos de temperatura del aire y precipitación, centrados específicamente en la SCH (Newhall & Berdanier, 1996, A. R. V. Wambeke, 2000).

El modelo de Newhall se aplica a suelos bien drenados, por lo tanto, excluye el régimen ácuico. Como se mencionó, el ácuico depende fuertemente de la posición geomorfológica y para su definición, se emplean características del suelo que indican la presencia del flujo del agua, que son morfológicamente identificables por rasgos redoximórficos como es el color (Soil Survey Staff, 2022).

A. R. V. Wambeke (2000) modificó el modelo y lo programó para alterar algunas variables de entrada, por ejemplo: (i) la lámina de almacenamiento en el perfil (200 mm, valor estándar utilizado hasta entonces) y (ii) la ETP, permitiendo ingresar valores derivados de otros modelos o de datos de campo. Los valores y funciones que inicialmente computa el modelo, se basa en los adoptados por Thornthwaite (1948) (A. R. V. Wambeke, 2000).

En formulaciones posteriores, el suelo se concibe como un reservorio estratificado con capacidad inicial de 200 mm (Diaz et al., 2019). La estratificación (o «capas de Newhall») está conformada por ocho capas, cada una subdividida a su vez en ocho compartimentos. Aunque el algoritmo simula el perfil completo, para acoger las reglas de clasificación de RH de la TS se utiliza únicamente la humedad disponible en la SCH. En este esquema, la SCH se representa mediante las capas 2 y 3: la capa 2 define el límite superior (acumulación de 25 mm) y la capa 3 el límite inferior (hasta completar 75 mm), conforme los compartimentos se van llenando a capacidad de campo (Figura **3-4**).

En general, el modelo asume que, durante el llenado, cada compartimento alcanza la capacidad de campo (CC) bajo condiciones físicas adecuadas; no obstante, no considera aportes ni pérdidas por escorrentía o por percolación. En el vaciado, el movimiento del agua se calcula en función de factores específicos para cada compartimento, dado que la energía requerida para que las plantas absorban la humedad es proporcional a la profundidad y a la retención del agua en el suelo.

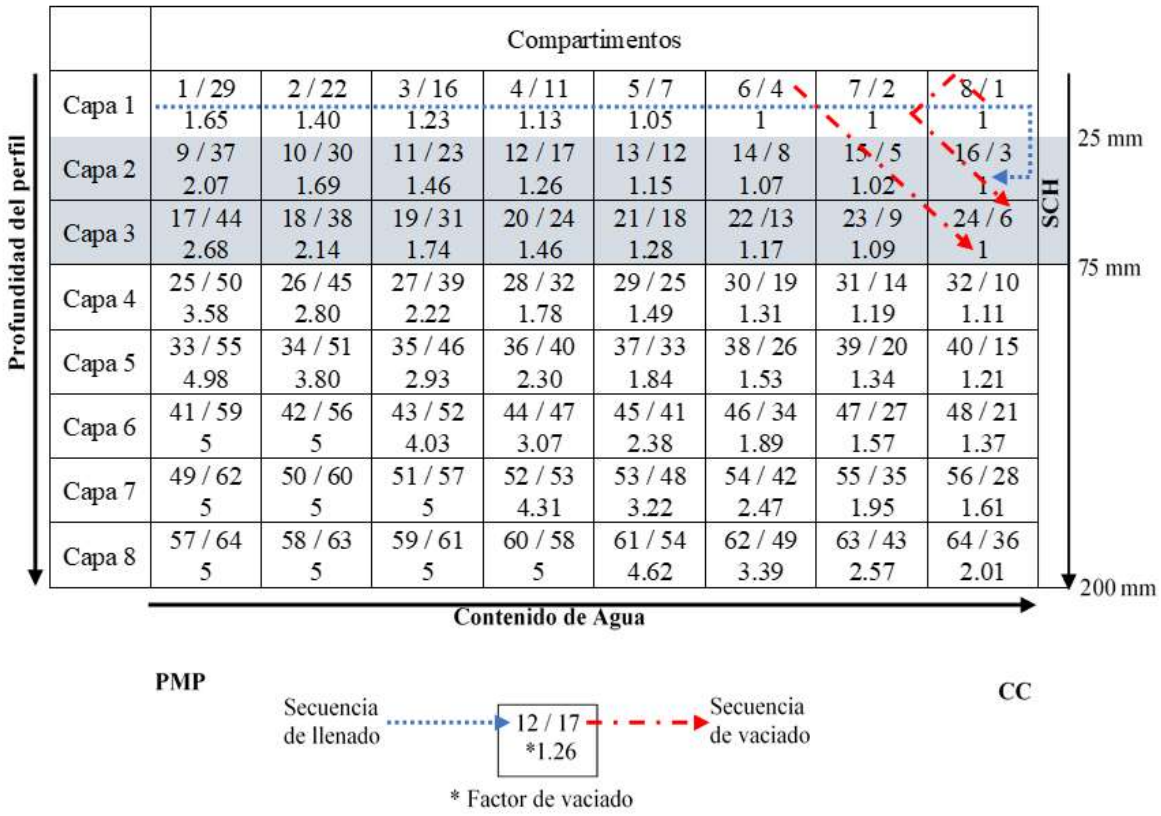

Figura **3-4**: Modelo de compartimentos de Newhall y su relación con la sección control de humedad (SCH).

Para acoger el requerimiento de «año normal» de la TS, el algoritmo considera un año de 360 días y meses de 30 días. El programa utiliza una serie de ecuaciones con los supuestos mencionados, teniendo en cuenta que la precipitación mensual promedio no se distribuye uniformemente a lo largo del mes, a diferencia de la ETP. De esta manera, genera matrices con valores de días consecutivos o acumulados en los que la SCH se encuentra húmeda, seca o parcialmente seca (o parcialmente húmeda), así como de la temperatura edáfica. Los resultados se obtienen para cada año de una serie de tiempo, calculando el RH por año por separado y la frecuencia total de cada RH en la serie.

Por su simplicidad y por requerir datos climáticos de habitual disponibilidad, este modelo aún se emplea para la modelación retrospectiva y prospectiva. Autores como D'Avello et al. (2019), Diaz et al. (2019) y Waltman et al. (2004) se basaron en el modelo de Newhall para simular los efectos de variaciones climáticas en la humedad del suelo.

Otros modelos han sido utilizados para determinar los RH definidos por la TS. Los modelos EPIC (Williams, 1990), Billaux (1978) y Jarauta (1989) se basan principalmente en datos climáticos para simular el movimiento y almacenamiento de agua en el suelo. Las diferencias reportadas entre el uso de estos modelos pueden imputarse a la temporalidad de los datos climáticos y a las diferencias existentes entre los lugares donde se han aplicado (Tabla **3-5**).

Tabla **3-5**: Modelos complementarios para determinar el régimen de humedad del suelo

Modelo	**Concepto general**	**Revisión**
EPIC	Modelo robusto cuyo objetivo es cuantificar el impacto de la erosión en la productividad; sin embargo, también se utiliza para cuantificar el régimen de humedad y la temperatura por capas del suelo.	(Liu & Han, 2020) (I. Sánchez et al., 2012) (Williams, 1990)
Billaux	Propuesto por Paul Bilaux (1978) y usado en Italia. Se basa en el modelo de Newhall; sin embargo, difiere en la distribución de la precipitación: asume que esta ocurre al final del mes y no en tres secciones como en Newhall, lo cual puede sobreestimar la humedad del suelo.	(Bonfante et al., 2011) (Bonfante et al., 2010) (Costantini et al., 2002) (Billaux, 1978)
Jarauta	Perfeccionado por Bragulat (1989) en su tesis doctoral para determinar los RH del área meridional de Lleida. Se diferencia del modelo de Newhall al suponer variables que modifican la infiltración del agua en el suelo y su temporalidad; asimismo, permite utilizar precipitaciones diarias u horarias.	(Loaiza et al., 2010) (Jarauta, 1989)

3.6.3 Modelos físicos

Otra forma de estimar la humedad del suelo es mediante la aplicación de modelos físicos, los cuales toman en consideración las relaciones suelo-agua-atmósfera-planta (Wanders et al., 2012).

Modelos tales como SWAP ((Feddes, 1971) (de las siglas en inglés *Soil-Water-Atmosphere-Plant*), CropSyst (Stöckle et al., 2014), HYDRUS (Šimůnek et al., 2012) y MACRO (McGechan, 2002) entre otros, se basan en la ecuación de Richards (1931); de esta manera, simulan el movimiento del agua (o el gradiente de flujo) en el suelo.

Caso similar, Monteverde (2014) tomó un conjunto de datos de humedad del suelo recolectados durante seis años para establecer reglas coherentes con la TS y, así, clasificar los RH. Asimismo, comparó sus resultados de modelación y encontró que eran similares a los obtenidos por D'Avello et al. (2019), Salley et al. (2016), Bonfante et al. (2011) y Loaiza et al. (2010).

El modelo SWAP simula el transporte de agua, solutos y la tensión en la zona no saturada, en interacción con el desarrollo de la vegetación (van Dam et al., 2008). Bonfante et al. (2011) utilizaron este modelo para determinar el RH y encontraron que su implementación puede ser engorrosa, debido a las reglas de humedad en la SCH establecidas por la TS.

Los modelos citados se utilizaron, en principio, con un enfoque centrado en el perfil del suelo, es decir, desde la pedología. Emplean datos *in situ*, datos climáticos de estaciones meteorológicas o mediciones de suelo del pedón objeto de estudio (Sidle et al., 2017). Ma et al. (2017) señalan que la representación puntual puede generar desventajas en la estimación de las variaciones espaciales y temporales de la humedad del suelo, ya que no incorpora una visión macro de las características del paisaje, es decir visto como un polipedón.

En este contexto han emergido disciplinas como la *hidropedología*, que han ganado espacio en investigaciones recientes sobre las relaciones agua--suelo, al añadir una visión integral frente a la aproximación puntual (Lin, 2010). De esta manera, las concepciones actuales conciben el agua en el suelo como una variable que se correlaciona e interactúa en el paisaje con: coberturas del suelo, parámetros morfométricos (pendiente, forma y densidad), ecología, ambiente y clima, entre otros, e incluso con unidades espaciales de análisis más generales como la cuenca.

La hidropedología se entiende como una rama de las ciencias hidrológicas que estudia las interacciones entre los procesos pedológicos e hidrológicos en la zona crítica de la Tierra (regolito, suelos y roca consolidada) a distintas escalas (Lin et al., 2015). De esta manera, la hidropedología puede abordar procesos en diferentes jerarquías: desde escalas asociadas al pedón hasta niveles más generales, como las cuencas hidrográficas.(Ma et al., 2017)

Entender estas relaciones a diferentes escalas y jerarquías podría ayudar a esclarecer vacíos que se hayan generado en torno al estudio de los RH desde una escala estrictamente puntual. De manera similar, permitiría complementar enfoques basados en modelos matemáticos (p. ej., Newhall o SWAP) que no relacionan parámetros externos que claramente influyen en el movimiento del agua en el suelo.

Uno de los modelos frecuentemente utilizados en hidropedología es SWAT; sin embargo, Mapfumo et al. (2004) afirman que el modelo funciona bien para cuencas pequeñas, pero tiende a sobreestimar la humedad en condiciones secas del suelo y a subestimarla en condiciones húmedas.

De acuerdo con Loaiza (2007), se han utilizado diversos modelos para los fines mencionados, tales como SVATS (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer Schemes*), IHACRES, TOPMODEL, E2D, EUROSEM, HEC-1 y funciones de pedotransferencia (Pachepsky et al., 2006). Estos modelos han permitido simular el comportamiento temporal del agua en el suelo a diferentes escalas y con distintos niveles de precisión, generalmente a partir de datos físicos del suelo y datos climáticos.

3.7 El régimen de humedad del suelo en Colombia

En Colombia, el IGAC ha ejercido históricamente la función rectora en la generación de conocimiento sistemático de los suelos durante más de siete décadas. En tal sentido, los levantamientos de suelos realizados por esta institución no solo constituyen inventarios descriptivos del recurso suelo sino que configuran una infraestructura científica fundamental para la comprensión espacial de los procesos pedogenéticos y su interacción con los sistemas productivos y ambientales. Desde una perspectiva funcional, estos estudios han sustentado la planificación territorial, el ordenamiento ambiental y la toma de decisiones en materia de desarrollo rural, al proporcionar información estructurada sobre propiedades morfológicas, físicas, químicas y taxonómicas de los suelos.

De manera específica, dichos levantamientos han servido como base técnica para: (i) la actualización catastral

bajo criterios de productividad y uso potencial; (ii) el diseño y operación de distritos de riego y drenaje, donde la dinámica hídrica del suelo constituye un factor crítico; (iii) la evaluación de la capacidad de uso de las tierras y la asignación de clases agrológicas conforme a los lineamientos de Klingebiel y Montgomery (IGAC, 2015); y (iv) más recientemente, la determinación de la aptitud de tierras en procesos de zonificación agrícola estratégica (UPRA, 2018). En consecuencia, el conocimiento pedológico ha operado como un eje articulador entre la caracterización biofísica del territorio y la formulación de políticas públicas sectoriales.

Ahora bien, dado que los levantamientos de suelos implican altos costos logísticos, operativos y analíticos derivados del trabajo de campo intensivo, el muestreo sistemático, los análisis de laboratorio y la cartografía temática, su ejecución ha sido jerarquizada en función de la escala cartográfica y el nivel de resolución requerido. En la actualidad, Colombia dispone de cobertura nacional a escala exploratoria (1:500.000) y general (1:100.000), que permiten una visión sinóptica de los patrones edafogeográficos dominantes. Estas se complementan con estudios semidetallados (1:25.000) en áreas de especial interés ecológico como humedales y páramos, así como con levantamientos detallados (1:10.000 a 1:25.000) en zonas de agricultura intensiva, particularmente en sistemas productivos de caña de azúcar, palma de aceite y banano, y en regiones estratégicas como la sabana de Bogotá (IGAC, 2015). Esta acumulación progresiva de información ha consolidado al país como referente regional en la caracterización sistemática de sus suelos en el contexto latinoamericano.

Desde el punto de vista epistemológico y metodológico, el IGAC adoptó tempranamente los lineamientos técnicos de la escuela estadounidense de levantamiento de suelos, con base en el Manual de Levantamiento de Suelos (*Soil Survey Manual*) (Staff, 2017), así como el sistema taxonómico desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por las siglas en inglés), cuya actualización periódica se consigna en las Claves Taxonómicas de Suelos (*Keys to Soil Taxonomy*). Esta adopción no se limitó a una transferencia instrumental de criterios clasificatorios, sino que implicó la incorporación de un marco conceptual sustentado en la teoría de los factores formadores del suelo propuesta por Dokuchaev (clima, organismos, relieve, material parental y tiempo), posteriormente sistematizada en el modelo factorial de Jenny (Jenny, 1941).

En este contexto, la caracterización de los RH en Colombia debe entenderse como una derivación lógica de dicha tradición pedológica. Los RH, en tanto expresión integrada de la interacción entre clima, propiedades físicas del suelo y posición en el paisaje, constituyen un componente central de la taxonomía del USDA y, simultáneamente, un descriptor funcional de la disponibilidad hídrica para la vegetación natural y los sistemas agrícolas. Así, su análisis trasciende la mera clasificación y se proyecta hacia la interpretación agroecológica del territorio, permitiendo establecer vínculos cuantitativos entre variabilidad climática, dinámica hídrica del suelo y potencial productivo.

En virtud de lo anterior, el clima es concebido como uno de los factores formadores fundamentales del suelo, en tanto condiciona los procesos de meteorización, la dinámica de la materia orgánica, los flujos de energía y, de manera determinante, el balance hídrico edáfico. En coherencia con este marco conceptual, los levantamientos de suelos realizados en Colombia han incorporado metodologías orientadas a la integración de relaciones climo-ambientales y edafo-climáticas en la caracterización de los polipedones (IGAC, 2015). Esta integración responde a la necesidad de interpretar las propiedades morfológicas y funcionales del suelo no de manera aislada, sino en estrecha correspondencia con los gradientes climáticos que estructuran el territorio nacional.

La cuantificación de dichas relaciones se ha efectuado mediante la aplicación de la zonificación climática adaptada por el IGAC a partir del sistema Caldas–Lang, la cual permite representar el clima como un ambiente caracterizador dentro de las unidades cartográficas de suelos. Esta aproximación articula los pisos térmicos con las condiciones de humedad ambiental, incorporando variables tales como precipitación media anual, temperatura, altitud y evapotranspiración potencial (IGAC, 2015). En consecuencia, el clima no solo se consigna como información contextual, sino que se constituye en un criterio interpretativo que contribuye a explicar la génesis y diferenciación espacial de los suelos.

En el ámbito específico de la estimación de los RH, en Colombia se ha adoptado el concepto de zonalidad como principio operativo. Bajo este supuesto, se reconoce una correspondencia estrecha entre la humedad edáfica y las zonificaciones climáticas previamente definidas con excepción del régimen ácuico, cuya expresión depende predominantemente de condiciones locales de drenaje y saturación, así como entre las provincias de humedad del sistema de zonas de vida de Holdridge, adaptadas por el IGAC (Tabla **3-6**). De esta manera, la delimitación de los RH se fundamenta en inferencias derivadas de patrones climáticos regionales, asumiendo que estos se reflejan de manera consistente en el comportamiento hídrico del suelo.

Tabla **3-6**: Relaciones del índice de Lang y Holdridge con los RH. Fuente: IGAC (2015)

RH de la TS	**Provincias de humedad IGAC**		**Humedad de Lang**	
	P/T	**Lang**	**ETP/P**	**Adoptado por IGAC**
Arídico	< 20	Desértico	38--4	Superárido, semiárido y árido
Arídico--ústico	20--40	Árido		
Ústico	40--60	Semiárido	4--1	Muy seco y seco
Údico--ústico	60--100	Semihúmedo		
Údico	100--60	Húmedo	1--0,25	Húmedo y muy húmedo
Perúdico	> 60	Superhúmedo	0,25--0,125	Pluvial

P: precipitación; T: temperatura

No obstante, estas inferencias climáticas provienen de registros de estaciones meteorológicas cuya distribución no es estrictamente una cuadrícula en el territorio nacional; en amplias regiones, particularmente en áreas de difícil acceso, la densidad de estaciones es limitada. Esta situación introduce incertidumbre en la representación espacial de variables como la precipitación y la evapotranspiración, lo cual puede conducir a la sobreestimación o subestimación de los parámetros asociados al almacenamiento y a la disponibilidad de agua en el suelo. En consecuencia, aunque el enfoque de zonalidad constituye una aproximación metodológica coherente dentro del marco taxonómico adoptado, resulta imprescindible reconocer sus limitaciones en términos de resolución espacial y robustez de los datos, especialmente en un país caracterizado por una marcada heterogeneidad climática y topográfica.

En el ámbito científico, A. V. Wambeke (1981) realizó una estimación de los RH para trece países de América del Sur, entre ellos Colombia, constituyendo uno de los primeros ejercicios sistemáticos de delimitación supranacional bajo el marco de la Taxonomía de Suelos. Para el caso colombiano, el autor aplicó el modelo de Newhall, utilizando registros históricos de precipitación y temperatura provenientes de estaciones meteorológicas que, para la época, se concentraban mayoritariamente en la región Andina. Esta distribución espacial de datos implicó una representación parcial de la heterogeneidad climática nacional, particularmente en zonas de baja densidad instrumental como la Amazonia, la Orinoquia y amplios sectores del Pacífico.

Los resultados obtenidos indicaron la presencia de dos clases principales de RH en el territorio colombiano: el régimen údico, identificado como el predominante, y el régimen perúdico (Figura **3-5**, tonalidades verdes). Esta caracterización, aunque consistente con la alta pluviosidad y el carácter intertropical húmedo de amplias regiones del país, se fundamentó en inferencias derivadas exclusivamente de datos climáticos convencionales, sin incorporar mediciones directas del contenido de agua en el suelo ni simulaciones explícitas del almacenamiento hídrico edáfico a escala de perfil.

En contraste, no se identificaron reportes científicos recientes para Colombia en los que se empleen datos de monitoreo in situ de humedad del suelo o modelaciones detalladas del almacenamiento hídrico con fines estrictamente pedológicos. Esta ausencia resulta significativa si se considera que la determinación formal de los RH, en el marco de la TS, requiere la evaluación de la dinámica anual de la humedad en secciones de control definidas del perfil.

Es plausible que dicha carencia de estudios responda, por una parte, a la limitada disponibilidad histórica de datos de humedad del suelo y, por otra, a las dificultades técnicas y logísticas asociadas a su medición

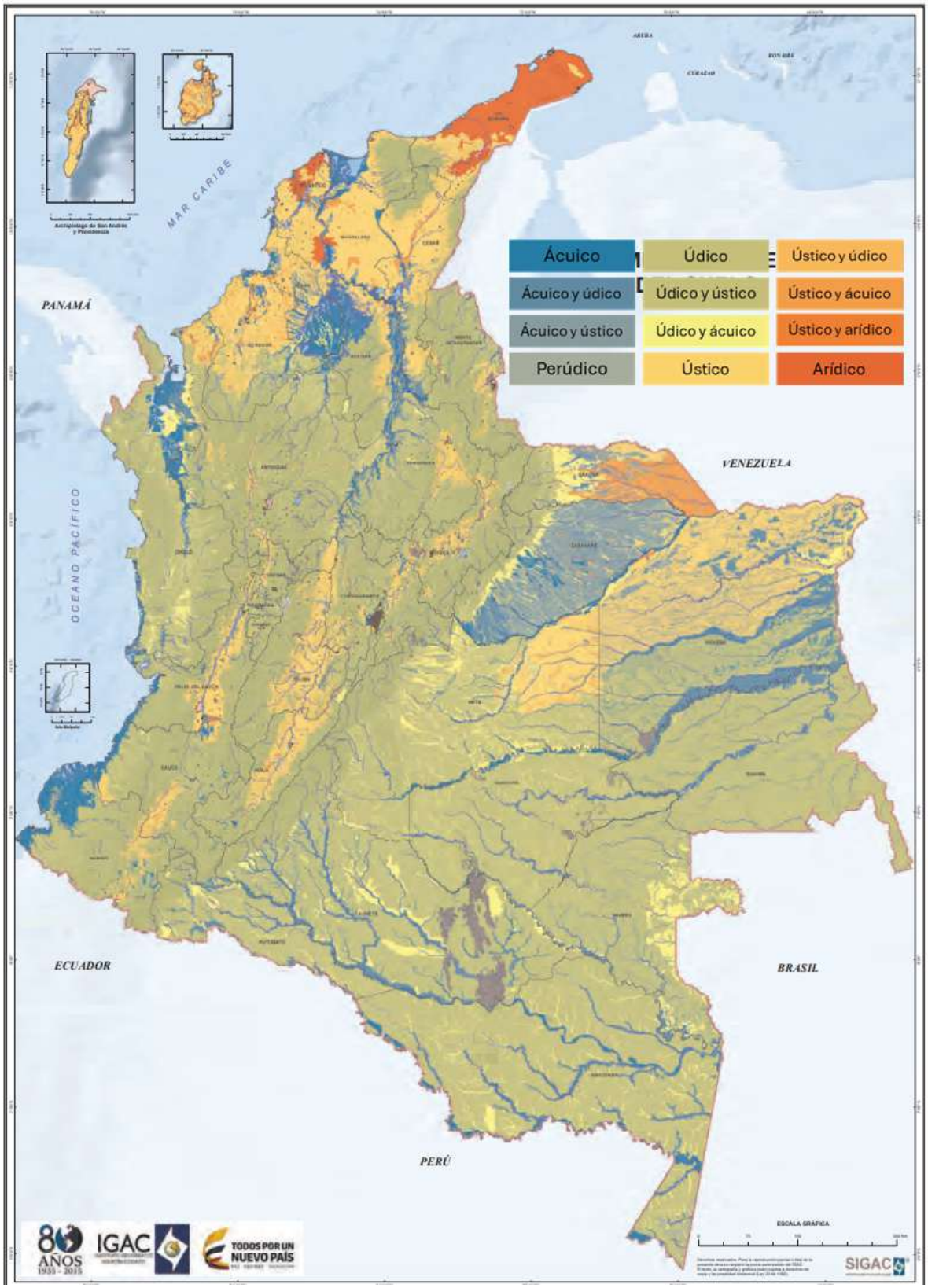

Figura **3-5**: Mapa de Regímenes de Humedad en Colombia. Fuente: IGAC (2015).

tradicional, la cual demanda instrumentación especializada, monitoreo continuo y series temporales extensas (Mohseni & Mokhtarzade, 2020). Esta situación es recurrente en países que adoptan la TS como sistema oficial de clasificación, donde la estimación de los RH suele basarse en aproximaciones climáticas indirectas, ante la ausencia de redes consolidadas de monitoreo edáfico. En consecuencia, la estimación y delimitación regional de los RH en Colombia ha dependido predominantemente de inferencias climáticas regionales y de observaciones de uso del suelo, lo que plantea la necesidad de avanzar hacia enfoques integrados que combinen datos observacionales, modelación hidrológica y análisis espacial de alta resolución.

3.8 Incertidumbre en la modelación del régimen de humedad del suelo

La incertidumbre inherente a la determinación del régimen de humedad del suelo representa uno de los principales desafíos en la modelación edafoclimática, especialmente en regiones tropicales, donde la marcada heterogeneidad espacial de los suelos y la escasez de datos observacionales complejizan la representación del sistema.

Desde una perspectiva conceptual, la incertidumbre en los modelos hidrológicos se suele categorizar en tres fuentes principales: la asociada a los datos de entrada, la paramétrica y la estructural (Beven, 2001, Refsgaard et al., 2007). En modelos de balance hídrico climático, como el propuesto por Newhall, estas fuentes se expresan de manera diferenciada, destacando la parametrización edáfica como un factor crítico dada su influencia directa en la simulación de los estados hídricos y en la consecuente clasificación del RH. La evidencia empírica como la mostrada por el IGAC, sugiere que, en los sistemas suelo-atmósfera, la incertidumbre vinculada a los parámetros del suelo puede superar a la derivada de las variables climáticas. Esto se debe a la alta variabilidad espacial de propiedades hidráulicas clave, como la CAD, la cual depende de factores como la textura, la estructura y la profundidad efectiva del perfil (Vereecken et al., 2007, Western et al., 2002). En este sentido, la CAD opera como un parámetro sintético que integra la capacidad de almacenamiento y la liberación de agua, condicionando así una dinámica hídrica simulada y, por extensión, la delimitación de los umbrales que definen cada clase de régimen de humedad.

Metodológicamente, este estudio aborda la incertidumbre mediante un análisis de sensibilidad global basado en la exploración sistemática de un rango de valores plausibles para la CAD. Si bien este enfoque no incorpora una cuantificación estrictamente probabilística de la incertidumbre, resulta coherente con marcos de evaluación aplicados en contextos de información limitada, cuyo propósito es identificar los parámetros dominantes y examinar la robustez estructural del modelo (Saltelli et al., 2008). La exploración metódica del espacio paramétrico permite, además, revelar la respuesta no lineal del modelo y la presencia de transiciones abruptas entre clases de RH, lo cual aporta claridad sobre los límites de aplicabilidad del modelo de Newhall en condiciones tropicales.

Por otra parte, el uso de conjuntos de datos climáticos derivados de reanálisis introduce una fuente adicional de incertidumbre, asociada principalmente a la resolución espacial y a los procedimientos de interpolación y asimilación de datos (Beck et al., 2017). No obstante, los estudio previos como el de Monteverde (2014), indican que la sensibilidad del modelo a la parametrización edáfica prevalece sobre la variabilidad inducida por los insumos climáticos, hallazgo que converge con la literatura reciente en hidrología de suelos tropicales y refuerza la idea de que la calidad de la representación edáfica actúa como cuello de botella en la simulación del RH.

4 Materiales y métodos

Esta investigación se fundamentó en un enfoque cuantitativo, de carácter aplicado y orientado a la modelación. El objetivo central fue la evaluación integral del régimen de humedad del suelo (RH), abordándolo tanto a una escala puntual (detallada, para la calibración y validación de procesos) como a una escala espacial (distribuida, para el análisis de patrones espaciales en diferentes temporalidades). Este enfoque dual permitió vincular procesos edafo-climáticos específicos con su aplicación en la altillanura plana del departamento del Meta, de la región Orinoquia en Colombia.

El diseño metodológico se clasifica como no experimental, transeccional (ya que analiza la distribución de los RH para un periodo específico) y analítico. No se manipularon variables en campo, dado que el estudio se basó en el análisis de datos observados, preexistentes y en información derivada de simulaciones. Esta elección se justifica por la naturaleza espacial y temporal del objeto de estudio (RH actual, histórico y bajo escenarios de cambio climático), para el cual la experimentación directa en grandes dimensiones es inviable. En su lugar, se adoptó una estrategia de modelación numérica, la cual permite integrar múltiples fuentes de información y explorar condiciones futuras proyectadas.

La investigación fue implementada en aproximadamente 745736 hectáreas, ubicadas en la región de la Orinoquia colombiana, particularmente en la altillanura plana del departamento del Meta y Vichada, una zona con alto potencial agropecuario (Forbes Colombia, 2025).

4.1 Zona de estudio

La investigación se realizó en gran parte de la altillanura plana del departamento del Meta, en el sector centro-occidental de la Orinoquia colombiana, principalmente en jurisdicción de los municipios de Villavicencio, Puerto López, Puerto Gaitán y Cumaribo en el departamento del Vichada. Geográficamente, se sitúa entre los 3° 55’ 21.65"N, 73° 42’ 59.02.º y 5° 15’ 25.12"N, 70° 11’ 26.50.º (Figura **4-1**), con altitudes que oscilan entre 150 y 250 m. s. n. m. Esta unidad geomorfológica forma parte del sistema de planicies estructurales y superficies de aplanamiento del escudo Guayanés, caracterizadas por extensas superficies subhorizontales y pendientes inferiores al 7 % (IGAC, 2000).

Desde el punto de vista geomorfológico, la altillanura corresponde a una superficie antigua de aplanamiento, con drenaje superficial poco encajado y presencia de microdepresiones que condicionan redistribuciones laterales del flujo hídrico (Rippstein et al., 2001).

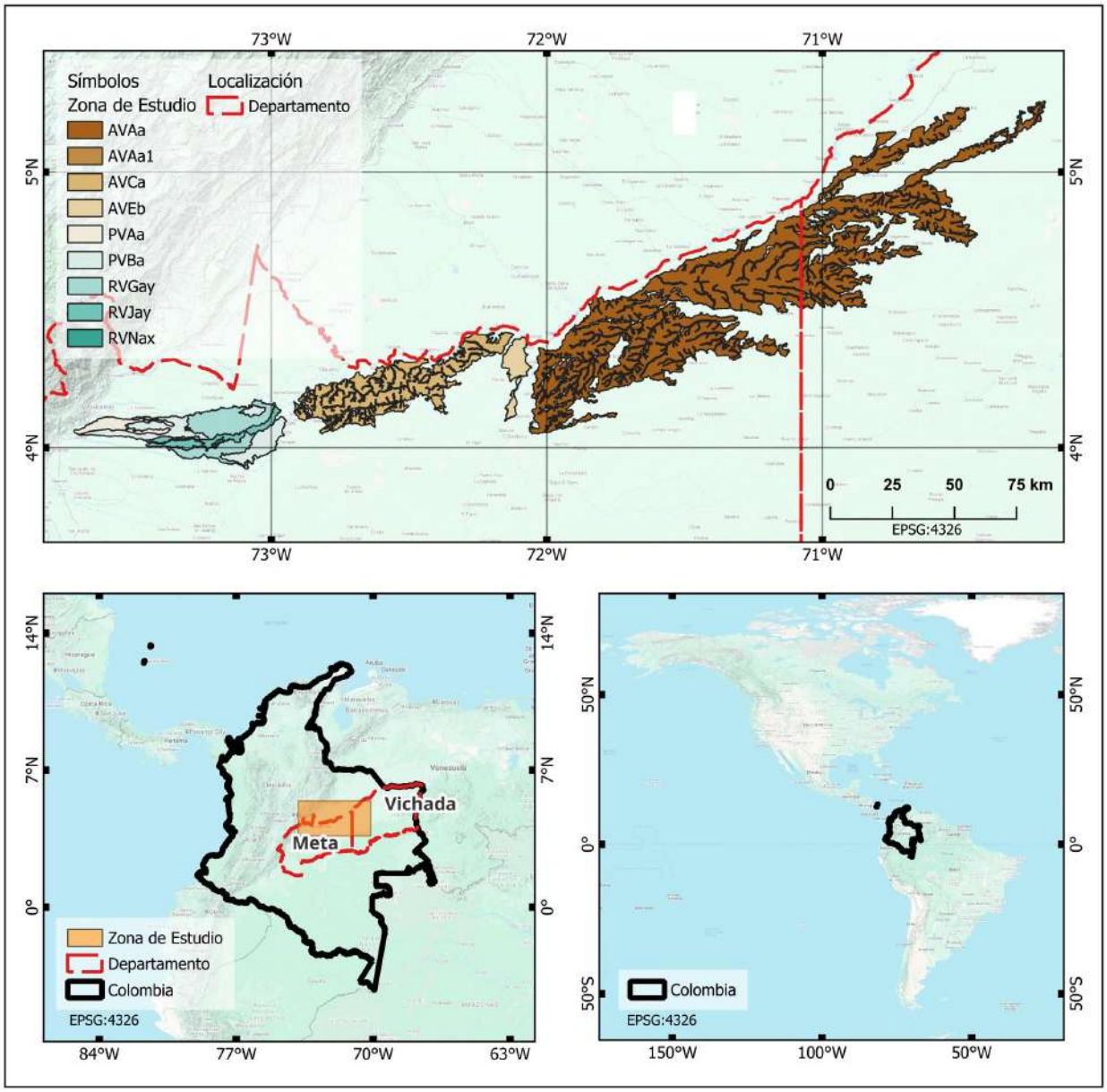

Figura **4-1**: Zona de estudio.

4.1.1 Suelos

Los suelos dominantes corresponden al orden de los Oxisoles, caracterizados por su alta meteorización, con horizontes profundos, texturas medias a finas, baja saturación de bases, alta saturación de aluminio y pH extremadamente ácido (IGAC, 2000). La génesis de estos suelos se asocia a procesos prolongados de laterización y lixiviación bajo condiciones tropicales húmedas (Buol et al., 2011). (Figura **4-1**). Domina el paisaje de altiplanicie conocido como Altillanura, seguido del piedemonte, que se ubica hacia la cordillera Oriental de Colombia (Tabla **4-1**).

Tabla **4-1**: Generalidades de los suelos de la zona de estudio.

Símbolo	**Clima**	**Paisaje**	**Tipo de relieve**	**Material parental**	**Taxón dominante**	**ha**	**%**
AVAa	Cálido húmedo	Altiplanicie	Ondulaciones	Depósitos finos	Xantic Haplustox, Typic Kandiustults, Oxiaquic Humustepts	511287.8	68.6
AVAa1	Cálido húmedo	Altiplanicie	Ondulaciones	Depósitos finos	Xantic Haplustox, Typic Kandiustults, Oxiaquic Humustepts	2051.0	0.3
AVCa	Cálido muy húmedo	Altiplanicie	Mesas	Arcillas	Typic Hapludoxs	101343.1	13.6
AVEb	Cálido húmedo	Altiplanicie	Lomas	Depósitos eólicos sobre arcillas	Ustic Quartzipsamments	15739.3	2.1
PVAa	Cálido húmedo	Piedemonte	Abanicos terraza	Depósitos aluviales finos	Typic Hapludoxs	12578.7	1.7
PVBa	Cálido húmedo	Piedemonte	Abanicos terraza antiguos	Depósitos aluviales mixtos	Oxic Dystrudepts, Plinthic Petraquepts	40952.5	5.5
RVGay	Cálido húmedo	Planicie aluvial	Terrazas nivel 3	Depósitos aluviales mixtos	Oxic Dystrudepts	44745.3	6.0
RVJay	Cálido húmedo	Planicie aluvial	Terrazas nivel 1	Depósitos aluviales mixtos	Fluvaquentic Eutrudepts, Typic Fluvaquents	16481.7	2.2
RVNax	Cálido húmedo	Planicie aluvial	Plano de inundación	Depósitos aluviales mixtos	Typic Udifluvents, Typic Fluvaquents	547.6	0.1

Desde la perspectiva de la Taxonomía de Suelos del USDA, los perfiles de la altillanura fueron clasificados mayoritariamente con régimen de humedad údico y ústico, en un gradiente de mayor a menor humedad en sentido oriente-occidente (Figura **3-5**). No obstante, el área presenta características ácuicas en las geoformas asociadas a encajonamientos o drenajes hídricos, y zonas de terrazas bajas aluviales o antiguas depresiones (IGAC, 2000, Rippstein et al., 2001)

4.1.2 Clima

La precipitación se encuentra con una distribución monomodal, controlada por el desplazamiento anual de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), con precipitaciones medias anuales entre 2000 mm y 2800 mm

y temperaturas medias cercanas a 27 °C (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [IDEAM], 2018). La evapotranspiración potencial anual oscila entre 1300 mm y 2290 mm, generando balances hídricos ambientales (P - ETP) positivos durante la mayor parte del año, aunque con un periodo seco marcado entre diciembre y marzo (IDEAM, 2018).

En términos de zonificación climática, el área corresponde al piso térmico cálido y a una provincia de humedad húmeda y muy húmeda, según la adaptación Caldas–Lang implementada por el IGAC (IGAC, 2000), y se ubica predominantemente en la zona de vida Bosque húmedo tropical del sistema de Holdridge (Holdridge, 1967).

4.1.3 Material parental

La altillanura plana del departamento del Meta está dominada por depósitos sedimentarios continentales del Terciario y depósitos cuaternarios de origen fluvio-aluvial y eólico, que reposan sobre una plataforma antigua vinculada al Escudo Guayanés. Estos sedimentos son, en general, de textura moderada a fina (franco-arenosa a franco-arcillosa) en las zonas de llanura aluvial, aunque localmente aparecen cuerpos arenosos y capas limo-arenosas asociadas a procesos eólicos o de redistribución fluvial. (IGAC, 2015, Rippstein et al., 2001)

La textura y composición mineralógica del material parental reflejan larga historia de meteorización química en condiciones tropicales húmedas: perfiles profundos con acumulación de óxidos de hierro y aluminio, baja saturación de bases y escaso contenido de nutrientes intercambiables. Por ello, desde el punto de vista edafogenético, los sedimentos favorecen la formación de Oxisoles y Ultisoles típicos de la altillanura, con horizontes subsuperficiales enriquecidos en arcillas kaolínicas y concreciones férricas en algunos sectores. (Rippstein et al., 2001)

4.2 Metodología

A continuación, se describen la metodología para responder a los propósitos de la investigación. La columna vertebral del proceso metodológico fue la integración de tres pilares de datos:

1. **Información edáfica:** correspondió a las propiedades físico-hídricas del suelo relevantes para la caracterización y modelación del RH. Estas propiedades incluyeron el contenido de humedad volumétrica, la textura del suelo, la densidad aparente, la densidad real, así como el contenido de agua a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

   Los datos edáficos se obtuvieron a partir de bases de datos provenientes de estudios pedológicos previos y se complementaron con mediciones *in situ* en sitios seleccionados, con el propósito de validar y ajustar la información existente.

2. **Información climática:** se conformó por series temporales de variables meteorológicas requeridas para la implementación del modelo de RH, incluyendo como mínimo la precipitación mensual y la temperatura media mensual de la superficie. Estas series se obtuvieron a partir de fuentes oficiales de información meteorológica y se complementaron con productos de reanálisis climático global, con el fin de garantizar continuidad temporal y consistencia espacial.

3. **Escenarios de cambio climático:** para el análisis de la variabilidad proyectada a futuro del RH se utilizaron los escenarios derivados de modelos de circulación general (*General Circulation Models*, GCM). Las proyecciones correspondieron a diferentes trayectorias de concentración representativas (*Representative Concentration Pathways*, RCP), asociadas a trayectorias socioeconómicas compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP).

Estas proyecciones permitieron evaluar la respuesta del RH bajo un contexto de forzamiento climático pesimista, proporcionando un marco para el análisis de cambios esperados durante el periodo de estudio. Las series proyectadas se utilizaron como insumo para la simulación del modelo de RH, manteniendo constantes las propiedades edáficas, con el fin de aislar el efecto del cambio climático sobre la dinámica hídrica del suelo.

El esquema metodológico se organizó en cuatro macroprocesos: revisión de literatura, análisis en el área de estudio, recopilación de datos edafoclimáticos y modelación del RH (Figura **4-2**). A continuación, se describen las fases correspondientes a los macroprocesos de datos de entrada y modelación del RH. Cada fase (identificada con un color diferente en la Figura **4-2**) responde a un objetivo metodológico específico y genera productos intermedios que sirven como insumos para la fase siguiente, garantizando la coherencia, la reproducibilidad y la trazabilidad del proceso.

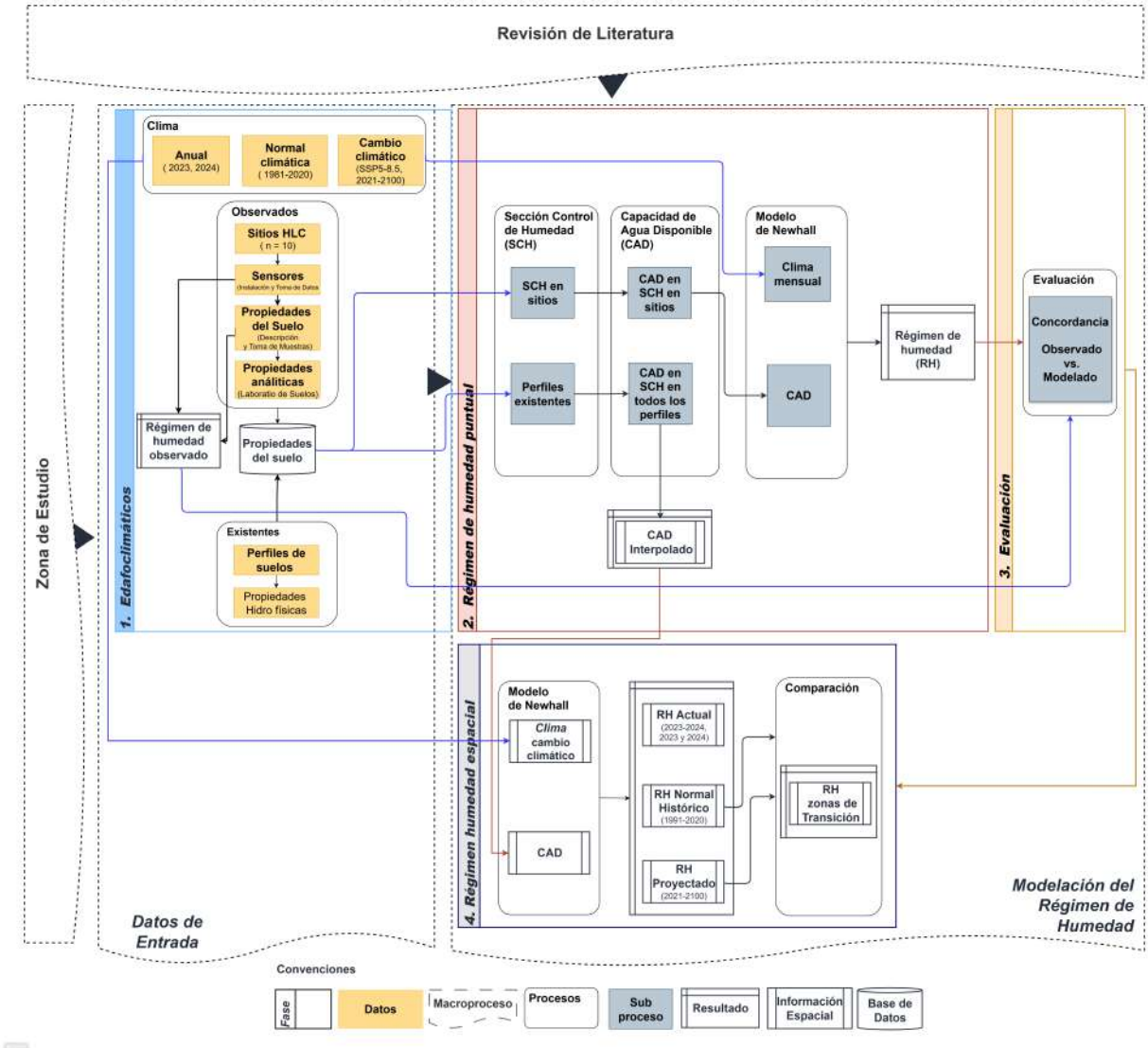

Figura **4-2**: Metodología para modelar el régimen de humedad del suelo

4.2.1 Fase 1. Datos edafoclimáticos

La información edáfica utilizada en la investigación se obtuvo a partir de dos fuentes principales:

(I) Datos medidos en sitios de referencia, y

(II) Información edáfica secundaria proveniente de perfiles de suelo previamente caracterizados.

4.2.1.1 Datos edáficos medidos en sitios de referencia

Selección de sitios de instrumentación

La localización de los sitios destinados al monitoreo del contenido de agua del suelo mediante sensores se seleccionó geográficamente con el método del Hipercubo Latino Condicionado (*conditioned Latin Hypercube Sampling*, cLHS).

El uso del cLHS se empleó como una estrategia de selección de muestras orientada a representar de manera eficiente la distribución multivariada de las variables explicativas en el área de estudio, como son los factores formadores del suelo. Este método extiende el muestreo del Hipercubo Latino clásico al incorporar condiciones explícitas que garantizan la correspondencia entre las distribuciones marginales y conjuntas de las variables auxiliares o covariables y las de la población objetivo (Minasny & McBratney, 2006).

El uso del cLHS resulta particularmente adecuado en contextos de alta heterogeneidad ambiental, ya que reduce el sesgo de muestreo y maximiza la representatividad del conjunto de datos con un número limitado de observaciones, fortaleciendo la robustez de los análisis posteriores y la capacidad predictiva de los modelos derivados (Minasny & McBratney, 2006, 2013).

El diseño permitió seleccionar sitios que cubrieran condiciones ambientales contrastantes, definidas a partir de las unidades de suelo, la cobertura del suelo y el índice topográfico de humedad.

La implementación se realizó con el uso del paquete `clhs` (Roudier, 2021) del software R (R Core Team, 2024). Se condicionó a 10 observaciones (n = 10) y 1000 iteraciones, empleando como covariables: (i) las unidades cartográficas de suelos derivadas de levantamientos pedológicos (Estudio General de Suelos del Departamento del Meta, escala 1:100 000) (IGAC, 2000); (ii) las coberturas de la tierra 2015--2018 (IDEAM, 2023a); y (iii) el índice topográfico de humedad, derivado del modelo digital de elevación SRTM (IGAC, 2011), con resolución espacial de 1 arco-segundo. Aunque los sitios presentan una distribución geográfica dentro del área estudiada, esta corresponde parcialmente a la expresión espacial de las covariables utilizadas y no a la aplicación de un criterio explícito de balance espacial.

Una vez identificados los sitios de muestreo seleccionados mediante el método de cLHS, las ubicaciones fueron ajustadas en campo debido a restricciones de accesibilidad terrestre y seguridad. La reubicación se realizó procurando conservar las condiciones ambientales representadas por el punto originalmente seleccionado, particularmente aquellas correspondientes a las covariables empleadas en el diseño muestral. Este procedimiento se fundamenta en que el cLHS busca reproducir la distribución multivariada de las covariables ambientales dentro del área de estudio, por lo que la representatividad estadística depende principalmente de la posición de los sitios en el espacio de covariables y no exclusivamente de sus coordenadas geográficas exactas. En consecuencia, el desplazamiento de los puntos se consideró aceptable siempre que los sitios alternativos conservaran condiciones edáficas, geomorfológicas y de cobertura comparables, minimizando así posibles cambios en la representatividad del diseño muestral (Malone et al., 2019).

Instalación de Sensores

En los 10 sitios seleccionados, se instalaron sensores de humedad del suelo Campbell Scientific CS616, con los cuales se obtuvieron registros continuos del contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) a tres profundidades, de acuerdo con las recomendaciones establecidas en la *Soil Taxonomy*. El periodo mínimo de monitoreo comprendió desde octubre de 2023 hasta octubre de 2024.

De acuerdo con el fabricante, el CS616 *Water Content Reflectometer* es un sensor diseñado para la medición continua y no destructiva del contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v). Su principio de funcionamiento se basa en una implementación simplificada de reflectometría en el dominio del tiempo, mediante la estimación indirecta del contenido de agua a partir de la permitividad dieléctrica del suelo, la cual está fuertemente controlada por el agua debido a su alta constante dieléctrica en comparación con los demás constituyentes del suelo (Campbell Scientific, Inc. [Campbell], 2026).

El sensor está compuesto por dos varillas de acero inoxidable de 30 cm de longitud, conectadas a un circuito electrónico encapsulado. Las varillas actúan como una guía de onda por la cual se propaga un pulso electromagnético cuyo periodo de oscilación depende del contenido de agua del suelo que rodea las varillas. En términos generales, el tiempo de propagación del pulso se incrementa a medida que aumenta la humedad del suelo, lo cual permite estimar θ_v mediante ecuaciones de calibración empíricas.

El CS616 proporciona como salida una onda cuadrada cuyo periodo, expresado en microsegundos, fue registrado mediante un recolector de datos (*datalogger*) Campbell Scientific CR800. Posteriormente, dicho periodo se convierte a contenido volumétrico de agua mediante una ecuación cuadrática estándar (Ecuación 4-1):

$$\theta_v = C_0 + C_1\tau + C_2\tau^2 \tag{4-1}$$

donde θ_v es el contenido volumétrico de agua ($\mathrm{m^3\ agua\,m^{-3}}$ suelo), τ es el periodo de la señal (μs) y C_0, C_1 y C_2 son coeficientes de calibración suministrados por el fabricante.

Bajo condiciones estándar (conductividad eléctrica del suelo $\leq 0{,}5\,\mathrm{dS\,m^{-1}}$), el CS616 presenta una precisión mejor que 0.1 % en contenido volumétrico, una exactitud aproximada de $\pm 2{,}5$ % y una resolución inferior a 0.1 %. (Campbell, 2026)

Los sensores se instalaron de forma horizontal en tres profundidades por sitio, entre 10 y 90 cm (ver Figura **4-3**), de acuerdo con las recomendaciones del Soil Survey Staff (2022) para las clases texturales observadas en campo. Esta configuración permitió monitorear la variación vertical del perfil, considerando que los RH pueden evaluarse en toda o en parte de la SCH.

En la Figura **4-3** se presenta, a modo de ejemplo, el detalle de la instalación en el sitio ARBORADA, mostrando la disposición de los sensores en el perfil y los componentes de la estación.

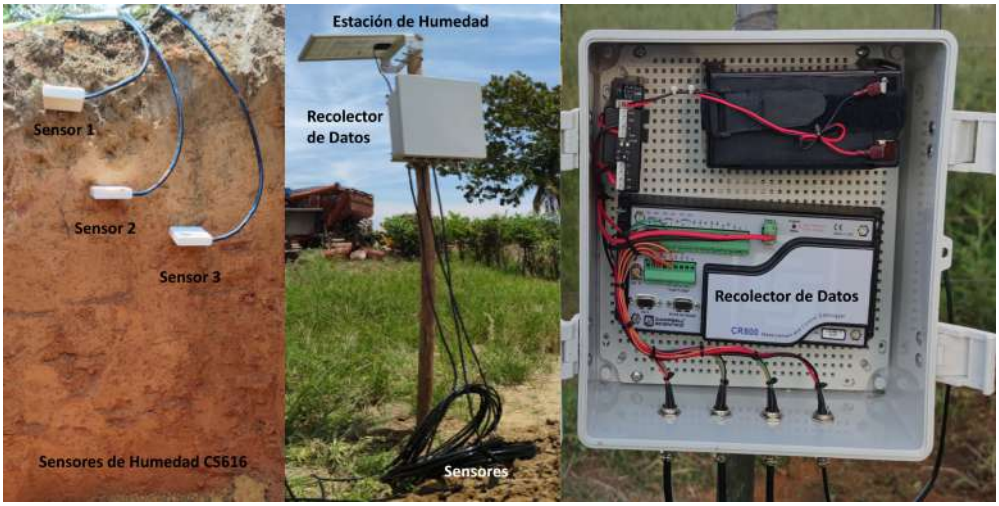

Figura **4-3**: Ejemplo de instalación de sensores de humedad (sitio: SHEEFER)

Cada estación se equipó con un panel solar de 10 W y una batería recargable de 12 V, garantizando la autonomía energética necesaria para el funcionamiento continuo durante el periodo de monitoreo. El recolector CR800 se programó para realizar lecturas cada minuto.

La descarga de datos se realizó de manera trimestral mediante conexión directa al recolector, utilizando un computador portátil con sistema operativo Windows 10 de 64 bits. Para este proceso se empleó el software PC400 versión 4.7 de Campbell Scientific (Campbell, 2021), siguiendo los procedimientos y recomendaciones establecidos por el fabricante.

Los datos registrados por los sensores fueron exportados en archivos planos con extensión `.dat`, los cuales fueron posteriormente respaldados y procesados para su análisis en el entorno estadístico R.

Caracterización del suelo

En cada sitio de instrumentación, se realizó la descripción morfológica de los perfiles de suelo y la recolección de muestras, siguiendo la guía de campo propuesta por Schoeneberger et al. (2012). La determinación de las propiedades físicas y químicas se llevó a cabo en laboratorios de entidades oficiales, conforme a los métodos descritos en la Tabla **4-2**. El propósito de identificar las propiedades físicas fue para la modelación de los RH y las químicas para comprobar los taxones identificados en los sitios muestreo.

4.2.1.2 Datos edáficos existentes

Las propiedades edáficas obtenidas se organizaron en dos bases de datos. La primera incluyó la información correspondiente a los diez sitios de estudio, derivada de mediciones de campo y análisis de laboratorio. La segunda, se consolidó a partir de perfiles de suelo provenientes de estudios pedológicos existentes. Esta incluyó variables como densidad aparente (DA), densidad real (DR), granulometría (% arena, % limo y % arcilla) y humedad gravimétrica (%), evaluada en tres estados hídricos del suelo: saturación, capacidad de campo (-33 kPa) y punto de marchitez permanente (-1500 kPa). La información correspondió a estudios pedológicos desarrollados en los departamentos de Meta (IGAC, 2000) y Vichada (IGAC, 2014).

Las bases de datos edáficas consolidadas constituyeron el insumo principal para el SCH, la CAD y la modelación espacial de los RH.

Tabla **4-2**: Propiedades para Sitios de Referencia.

Propiedad	**Laboratorio**	**Método**	**Unidad**
Granulometría	IGAC	Pipetas (IGAC, 2023)	%
Curvas de tensión a 5 puntos (saturación, 0.3, 1, 5, 10 y 15 atm)	UNAL	Ollas de tensión (IGAC, 2023)	%
Densidad aparente	UNAL	Terrón parafinado (IGAC, 2023)	$g\,cm^{-3}$
Densidad real	UNAL	Picnómetro	$g\,cm^{-3}$
Hierro (Fe) disponible (doble ácido)	AGROSAVIA	Extracción doble ácido -- absorción atómica	$mg\,kg^{-1}$
Cobre (Cu) disponible (doble ácido)	AGROSAVIA	Extracción doble ácido -- absorción atómica	$mg\,kg^{-1}$
Manganeso (Mn) disponible (doble ácido)	AGROSAVIA	Extracción doble ácido -- absorción atómica	$mg\,kg^{-1}$
Zinc (Zn) disponible (doble ácido)	AGROSAVIA	Extracción doble ácido -- absorción atómica	$mg\,kg^{-1}$
Determinación de pH (1:2.5)	AGROSAVIA	Acidez activa / pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25	pH
Determinación de conductividad eléctrica	AGROSAVIA	NTC 5596:2008	$dS\,m^{-1}$
Determinación de carbono orgánico	AGROSAVIA	GA-R-119 versión 4, 2021-10-25	g/100g
Materia orgánica (MO)	AGROSAVIA	Cálculo según NTC 5403 (Walkley & Black)	g/100g
Determinación de fósforo (P) disponible	AGROSAVIA	GA-R-48 versión 07, 2021-10-25	$mg\,kg^{-1}$
Azufre (S) disponible	AGROSAVIA	Fosfato monobásico de calcio	$mg\,kg^{-1}$
Capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE)	AGROSAVIA	Cálculo	$cmol(+)\,kg^{-1}$
Boro (B) disponible	AGROSAVIA	Fosfato monobásico de calcio	$mg\,kg^{-1}$
Acidez (Al+H)	AGROSAVIA	KCl	$cmol(+)\,kg^{-1}$
Aluminio (Al) intercambiable	AGROSAVIA	KCl	$cmol(+)\,kg^{-1}$
Calcio (Ca) intercambiable	AGROSAVIA	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25	$cmol(+)\,kg^{-1}$
Magnesio (Mg) intercambiable	AGROSAVIA	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 9, 2021-10-25	$cmol(+)\,kg^{-1}$

4.2.1.3 Datos climáticos

La información climática utilizada en la investigación se estructuró en tres conjuntos de datos:

(I) Datos climáticos correspondientes al periodo de análisis de los registros de humedad del suelo (2023-2024),

(II) Datos mensuales de la normal climática histórica 1991-2020, y

(III) Datos mensuales proyectados asociados al escenario de cambio climático SSP5-RCP 8.5.

Series para los años 2023 y 2024

Para la construcción de las series climáticas anuales se emplearon series temporales diarias de variables climáticas obtenidas a partir de productos climáticos globales, los cuales fueron accedidos y procesados mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE). GEE es un entorno de computación en la nube diseñado para el análisis geoespacial a gran escala, que permite el acceso, procesamiento y extracción eficiente de grandes volúmenes de datos climáticos y ambientales (Gorelick et al., 2017).

La precipitación (mm) se obtuvo a partir del producto CHIRPS v2.0 (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) (C. Funk et al., 2015), el cual integra estimaciones satelitales con observaciones de estaciones meteorológicas para generar series temporales de alta resolución espacial. De manera similar, la temperatura media del aire (°C) se derivó del producto de reanálisis ERA5 (*ECMWF Reanalysis v5*) (Hersbach et al., 2020), en su versión horaria (ERA5 Hourly), desarrollado por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), el cual proporciona variables atmosféricas consistentes mediante la asimilación de observaciones en un modelo numérico global.

Las series diarias fueron agregadas a escala mensual, de acuerdo con los requerimientos del modelo de Newhall, para los años 2023 y 2024, periodo durante el cual se contó con registros continuos de humedad del suelo en los sitios instrumentados.

Dado que no se dispone de estaciones meteorológicas cercanas o en funcionamiento a los sitios de referencia, con información completa y continua para los años de estudio, se realizó la extracción puntual de las variables climáticas directamente a partir de los productos espaciales (ráster) de CHIRPS y ERA5.

Series para la normal climática 1991-2020

Colombia cuenta oficialmente, de acuerdo con el IDEAM, con la información climática correspondiente a la última normal climática 1991-2020. Esta información fue suministrada por la entidad en formato ráster, con resolución temporal mensual (IDEAM, 2023b).

Para mantener la coherencia espacial y garantizar continuidad entre las variables climáticas y los sitios instrumentados, se extrajeron los datos a nivel puntual a partir de dicha serie histórica.

Los datos climáticos obtenidos se procesaron y analizaron en R, donde se organizaron y adecuaron de acuerdo con los requerimientos de entrada del modelo de Newhall. Durante este proceso se garantizó la consistencia de unidades, la continuidad temporal de las series y la representatividad espacial de la información climática para el área de estudio.

Series de datos proyectados de cambio climático 2021-2100

Para la evaluación del impacto futuro del cambio climático sobre el RH se utilizó el escenario SSP5-RCP8.5, el cual forma parte de los escenarios empleados en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) y fue desarrollado en el marco del proyecto CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*). En este marco, los escenarios combinan trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP, *Shared Socioeconomic Pathways*) con niveles objetivo de forzamiento radiativo hacia el año 2100 (Masson-Delmotte et al., 2021).

Las SSP corresponden a narrativas que describen posibles trayectorias de evolución social y económica global hasta el año 2100 y se emplean juntamente con modelos integrados para derivar proyecciones climáticas cuantitativas. En particular, el escenario SSP5, denominado «Fossil-fueled Development», describe un futuro con rápido crecimiento económico y fuerte dependencia de combustibles fósiles, asociado a altas emisiones y limitadas acciones de mitigación.

Por su parte, RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway*) representa una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero que conduce a un forzamiento radiativo aproximado de $8{,}5\,\mathrm{W\,m^{-2}}$ hacia finales de siglo. En el marco de CMIP6, la combinación SSP5 y RCP8.5 se emplea ampliamente para analizar la evolución de variables climáticas, como temperatura, precipitación y humedad, bajo condiciones de emisiones elevadas (IDEAM, 2024).

Este escenario configura una trayectoria de forzamiento radiativo extremo, asociada a incrementos significativos de la temperatura y cambios sustanciales en los patrones de precipitación hacia finales del siglo XXI (Florian-Vergara et al., 2021, IDEAM, 2024, Treier et al., 2022).

La selección del escenario SSP5-RCP8.5 es pertinente debido a su capacidad para representar condiciones climáticas extremas plausibles, derivadas de trayectorias de desarrollo intensivas en emisiones, lo que permite evaluar la respuesta del sistema edafoclimático ante escenarios de alta presión climática (Borges, 2023, González-Orozco et al., 2023). Además, este escenario, análogo al RCP8.5 utilizado en CMIP5, proyecta los mayores niveles de forzamiento radiativo, siendo especialmente útil para el análisis de cambios extremos en los componentes del ciclo hidrológico, incluyendo la humedad del suelo (Li et al., 2021, Zarei et al., 2025).

De acuerdo con lo anterior, la investigación incorporó las proyecciones climáticas correspondientes al escenario SSP5-RCP8.5 elaboradas por el IDEAM para el territorio colombiano. Este escenario es procesado por el IDEAM, mediante la regionalización de las simulaciones de un ensamble de modelos climáticos globales y su representación espacial para Colombia. Este procedimiento permite disponer de información climática con mayor detalle territorial y coherencia con las condiciones climáticas nacionales que la proporcionada directamente por los modelos globales (IDEAM, 2024). De esta manera, su incorporación resulta pertinente para evaluar los posibles efectos del cambio climático sobre el balance hídrico y la distribución futura de los regímenes de humedad del suelo en los departamentos del Meta y Vichada.

Para la obtención se desarrollaron en GEE (Google Earth Engine Team, 2025) (Tabla **4-3**).

Tabla **4-3**: Variables climáticas para la modelación de los Regímenes de Humedad.

Variable	Periodo	Fuente de información	Tipo	Algoritmo
Precipitación	2023-2024	UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY (C. C. Funk et al., 2014)	Ráster	`CHIRPS_data.txt` (GEE)
Temperatura	2023-2024	ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY (Muñoz Sabater, 2019)	Ráster	`ERA5_data.txt` (GEE)
Precipitación, Temperatura	1991-2020; 2021-2100	IDEAM (2023b); IDEAM (2024)	Ráster	---

4.2.2 Fase 2. Modelación de los regímenes de humedad por sitio

La estimación por sitio de los RH se realizó a partir de la integración de la información climática y edáfica descrita en la fase anterior.

Inicialmente, se definió la SCH de forma paramétrica para cada sitio, considerando las propiedades hidro físicas asociadas. Para encontrar los límites de la SCH, en los 10 puntos instrumentados se utilizó el método aplicado por Zobeck y Daugherty (1982).

El método se basa en el cálculo de la CAD medida por gravimetría teniendo en cuenta las curvas características de humedad para cada horizonte del suelo en la fracción de tierra fina. Adicionalmente, el método tiene en cuenta si los horizontes del perfil presentan fragmentos gruesos, los cuales limitarían el movimiento y almacenamiento de agua en el suelo, lo que hace que el espesor de la SCH sea mayor. En este caso, se determinó el porcentaje en volumen ocupado por estos en el horizonte, asumiendo que las partículas mayores a 2 mm no absorben agua (Reinhart, 1961, Soil Survey Staff, 2022)

La CAD se calcula a partir de la diferencia entre los contenidos de humedad determinados a tensiones de -33 kPa y -1500 kPa en su respectivo horizonte ((Zobeck & Daugherty, 1982)). Los valores de tensión son aproximados, ya que están relacionados con la capacidad de succión en donde el agua es retenida por la matriz del suelo y con las plantas mesófilas para su adecuado establecimiento fisiológico. Así, se asemejan tensiones al concepto de capacidad de campo para -33 kPa y al punto de marchitez permanente con -1500 kPa (Liang et al., 2016, Seneviratne et al., 2010). Para efectos cuantitativos de la investigación, la CAD se determinó para cada horizonte de los sitios, como lámina de agua [mm] con la Ecuación 4-2:

$$\phi_d = l \cdot \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \cdot e \cdot f \tag{4-2}$$

donde ϕ_d corresponde a la capacidad de agua disponible por horizonte [mm]; l es la diferencia del contenido de agua entre -33 kPa y -1500 kPa [g H_2O g^{-1} suelo]; ρ es la densidad aparente [$g\,cm^{-3}$]; ρ_{H_2O} es la densidad del agua a temperatura ambiente [$g\,cm^{-3}$]; e es el espesor del horizonte [mm]; y f es el porcentaje de tierra fina. Una vez conocida la ϕ_d total, se calculó la profundidad a la cual el agua llena cada horizonte, hasta alcanzar una capacidad total de 25 mm y 75 mm, definidos como los límites de la SCH.

Posteriormente, se calculó la CAD en la SCH tanto para los sitios instrumentados como para los perfiles de suelo existentes. Para ello, se implementó un algoritmo en R (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

La clasificación del RH se realizó mediante el modelo de Newhall, implementado en R con el paquete «Newhall» (versión 1.6.1) (Welsch, 2024) y la interfaz de conexión con la librería jNSMR (Soil and Plant Science Division Staff, USDA-NRCS & Brown, 2024). Este modelo, desarrollado originalmente por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, calcula los componentes del balance hídrico del suelo basándose en series climáticas de temperatura y precipitación, y en la CAD de la SCH, siguiendo los conceptos edafoclimáticos descritos en el numeral 3.6.2.

Para garantizar la reproducibilidad, se realizó una funcion en R: *04_0_SCH.R* (Rodríguez-Vásquez, 2026b), utilizando como insumos la información climática anual, la normal climática y la CAD de la SCH (Figura **4-2**, Fase 2). Como resultado de esta fase, se obtuvieron las clasificaciones del RH para los sitios instrumentados para los años 2023-2024, 2023 y 2024 así como para la normal climática 1991-2020.

4.2.3 Fase 3. Evaluación de la modelación

La evaluación del desempeño del modelo a escala puntual se realizó mediante la comparación entre el RH determinado a partir de las observaciones de campo y el RH estimado por el modelo de Newhall en cada sitio de monitoreo. Para cuantificar el grado de concordancia, identificar las discrepancias entre ambas clasificaciones y evaluar su asociación, se implementó una estrategia estadística secuencial basada en el análisis de tablas de contingencia, la cual incluyó:

(I) Construcción de la tabla de contingencia entre el régimen de humedad observado y el modelado;

(II) Cálculo de la exactitud global y de las métricas de desempeño por clase;

(III) Estimación del coeficiente kappa de Cohen como medida de concordancia corregida por el acuerdo esperado por azar;

(IV) Aplicación de la prueba exacta de Fisher para evaluar la existencia de asociación entre las clasificaciones observadas y modeladas;

(V) Estimación del coeficiente V de Cramér para cuantificar la magnitud de la asociación entre ambas clasificaciones.

Inicialmente, se construyó una tabla de contingencia para identificar los sitios correctamente clasificados, las discrepancias y la dirección de los errores. Posteriormente, la capacidad clasificatoria se cuantificó mediante la exactitud global y las métricas específicas por clase. El coeficiente kappa de Cohen se utilizó como medida principal de concordancia, debido a que corrige el acuerdo observado por el acuerdo esperado por azar. De manera complementaria, la prueba exacta de Fisher permitió evaluar si existía evidencia de asociación entre las clasificaciones observadas y modeladas, considerando el tamaño muestral reducido y las bajas frecuencias esperadas. El coeficiente V de Cramér se empleó para cuantificar la magnitud de dicha asociación. Debido a que la asociación y la concordancia representan propiedades estadísticas diferentes, los resultados de Fisher y V de Cramér se interpretaron como evidencia complementaria y no como medidas directas de exactitud o criterios independientes para determinar la aceptación del modelo.

El desempeño puntual del modelo se interpretó de manera conjunta, considerando la magnitud de la exactitud global, las métricas por clase, el coeficiente kappa y la distribución de los errores en la tabla de contingencia. Adicionalmente, la estabilidad de las clasificaciones frente a diferentes valores de CAD se evaluó mediante un análisis de sensibilidad complementario. Debido al tamaño reducido de la muestra, los resultados se interpretaron como evidencia del desempeño del modelo en los sitios monitoreados y no como una validación definitiva de su aplicación en el área de estudio.

Matriz de confusión y exactitud de clasificación

Inicialmente, las clasificaciones observadas y estimadas se organizaron en una matriz de confusión 2×2, en la cual las filas representaron el régimen de humedad observado y las columnas el régimen estimado por el modelo de Newhall. Las categorías evaluadas fueron ústico y údico. La diagonal principal representó los sitios correctamente clasificados, mientras que las celdas fuera de la diagonal correspondieron a las discrepancias entre ambas clasificaciones.

A partir de la matriz se calculó la exactitud global (Congalton & Green, 2019), definida como la proporción de sitios correctamente clasificados respecto del total evaluado:

$$\text{Exactitud global} = \frac{n_{11} + n_{22}}{N}. \tag{4-3}$$

Tabla **4-4**: Tabla de contingencia para comparar el régimen de humedad observado y el estimado mediante el modelo de Newhall.

Observado (O) / Newhall (E)	Ústico	Údico	**Total**
Ústico	$\mathbf{n_{11}}$	n_{12}	n_{1+}
Údico	n_{21}	$\mathbf{n_{22}}$	n_{2+}
Total	n_{+1}	n_{+2}	**N**

Coeficiente kappa de Cohen

El coeficiente kappa de Cohen se utilizó como medida principal de concordancia entre las clasificaciones observadas y estimadas, debido a que corrige el acuerdo observado por el acuerdo esperado por azar (Cohen, 1960, J. Wang et al., 2019):

$$\kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}, \tag{4-4}$$

donde P_o es la proporción de acuerdo observado y P_e es la proporción de acuerdo esperado por azar. Los valores de κ se interpretaron de manera orientativa según la escala de Landis y Koch (1977a), considerando conjuntamente la exactitud global y la distribución de los errores en la matriz de confusión.

Prueba exacta de Fisher

La prueba exacta de Fisher se aplicó para evaluar la existencia de asociación entre las clasificaciones observadas y estimadas. Esta prueba fue seleccionada debido al reducido tamaño de la muestra ($n = 10$) y a la presencia de frecuencias esperadas bajas, condiciones bajo las cuales la prueba chi-cuadrado de Pearson puede resultar inadecuada (Kim, 2016, 2017).

Para una tabla de contingencia 2×2, la probabilidad de observar una tabla particular con márgenes fijos se calculó mediante:

$$P = \frac{(a+b)!(c+d)!(a+c)!(b+d)!}{a!\,b!\,c!\,d!\,n!}, \tag{4-5}$$

donde a, b, c y d representan las frecuencias observadas y n el número total de sitios. El valor p de la prueba corresponde a la suma de las probabilidades de las tablas consideradas tan extremas o más extremas que la observada bajo la hipótesis nula de independencia.

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{n \cdot \text{mín}(r-1,\ c-1)}}, \tag{4-6}$$

donde χ^2 es el estadístico chi-cuadrado, n es el número total de observaciones, r es el número de filas y c es el número de columnas de la tabla de contingencia. Debido a que V de Cramér mide asociación y no concordancia, se interpretó como una medida complementaria y no como evidencia directa de exactitud del modelo.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software R (versión 4.3.0) (R Core Team, 2026), a partir del algoritmo «07_Evaluacion_Modelo.R» (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

Esta fase permitió evaluar la capacidad del modelo para reproducir las condiciones del RH y establecer su idoneidad para su aplicación en términos espaciales.

4.2.4 Fase 4. Modelación espacial del régimen de humedad

Con base en los resultados obtenidos en la modelación puntual del RH y en la evaluación del desempeño del modelo, se procedió a la modelación espacial a escala regional, que incluye la altillanura plana de los departamentos del Meta y Vichada. Para este propósito, la CAD fue espacializada utilizando técnicas de interpolación espacial, permitiendo su integración como insumo edáfico espacial dentro del proceso de modelación.

El modelo fue ejecutado para tres instancias temporales de clima. En primer lugar, se generaron mapas del RH correspondientes a las condiciones actuales, utilizando información climática espacial de los años 2023 y 2024, coincidentes con el periodo de monitoreo de la humedad del suelo. En segundo lugar, se simuló el RH bajo condiciones de la normal climática 1991-2020, con el fin de establecer un marco de referencia histórico. Finalmente, se incorporaron escenarios de cambio climático correspondientes al periodo 2021-2100, a partir de proyecciones climáticas asociadas a un escenario específico de altas emisiones (SSP5 RCP8.5), con el objetivo de conocer la respuesta futura del RH ante cambios de temperatura del aire.

Una vez obtenidas las capas espaciales del RH para los distintos periodos, se realizó un análisis de cambios espaciales mediante una comparación píxel a píxel entre las condiciones actuales y futuras. Este análisis permitió clasificar los cambios del RH como *zonas de transición* de humedad del suelo.

La implementación del modelo de Newhall en un entorno espacial se realizó utilizando el softare R, mediante el uso del paquete *Newhall* (Welsch, 2024), con el algoritmo «Spatial_Newhall.Rmd» ((Rodríguez-Vásquez, 2026a)). La información espacial climática y edáfica fue previamente armonizada en términos de resolución espacial (1 km), unidades y estructura temporal, garantizando la consistencia de los insumos empleados para la modelación.

5 Resultados y discusiones

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases metodológicas descritas en el capítulo anterior. La exposición de los hallazgos sigue la secuencia lógica planteada en los objetivos específicos, comenzando con la caracterización de los sitios de estudio y la estimación de la sección control de humedad del suelo (SCH), para luego abordar la modelación puntual de los regímenes de humedad del suelo (RH), su evaluación y, finalmente, la espacialización bajo diferentes análisis climáticos.

5.1 Caracterización de suelos

A conitnuación se describen los resultados obtenidos de la localización de los sitios muestreados.

5.1.1 Sitios de monitoreo

La localización de los diez sitios destinados al monitoreo continuo de la humedad del suelo se definió mediante el método de muestreo del *Hipercubo Latino Condicionado*. Este enfoque permitió seleccionar puntos representativos de la heterogeneidad ambiental del área de estudio, integrando como covariables las unidades cartográficas de suelos (IGAC, 2000), las coberturas de la tierra (IDEAM, 2023a) y el índice topográfico de humedad derivado del modelo digital de elevación SRTM (IGAC, 2011).

La ubicación final de los sitios se ajustó para nueve de los diez puntos inicialmente planificados, debido a limitaciones logísticas durante la fase de instalación. En uno de los lugares establecidos no fue posible completar la instrumentación dentro de la ventana temporal prevista para la investigación, dado que no se contó con el recolector de datos en funcionamiento en el momento de la instalación de los sensores. Este equipo estuvo disponible únicamente ocho meses después, lo que imposibilitó la captura de datos durante el periodo de monitoreo definido (octubre de 2023 a septiembre de 2024) y, por tanto, el sitio fue excluido de la investigación.

En la Figura **5-1** se presenta la localización geográfica de los nueve sitios efectivamente instrumentados. Los puntos se identifican con nombres vernáculos representativos de la zona (ej. "SHEEFER", "LALIBERTAD", ÇARIMAGUA"), los cuales facilitaron su reconocimiento en campo y vinculación con predios o paisajes locales. La ubicación de los sitios se superpone sobre el mapa de unidades de suelos del área de estudio, elaborado a partir del *Estudio General de suelos del departamento del Meta* (IGAC, 2000). Esta representación permite visualizar la distribución de los puntos de monitoreo en relación con las principales unidades cartográficas y geomorfológicas de la Altillanura plana.

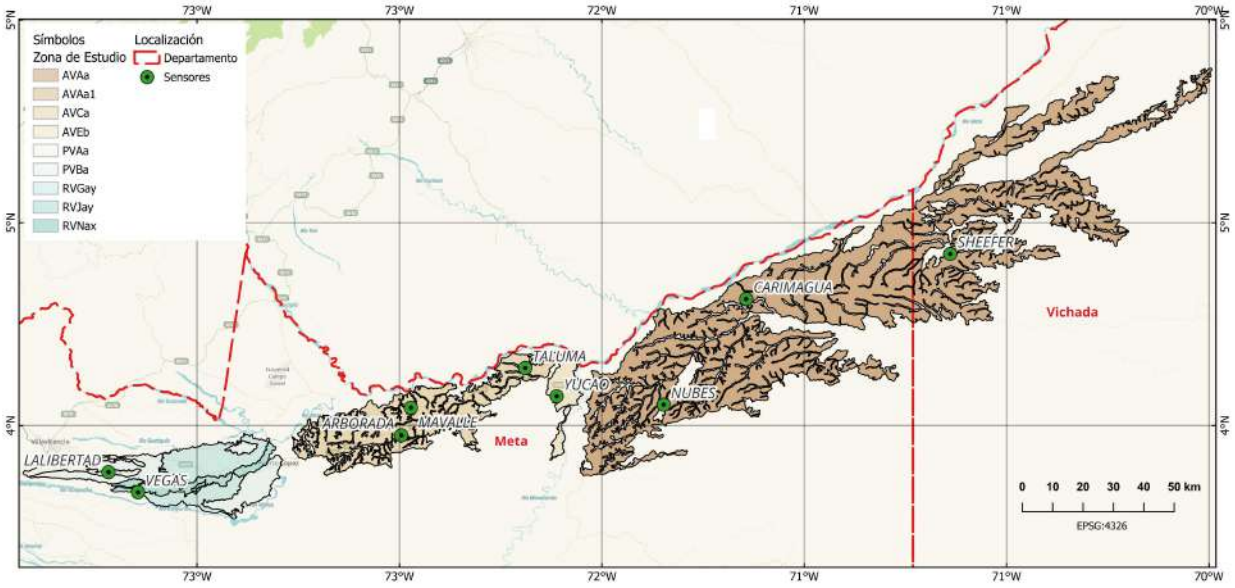

Figura **5-1**: Ubicación de los sitios instrumentados

5.1.1.1 Instrumentación

Los sensores se instalaron conforme al a metodología. En términos generales, las profundidades de instalación para la mayoría de los sitios, con texturas finas correspondieron a 10 cm (capa superficial), 20 cm (capa media) y 30 cm (capa inferior). En la Tabla **5-1** se especifican, para cada sitio, las profundidades y fecha de instalación de los sensores.

Tabla **5-1**: Profundidad de instalación y fechas de establecimiento.

ID	Sitio	Fecha Instalación	Profundidad
1	LALIBERTAD	20/04/2023	a
2	VEGAS	06/10/2023	a
3	ARBORADA	05/10/2023	a
4	MAVALLE	04/10/2023	a
5	TALUMA	25/04/2023	a
6	YUCAO	18/08/2023	c
7	NUBES	17/08/2023	b
8	CARIMAGUA	15/08/2023	a
9	SHEEFER	16/08/2023	a

Nota: La columna Profundidad indica la categoría de profundidad del perfil según la TS, ubicando los 3 sensores en la SCH. a: 10, 20 y 30 cm; b: 20, 40 y 60 cm; c: 30, 60 y 90 cm.

5.1.1.2 Características locales

La Tabla **5-2** sintetiza las principales características edafológicas de cada sitio. La distribución de los sitios abarca los principales órdenes de suelos presentes en la Altillanura plana del Meta, con predominio de Oxisoles (siete sitios), seguido por un Entisol (YUCAO) y un Inceptisol (VEGAS), según los resultados obtenidos en campo (Apéndice A) y acorde con perfiles de unidades de suelos de los sitios instumentados, según el estudio general de suelos (IGAC, 2000, 2014). Esta composición refleja las condiciones pedológicas de la zona de estudio, donde los Oxisoles altamente meteorizados dominan las posiciones estables del paisaje

(altiplanicie o altillanura), mientras que los suelos menos evolucionados se asocian a geoformas más recientes.

Tabla **5-2**: Características generales de los sitios de monitoreo.

ID	**Sitio**	**Orden**	**Cobertura**	**Paisaje**	**Longitud** [°O]	**Latitud** [°N]	**Altitud** [m.s.n.m.]
1	LALIBERTAD	Oxisol	Sistema Agroforestal	Piedemonte	-73.462618	4.061391	333
2	VEGAS	Entisol	Sistema Agroforestal	Planicie Aluvial	-73.375127	4.001949	268
3	ARBORADA	Inceptisol	*Brachiaria dictyoneura*	Altiplanicie	-72.594311	4.170420	211
4	MAVALLE	Oxisol	*Brachiaria dictyoneura*	Altiplanicie	-72.565992	4.252227	191
5	TALUMA	Oxisol	*Brachiaria dictyoneura*	Altiplanicie	-72.227149	4.369926	178
6	YUCAO	Entisol	*Brachiaria dictyoneura*	Altiplanicie	-72.133876	4.286239	191
7	NUBES	Oxisol	Sistema Agroforestal	Altiplanicie	-71.816872	4.261297	204
8	CARIMAGUA	Oxisol	*Brachiaria dictyoneura*	Altiplanicie	-71.571871	4.574046	164
9	SHEEFER	Oxisol	*Brachiaria dictyoneura*	Altiplanicie	-70.966902	4.707475	167

En cuanto a coberturas revisadas para la zona de estudio, cinco de los sitios corresponden a pastos del género *Brachiaria* (principalmente *B. dictyoneura*), la cobertura transformada más extensa en la región para actividades ganaderas (Rippstein et al., 2001); Los cuatro sitios restantes corresponden a sistemas agroforestales, en los cuales se combinan especies maderables o cultivos perennes (como cacao, caucho y plátano) con pastos o cultivos anuales, reflejando estrategias de diversificación productiva en la altillanura (Rodríguez et al., 2013).

La altitud de los sitios oscila entre 164 y 333 m.s.n.m., con los valores más bajos en las áreas de planicie aluvial (VEGAS, 268 m) y los más altos en el piedemonte (LALIBERTAD, 333 m), lo que evidencia el gradiente topográfico suave pero relevante para la distribución de los suelos y la dinámica hídrica de la zona

5.1.1.3 Propiedades de suelos

Según lo descrito en el apartado 4.2.1.1 (Fase 1), en cada uno de los sitios instrumentados se realizó la caracterización morfológica de los perfiles de suelo, junto con la toma de muestras para análisis de laboratorio. Dichas muestras fueron procesadas en laboratorios oficiales (IGAC, UNAL y AGROSAVIA), siguiendo métodos estandarizados que se resumen en la Tabla **4-2**. Los resultados correspondientes se presentan en el Apéndice A.

En la Tabla **5-3** se presentan la síntesis de resultados de las propiedades físicas determinadas para cada sitio, correspondientes a los horizontes que conforman cada perfil. (Apéndice A)

5.1.2 Sitios no monitoreados

Además de la información primaria recolectada en los sitios de referencia, se consolidó una base de datos con propiedades físicas de perfiles de suelo provenientes de estudios pedológicos previos realizados por el IGAC en los departamentos de Meta (IGAC, 2000) y Vichada (IGAC, 2014). (Figura **5-2**)

Tabla **5-3**: Propiedades físicas por horizonte en los sitios de monitoreo.

ID	Sitio	LS	LI	A	L	Ar	DA	DR	SAT	CC	PMP
1	LALIBERTAD	0.00	39.00	50.20	20.30	29.50	1.59	2.84	61.01	17.68	12.01
		39.00	75.00	50.20	14.40	35.40	1.78	2.45	52.83	18.36	12.80
		75.00	90.00	42.40	18.30	39.30	1.87	2.87	52.81	17.87	12.35
		90.00	150.00	42.20	18.40	39.40	1.83	2.56	57.09	18.04	12.83
2	VEGAS	0.00	10.00	28.89	52.06	19.05	1.47	2.32	24.86	24.34	20.69
		10.00	63.00	23.34	49.88	26.78	1.56	2.34	21.38	21.10	18.99
		63.00	130.00	44.54	36.92	18.54	1.59	2.43	18.04	16.96	10.67
3	ARBORADA	0.00	21.00	46.01	23.21	30.78	1.46	2.42	23.50	23.09	19.22
		21.00	35.00	38.12	27.34	34.54	1.57	2.29	20.08	19.67	15.13
		35.00	170.00	42.63	25.05	32.32	1.54	2.42	23.62	23.32	20.57
4	MAVALLE	0.00	18.00	29.46	26.76	43.78	1.44	2.30	25.85	25.34	21.50
		18.00	34.00	26.71	25.64	47.65	1.50	2.39	24.80	24.31	21.12
		34.00	190.00	22.43	26.38	51.19	1.54	2.51	25.15	24.77	22.35
5	TALUMA	0.00	11.00	30.46	26.76	42.78	1.55	2.60	23.40	16.61	13.56
		11.00	31.00	26.71	25.64	47.65	1.54	2.50	24.04	17.34	14.25
		31.00	92.00	21.43	24.38	54.19	1.58	2.40	23.14	17.27	14.78
		92.00	200.00	20.43	23.38	56.19	1.64	2.50	22.42	16.84	14.63
6	YUCAO	0.00	12.00	79.83	9.89	10.28	1.66	2.60	--	13.71	8.41
		12.00	105.00	67.03	17.14	15.83	1.62	2.60	--	14.03	8.72
7	NUBES	0.00	15.00	51.83	28.42	19.75	1.40	2.40	23.09	22.50	17.56
		15.00	47.00	50.33	29.58	20.09	1.62	2.58	23.02	22.25	16.77
		47.00	105.00	36.01	30.76	33.23	1.56	2.44	23.08	21.84	14.54
		105.00	150.00	49.00	16.65	34.35	1.53	2.58	26.67	24.84	17.15
8	CARIMAGUA	0.00	23.00	8.21	53.82	37.97	1.35	2.30	25.03	24.04	18.70
		23.00	44.00	6.14	51.23	42.63	1.45	2.51	29.05	27.66	21.80
		44.00	103.00	6.04	48.00	45.96	1.58	2.71	26.43	24.27	18.79
		103.00	150.00	8.89	46.87	44.24	1.61	2.60	--	--	--
9	SHEEFER	0.00	14.00	6.97	49.34	43.69	1.41	2.65	33.22	31.38	25.68
		14.00	30.00	7.54	49.34	43.12	1.42	2.34	27.73	26.87	21.59
		30.00	80.00	4.89	43.61	51.50	1.56	2.69	26.97	25.16	19.20
		80.00	130.00	4.89	39.06	56.05	1.52	2.66	28.24	26.80	20.63

Nota: LS: Límite superior del horizonte [cm]; LI: Límite inferior del horizonte [cm]; A: Arena [%]; L: Limo [%]; Ar: Arcilla [%]; DA: Densidad aparente [g cm^{-3}]; DR: Densidad real [g cm^{-3}]; SAT: Saturación [%]; CC: Capacidad de campo [%]; PMP: Punto de marchitez permanente [%].

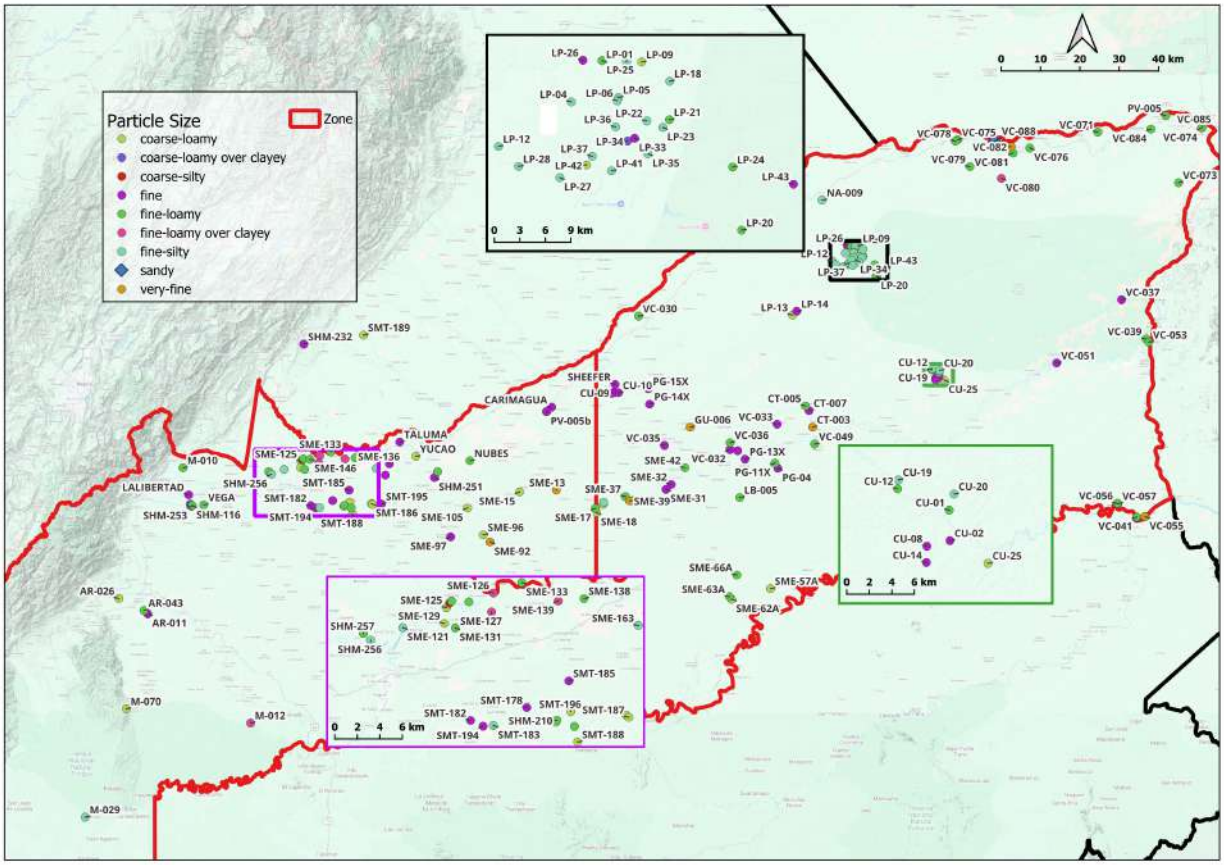

Figura **5-2**: Ubicación de los perfiles de estudios existentes, agrupados por Tamaño de Partículas.

De estas publicaciones se extrajeron 148 perfiles de suelo con información mínima de las siguientes variables: sistema de coordenadas, profundidad de los horizontes, taxón, granulometría, densidad aparente, densidad real y contenidos de humedad gravimétrica a capacidad de campo y punto de marchitez permanente. En la Tabla **5-4** se presenta una muestra de cuatro perfiles consolidados (Tabla completa llamada *data_prop_pfs.csv* de Rodríguez-Vásquez (2026b).

Esta información tuvo como propósito generar la cobertura espacial para la modelación regional de los RH y la espacialización de la CAD, tal como se describe en la Fase 4.2.4, y como se evidencia en la información espacial disponible.

Tabla **5-4**: Propiedades de los perfiles AR-011, AR-021, AR-026 y AR-043

ID	Taxón	LS	LI	A	L	Ar	DA	DR	CC	PMP
AR-011	Aeric Udoaquepts	0.00	12.00	32.00	38.00	30.00	1.60	2.61	26.90	15.70
		12.00	85.00	24.00	36.00	40.00	1.65	2.65	27.40	15.90
		85.00	130.00	28.00	36.00	36.00	1.65	2.66	29.50	17.10
AR-021	Typic Dystrudepts	0.00	18.00	28.00	42.00	30.00	1.31	2.60	33.30	19.20
		18.00	32.00	24.00	36.00	40.00	1.51	2.65	27.50	15.90
		32.00	45.00	40.00	34.00	26.00	1.57	2.68	22.90	13.50
AR-026	Fluventic Dystrudepts	0.00	30.00	54.00	28.00	18.00	1.26	2.59	39.40	22.40
		30.00	55.00	52.00	36.00	12.00	1.34	2.67	27.90	16.20
		55.00	75.00	22.00	66.00	12.00	1.29	2.68	27.30	15.80
		75.00	100.00	34.00	40.00	26.00	1.50	2.68	24.50	13.40
		100.00	120.00	36.00	36.00	28.00	1.53	2.69	24.40	13.40
AR-043	Oxic Dystrudepts	0.00	18.00	36.00	42.00	22.00	1.35	2.65	23.90	12.90
		18.00	45.00	36.00	40.00	24.00	1.48	2.66	20.10	11.20
		45.00	80.00	28.00	42.00	30.00	1.50	2.67	21.90	12.90
		80.00	130.00	38.00	38.00	24.00	1.65	2.65	21.60	12.70

5.1.3 Sección control de humedad del Suelo

La estimación de la SCH constituyó un paso fundamental para la modelación de los RH, ya que define la zona del perfil del suelo en el cual se evalúa la dinámica del agua. Siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.2.2, la SCH se estableció a partir de la CAD de cada horizonte, calculando la profundidad necesaria para acumular láminas de 25 mm (límite superior) y 75 mm (límite inferior), conforme a los lineamientos de la TS.

5.1.3.1 Límites de la SCH en los sitios de monitoreo

A partir de las propiedades físicas determinadas en laboratorio para cada horizonte (Tabla **5-3**) y mediante la aplicación de la ecuación 4-2, se calculó la lámina de agua retenida en cada horizonte, conforme a los LI y LS de la SCH, para los nueve sitios instrumentados, así como para 148 sitios provenientes de estudios previos, alcanzando un total de 157 perfiles analizados.

Con el fin de facilitar la comparación de los resultados a escala de perfil, determinó para cada uno, la clase por tamaño de partículas (TP) según la TS (Soil Survey Staff, 2022), empleando la librería *aqp* (Algorithms for

Quantitative Pedology) del software R (Beaudette et al., 2023) y el código 04_0_SCH.R (Rodríguez-Vásquez, 2026b), a partir de los espesores de los horizontes y los porcentajes de arena, limo y arcilla. (Tabla **5-5**)

Tabla **5-5**: Límites de la SCH de los sitios

ID	Sitio	LS [cm]	LI [cm]	Límites [cm]	TP
1	LALIBERTAD	29.19	80.78	29--81	fine
2	VEGAS	66.93	116.93	67--117	fine - loamy
3	ARBORADA	42.45	160.52	42--161	fine - loamy
4	MAVALLE	53.83	187.99	54--188	fine
5	TALUMA	57.18	192.18	57--193	fine
6	YUCAO	28.79	86.91	29--87	coarse - loamy
7	NUBES	31.48	78.80	31--79	fine - loamy
8	CARIMAGUA	32.91	90.86	33--91	fine
9	SHEEFER	31.88	85.61	32--86	fine

Nota: LS: límite superior; LI: límite inferior; TP: Clase de Tamaño de Partículas según TS, se citan en inglés debido que son el resultado del algoritmo aqp de R.

Los resultados de la clasificación de TP mostraron que los valores de LS oscilan entre 28.78 cm (YUCAO) y 66.93 cm (VEGAS), mientras que los de LI varían desde 78.80 cm (NUBES) hasta 192.18 cm (TALUMA).

En cuanto a la textura del perfil, se identificaron tres clases texturales: fina (*fine*), franca fina (*fine - loamy*) y franca gruesa (*coarse - loamy*). La clase fina se presenta en cinco sitios (LALIBERTAD, MAVALLE, TALUMA, CARIMAGUA y SHEEFER), representando el 55.6 % del total. La clase franca fina se observa en tres sitios (VEGAS, ARBORADA y NUBES), equivalente al 33.3 %. Finalmente, la clase franca gruesa se registra únicamente en el sitio YUCAO, con una frecuencia del 11.1 %. Esto coincide con la información descrita por el IGAC (2000)

5.1.3.2 Límites de la SCH para todos los perfiles de suelo

En relación con el total de perfiles (157), la frecuencia de las texturas por TP se presenta en la Tabla **5-6**. Se observó una heterogeneidad, con un total de 11 TP distintas, incluidas combinaciones que indican cambios texturales abruptos dentro del perfil.

Tabla **5-6**: Frecuencia de tamaño de partículas en los 157 sitios

Tamaño partícula	Traducción	Frecuencia	%
fine	fina	44	28.0
fine-loamy	franca fina	47	29.9
coarse-loamy	franca gruesa	25	15.9
fine-silty	limosa fina	24	15.3
fine-loamy over clayey	franca fina sobre arcillosa	5	3.2
very-fine	muy fina	8	5,1
coarse-loamy over clayey	franca gruesa sobre arcillosa	2	1.3
coarse-silty	limosa gruesa	1	0.6
sandy	arenosa	1	0.6
Total		**157**	**100**

La moda para el TP, mostró que el tamaño predominante fue la franca fina, con una frecuencia de 47 perfiles,

representando el 29,9 % del total. Sueguida de la fina, con 44 perfiles (28.0 %). Ambas clases concentran más de la mitad de los perfiles (57.9 %).

En conjunto, los TP dominados por la fracción fina (fina, franca fina, limosa fina y muy fina) suman 123 perfiles, equivalentes al 78,3 % del total. Esto indica un dominio de suelos con alto contenido de partículas finas (arcillas y limos) en el área de estudio. Las texturas gruesas (franca gruesa, limosa gruesa y arenosa) representan 27 perfiles (17.2 %), mientras que aquellos con cambios texturales abruptos suman 7 perfiles (4.5 %).

En la Tabla **5-7**, se indican las estadísticas de los límites de la SCH agrupadas por TP, así como la representación gráfica, organizadas de la misma forma (Figura **5-3**);la organización por grupos, pedológicamente tienen un mayor nivel de comparación que al analizarlas en conjunto para todos los perfiles. Esto es consistente con la recomendación de la TS para los límites de la SCH.

Tabla **5-7**: Estadísticas descriptivas de los límites de la SCH, agrupadas por TP.

TP	**n**	**Promedio**		**Mínimo**		**Máximo**		**Desv. Est.**	
		LS	**LI**	**LS**	**LI**	**LS**	**LI**	**LS**	**LI**
coarse-loamy	25	17.17	47.18	6.88	21.57	68.66	108.44	12.39	21.42
coarse-loamy over clayey	2	6.28	20.99	3.62	14.67	8.94	27.32	3.76	8.94
coarse-silty	1	12.01	50.20	12.01	50.20	12.01	50.20	--	--
fine	44	17.89	56.03	7.06	21.19	57.20	192.18	10.77	34.88
fine-loamy	47	16.36	49.37	6.78	20.44	66.93	160.52	10.86	27.44
fine-loamy over clayey	5	16.79	52.65	10.49	41.57	20.40	67.43	4.04	9.36
fine-silty	24	15.61	49.19	7.04	21.00	66.41	152.89	12.03	26.72
sandy	1	17.41	55.18	17.41	55.18	17.41	55.18	--	--
very-fine	8	18.48	62.54	8.83	27.03	27.12	90.50	6.76	25.53
Total general	**157**	**16.56**	**50.59**	**3.62**	**14.67**	**68.66**	**192.18**	**10.79**	**28.20**

Nota: TP: Clase de tamaño de partículas según TS; LS: límite superior [cm]; LI: límite inferior [cm].
Las clases con n=1 no presentan desviación estándar.

Límite superior - inicio de la SCH

Los resultados de la Tabla **5-7**, mostraron que que el TP muy fina registró el mayor promedio de profundidad del LS (18.48 cm), seguida por la franca fina (17.17 cm) y fina (17.11 cm). En contraste, la franco gruesa sobre arcillosa presentó el LS más superficial, con un promedio de 6.28 cm, lo que indica que la SCH es muy cercana a la superficie. Este comportamiento puede estar relacionado con cambios texturales abruptos dentro del perfil, que condicionan la dinámica del agua y generan una delimitación más somera de la sección.

En cuanto a los valores extremos, el mínimo absoluto del límite superior (3.62 cm) también se registró en la clase franco gruesa sobre arcillosa, mientras que el valor máximo (68.66 cm) correspondió a la franca gruesa. Este amplio rango evidencia la influencia tanto de la textura como de la organización interna del perfil como son la estructura de los agregados del suelo.

Respecto a la variabilidad interna, la clase franca gruesa presentó la mayor dispersión (DE = 12.39 cm), seguida por la limosa fina (DE = 12.03 cm), lo que refleja una heterogeneidad considerable en la profundidad del límite superior dentro de estas clases. Por el contrario, la menor variabilidad se observó en la franco gruesa sobre arcillosa (DE = 3.76 cm), indicando un comportamiento más consistente y predecible en la ubicación del límite superior para este tipo de partículas.

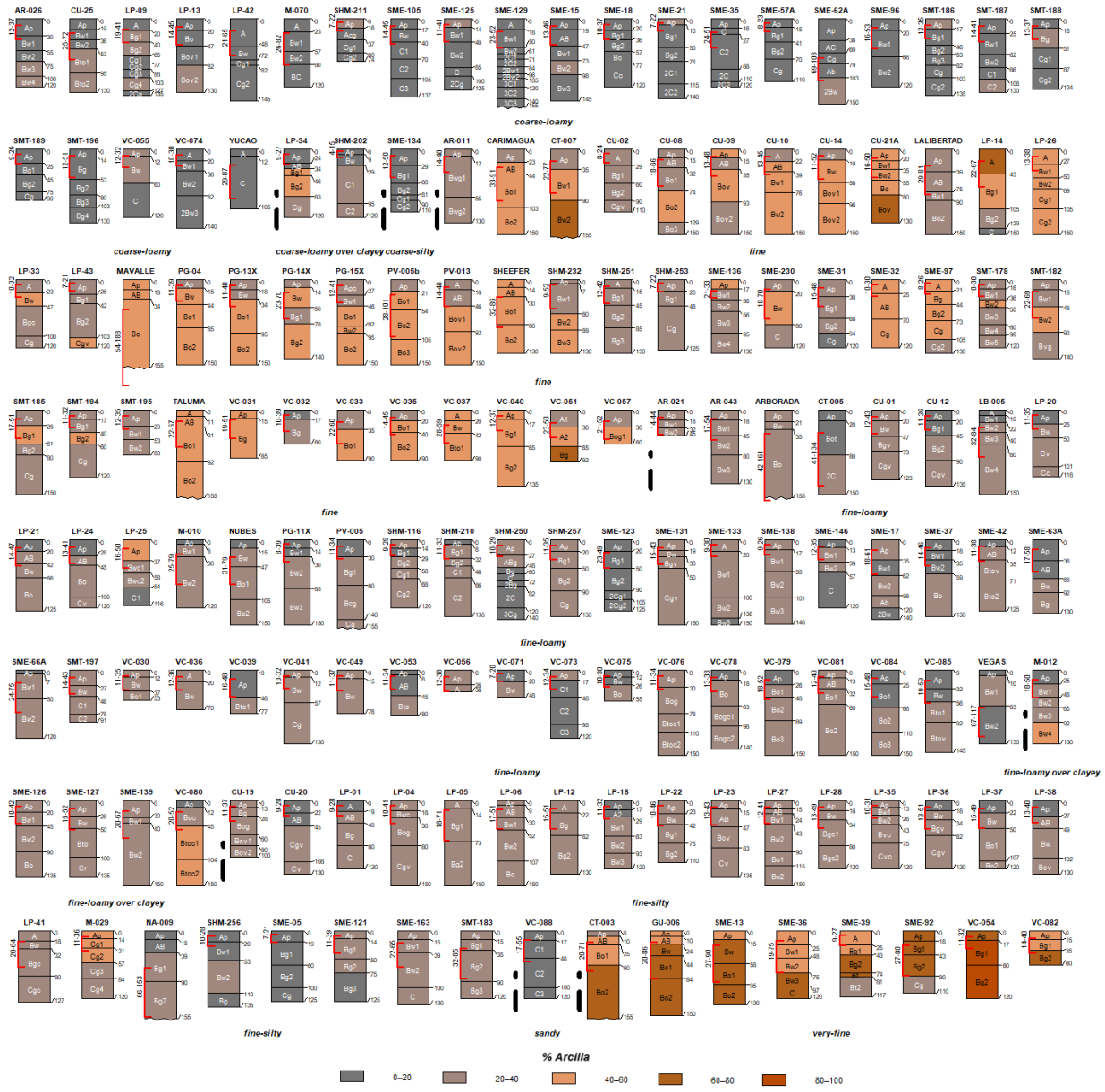

Figura **5-3**: Sección control de humedad de 157 perfiles.

Límite inferior - final de la SCH

La clase muy fina presentó el mayor promedio de LI con 62.54 cm, seguida por la fina con 56.03 cm. Estos resultados indican que, en estas clases, la SCH se extiende a mayores profundidades dentro del perfil.

En contraste, la clase franca gruesa sobre arcillosa registró el promedio más bajo, con 20.99 cm, evidenciando que la SCH esta condicionada en profunidad,por el cambio textural. Este mismo grupo presenta también el valor mínimo observado, con 14.67 cm, mientras que el máximo del conjunto de datos corresponde a la fina, con 192.18 cm (perfil TALUMA), constituyendo la SCH más profunda registrada.

Un cambio textural abrupto, puede implicar un incremento drástico en el contenido de arcilla (Ganatsios

et al., 2021). Cuando aparece un horizonte arcilloso restrictivo (como un horizonte argílico o una capa densa), se producen alteraciones en la SCH como son: (i) restricción en el movimiento vertifcal, el horizonte arcilloso actúa como una barrera de baja conductividad hidráulica, limitando la infiltración profunda (Zhu & Lin, 2009). Esto provoca que el frente de humedad se detenga o se acumule sobre dicha capa, desplazando los límites de la SCH hacia niveles más superficiales (Drohan et al., 2020). (ii) Alteración de la porosidad, en suelos de la altillanura, como los *Typic Hapludox*, la alta concentración de óxidos de hierro y aluminio genera una porosidad específica que puede verse truncada por cambios en la densidad aparente o la presencia de capas compactadas (Carranza et al., 2018, Zimmermann et al., 2005). Un horizonte restrictivo reduce el volumen de poros grandes (macroporos), disminuyendo la CAD y la disponibilidad de agua para las plantas al aumentar la retención a tensiones altas (Drohan et al., 2020, Gile et al., 1981). (iii) Flujo lateral y saturación, La presencia de estas capas arcillosas restrictivas puede generar niveles freáticos colgado y promover flujos laterales preferenciales, lo que altera la dinámica de humedad (Zhu & Lin, 2009).

En cuanto a la variabilidad, la clase fina mostró la mayor dispersión (DE = 27.95 cm), seguida por la franca fina (DE = 27.44 cm), lo que refleja una amplia gama de profundidades dentro de estas clases. Por el contrario, la menor variabilidad se observa en la franca gruesa sobre arcillosa (DE = 8.94 cm) y franca fina sobre arcillosa (DE = 9.36 cm), indicando un comportamiento más homogéneo en la profundidad del límite inferior en estos grupos texturales.

5.1.3.3 Límites de la SCH con respecto a la TS

Aunque la TS de suelos no clasifica la profundidad de la SCH por tamaño de partículas, lo hace de forma más general, donde: para suelos de textura fina, el LS teórico es 10 cm y el LI teórico es 30 cm; Para texturas medias (franco fina, limosa fina), LS teórico de 20 cm, LI teórico de 60 cm; y para texturas gruesas, el LS teórico con 30 cm y LI teórico de 90 cm.

En el caso de suelos con cambios texturales abruptos, la SCH puede verse afectada en el espesor y sus límites pueden ser diferentes (generalmente más superficiales) debido a la presencia de un horizonte arcilloso restrictivo.

Por lo tanto, se evaluó si los límites calculados se ajustaban a la TS, comparando los promedios de LS y LI de cada clase con esos valores teóricos. (Tabla **5-8**)

Tabla **5-8**: Comparación de los límites promedio de la SCH con los valores establecidos por la TS.

Tamaño de Particula (TP)	n	LS obs	LI obs	LS teórico	LI teórico	Dif. LS	Dif. LI
Texturas finas (teórico: LS=10, LI=30)							
fine	44	17.92	56.28	10	30	+7.92	+26.28
very-fine	8	18.48	62.54	10	30	+8.48	+32.54
Texturas medias (teórico: LS=20, LI=60)							
fine-loamy	47	16.36	49.37	20	60	-3.64	-10.63
fine-silty	24	15.61	49.19	20	60	-4.39	-10.81
fine-loamy over clayey	5	16.79	52.65	20	60	-3.21	-7.35
Texturas gruesas (teórico: LS=30, LI=90)							
coarse-loamy	25	17.17	47.18	30	90	-12.83	-42.82
sandy	1	17.41	55.18	30	90	-12.59	-34.82
coarse-silty	1	12.01	50.20	30	90	-17.99	-39.80
coarse-loamy over clayey	2	6.28	20.99	30	90	-23.72	-69.01

Nota: LS: límite superior [cm]; LI: límite inferior [cm]; obs: observado; Dif.: diferencia (obs - teórico) [cm]. Las clases con n=1 son solo referenciales.

Los promedios del LS de TP finas (17.11 y 18.48 cm) son superiores al valor teórico de 10 cm, y los de LI

(56.28 y 62.54 cm) son muy superiores a los 30 cm esperados. Esto indica que, en los suelos clasificados como finos de este estudio, la SCH es considerablemente más profunda de lo que establece la TS.

Los grupos de TP fina no implica necesariamente que la SCH sea somera; la TS no define la SCH en función de la familia textural, pero si el suelo es muy profundo, la SCH sigue siendo la misma (10-30 cm) independientemente de la profundidad total. En este caso, los valores observados sugieren que la SCH real (zona de control de humedad) se ha desplazado a mayor profundidad, asociado a las propiedades físicas del suelo.

Las texturas medias (franco fina, limos fina y franca fina) de los valores observados se acercan a los teóricos, aunque con una tendencia a ser ligeramente más superficiales, donde el LS se encuentra entre 15.6 y 16.8 cm (teórico 20 cm) → unos 3-4 cm menos. El LI, entre 49.2 y 52.7 cm (teórico 60 cm) → unos 7-10 cm menos. Esto indica que la SCH en estas texturas comienza un poco antes y termina antes de lo sugerido.

Para las clases de textura gruesa (franca gruesa, arenosa y limosa gruesa) el LS observado (entre 12.0 y 17.4 cm) se encuentra muy por debajo del valor teórico de 30 cm. De manera similar, el LI (entre 47.2 y 55.2 cm) también es considerablemente menor que el valor teórico de 90 cm. Estos resultados indican que la SCH en estos suelos es más superficial de lo que la TS recomienda para texturas gruesas.

Para las clases con cambios texturales abruptos de franca grueso sobre arcillosa, el LS de 6.28 cm y el LI de 20.99 cm, están por debajo de los teóricos. La presencia de un horizonte arcilloso a poca profundidad restringe drásticamente la SCH, lo que es coherente con la teoría según lo sugerido por TS. Así, para el franco fino sobre arcilloso el LS es 16.79 cm y el LI de 52.65 cm, los valores son similares al franco fino sin restricción, indicando que el horizonte arcilloso está más profundo.

La síntesis de los resultados se plasman en la Tabla **5-9**.

Tabla **5-9**: Resumen del comportamiento de la SCH por grupo textural.

Grupo textural	Rango TS (cm)	Promedio obs (cm)	Diferencia (cm)	Observación
Texturas finas	10--30	18.2--59.4	(+8.2, +29.4)	SCH más profunda de lo esperado.
Texturas medias	20--60	16.1--49.3	(-3.9, -10.7)	Cercano a teórico, ligeramente más superficial.
Texturas gruesas	30--90	17.0--47.6	(-13.0, -42.4)	SCH notablemente más superficial.
Clases con cambios texturales	--	13.8--43.6	--	Efecto restrictivo de horizontes arcillosos.

La variabilidad que se encontró en los límites de la SCH está relacionada principalmente con la forma de estimación de la CAD, donde los parámetros utilizados para el cálculo no son estáticos en el perfil del suelo (Hohenbrink et al., 2023). Esto se ve representado en los suelos tropicales altamente meteorizados de la Altillanura por una condición crítica de bimodalidad de poros en los agregados (Kühn, Lopes, Borges et al., 2021, Kühn, Lopes, Caicedo & Neto, 2021). Esta estructura bimodal comprende los poros texturales espacios intra-agregados o pequeños poros entre partículas individuales y los poros estructurales, que son macroporos ubicados entre los agregados (Kühn, Lopes, Borges et al., 2021, Zhou et al., 2017).

De esta manera, la presencia de agregados de arcilla cementados por agentes como los óxidos de hierro y aluminio genera familias de poros marcadamente distintas (macro y microporos) (Borges, 2023, Kirsten et al., 2021). El resultado es una marcada variación en las curvas de característica de agua del suelo, donde la estabilidad de estos microagregados, típicos de los Oxisoles colombianos, influye directamente en la retención hídrica y la porosidad efectiva (Parra et al., 2020, Zounemat-Kermani et al., 2021).

Explicado desde la mineralogía, los perfiles analizados, particularmente los Oxisoles, se caracterizan por la dominancia de arcillas de baja actividad caolinita y óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, gibbsita, goethita, hematita, limolita, que definen el comportamiento químico funcional del suelos, la baja capacidad de retención de agua y de nutrientes disponibles, la formación de complejos estables que contribuyen a la

formación de microagreegados y son los responsables a pesar de la estabilización de los agregados del suelo, lo que se alinea con las propiedades reportadas para este orden, en otras regiones tropicales (Camacho-Umaña et al., 2025).

A pesar de la alta estabilidad de los agregados y la presencia de macroporos en Oxisoles, que favorecen una liberación y disponibilidad rápida del agua (Wolf & Drosdoff, 1976), los ciclos de humedecimiento y secado pueden alterar significativamente la estructura del suelo y la retención hídrica, especialmente en las regiones más secas (Pires, 2023).

5.2 Modelación puntual de los regímenes de humedad del suelo

Esta sección responde a la Fase 2 y al objetivo específico 2. Se presentan los resultados de la determinación del RH para los sitios instrumentados, obtenidos mediante dos aproximaciones complementarias: (i) la medición directa con sensores de humedad durante el período 2023 a 2024, que se constituyen en los datos de referencia; y (ii) la simulación con el modelo Newhall a partir de datos edafoclimáticos, tanto para el período de medición como para la normal climática 1991-2020.

5.2.1 Dinámica de la humedad del suelo observada 2023-2024

La Figura **5-4** presenta la evolución diaria del contenido volumétrico de agua a las profundidades de instalación de los sensores correspondientes a las profundiades: superficial (VW_1), media (VW_2) e inferior (VW_3) (Tabla **3-2**).

De acuerdo con los estadísticos descriptivos de la Tabla **5-10**, el contenido de humedad volumétrica (m^3 m^{-3}) presentó una marcada variabilidad espacial entre sitios y profundidades evaluadas (VW_1, VW_2 y VW_3). Los mayores valores medios se registraron en los sitios VEGAS (VW_2 = 0.317; VW_3 = 0.327 m^3 m^{-3}), SHEEFER (VW_1 = 0,294 m^3 m^{-3}) y CARIMAGUA (VW_3 = 0.285 m^3 m^{-3}). En contraste, los menores valores medios se observaron en YUCAO (VW_3 = 0.149 m^3 m^{-3}), ARBORADA (VW_1 = 0,188 m^3 m^{-3}) y NUBES (VW_2 = 0.193 m^3 m^{-3}).

En la mayoría de los sitios se evidenció un incremento del contenido medio de humedad con la profundidad, especialmente en CARIMAGUA, MAVALLE, NUBES y TALUMA. No obstante, este patrón no fue uniforme, dado que en YUCAO se registró una disminución progresiva con la profundidad, mientras que en VEGAS los valores máximos correspondieron a la profundidad intermedia y profunda.

La desviación estándar (DE) evidenció diferencias en la estabilidad temporal del contenido de agua entre sitios y profundidades. Los mayores niveles de variabilidad se registraron en ARBORADA (DE hasta 0,054) y CARIMAGUA (DE hasta 0.056), mientras que MAVALLE presentó los valores más bajos de dispersión (DE mínima de 0.011 en VV_3), indicando mayor estabilidad en profundidad. MAVALLE se descartó para análisis posteriores, ya que en esta estación hubo un daño físico de los cables de trasmisión, por lo cual solo registraron 92 días de los 360 que se requerían.

Los rangos mínimo y máximo confirmaron esta heterogeneidad. CARIMAGUA presentó amplitudes superiores a 0.20 m^3 m^{-3}. En VEGAS, el análisis comparativo se concentró en VW_2 y VW_3. El sensor en la profundidad superficial no registró información debido a daños en el cable de trasmisión.

El análisis visual de las series temporales comprendidas entre abril de 2023 y octubre de 2024 permitió identificar patrones diferenciados entre sitios, en una escala temporal de 12 meses.

Tabla **5-10**: Estadísticas descriptivas de humedad del suelo por sitio y Sensor.

Sitio	VW	N	Media	DE	Mediana	Q1	Q3	Mín--Máx
Humedad (m^3 m^{-3})								
ARBORADA	**VW_1**	359	0.188	0.054	0.212	0.135	0.280	0.093--0.284
	VW_2	365	0.194	0.044	0.212	0.157	0.280	0.112--0.264
	VW_3	365	0.212	0.040	0.227	0.194	0.280	0.129--0.279
CARIMAGUA	**VW_1**	415	0.276	0.056	0.301	0.234	0.367	0.149--0.367
	VW_2	415	0.276	0.042	0.296	0.242	0.365	0.172--0.365
	VW_3	415	0.285	0.042	0.303	0.249	0.375	0.174--0.375
LALIBERTAD	**VW_1**	528	0.215	0.048	0.231	0.194	0.290	0.102--0.290
	VW_2	528	0.221	0.040	0.231	0.201	0.288	0.122--0.288
	VW_3	528	0.252	0.033	0.262	0.237	0.302	0.167--0.302
MAVALLE	**VW_1**	92	0.171	0.040	0.177	0.135	0.239	0.097--0.239
	VW_2	92	0.263	0.018	0.268	0.251	0.293	0.215--0.293
	VW_3	92	0.279	0.011	0.279	0.269	0.308	0.258--0.308
NUBES	**VW_1**	413	0.215	0.035	0.223	0.202	0.275	0.114--0.275
	VW_2	413	0.193	0.036	0.202	0.180	0.256	0.095--0.256
	VW_3	413	0.222	0.042	0.237	0.209	0.273	0.111--0.273
SHEEFER	**VW_1**	224	0.294	0.026	0.302	0.288	0.329	0.234--0.329
	VW_2	414	0.278	0.034	0.288	0.255	0.329	0.180--0.329
	VW_3	414	0.280	0.042	0.293	0.258	0.340	0.163--0.340
TALUMA	**VW_1**	528	0.233	0.039	0.247	0.219	0.289	0.103--0.289
	VW_2	528	0.251	0.034	0.263	0.236	0.304	0.130--0.304
	VW_3	528	0.243	0.029	0.251	0.228	0.297	0.152--0.297
VEGAS	**VW_1**	--	--	--	--	--	--	--
	VW_2	366	0.317	0.028	0.324	0.299	0.357	-0.006--0.357
	VW_3	366	0.327	0.032	0.337	0.302	0.374	-0.003--0.374
YUCAO	**VW_1**	412	0.196	0.022	0.196	0.183	0.267	0.142--0.267
	VW_2	412	0.177	0.028	0.179	0.169	0.252	0.085--0.252
	VW_3	412	0.149	0.032	0.152	0.140	0.233	0.061--0.233

Nota: DE: Desviación estandar. Q1: Cuartil 1. Q3: Cuartil 3. Mín: Mínimo. Máx: Máximo. ‘‘--’’: ausencia de eventos registrados.

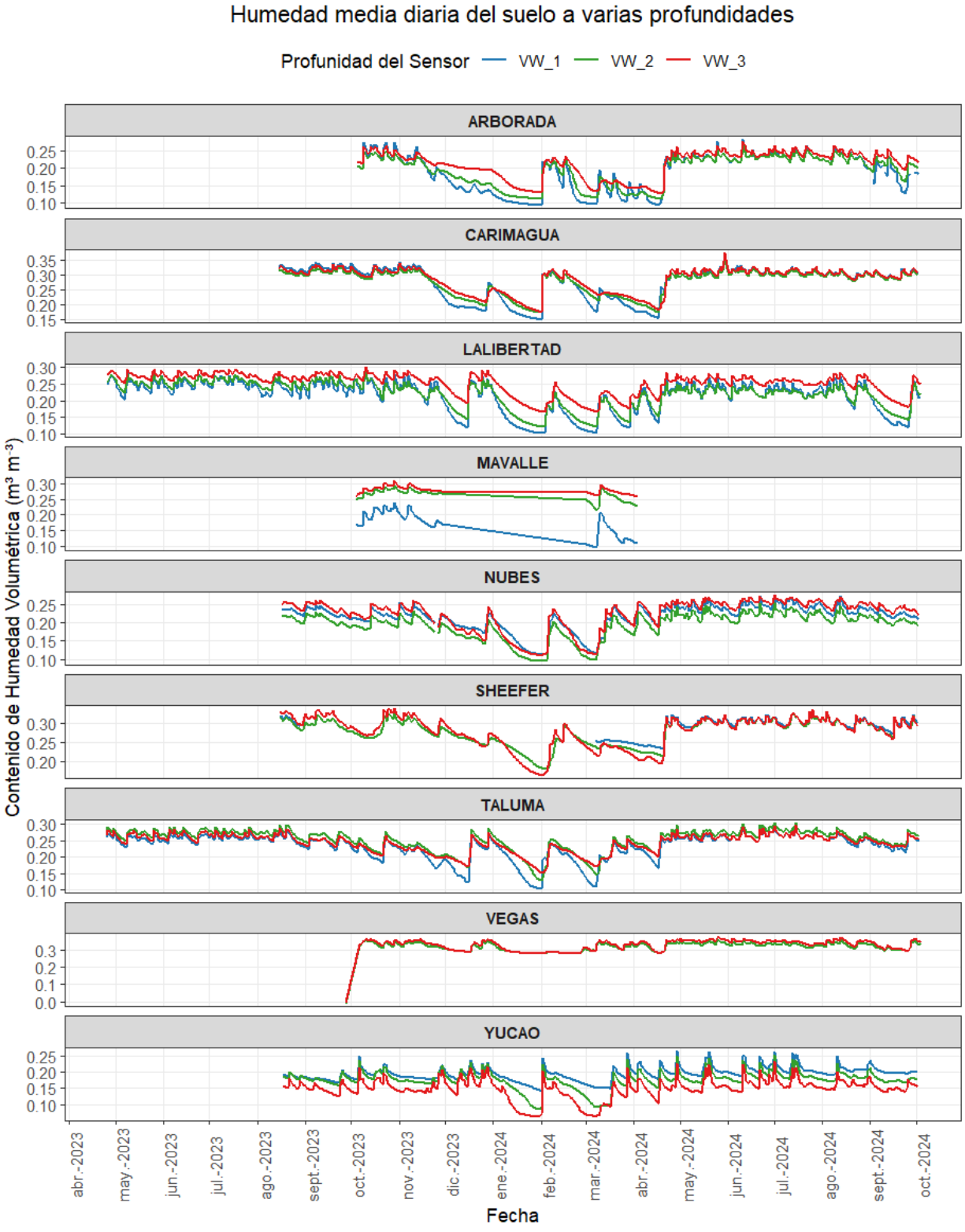

Figura **5-4**: Humedad media diaria en sitios instrumentados.

Durante el periodo diciembre de 2023 a marzo de 2024 se registraron descensos generalizados en la humedad

en la mayoría de los sitios, con distinta magnitud según la profundidad y localización. Posteriormente, a partir de abril de 2024, se observó una recuperación progresiva de la humedad en todos los perfiles. SHEEFER y VEGAS presentaron oscilaciones de menor amplitud y mayor estabilidad a lo largo del periodo evaluado. En contraste, LALIBERTAD, TALUMA y YUCAO mostraron eventos de descenso más pronunciados, seguidos de incrementos abruptos posteriores.

En términos verticales, los sensores superficiales (VW_1) evidenciaron mayor amplitud de variación y respuestas más rápidas a los cambios temporales (Tabla **5-10**). Las capas profundas (VW_3) mostraron mayor inercia hídrica y menor variabilidad relativa.

El gradiente vertical promedio entre VW_1 y VW_3 osciló entre 0.01 y 0.07 m^3 m^{-3}, dependiendo del sitio. Los gradientes más marcados se observaron en CARIMAGUA, mientras que SHEEFER y VEGAS presentaron diferencias reducidas entre profundidades intermedia y profunda.

Para comprobar dichas afirmaciones se realizó un análisis estadístico (Apéndice B) que permitió establecer los siguientes resultados:

- Existe una diferenciación espacial significativa en el contenido medio de humedad del suelo. (Análisis de comparación entre sitios)
- La profundidad influye en la magnitud y estabilidad del contenido de humedad. (Comparación entre profundidades)
- La variabilidad temporal fue mayor en las capas superficiales (Comparación entre profundidades).
- El periodo comprendido entre enero, marzo y abril registró los valores mínimos de humedad (Análisis trimestral de datos de humedad).

La variación espacial horizontal (distintos sitios) y vertical (sensores a diferente profundidad) instalados en los perfiles, fue dada particularmente por las propiedades físicas como lo indicaron los resultados de la Tabla **5-10** y Tabla **5-7**. A medida que se profundiza en el perfil, la cantidad de arcilla generalmente va aumentado, por lo cual las propiedades del almacenamiento de agua se van modificando por la bimodalidad de poros en este tipo de suelos (Zhou et al., 2017); asi mismo otras propiedades se van afectando como es la densidad aparente, lo cual son relativamente altas en los sitios estudiados (valores mayores a 1.3 [g cm^{-3}]).

Con respecto a la variación temporal de la humedad del suelo en las capas superficiales, Los resultados obtenidos en la Altillanura mostraron que el cambio fue significativamente mayor, disminuyendo progresivamente con la profundidad (Apéndice B). Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura internacional, donde se establece que las capas superficiales son altamente dinámicas debido a la exposición directa a forzamientos meteorológicos como la precipitación y la evapotranspiración (Biswas et al., 2012, Carranza et al., 2018). Mientras que la superficie responde de forma inmediata a los eventos climáticos, las capas profundas exhiben una inercia hidrológica o capacidad de amortiguamiento, manteniendo niveles de humedad más estables a lo largo del tiempo (Biswas et al., 2012, Gao et al., 2015). Esta diferenciación fue crítica en suelos de la Altillanura, donde la rápida respuesta superficial puede inducir condiciones de estrés hídrico temporal a pesar de la existencia de reservas de humedad en el subsuelo (Yao & Zhao, 2019, Yu et al., 2021)

En adición, la marcada dinámica de la humedad en los primeros 60 cm de profundidad está intrínsecamente relacionada con la actividad biológica concentrada en esta zona, conocida como la zona radicular activa (Gao et al., 2015). En los Oxisoles de la Altillanura, las raíces de la vegetación (tanto de sabana nativa como de pasturas introducidas o cultivos) ejercen una presión constante sobre el balance hídrico mediante la extracción rápida de agua para la transpiración, lo que intensifica las fluctuaciones temporales de humedad en comparación con el subsuelo, donde la densidad de raíces es menor (Amézquita et al., 2004).

De maneara similar, la presencia de la macrofauna del suelo, como lombrices y termitas, junto con la descomposición de raíces, promueve la formación de una red de bioporos y macroporos que facilita una infiltración rápida pero variable durante los eventos de precipitación (Boizard et al., 2016, Sanabria-Blandón, 2017). Estudios específicos en la región del Meta han demostrado que sistemas con mayor biodiversidad y contenido de carbono orgánico presentan una estructura de poros más estable, lo que modula la velocidad con la que la superficie responde a los ciclos de humedecimiento y secado (Moreno-Conn et al., 2022, Visconti-Moreno & Valenzuela-Balcázar, 2022) (Apéndice A, Morfología de perfiles de suelos)

Conforme a los balances hídricos de cada sitio (Apéndice E) y acorde con Florian-Vergara et al. (2021), los valores mínimos de humedad durante los meses de enero, marzo y abril es coherente con el régimen de lluvias unimodal de la Altillanura, donde la estación seca (diciembre-marzo) agota las reservas hídricas del perfil. La persistencia de valores bajos en abril refleja el déficit acumulado y la lenta respuesta de recarga de la SCH al inicio de la temporada de lluvias (Yu et al., 2021, Zounemat-Kermani et al., 2021). Esta demora en la recuperación hídrica se fundamenta en la dependencia rezagada entre la humedad superficial y la subsuperficial, donde el frente de humedad tarda en penetrar hacia la SCH debido a que los horizontes superiores deben alcanzar primero un umbral de saturación tras la desecación extrema del periodo seco (Carranza et al., 2018). En suelos de la Altillanura con horizontes restrictivos o cambios texturales abruptos, esta recarga se ve aún más limitada, ya que la baja conductividad hidráulica vertical actúa como una barrera que reduce el volumen de poros activos para el almacenamiento hídrico (Malagón Castro, 2003). Para los cultivos, esto puede generar un estado de *sequía edáfica* persistente durante la fase de siembra; a pesar de la presencia de lluvias en abril, la baja disponibilidad de agua en la SCH fuerza a las raíces a operar bajo potenciales matriciales críticos, lo que limita el establecimiento inicial y compromete la productividad si no se garantiza una reposición efectiva del perfil profundo (Carranza et al., 2018, Drohan et al., 2020).

5.2.2 Clasificación del régimen de humedad del suelo

La clasificación puntual del RH se realizó a partir de los registros continuos de humedad volumétrica del suelo, obtenidos en los sitios instrumentados durante 360 días (días compatibles conforme a la TS y el modelo de Newhall), comprendidas entre octubre 10 del 2023 a octubre 4 de 2024.

La Tabla **5-11** resume para cada sitio, la dinámica temporal de la humedad. En ella se reporta la frecuencia y la duración de los periodos consecutivos en los que el suelo permaneció en las siguientes condiciones: seco ($\leq$ 1500 kPa), húmedo ($>$ 1500 y $\leq$ 33 kPa) o saturado ($>$ 33 kPa). Con base en la serie temporal diaria, se contabilizó los días consecutivos según la condición de humedad, siguiendo las reglas taxonómicas descritas en la Soil Survey Staff (2022) (Tabla **3-3**).

En los sitios clasificados como RH ústico (ARBORADA, CARIMAGUA, NUBES y SHEEFER), predominó una alta proporción anual de días en condición seca en al menos una de las profundidades monitoreadas. En ARBORADA, la condición seca representó aproximadamente el 100 % del periodo en VW_2 (1.00) y el 98 % en VW_1 (0.98), mientras que en VW_3 se distribuyó entre seco (0.67) y húmedo (0.33). NUBES mostró un patrón similar, con proporciones cercanas a 0.99 en condición seca para VW_1 y VW_2, mientras que en VW_3 predominó la condición húmeda (0.60).

CARIMAGUA evidenció una marcada diferenciación vertical: en VW_3 la condición seca alcanzó una proporción de 0.99, mientras que en las capas superficiales se observó mayor alternancia, con predominio de condición húmeda en VW_1 (0.59) y VW_2 (0.68). SHEEFER presentó proporciones de días secos entre 0.58 y 0.77 en las tres profundidades, con alternancia moderada hacia condición húmeda y ausencia de saturación registrada.

Tabla **5-11**: Clasificación de régimen de humedad por sitio

Sitio	Sensor	Seco	Húmedo	Saturado	RH
ARBORADA	VW_1	$n = 6$, 58.7 (4--244) [0.98]	$n = 5$, 1.4 (1--2) [0.02]	--	Ústico
	VW_2	$n = 1$, 359 (359--359) [1.00]	--	--	
	VW_3	$n = 25$, 9.6 (1--163) [0.67]	$n = 25$, 4.8 (1--12) [0.33]	--	
CARIMAGUA	VW_1	$n = 5$, 23.4 (1--39) [0.33]	$n = 18$, 11.9 (1--66) [0.59]	$n = 12$, 2.2 (1--9) [0.07]	Ústico
	VW_2	$n = 3$, 37.3 (29--53) [0.31]	$n = 6$, 40.5 (5--124) [0.68]	$n = 2$, 1.5 (1--2) [0.01]	
	VW_3	$n = 1$, 358 (358--358) [0.99]	--	--	
LALIBERTAD	VW_1	$n = 10$, 13 (1--32) [0.36]	$n = 11$, 20.9 (1--123) [0.64]	--	Údico
	VW_2	$n = 8$, 14.2 (1--32) [0.32]	$n = 9$, 27.3 (2--125) [0.68]	--	
	VW_3	$n = 4$, 10.5 (6--16) [0.12]	$n = 18$, 16.4 (1--75) [0.82]	$n = 14$, 1.6 (1--5) [0.06]	
NUBES	VW_1	$n = 3$, 119 (45--218) [0.99]	$n = 2$, 1 (1--1) [0.01]	--	Ústico
	VW_2	$n = 2$, 179 (45--313) [0.99]	$n = 1$, 1 (1--1) [0.01]	--	
	VW_3	$n = 11$, 12.9 (2--40) [0.39]	$n = 10$, 21.7 (1--150) [0.60]	--	
SHEEFER	VW_1	$n = 1$, 210 (210--210) [0.58]	$n = 1$, 148 (148--148) [0.41]	--	Ústico
	VW_2	$n = 26$, 10.7 (1--161) [0.77]	$n = 25$, 3.2 (1--7) [0.22]	--	
	VW_3	$n = 26$, 10.2 (1--144) [0.74]	$n = 25$, 3.7 (1--25) [0.26]	--	
TALUMA	VW_1	$n = 8$, 13.6 (1--30) [0.30]	$n = 28$, 5.8 (1--27) [0.45]	$n = 20$, 4.3 (1--27) [0.24]	Údico
	VW_2	$n = 5$, 17.6 (5--27) [0.24]	$n = 21$, 7.4 (1--26) [0.43]	$n = 16$, 7.2 (1--42) [0.32]	
	VW_3	$n = 7$, 14.3 (1--30) [0.28]	$n = 26$, 8.4 (1--42) [0.61]	$n = 18$, 2.3 (1--7) [0.11]	
VEGAS	VW_1	--	--	--	Údico
	VW_2	$n = 7$, 11.3 (2--51) [0.22]	$n = 28$, 4.6 (1--18) [0.36]	$n = 22$, 6.9 (1--23) [0.42]	
	VW_3	$n = 6$, 12.3 (1--49) [0.21]	$n = 19$, 3.9 (1--13) [0.21]	$n = 15$, 14.1 (1--91) [0.59]	
YUCAO	VW_1	--	$n = 16$, 20.6 (2--67) [0.92]	$n = 15$, 1.9 (1--5) [0.08]	Údico
	VW_2	$n = 2$, 18.5 (16--21) [0.10]	$n = 15$, 20.5 (1--67) [0.86]	$n = 12$, 1.2 (1--2) [0.04]	
	VW_3	$n = 17$, 5.9 (1--34) [0.28]	$n = 20$, 12.8 (2--70) [0.71]	$n = 2$, 1 (1--1) [0.01]	

Nota: Los valores corresponden a n: número de eventos continuos, días promedio y días consecutivos (mínimo de días -- máximo días). Entre corchetes: proporción anual aproximada de días en cada estado (fracción respecto a 360 días).''--'' indica ausencia de eventos registrados.

En los sitios clasificados como régimen údico (LALIBERTAD, TALUMA, VEGAS y YUCAO), se registró mayor proporción anual de días en condición húmeda y, en varios casos, presencia significativa de saturación. LALIBERTAD presentó predominio húmedo en todas las profundidades, con proporciones entre 0.64 y 0.82, y baja ocurrencia de saturación (0.06 en VW_3). TALUMA mostró una distribución más equilibrada entre los tres estados, con proporciones de condición saturada entre 0.11 y 0.32, siendo VW_2 la capa con mayor persistencia de saturación (0.32).

VEGAS destacó por la mayor proporción anual de días en condición saturada, particularmente en VW_3 (0.59), seguida por VW_2 (0.42), superando en ambas profundidades la proporción de días secos. En YUCAO predominó la condición húmeda en las tres profundidades (0.71-0.92), con baja proporción de saturación ($\leq$0.08) y presencia limitada de condición seca en superficie.

En términos generales, las proporciones anuales confirman una diferenciación clara entre sitios con predominio de condiciones secas persistentes en el perfil y aquellos con mayor recurrencia de condiciones húmedas o saturadas. Asimismo, se evidencian contrastes verticales significativos en varios sitios, particularmente en CARIMAGUA y VEGAS, donde la distribución de estados hídricos varía marcadamente entre profundidades.

En conjunto, la clasificación del RH, derivada de datos observados proporcionó una referencia empírica para la evaluación posterior del desempeño del modelo de Newhall.

5.2.2.1 Variación del límite de condición de humedad: seco

Con el fin de evaluar de forma global, si al diminuir la CAD puede aumentar las condiciones secas, se modificó el valor del PMP (Límite seco), reduciendola al 50 % (Ecuacion 5-1).

$$\text{Límite Seco} = \text{CC} - 0{,}5\,\big(\text{CC} - \text{PMP}\big) \tag{5-1}$$

Los resultados de la Tabla **5-12** que en ARBORADA hay un predominio de la condición seca. En VW_2 la proporción anual alcanzó 1.00, indicando permanencia prácticamente continua en esta condición. En VW_1 y VW_3 las proporciones fueron igualmente altas (0.98 y 0.99, respectivamente), con presencia marginal de días en condición húmeda.

Tabla **5-12**: Clasificación del regímen de humedad por sitio al 50 % de la CAD

Sitio	Sensor	Seco	Húmedo	Saturado	RH
ARBORADA	VW_1	$n = 5$, 70.6 (4--315) [0.98]	$n = 4$, 1.5 (1--2) [0.02]	--	Ústico
	VW_2	$n = 1$, 359 (359--359) [1.00]	--	--	
	VW_3	$n = 2$, 179 (114--244) [0.99]	$n = 1$, 1 (1--1) [0.00]	--	
CARIMAGUA	VW_1	$n = 8$, 18.8 (1--73) [0.42]	$n = 21$, 8.7 (1--24) [0.51]	$n = 12$, 2.2 (1--9) [0.07]	Ústico
	VW_2	$n = 10$, 16 (1--74) [0.44]	$n = 13$, 15 (1--79) [0.54]	$n = 2$, 1.5 (1--2) [0.01]	
	VW_3	$n = 1$, 358 (358--358) [0.99]	--	--	
LALIBERTAD	VW_1	$n = 34$, 7.4 (1--96) [0.70]	$n = 34$, 3.1 (1--11) [0.29]	--	Ústico
	VW_2	$n = 28$, 10.3 (1--112) [0.80]	$n = 28$, 2.6 (1--8) [0.20]	--	
	VW_3	$n = 6$, 21.7 (1--53) [0.36]	$n = 20$, 10.4 (1--75) [0.58]	$n = 14$, 1.6 (1--5) [0.06]	
NUBES	VW_1	$n = 2$, 179 (45--313) [0.99]	$n = 1$, 1 (1--1) [0.00]	--	Ústico
	VW_2	$n = 2$, 179 (45--313) [0.99]	$n = 1$, 1 (1--1) [0.00]	--	
	VW_3	$n = 2$, 179 (45--313) [0.99]	$n = 1$, 1 (1--1) [0.00]	--	
SHEEFER	VW_1	$n = 1$, 210 (210--210) [0.58]	$n = 1$, 148 (148--148) [0.41]	--	Ústico
	VW_2	$n = 1$, 358 (358--358) [0.99]	--	--	
	VW_3	$n = 1$, 358 (358--358) [0.99]	--	--	
TALUMA	VW_1	$n = 11$, 16.3 (1--38) [0.50]	$n = 27$, 3.4 (1--8) [0.26]	$n = 20$, 4.3 (1--27) [0.24]	Ústico
	VW_2	$n = 9$, 17.4 (2--36) [0.44]	$n = 22$, 3.9 (1--13) [0.24]	$n = 16$, 7.2 (1--42) [0.32]	
	VW_3	$n = 9$, 21.2 (2--75) [0.53]	$n = 24$, 5.3 (1--13) [0.35]	$n = 18$, 2.3 (1--7) [0.12]	
VEGAS	VW_1	--	--	--	Údico
	VW_2	$n = 9$, 14.7 (1--64) [0.37]	$n = 27$, 2.9 (1--10) [0.22]	$n = 22$, 6.9 (1--23) [0.42]	
	VW_3	$n = 7$, 15 (3--54) [0.29]	$n = 19$, 2.3 (1--7) [0.12]	$n = 15$, 14.1 (1--91) [0.59]	
YUCAO	VW_1	$n = 7$, 11.9 (1--30) [0.23]	$n = 20$, 12.3 (2--31) [0.68]	$n = 15$, 1.9 (1--5) [0.08]	Ústico
	VW_2	$n = 20$, 11.6 (1--37) [0.64]	$n = 27$, 4.2 (1--12) [0.32]	$n = 12$, 1.2 (1--2) [0.04]	
	VW_3	$n = 20$, 16.1 (1--54) [0.89]	$n = 18$, 1.8 (1--4) [0.09]	$n = 2$, 1 (1--1) [0.01]	

Nota: Los valores corresponden a n: número de eventos continuos, días promedio y días consecutivos (mínimo de días -- máximo días). Entre corchetes: proporción anual aproximada de días en cada estado (fracción respecto a 360 días).''--'' indica ausencia de eventos registrados.

CARIMAGUA mostró un comportamiento estratificado. En VW_3 predominó la condición seca (0.99), mientras que en las capas superficiales (VW_1 y VW_2) se registró una distribución más equilibrada entre condición seca (0.42-0.44) y húmeda (0.51-0.54), con baja proporción de saturación ($\leq$0.07).

En LALIBERTAD se evidenció predominio de condición seca en las capas superficiales (0.70-0.80), mientras que en VW_3 aumentó la proporción de condición húmeda (0.58) y se registró una fracción reducida de saturación (0.06), indicando mayor alternancia vertical.

NUBES presentó proporciones cercanas a 1.00 en condición seca en las tres profundidades, con presencia prácticamente nula de estados húmedos o saturados.

SHEEFER mostró predominio de condición seca en VW_2 y VW_3 (0.99), mientras que en VW_1 se registró alternancia entre condición seca (0.58) y húmeda (0.41), sin eventos saturados.

TALUMA presentó una distribución más balanceada entre estados. En las tres profundidades la condición seca representó aproximadamente la mitad del periodo (0.44-0.53), acompañada de proporciones relevantes de condición húmeda (0.24-0.35) y saturada (0.12-0.32), siendo VW_2 la profundidad con mayor persistencia de saturación.

VEGAS evidenció mayor proporción de días en condición saturada en VW_3 (0.59) y VW_2 (0.42), superando en ambas profundidades la proporción de condición seca. No se registraron datos para VW_1.

YUCAO mostró predominio de condición húmeda en VW_1 (0.68) y presencia relevante de condición seca en VW_2 y VW_3 (0.64 y 0.89, respectivamente), acompañada de baja proporción de saturación ($\leq$0.08).

En síntesis, las proporciones anuales evidenciaron diferencias en la persistencia de los estados de humedad entre sitios y profundidades, con una tendencia hacia estados más secos (de údico a ústico), excepto en VEGAS. Este comportamiento se explica porque este sitio se ubica sobre una terraza baja, con condiciones de anegamiento frecuentes.

En general, los resultados confirman una sensibilidad que pueden tener las condiciones de humedad con los cambios de la magnitud a PMP en la SCH. De esta manera la CAD se ve modificada con el cambiom dobde en los Oxisoles y Ultisoles de la Altillanura, la dominancia de una mineralogía oxídico-caolinítica genera una estructura física particular con una alta proporción de microporos, lo que reduce significativamente la capacidad de almacenamiento efectivo de agua (Camacho-Umaña et al., 2025, Zounemat-Kermani et al., 2021). Esta restricción en la CAD compromete el balance hídrico del perfil, ya que el suelo no logra actuar como un reservorio suficiente para amortiguar el déficit hídrico durante la estación seca, permitiendo que las reservas se agoten rápidamente incluso tras eventos de precipitación significativos (Amézquita et al., 2004, Zounemat-Kermani et al., 2021).

5.2.3 Simulación del régimen de humedad del suelo

Con el propósito de simular el comportamiento del RH del suelo bajo condiciones edafoclimáticas locales, se aplicó el modelo de Newhall a escala puntual para cada uno de los sitios instrumentados. La simulación se realizó utilizando como entrada los datos de CAD de la SCH y las series climáticas anuales derivadas para cada punto, permitiendo simular la dinámica del almacenamiento del contenido de agua en la SCH y la clasificación resultante del RH conforme a los criterios taxonómicos establecidos por la Soil Survey Staff (2022).

5.2.3.1 Capacidad de agua disponible

Como insumo para el modelo de Newhall, se ponderó la CAD en la SCH para los 157 perfiles. Los resultados se muestran para los sitios instrumentados en la Tabla **5-13** y para todos los perfiles en el Apéndice D.

La estimación de la CAD en la SCH evidenció variabilidad entre sitios tanto en términos del espesor evaluado como en la cantidad de almacenamiento hídrico por unidad de profundidad.

El espesor de la SCH presentó un rango amplio, desde 47.33 cm en NUBES hasta 134.99 cm en TALUMA.

Tabla **5-13**: Capacidad de agua disponible en la SCH por sitio.

Sitio	LS [cm]	LI [cm]	Espesor [cm]	HZE en SCH	CAD [mm/cm]	CAD SCH [mm]
ARBORADA	42.45	160.52	118.06	1.00	0.28	32.47
CARIMAGUA	32.91	90.86	57.95	2.00	0.56	32.18
LALIBERTAD	29.19	80.78	51.59	3.00	0.56	28.77
MAVALLE	53.83	187.99	134.16	1.00	0.24	32.47
NUBES	31.48	78.80	47.33	2.00	0.67	31.72
SHEEFER	31.88	85.61	53.73	2.00	0.60	32.14
TALUMA	57.18	192.18	134.99	2.00	0.23	30.81
VEGAS	66.93	116.93	49.99	1.00	0.63	31.45
YUCAO	28.79	86.91	58.12	1.00	0.53	30.86

Los mayores espesores se registraron en TALUMA (134.99 cm) y MAVALLE (134.16 cm), seguidos por ARBORADA (118.06 cm). En contraste, NUBES (47.33 cm), VEGAS (49.99 cm) y LALIBERTAD (51.59 cm) mostraron las menores extensiones verticales dentro del intervalo evaluado.

En términos de capacidad específica de almacenamiento, expresada como láimna por centímetro de profunidad (mm / cm), los valores oscilaron entre 0.23 mm/cm (TALUMA) y 0.67 mm/cm (NUBES). Los mayores valores de CAD por unidad de espesor se registraron en NUBES (0.67 mm/cm), VEGAS (0.63 mm/cm) y SHEEFER (0.60 mm/cm), mientras que TALUMA (0.23 mm/cm) y MAVALLE (0.24 mm/cm) presentaron los menores valores.

A pesar de las diferencias en espesor y en capacidad específica, la CAD total en la SCH mostró una notable convergencia entre sitios, con valores comprendidos entre 28.77 mm (LALIBERTAD) y 32.47 mm (ARBORADA y MAVALLE). La mayoría de los sitios presentaron valores próximos a 31-32 mm, evidenciando una relativa homogeneidad en el almacenamiento total de agua disponible dentro de la sección de control.

Este comportamiento refleja combinaciones contrastantes entre espesor y capacidad específica: sitios con mayor espesor tienden a presentar menor CAD por unidad de profundidad, mientras que sitios con menor espesor muestran valores más altos de CAD por centímetro, resultando en magnitudes totales comparables.

De acuerdo con lo anterior, los resultados indicaron que, aunque la arquitectura vertical de la SCH y la capacidad específica de retención hídrica varían entre sitios, el almacenamiento total potencial de agua disponible dentro de la sección de control presenta una variabilidad reducida a escala puntual aproximado a los 40 mm.

Para los 157 perfiles, se obvieron las estadisticas de la Tabla **5-14**:

Tabla **5-14**: Estadísticos de la CAD en los perfiles

Característica	n	Media ± DE	Mediana (Q1--Q3)	Mín--Máx
CAD total del perfil (mm)	157	37.2 ± 8.4	35.4 (32.2--39.1)	27--78.9
CAD específica (mm/cm)	157	1.33 ± 0.71	1.18 (0.85--1.61)	0--4.29

Nota: DE: desviación estándar; Q1: primer cuartil; Q3: tercer cuartil.

De manera análoga, los resultados obtenidos para los nueve sitios instrumentados mostraron que, aunque existen diferencias en el espesor de la SCH y en la capacidad específica de almacenamiento del agua, la CAD total presenta una variabilidad reducida a escala puntual. Los valores de CAD total se concentraron en un intervalo estrecho (≈29-32 mm), indicando una magnitud relativamente homogénea del almacenamiento potencial de agua dentro de la sección de control evaluada.

La comparación con el conjunto global de 157 perfiles permitió situar estos resultados en un contexto regional más amplio. Los sitios analizados se ubican en el segmento inferior de la distribución regional de CAD total y presentan valores de CAD específica consistentemente menores que la media global. No obstante, permanecen dentro del rango observado para el conjunto completo de perfiles.

Esta convergencia en la magnitud total de agua disponible, pese a diferencias en arquitectura vertical y capacidad específica, configura un marco físico relativamente comparable entre los sitios instrumentados. En consecuencia, las diferencias que se observen en la dinámica del régimen de humedad no pueden atribuirse únicamente a variaciones sustanciales en el almacenamiento potencial total, sino que deberán analizarse a la luz de la interacción entre capacidad de almacenamiento, profundidad efectiva del perfil y forzantes climáticos.

5.2.3.2 Modelación de los RH con el Modelo de Newhall

Se ejecutó el Modelo de Newhall conforme a la metodología; los resultados completos de las ejecuciones se adjuntan como reporte en formato PDF, en el Apéndice E. Cada reporte contiene: información del sitio (Tabla **5-15**), resumen ejecutivo (Tabla **5-16**), datos climáticos mensuales (Tabla **5-17**), climograma de preciptiación versus temperatura superficial y balance hídrico mensual (Figura **5-5**), resumen de indicadores del modelo (Tabla **5-18**).

Tabla **5-15**: Informe por sitio del reporte del modelo de Newhall para ARBORADA

Campo	**Descripción**
Informe	Simulación Newhall
Modelo	Régimen de Humedad del Suelo
Estación	ARBORADA
Ubicación	Lat 4.1704 °; Lon −72.5943 °
País y elevación	Col; 300 m
Período de datos	1991--2020

Tabla **5-16**: Resumen ejecutivo del reporte del modelo de Newhall para ARBORADA

Variable	**Valor**
Régimen de humedad	Ustic
Régimen de temperatura	Isohyperthermic
Precipitación anual [mm]	2572.6
Balance hídrico anual [mm]	1111.8
Capacidad de retención [mm]	32.5
Días secos acumulados	73
Días húmedos acumulados	255

Interpretación del reporte: El modelo Newhall indica un régimen de humedad *ustic* con temperatura *isohyperthermic*. La capacidad de retención de agua del suelo es de 32.5 mm y el balance hídrico anual es positivo, con 1111.8 mm.

Los resultados consolidados de las diferentes ejecuciones del modelo por sitio se presentan en la Tabla **5-19**. Las simulaciones se realizaron bajo tres periodos de 12 meses: (i) octubre del 2023 a septiembre del 2024 (ii) enero a diciembre para 2023 y 2024 (iii) Normal Climática 1991-2020.

Como insumos climáticos se emplearon los registros de precipitación y temperatura descritos en la Sección 4.2.1.3, mientras que los parámetros edáficos correspondieron a la CAD estimada para la Sección de Control de Humedad SCH en cada sitio.

Tabla **5-17**: Datos climáticos mensuales del reporte del modelo de Newhall para el sitio ARBORADA.

Mes	P [mm]	T [°C]	ETP [mm]	Balance [mm]
Ene	22.5	25.9	129.7	-107.3
Feb	45.3	26.5	126.9	-81.6
Mar	121.2	26.4	138.4	-17.2
Abr	310.5	25.8	125.0	185.5
May	381.1	25.5	122.5	258.6
Jun	379.0	25.0	111.0	268.0
Jul	316.2	24.4	106.4	209.8
Ago	264.9	24.9	112.8	152.0
Sep	248.3	25.3	116.0	132.3
Oct	257.9	25.7	126.9	131.0
Nov	170.1	25.7	122.2	47.8
Dic	55.7	25.5	122.9	-67.2
Anual	**2572.6**	**25.6**	**1460.8**	**1111.8**

Nota: P: precipitación, T: Temperatura del aire, ETP: Evapotranspiración potencial.

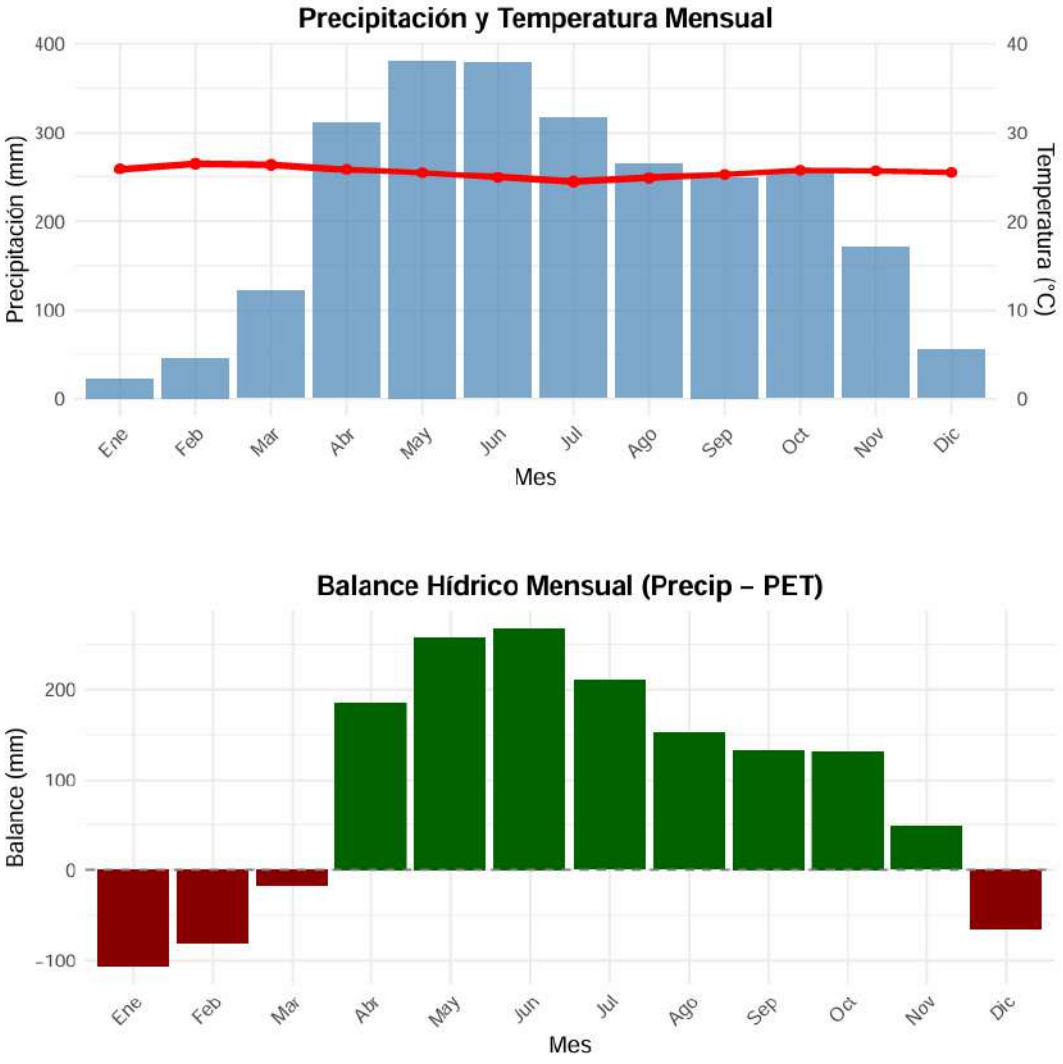

Figura **5-5**: Climograma de precipitación y temperatura mensual, y balance hídrico mensual para ARBORADA

Tabla **5-18**: Resumen de indicadores del reporte del modelo de Newhall para ARBORADA

Categoría	Indicador
Balances hídricos	Balance anual: 1111.8 mm
Balances hídricos	Balance estival: 629.8 mm
Balances hídricos	Precipitación anual: 2572.6 mm
Balances hídricos	Capacidad de retención: 32.5 mm
Días acumulados	Días secos: 73
Días acumulados	Días húmedos: 255
Días acumulados	Días secos/húmedos: 32
Días acumulados	Días secos (>5 °C): 73
Días acumulados	Días húmedos (>5 °C): 255
Días acumulados	Días secos/húmedos (>5 °C): 32
Días consecutivos	Días húmedos consecutivos: 263
Días consecutivos	Días húmedos consecutivos (>8 °C): 263
Indicadores estacionales	Días secos post--solsticio de verano: 0
Indicadores estacionales	Días húmedos post--solsticio de invierno: 22

Con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo frente a variaciones en la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, se realizaron simulaciones modificando la lámina total de la CAD en cuatro láminas (mm): 40, 100, 150 y 200. El valor de 40 mm corresponde aproximadamente a la media observada de la CAD en la SCH de los 157 perfiles (Tabla **5-14**), mientras que 200 mm representa el valor por defecto sugerido por el modelo de Newhall. Los valores intermedios (100 mm y 150 mm) permitieron explorar comportamientos transicionales entre condiciones de almacenamiento moderado y alto. Esta estrategia permitió analizar la respuesta del RH simulado ante incrementos progresivos en la CAD, identificando el grado de estabilidad o variabilidad del régimen asignado en función de las condiciones edáficas asumidas.

Tabla **5-19**: Clasificación del régimen de humedad por sitio con el modelo de Newhall.

Sitio	RH		CAD SCH			CAD Constante			
	Medido	Modelado	2023	2024	NC	40	100	150	200
ARBORADA	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Údico*	Údico*
CARIMAGUA	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Ústico	Údico*
LALIBERTAD	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*
MAVALLE	Sin dato	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Ústico	Ústico
NUBES	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Údico*	Údico*
SHEEFER	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Ústico	Údico*
TALUMA	Údico*	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Ústico	Ústico
VEGAS	Údico*	Ústico	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*	Údico*
YUCAO	Údico*	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Ústico	Údico*	Ústico	Ústico

Sensibilidad frente a la variación temporal de datos

Los resultados para los datos de octubre de 2023 a septiembre de 2024, mostraron que el modelo clasificó en ústico 8 de 9 sitios, siendo LALIBERTAD el único clasificado como Údico. MAVALLE no presentó clasificación observada de referencia debido a la falta de datos observados, pero con la simulación mostró como ústico. En comparación con los RH údico de TALUMA, VEGAS y YUCAO, el modelo los clasificó como ústicos. Esto puede explicarse debido a las propiedades diferenciantes que tuvo cada sitio.

Para el sitio TALUMA, las densidades aparentes de los horizontes fueron superiores a 1.5 $g\ cm^{-3}$. Adicionalmente, presenta una textura fina, con contenidos de arcilla mayores al 42 %. Estas condiciones físicas constituyen un factor diferenciador en el balance hídrico cuando se compara el modelo de Newhall model

con las observaciones de campo. Esto se debe a que el modelo considera principalmente la CAD de la SCH, la cual fue de 30.81 mm, valor similar al de los demás sitios, sin incorporar explícitamente el efecto de la densidad aparente ni de la estructura del suelo.

En el caso de VEGAS, aunque la CAD fue comparable (31.45 mm), este sitio se localiza en una posición de terraza baja, lo que favorece la ocurrencia de inundaciones o encharcamientos frecuentes. Esta condición hidromorfológica introduce un control adicional sobre la dinámica de humedad que no es capturado por el modelo.

En contraste, el sitio VEGAS presentó contenidos de arena superiores al 67 %, con un TP franco grueso y densidades aparentes mayores a 1.6 $g\ cm^{-3}$. Bajo estas condiciones, sería esperable la ocurrencia de un régimen de humedad ústico. Sin embargo, los resultados del modelo mostraron údico, lo que sugiere una fuerte influencia de las condiciones de precipitación, las cuales permitieron la recarga continua de humedad durante el periodo de medición.

En conjunto, estos resultados evidencian que el modelo de Newhall, al depender principalmente de variables climáticas, no incorpora de manera explícita las propiedades físicas del suelo más allá de la CAD. En consecuencia, al aplicarse en sitios con balances climáticos y valores de CAD similares, los regímenes estimados tienden a ser homogéneos, como se observó en la investgación, lo cual contrasta con los resultados derivados de los datos de referencia. Esta limitación reduce la capacidad del modelo para representar adecuadamente la variabilidad hidro pedológica en suelos con propiedades altamente contrastantes.

Para las modelaciones anuales correspondientes a los años 2023 y 2024 (enero-diciembre), siete de los nueve sitios fueron clasificados bajo un régimen de humedad ústico. En contraste, únicamente los sitios LALIBERTAD y VEGAS mantuvieron consistentemente un régimen údico en ambos años.

Estos resultados evidencian una sensibilidad del modelo frente a la selección del periodo temporal utilizado para la anualidad, lo cual sugiere que la delimitación de los meses incluidos en la simulación influye en la clasificación final del RH. En este sentido, aunque los periodos de modelación no coinciden estrictamente con los periodos observados en campo, las simulaciones anuales (enero-diciembre) mostraron una mayor concordancia con las condiciones reales que aquellas realizadas exactamente sobre los intervalos de observación (octubre-septiembre).

En términos de contexto histórico, al emplear la Normal Climática (NC) con la CAD observada en la SCH, la clasificación se mantuvo igual que con los resultados anuales (2023 y 2024): siete sitios fueron ústicos, mientras que LALIBERTAD y VEGAS conservaron régimen údico. Esto indicó una estabilidad interanual relativa en la clasificación cuando se utiliza la capacidad de almacenamiento estimada para cada sitio, conforme a los resultados obtenidos por variación de la CAD.

Sensibilidad de humedad frente a la variación de la CAD

La modificación de la lámina de la CAD evidenció distintos grados de sensibilidad entre sitios:

- Con una CAD de 40 mm, la mayoría de los sitios se clasificaron como ústicos, excepto LALIBERTAD y VEGAS, que permanecieron údicos; esto indica que para los sitios observados con un valor constante frente a la CAD para cada sitio, los resultados no cambiaron.
- Con una CAD de 100 mm, se observó un cambio hacia régimen údico en varios sitios (ARBORADA, CARIMAGUA, NUBES y SHEEFER), indicando sensibilidad al incremento de la capacidad de almacenamiento, conforme aumenta la CAD aumenta la condición de humedad del régimen.
- Con una CAD de 150 mm, algunos sitios retornaron a condición ústica (CARIMAGUA, MAVALLE, TALUMA y YUCAO), mostrando comportamiento no lineal en la respuesta del modelo.

- Con la CAD de 200 mm (valor por defecto del modelo), ARBORADA, NUBES y SHEEFER fueron clasificados como údicos, mientras que CARIMAGUA, MAVALLE, TALUMA y YUCAO permanecieron Ústicos. LALIBERTAD y VEGAS conservaron régimen údico en todos los escenarios.

Consistencia de la clasificación

LALIBERTAD y VEGAS mostraron estabilidad absoluta en todos los escenarios evaluados, manteniéndose como údicos independientemente de la lámina de agua considerada. En contraste, CARIMAGUA, MAVALLE, TALUMA y YUCAO evidenciaron mayor variabilidad frente a cambios en la CAD. ARBORADA, NUBES y SHEEFER presentaron transición hacia régimen údico bajo mayores valores de almacenamiento.

En términos generales, el RH ústico predominó con condiciones de CAD estimados en la SCH, mientras que incrementos en la lámina de almacenamiento tendieron a favorecer la clasificación údica en varios sitios.

Los resultados evidencian que la clasificación del RH presenta una sensibilidad paramétrica a la CAD, confirmando que este parámetro actúa como un controlador dominante en la simulación del balance hídrico mediante el modelo Newhall (Camacho-Umaña et al., 2025, Treier et al., 2022). Bajo condiciones de CAD medida (40 mm), la predominancia de condiciones ústicas refleja la limitada capacidad intrínseca de los Oxisoles de la Altillanura para sostener periodos de humedad prolongados. Esta respuesta es coherente con las restricciones físicas reportadas por estos suelos por Amézquita et al. (2004), caracterizados por una alta proporción de microporos y una baja capacidad de almacenamiento de agua útil, lo que provoca un comportamiento seco incluso durante la temporada de lluvias (Zounemat-Kermani et al., 2021)

En contraste, el incremento de la CAD a 100 mm favorece una transición hacia condiciones údicas, indicando que un mayor reservorio teórico permite al modelo simular una prolongación de la fase húmeda (Camacho-Umaña et al., 2025). Sin embargo, la respuesta no monotónica observada al aumentar la CAD a 150 mm donde algunos sitios retornan a la clasificación ústica muestra una interacción no lineal. Este fenómeno sugiere que el modelo Newhall es altamente susceptible a la distribución temporal de la precipitación y la demanda evaporativa, lo que puede generar discrepancias significativas en la asignación del RH en entornos tropicales con alta variabilidad climática (Camacho-Umaña et al., 2025, Rincón et al., 2023).

Finalmente, la consistencia de los sitios LALIBERTAD y VEGAS como údicos en todos los escenarios refuerza la influencia de factores edafoclimáticos intrínsecos, como la ubicación en zonas de mayor precipitación o mejores propiedades de infiltración, que trascienden la parametrización estándar del modelo (Florian-Vergara et al., 2021, Pimentel et al., 2021). Estos hallazgos ponen de manifiesto que el uso de valores de CAD generalizados (como el valor por defecto de 200 mm) puede inducir sesgos en la determinación del régimen de humedad, resaltando la necesidad de incorporar estimaciones específicas por sitio que reflejen las propiedades físicas reales y la dinámica hidrológica de la región (Guzmán et al., 2022, Rincón et al., 2023).

5.3 Evaluación del modelo

Esta sección corresponde a la fase 3. Para evaluar el desempeño del modelo se siguió la metodología descrita en la Sección 4.2.3. Dado que se contó con ocho clasificaciones observadas y nueve modeladas, (baja cantidad de datos observados) se aplicó un análisis de concordancia entre ambas fuentes de información.

Puesto que los RH se conforman en un año normal (Normal Climática) y las simulaciones fueron iguales para los años 2023 y 2024, la NC con CAD variable y la NC con CAD de 40 mm constante, se comparó la clasificación del RH obtenida mediante observaciones con la estimada por el modelo de Newhall como único resultado. Los resultados fueron consistentes y permitieron valorar su capacidad predictiva en el área de estudio (Tabla **5-20**, Figura **5-6**).

Tabla **5-20**: Tabla de contingencia entre el régimen de humedad observado (O) y modelado (E) por el modelo de Newhall.

O / M	Ústico	Údico	Total
Ústico	4	0	4
Údico	2	2	4
Total	**6**	**2**	**8**

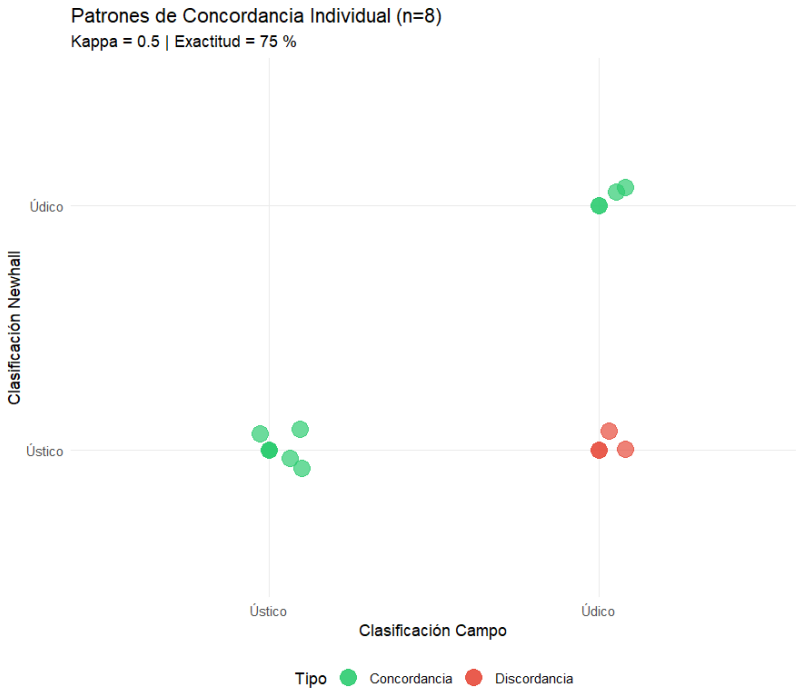

Figura **5-6**: Análisis de Concordancias Kappa de Cohen

La exactitud global fue del 75 %, lo que indica que tres de cada cuatro sitios fueron correctamente clasificados por el modelo. En términos operativos, este resultado refleja una capacidad predictiva adecuada para aplicaciones regionales o estudios de reconocimiento, donde el objetivo principal es capturar patrones generales de comportamiento más que reproducir con exactitud absoluta cada sitio puntual (Congalton, 1991).

El coeficiente Kappa de Cohen fue de $\kappa = 0{,}5$, valor que, según la escala propuesta por Landis y Koch (1977b), corresponde a un nivel de concordancia moderado. Esta métrica resulta relevante porque corrige la exactitud observada descontando el acuerdo esperado por azar, proporcionando así una medida más robusta de la concordancia real (Cohen, 1960).

Además, un valor de $\kappa = 0{,}5$ indica que el 50 % del acuerdo entre clasificación observada y modelada no es atribuible al azar, sino a una correspondencia efectiva entre el modelo y las condiciones de campo. Además, este valor se sitúa en el rango superior de la categoría moderada, cercano al umbral de concordancia sustancial (0.61), lo que sugiere que ajustes adicionales en la parametrización o un incremento en el tamaño muestral podrían mejorar el nivel de concordancia.

Es importante resaltar la coherencia entre ambas métricas: una exactitud global del 75 % acompañada de un

Kappa de 0.5 constituyó una combinación estadísticamente consistente. Esta relación indicó que:

- No existe un desbalance extremo entre categorías que pueda sobreestimar artificialmente la exactitud.
- Los errores de clasificación se distribuyen de manera relativamente equilibrada.
- El modelo discrimina adecuadamente entre los distintos regímenes de humedad, aunque conserva un margen de mejora.

El valor de Kappa obtenido se encuentra dentro del rango reportado en estudios de validación de modelos edafoclimáticos comparables (Bui & Moran, 2001, McBratney et al., 2003), lo que refuerza la consistencia del desempeño observado.

Se aplicó el test exacto de Fisher (Tabla **5-21**) para evaluar la independencia entre la clasificación de RH y los valores observados, obteniéndose un valor de p = 0.4286 y una odds ratio estimada infinita (IC 95 %: 0.198 - Inf). La no significancia estadística (p >0.05) impide rechazar la hipótesis nula de ausencia de asociación; sin embargo, este resultado debe interpretarse con extrema cautela debido al tamaño muestral reducido (N = 8), el cual confiere muy baja potencia de la prueba (Stehman, 1997). La odds ratio infinita es un artefacto computacional derivado de la presencia de celdas con valor cero en la tabla de contingencia y no implica una asociación perfecta.

Tabla **5-21**: Resultados del test exacto de Fisher

Componente	**Valor**	**Interpretación**
p-value	0.4286	No significativo al nivel $\alpha = 0{,}05$
Hipótesis alternativa	odds ratio verdadero $\neq 1$	Se evaluó si la asociación entre el modelo/mapa y la referencia es diferente del azar
Intervalo de confianza (95 %)	0.198 a Inf	Extremadamente amplio, incluye el 1 y se extiende al infinito
Odds ratio estimada	Inf (infinito)	Indica separación perfecta o casi perfecta en los datos
Conclusión estadística	$p > 0{,}05$	No se puede rechazar H_0; no hay evidencia suficiente de asociación

Para las demás simulaciones del RH con datos de la NC, donde se aumentó la CAD, las concordancias fueron menores (K <0.5, Tabla **5-22**), indicando que posiblemente el modelo no es recomendado con la CAD diferentes o mayores a los obtenidos en los perfiles del suelo.

Tabla **5-22**: Concordancia entre clasificación observada y simulada según la CAD asumida.

Parámetro	**40**	**100**	**150**	**200**
Observaciones	8	8	8	8
Kappa	0.5	0.25	0	-0.5
z	1.63	1.07	0	-1.63
p-value	0.102	0.285	1	0.102
Exactitud Global	75 %	63 %	50 %	25 %
Interpretación	Moderada	Leve	Insignificante	Peor que azar

En sintexis, EL modelo de Newhall presentó una concordancia moderada ($\kappa = 0{,}5$) con los obtenidos para el año 2023, 2024 y la NC, utilizando como CAD valor cercano al promedio de los datos observados (40 mm). Estos resultados se respaldan por una exactitud global del 75 %, evidenciando un desempeño predictivo aceptable bajo las condiciones anuales e históricas de la NC con los datos de la CAD de datos medidos de la SCH.

La falta de significancia estadística del coeficiente Kappa en los resultados no debe interpretarse como evidencia de un desempeño aleatorio del modelo, sino como una limitación inherente al tamaño de muestra

reducido (N = 8), el cual proporciona baja potencia para detectar concordancias moderadas como significativas (Foody, 2002). La validación con un mayor número de sitios de referencia, idealmente ≥ 20 por clase, permitiría una estimación más precisa de κ y de sus intervalos de confianza, así como una evaluación más robusta de la incertidumbre asociada a la clasificación de los RH.

Es importante mencionar que, al no contar con datos de estaciones meteorológicas en los sitios instrumentados, no fue posible estimar la desviación estándar del periodo de medición. Aunque la TS indica que el año de medición debe estar dentro de una desviación estándar de un año normal, la *nota 90* de la TS (Soil Survey Staff, 2022) señala que, si los criterios se cumplen durante periodos por encima o por debajo de un año normal, también se cumplirán durante años normales; por esta razón, los análisis realizados en la investigación se evaluaron con el mismo criterio.

5.4 Modelación espacial del régimen de humedad del suelo

Esta sección responde al objetivo 3 y la fase 4 de la investigación. La determinación puntual de los RH constituyó una aproximación necesaria pero poco suficiente para comprender la variabilidad edafoclimática a escala regional, debido a la baja densidad de observaciones de humedad obtenidas. En este contexto, la modelación espacial permitió extender los resultados obtenidos en los sitios de referencia hacia el conjunto del territorio, integrando la variabilidad climática y edáfica que caracterizan sectores como la Altillanura del departamento del Meta. Al contar con información climática y edáfica para los departamentos del Meta y Vichada, se amplió la ventana espacial de análisis del RH para aproximadamente 170 598 Km^2.

La CAD se espeacializó mediante el método de *Interpolación Inversa de la Distancia Ponderada (IDP)* como capa de superficie continua a partir de las propiedades hídricas de la SCH de 156 perfiles (Figura **5-8**), el perfil PV-013 se encuentra en el departamento del Meta, pero no reporta coordenadas. La elección del interpolador, se debió a la distribución irregular de perfiles, que mostró un efecto pepita puro en el semivariograma (Figura **5-7**), indicando ausencia de correlación espacial. Esto sugiere que la variabilidad observada en la CAD puede ocurrir a escalas espaciales menores que la distancia mínima entre muestras(Tenelanda et al., 2018). Los resultados resaltan la necesidad de una mayor densidad de perfiles o el empleo de técnicas geomáticas avanzadas, como son el aprendizaje de maquina o funciones de pedotransferencia, para una caracterización más precisa de la variabilidad espacial de la CAD en la región (Chen et al., 2017, Pimentel et al., 2021)

Para validar la interpolación se uso La validación cruzada leave-one-out, lo cual, produjo un error cuadrático medio de 68.51 y una raíz del error cuadrático medio (RMSE, siglas en inglés) de 8.28 mm, lo que indicó que los valores estimados mediante la interpolación se desviaron de los observados en aproximadamente 8.28 mm, con una mayor penalización de los errores de gran magnitud. La raíz del error cuadrático medio normalizada (NRMSE, siglas en inglés) fue de 15.83 %, valor que, de acuerdo con los rangos de interpretación comúnmente atribuidos a Jamieson et al. (1991), corresponde a un desempeño bueno, dado que se encuentra entre el 10 y el 20 %. No obstante, estos rangos fueron planteados y utilizados principalmente en la evaluación de modelos de simulación agronómica, por lo que su interpretación a la interpolación espacial son considerados de referencia y no como un criterio universal de aceptación. Por otra parte, el coeficiente de determinación obtenido fue de 31,96 %, lo que evidenció que la interpolación reprodujo aproximadamente una tercera parte de la variabilidad observada y presentó una capacidad limitada para representar las variaciones locales de la variable. En sintesis, los resultados indican que la interpolación presentó un error relativo moderado y una capacidad predictiva parcial, por lo cual la superficie ráster obtenida puede utilizarse para identificar tendencias espaciales del RH como insumo en el modelo de Newhall.

Se aplicó el Índice de Moran Global (IM), lo que evidenció una autocorrelación espacial positiva muy fuerte, con un valor de IM = 0.998. Este resultado indica que los valores similares tienden a agruparse espacialmente, reflejando una alta continuidad espacial en el patrón cartográfico (Western et al., 2004). Bajo una contigüidad

tipo reina (8 pixeles), se evaluaron 434396 celdas y 1351246 relaciones de vecindad, lo que sugiere que la distribución espacial de la variable no es aleatoria, sino altamente estructurada. Aunque el valor del índice evidenció una fuerte estructura espacial, el resultado debe interpretarse como descriptivo, debido a que no se reportaron los estadísticos de significancia asociados.

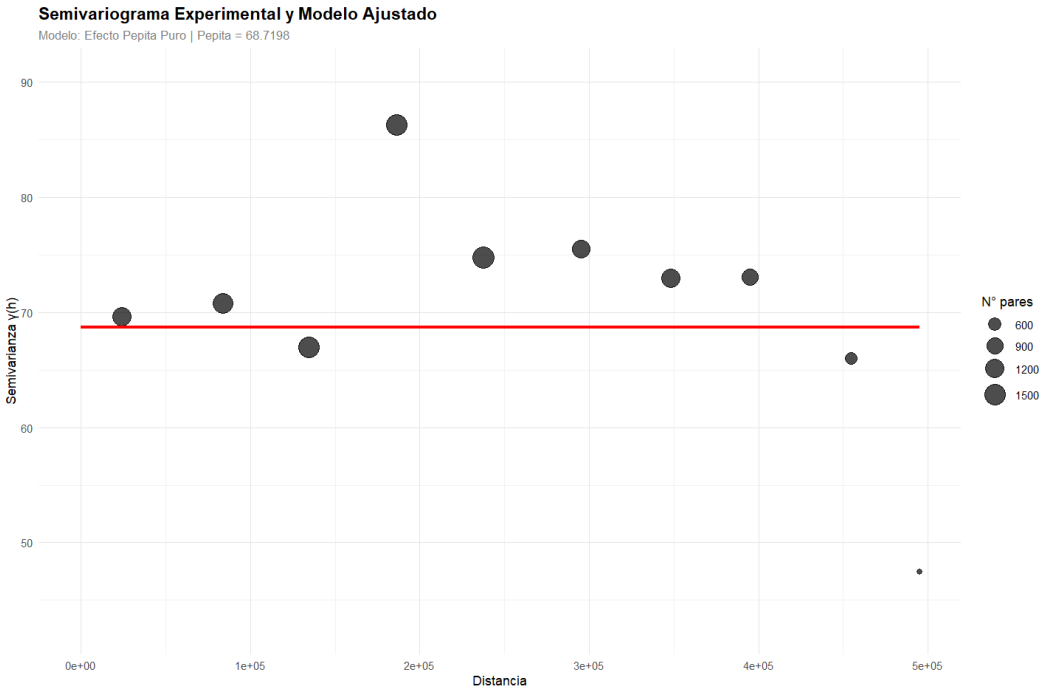

Figura **5-7**: Semivariograma de CAD en la SCH

La Figura **5-8** ilustra la variabilidad espacial en la capacidad hídrica de almacenamiento de agua en la SCH del área de estudio. Los rangos de CAD entre 37.26-38.86 mm ocupan la mayor extensión espacial, predominando en amplios sectores del centro y oriente del departamento del Vichada. Esta distribución sugiere una condición relativamente homogénea de almacenamiento hídrico moderado en los suelos de estas áreas, configurando una franja continua que atraviesa el territorio de oeste a este.

Por otra parte, los valores menores de 35.59 mm se concentran principalmente en el occidente del área de estudio, particularmente en el departamento del Meta, donde se observan superficies amplias asociadas a reservas hídricas menores en la SCH. Estas condiciones podrían relacionarse con variaciones en la textura, profundidad efectiva o características mineralógicas que limitan la retención de agua (Pérez-Cutillas et al., 2018).

Las clases intermedias bajas (35.59-37.26 mm) actúan como zonas de transición entre las áreas de menor y mayor disponibilidad hídrica, formando zonas dispersas que rodean los núcleos de menor CAD, especialmente hacia el centro de la zona de estudio.

Finalmente, las zonas con mayor CAD (> 40 mm) se presentan de forma puntual y fragmentada, principalmente en sectores del centro y noreste del Vichada, así como en áreas aisladas del Meta. Estas áreas se asocian a condiciones edáficas favorables, como texturas medias a finas, mayor contenido de materia orgánica que en el Vichada (Ramachandran et al., 2024).

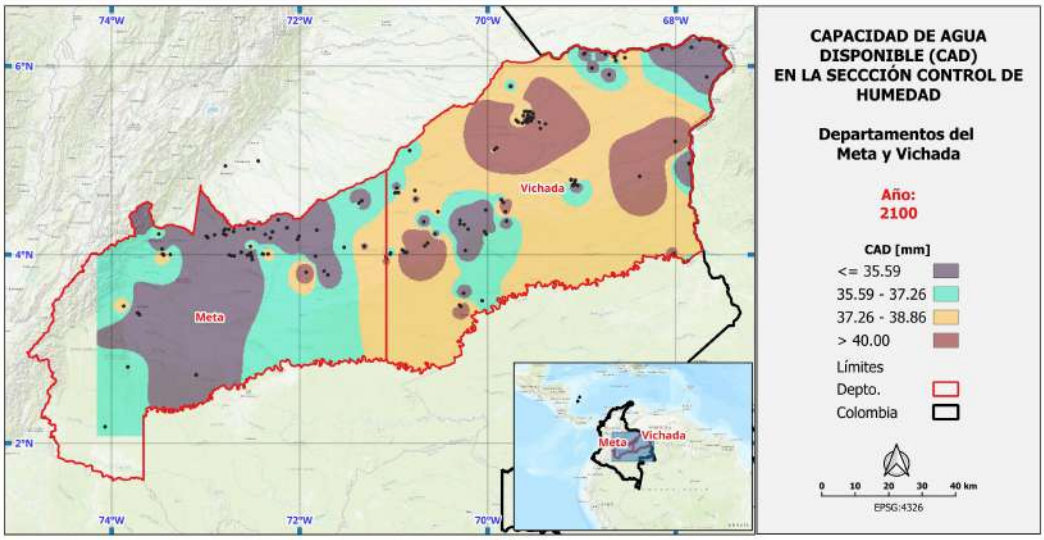

Figura **5-8**: Capacidad de agua disponible de la Sección Control de Humedad

El predominio de valores intermedios de CAD, con zonas localizadas de mayor y menor almacenamiento hídrico, reflejan la heterogeneidad edáfica típica de los paisajes de la Orinoquia colombiana (Silva Borges, 2023). Esta variabilidad es consistente con estudios previos que resaltan la complejidad pedogenética de la Orinoquia, donde factores como la baja proporción de poros y alta saturación de aluminio pueden llevar a un comportamiento seco del suelo incluso en períodos de lluvia (Zounemat-Kermani et al., 2021). La dinámica hídrica en las microcuencas de la Orinoquia colombiana también sugiere que factores como la geomorfología, la frecuencia y distribución del régimen de lluvias, y la demanda de agua por evaporación inciden significativamente en el contenido de humedad del suelo, especialmente en áreas de transición forestal a pastizales (Zimmermann et al., 2005)

Con el propósito de conocer la variabilidad espacial en diferentes escalas de tiempo del edafoclima, se elaboraron mapas del RH correspondientes al periodo de observación de octubre de 2023 a septiembre de 2024, de enero a diciembre de los años 2023 y 2024, así como un escenario representativo de las condiciones climáticas medias de largo plazo, correspondiente a la NC 1991-2020. Este análisis permitió comparar el comportamiento del RH bajo condiciones interanuales recientes frente a un escenario climático promedio, facilitando la identificación de patrones espaciales persistentes y variaciones asociadas a la dinámica climática anual.

5.4.1 Patrón espacial en condiciones actuales

5.4.1.1 Periodo 2023-2024

La Figura **5-9** presenta la distribución espacial de los RH para el periodo octubre de 2023 a septiembre de 2024 en los departamentos del Meta y Vichada. Los resultados evidencian un dominio del régimen ústico, el cual ocupa la mayor parte del territorio analizado (79.29 %), particularmente en las zonas centrales, septentrionales y orientales del área de estudio. Este patrón indica la presencia de condiciones de humedad del suelo caracterizadas por una alternancia estacional entre periodos húmedos y secos, consistente con la marcada estacionalidad climática que caracteriza a la región de la Orinoquia colombiana. En contraste, el régimen údico se distribuye de manera más restringida (20.71 %) y se concentra principalmente hacia el sector suroccidental, asociado espacialmente con áreas próximas al piedemonte de la cordillera Oriental y

sectores con mayor disponibilidad hídrica anual.

Se evidenció un gradiente espacial de humedad del suelo, con condiciones relativamente más húmedas hacia el suroccidente y más estacionales hacia el norte y oriente, lo cual refleja la influencia de factores climáticos regionales, particularmente la distribución espacial de la precipitación y la dinámica estacional del régimen pluviométrico en la Altillanura y el Piedemonte llanero. Este patrón confirma el carácter prevalente del régimen ústico en gran parte de la región analizada durante el periodo evaluado, mientras que el régimen údico se restringe a sectores específicos con mayor disponibilidad hídrica.

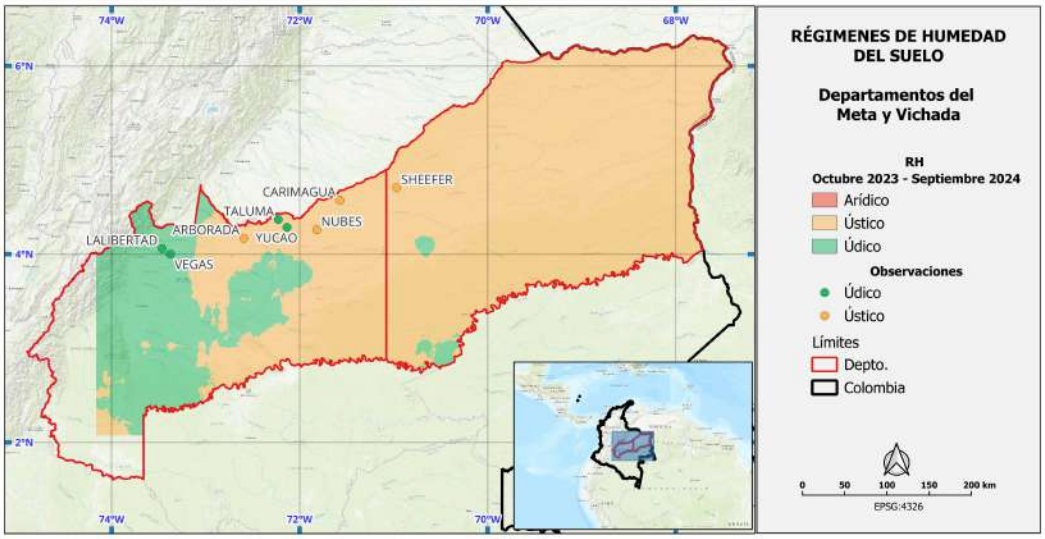

Figura **5-9**: Régimen de humedad del suelo periodo 2023-2024

Estos comportamientos de humedad en el suelo van en consecuencia del comportamiento metererológico. De acuerdo con Physical Sciences Laboratory (2026) los valores del índice multivariado ENSO (*MEI.v2*, por sus nombres en inglés) evidenciaron que el periodo analizado estuvo influenciado por una marcada variabilidad asociada al fenómeno ENSO. Durante 2023 se observó una transición desde condiciones de La Niña moderada a inicios del año (MEI entre $-1{,}1$ y $-0{,}8$) hacia condiciones El Niño moderado a fuerte entre septiembre y diciembre (MEI entre 0.7 y 1.1). Para 2024, el evento El Niño persistió durante el primer trimestre (MEI entre 0.7 y 0.8), seguido por una fase neutral durante el segundo trimestre y posteriormente una transición hacia condiciones La Niña entre julio y diciembre (MEI entre $-0{,}7$ y $-0{,}9$). En consecuencia, el periodo octubre de 2023 a septiembre de 2024 estuvo inicialmente dominado por condiciones El Niño, que tienden a reducir la precipitación en la región de la Orinoquia colombiana, seguido por una transición hacia condiciones La Niña durante el segundo semestre de 2024, asociadas a un incremento en la disponibilidad hídrica regional.

Para el año 2023 y 2024, los patrones de humedad fueron similares al periodo anterior descrito (Figura **5-10**); el régimen ústico fue el dominante, cubriendo la mayor parte del territorio (81.59 % y 80.65 % respectivamente). Este patrón reflejó las condiciones climáticas típicas de la Orinoquia colombiana (Florian-Vergara et al., 2021), con una marcada estacionalidad pluviométrica unimodal: una estación seca definida (diciembre-marzo) seguida de un periodo lluvioso prolongado (abril-noviembre) (Pimentel et al., 2021). Así, los suelos permanecen relativamente secos parte del año, pero retienen suficiente humedad durante la temporada lluviosa para sostener procesos biológicos y el crecimiento vegetal, alineándose con la definición del régimen ústico en entornos tropicales subhúmedos según la TS (3-9 meses secos en SCH, típicamente 3-6 en subhúmedos tropicales) (Soil Survey Staff, 2022).

En contraste, el régimen údico presentó menor proporción (17.07 % y 19.33 %),prinicpalmente en zonas más cercanas a la cordillera oriental, predominantemente en el occidente del Meta para el año 2023, lo que podría indicar condiciones locales con mayor aporte hídrico o menor evapotranspiración. El año 2023 mostró el

régimen perudico (1.35 %), en la zonas con mayor altitud, sector noroccidental del Meta. No hubo resultados de régimen Arídico.

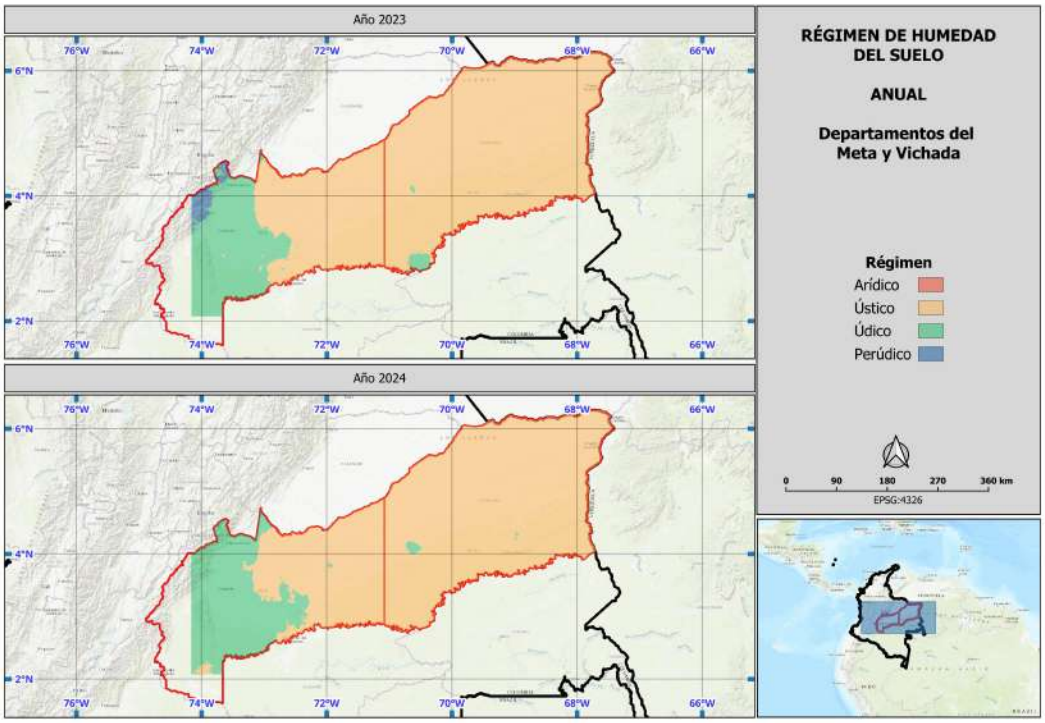

Figura **5-10**: Régimen de humedad del auelo para 2023 y 2024

La comparación entre los años 2023 y 2024 (Figura **5-11**) indicó una estabilidad regional relativa (94.42 % del área) en la distribución espacial de los RH, pese a las variaciones localizadas (5.58 %) en zonas de transición de la humedad del suelo. Estas áreas transicionales evidencian la sensibilidad del RH ante leves variaciones interanuales en las condiciones climáticas. Desde una perspectiva edafológica, este comportamiento resulta consistente con la naturaleza del RH, el cual representa una propiedad climáticamente controlada y definida a partir de patrones de largo plazo, más que de variaciones interanuales aisladas (Soil Survey Staff, 2022). En consecuencia, los cambios observados en el presente análisis corresponden a variaciones localizadas y de baja extensión espacial, distribuidas en forma de zonas discontinuas.

Las áreas donde se identificaron cambios se concentran principalmente en: sectores del piedemonte del Meta, algunas zonas sur y áreas puntuales dentro del dominio del régimen ústico. En la mayoría de los casos, estas variaciones corresponden a transiciones entre los regímenes ústico y údico, lo cual sugiere modificaciones en la duración de los periodos húmedos o secos dentro de la SCH. Este tipo de transición es esperable en zonas de frontera climática, donde pequeñas variaciones en la precipitación o en la evapotranspiración pueden modificar temporalmente el balance hídrico del suelo.

Estos resultados, permitieron establecer la incertidumbre en la clasificación del RH, que se genera al elegir los meses de anualidad para la simulación de Newhall. Para verificar esta afirmación se realizó una comparación espacial entre los mapas del RH octubre 2023 a septiembre 2024, con enero a diciembre de 2023 y 2024, encontrando que el 9.7 % del área hay cambios a nivel de pixel (Figura **5-12**), principalmente en la zona centro del Meta, cambiando los RH ústico a údico.

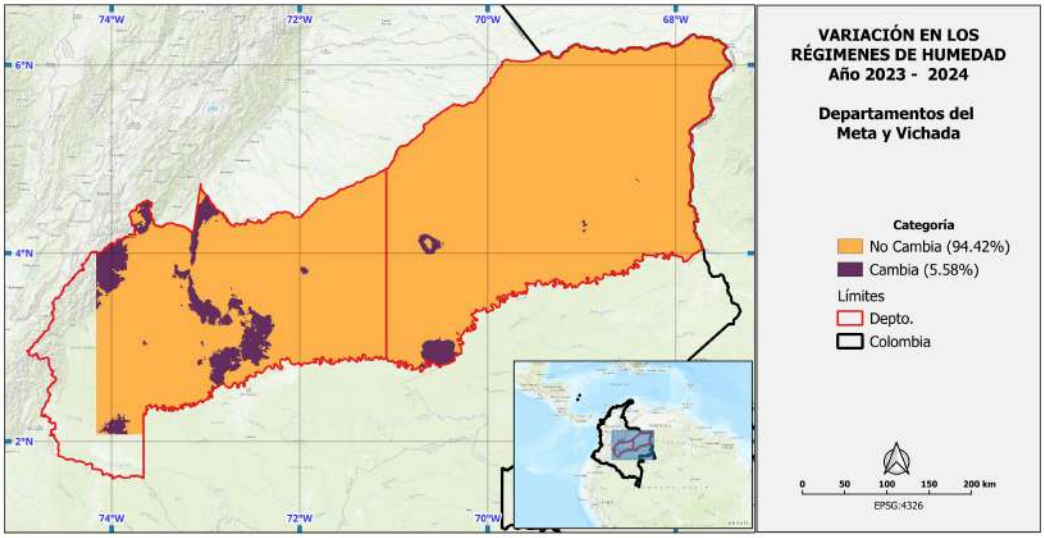

Figura **5-11**: Variación del régimen de humedad del suelo 2023-2024

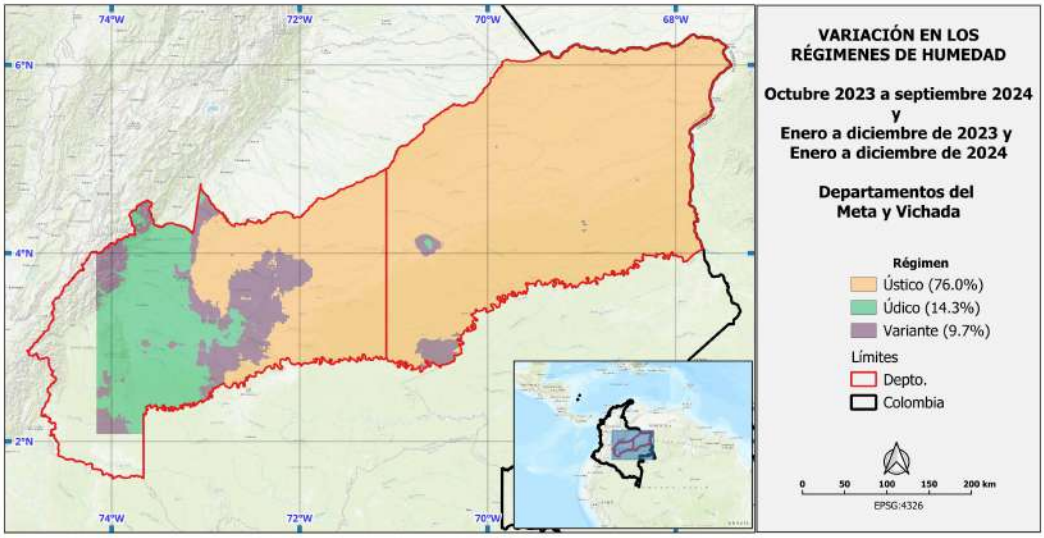

Figura **5-12**: Variación del régimen de humedad 2023-2024, 2023 y 2024

5.4.1.2 Normal climática 1991-2020

El mapa de RH derivado de la NC 1991-2020 (Figura **5-13**) representa el comportamiento edafoclimático promedio esperado para la región bajo condiciones climáticas de largo plazo (30 años). Se observó nuevamente la dominancia del régimen ústico, confirmando que este constituye la condición edafoclimática dominante en gran parte de la Orinoquia plana del Meta y Vichada.

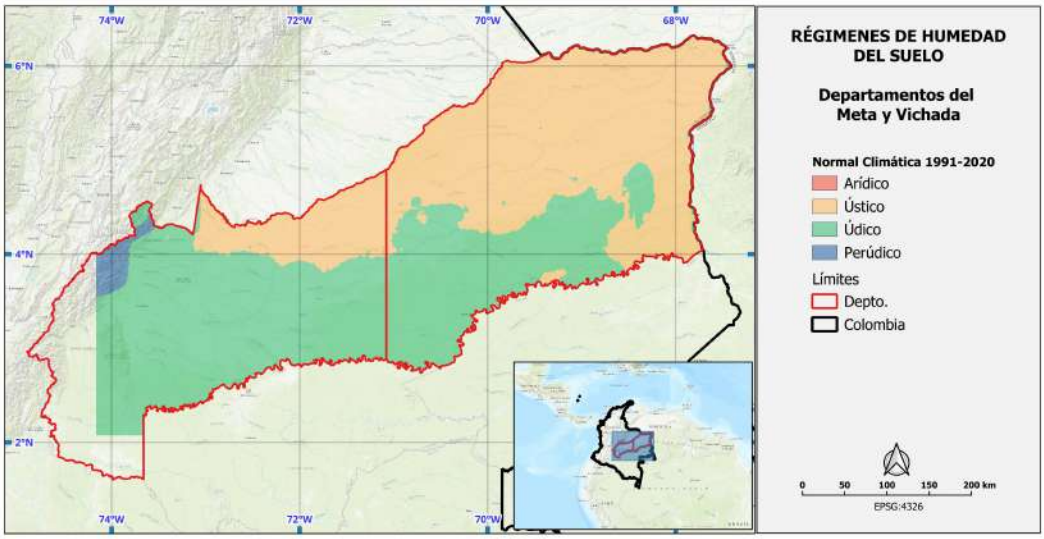

Figura **5-13**: Régimen de humedad del suelo de 1991-2020

Sin embargo, el análisis espacial muestra que algunas áreas clasificadas como ústicas en los años 2023 y 2024 presentan una tendencia hacia condiciones údicas bajo el escenario de NC. Este resultado indica que ciertas zonas del territorio, como la zona sur, se encuentran cercanas al umbral de transición entre ambos regímenes de humedad, por lo que pequeñas variaciones en el balance hídrico mensual pueden modificar la clasificación.

La Figura **5-14** presenta el análisis de incertidumbre espacial del RH, en el cual se clasificó como zona de transición aquellas áreas donde la clasificación del RH varió entre los diferentes escenarios simulados de enero a diciembre (2023, 2024 y 1991-2020). Los resultados permitieron identificar sectores donde el RH se mantuvo relativamente estable en el tiempo. En este sentido, el régimen ústico fue el de mayor extensión territorial, con 45.59 % del área de estudio, mientras que el régimen údico presentó la menor ocupación, con 15.03 %. Por su parte, las áreas de transición, donde la clasificación mostró variabilidad entre escenarios, representaron el 39.36 % del territorio, constituyéndose como la segunda categoría en términos de extensión. Estas zonas pueden interpretarse como áreas de transición edafoclimática, las cuales representan un elemento clave para comprender la incertidumbre asociada a la estimación espacial de los regímenes de humedad del suelo, dado que reflejan sectores donde pequeñas variaciones en las condiciones climáticas o en los parámetros del modelo pueden modificar la clasificación del RH.

En términos consolidados, la Tabla **5-23** presenta la distribución del área y la proporción de los RH para diferentes periodos de análisis: 2023--2024, 2023, 2024 y la NC 1991-2020. Los resultados mostraron que, para el periodo de octubre 2023 a septiembre de 2024, el régimen ústico fue el dominante, ocupando 135 258.87 km^2, lo que corresponde al 79.29 % del área de estudio. En segundo lugar, se encuentra el régimen údico, con 35 302.90 km^2 (20.69 %), mientras que el régimen perúdico presenta una presencia prácticamente marginal, con apenas 36.04 km^2 (0.02 %).

Al analizar los años de forma individual, se observa que en 2023 el predominio del régimen ústico fue aún mayor, alcanzando 81.59 % del área, mientras que el régimen údico representó 17.07 % y el perúdico 1.35 %. En 2024, aunque el ústico continúa siendo el dominante (80.65 %), se registró un ligero incremento del údico,

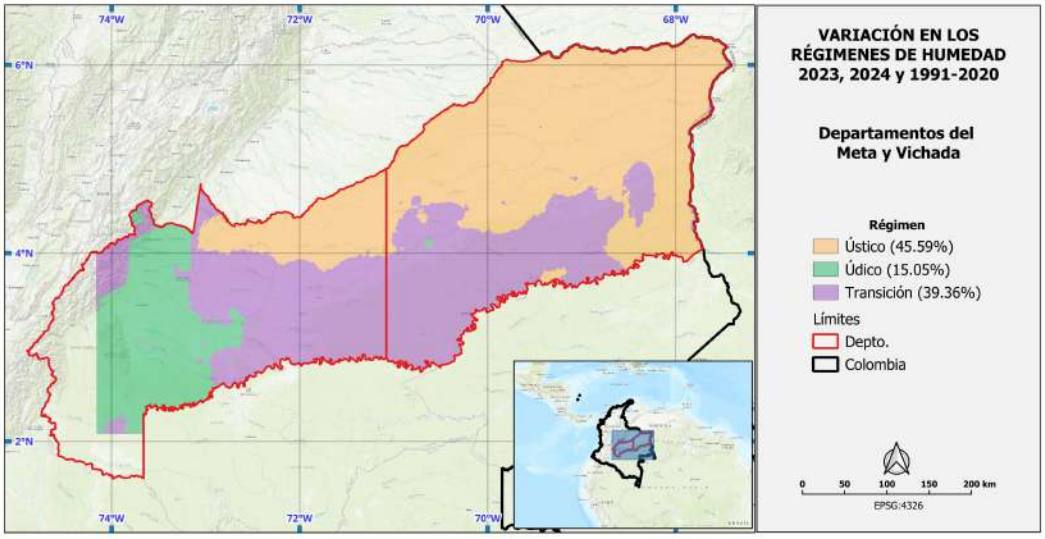

Figura **5-14**: Transicion del régimen humedad del suelo

Tabla **5-23**: Área y proporción del RH por periodo

RH	2023--2024		2023		2024		1991--2020	
	Área [km²]	%	Área [km²]	%	Área [km²]	%	Área [km²]	%
Ústico	135258.87	79.29	139186.31	81.59	137585.50	80.65	78369.57	45.94
Údico	35302.90	20.69	29114.91	17.07	32976.27	19.33	89493.15	52.46
Perúdico	36.04	0.02	2296.60	1.35	36.04	0.02	2735.09	1.60
Total	**170597.81**	**100.00**	**170597.81**	**100.00**	**170597.81**	**100.00**	**170597.81**	**100.00**

que alcanza 19.33 %, mientras que el perúdico vuelve a representar una fracción mínima del territorio (0.02 %). En contraste, cuando se consideran las condiciones de la NC, la distribución espacial de los regímenes muestra un patrón diferente: el údico pasa a ser el predominante, ocupando 52.46 % del área, mientras que el ústico representa 45.94 %, y el perúdico mantiene una presencia muy reducida (1.60 %).

En conjunto, estos resultados evidenciaron que los años recientes (2023--2024) presentaron una mayor predominancia del régimen ústico en comparación con el patrón climático histórico, lo que sugiere condiciones relativamente más secas o con mayor estacionalidad en la disponibilidad de agua del suelo durante el periodo analizado respecto a la normal.

Es de mencionar que las zonas de transición se presenta entre la comparación 2023, 2024 con la NC, entendiinendo que ésta, es utilizada para suavizar la variabilidad interanual del clima y representar las condiciones promedio de largo plazo. Esta práctica está ampliamente justificada en la climatología porque el clima presenta variaciones naturales de un año a otro, asociadas a fenómenos como la variabilidad atmosférica interna. La Organización Meteorológica Mundial establece que las normales climáticas deben calcularse a partir de periodos de al menos 30 años, ya que este intervalo permite suavizar la variabilidad interanual y capturar el estado medio del sistema climático. De esta forma, las normales climáticas se convierten en una referencia estadística que describe el comportamiento típico del clima, permitiendo comparar periodos, detectar anomalías y analizar tendencias climáticas a largo plazo. En términos estadísticos, el promedio multianual reduce la influencia de valores extremos o anomalías de corta duración, produciendo una señal climática más representativa de las condiciones medias del sistema (Arguez & Vose, 2011, Organization [WMO], 2017)

De igual manera, la TS recomienda utilizar datos de clima y humedad del suelo en periodo normal para la clasificación de los RH, sin embargo las limitaciones de una continuidad de datos de humedad como lo obtenidos en la investigación, solo perimitieron conocer la humedad en un tiempo corto pero representativos en el periodo anual. Para los datos de clima utilizados tanto a nivel puntual como espacial, el RH simulado representó el comportamiento de dicho periodo, afirmación que la TS (Soil Survey Staff, 2010) amplió y aceptó como válido, ya que si la precipitación se encuentra por encima o por debajo de una normal climática, los resultados corresponderán a una normal, cuando esta lo presente.

En términos generales, el uso de la NC resultó particularmente relevante en esta investigación, ya que permitió suavizar la variabilidad interanual observada durante los años 2023 y 2024. De esta manera, fue posible estimar de forma más representativa las condiciones promedio de disponibilidad de agua en el suelo, evitando que la influencia de años excepcionalmente húmedos o secos distorsionara la determinación de los regímenes de humedad del suelo. En consecuencia, la utilización de promedios climáticos contribuyó a obtener una caracterización más estable y robusta de las condiciones edafoclimáticas predominantes en el área de estudio.

5.4.1.3 Sensibilidad espacial del RH frente a variaciones en la CAD

Similar a los análisis del RH puntual se evaluó la influencia de las propiedades hidrofísicas del suelo en la determinación espacial del RH, para ello, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo de Newhall frente a diferentes valores de CAD. Este análisis permitió explorar cómo variaciones en la lámina de almacenamiento de agua en la SCH afectan la clasificación del régimen a escala regional.

Para este propósito se simularon diferentes escenarios de CAD representativos de las condiciones edáficas observadas en la zona de estudio, incluyendo capas continuas de CAD, en el análisis de NC 1991-2020, con láminas [mm] de: 40, 100, 150 y 200. Estos valores abarcan desde condiciones cercanas al promedio observado en los perfiles analizados hasta el valor estándar sugerido en el modelo original de Newhall.(Figura **5-15** y Tabla **5-24**)

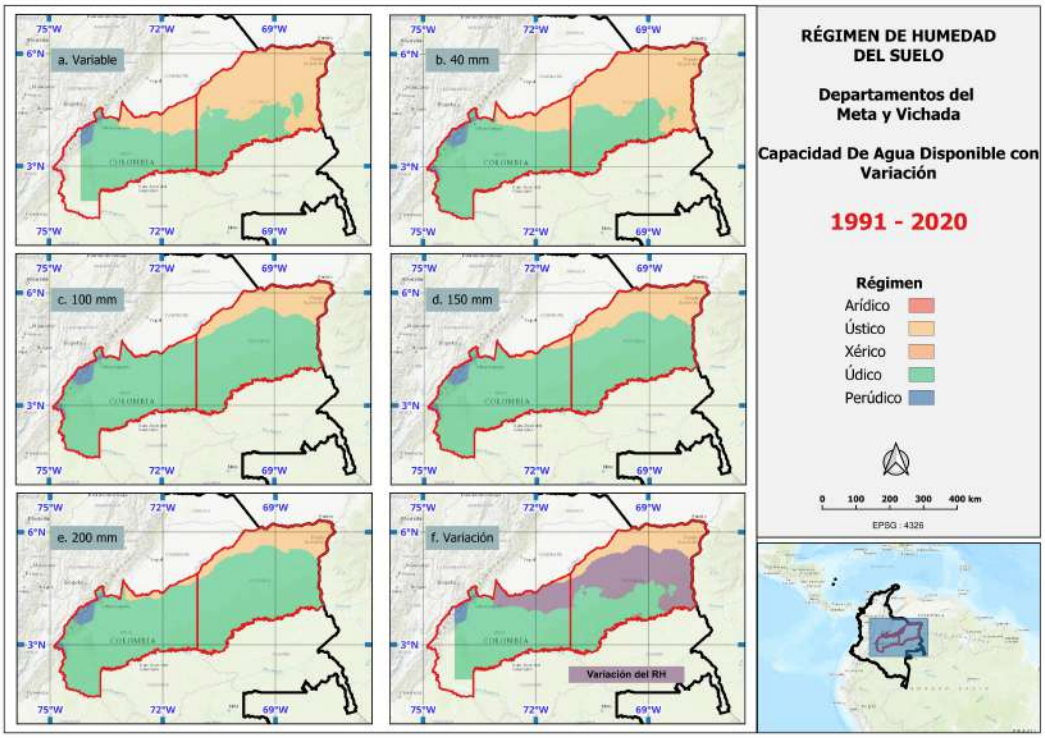

Figura **5-15**: Régimen de humedad del suelo para diferentes láminas de CAD

Tabla **5-24**: Área y proporción de los regímenes de humedad bajo diferentes láminas CAD en la normal climática (1991-2020).

RH	**Variable**		**40**		**100**		**150**		**200**	
	Área [km²]	**%**	**Área [km²]**	**%**	**Área [km²]**	**%**	**Área [km²]**	**%**	**Área [km²]**	**%**
Ústico	78281	45.94	73211	42.96	27375	16.06	33416	19.61	25975	15.24
Údico	89392	52.46	94460	55.43	140296	82.33	134255	78.79	141696	83.15
Perúdico	2732	1.60	2734	1.60	2734	1.60	2734	1.60	2734	1.60
Total	**170405**	**100.00**	**170405**	**100.00**	**170405**	**100.00**	**170405**	**100.00**	**170405**	**100.00**

Los resultados evidencian que la simulación del RH presenta una sensibilidad significativa frente a las variaciones en la CAD, puesto que la esta fue del 32.89 % del área. En particular, los escenarios con valores de CAD cercanos a los estimados para la SCH (panel b, Figura **5-15**) muestran una distribución espacial del RH muy similar a la obtenida cuando se emplea una CAD variable derivada de las propiedades del suelo (panel a, Figura **5-15**). En contraste, valores más elevados de CAD (panel e, Figura **5-15**) incrementan la permanencia de humedad en el perfil del suelo, favoreciendo la clasificación del régimen údico en determinados sectores del área de estudio, como se ilustra en la Figura **5-16**.

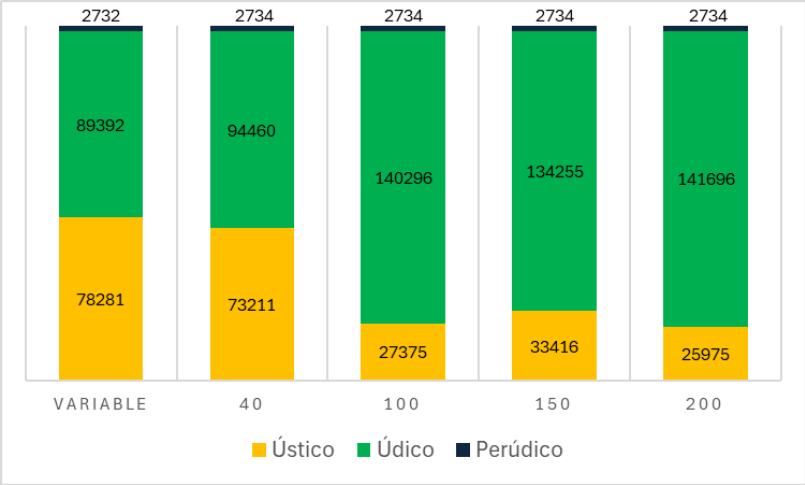

Figura **5-16**: Distribución del área por régimen de humedad bajo escenarios de CAD variable y constante.

Este comportamiento refleja la estrecha relación entre las propiedades hidrofísicas del suelo y el balance hídrico edafoclimático simulado por el modelo. En suelos con mayor CAD, el agua proveniente de la precipitación puede permanecer durante periodos más prolongados dentro de la SCH, extendiendo las condiciones de humedad y reduciendo la frecuencia de eventos de sequedad. Por el contrario, en suelos con menor CAD, los procesos de drenaje gravitacional y consumo evaporativo disminuyen con mayor rapidez el contenido de agua del suelo, favoreciendo condiciones más secas y, en consecuencia, la clasificación hacia RH más restrictivos para la agricultura.

Desde una interpretación pedológica, estos resultados son consistentes con los principios establecidos en la TS, donde el RH se define a partir de la duración y frecuencia de las condiciones húmedas y secas dentro de la SCH Soil Survey Staff (2022). En este contexto, pequeñas variaciones en la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo pueden modificar la duración de los periodos en que el suelo permanece húmedo o seco, afectando directamente la clasificación del régimen, particularmente en ambientes donde el balance hídrico anual se encuentra cercano a los umbrales que separan distintos regímenes.

En la región de la Altillanura de Meta y Vichada, esta respuesta hidrológica está estrechamente vinculada con la naturaleza de los suelos dominantes, principalmente Oxisoles y Ultisoles altamente meteorizados. Similar a los resultados encontrados por Camacho-Umaña et al. (2025), estos suelos se caracterizan por presentar altos grados de meteorización, abundancia de óxidos de hierro y aluminio, y estructuras estables con alta permeabilidad, lo que favorece una rápida infiltración del agua pero una capacidad moderada de CAD para las plantas Buol et al., 2011. Como resultado, aunque el agua de lluvia puede ingresar fácilmente al perfil del suelo, su permanencia dentro de la SCH depende en gran medida de la capacidad de retención de agua del suelo y del balance entre precipitación y evapotranspiración (Zounemat-Kermani et al., 2021).

A nivel espacial, las mayores diferencias entre los escenarios de CAD se concentran en las zonas de transición entre los regímenes údico y ústico. En estas áreas, variaciones de la CAD en el rango de 40 mm a 100 mm inducen cambios en la clasificación del régimen de humedad. En contraste, las zonas claramente dominadas por un régimen específico, particularmente el régimen ústico, muestran una mayor estabilidad frente a

las variaciones de CAD, especialmente en la Altillanura plana de los departamentos del Meta y Vichada, localizada hacia el norte del área de estudio.

Asimismo, la validación de los resultados obtenidos mediante el modelo de Newhall con datos observados en campo subraya la relevancia de considerar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, la cual fue un factor determinante en la fluctuación de los niveles de almacenamiento hídrico en la región (Guarín Giraldo, 2023). Esta congruencia entre el modelo teórico y las mediciones in situ permite inferir que, al igual que en otras zonas tropicales con marcada estacionalidad, el comportamiento hídrico en la Altillanura es susceptible de ser modelado con precisión para determinar la CAD efectiva frente a una escorrentía subsuperficial (Arenas-Bautista et al., 2018).

De igual manera, los resultados evidenciaron que la CAD constituyó una fuente de incertidumbre importante en la estimación espacial del RH, especialmente en zonas donde el balance hídrico anual se encuentra cercano al umbral que separa los regímenes údico y ústico (zonas de transición). En consecuencia, las áreas identificadas como zonas de transición representaron sectores donde las variaciones en los parámetros edáficos o en las condiciones climáticas pueden generar cambios en la clasificación del RH, lo cual es particularmente relevante en modelos edafoclimáticos basados en balances hídricos. En este sentido, la caracterización precisa de las propiedades hidrofísicas del suelo resulta fundamental para reducir la incertidumbre en las simulaciones del RH y mejorar la robustez de las interpretaciones pedológicas a escala regional.

La presencia de estas zonas de transición tiene implicaciones importantes para la cartografía de suelos y la interpretación de los RH a escala regional. En particular, se sugiere que la delimitación cartográfica de los RH debe interpretarse con información complementaria, asociada a un gradiente edafoclimático en el que la incertidumbre aumenta por la proximidad a los umbrales de clasificación. De acuerdo con Monteverde (2014), la TS no ha aceptado, hasta la fecha, subdivisiones de los RH, como las propuestas por A. R. V. Wambeke (2000), las cuales podrían considerarse necesarias para cartografiar o mejorar la representación de estas condiciones de humedad del suelo.

En este sentido, la identificación cartográfica de zonas de transición constituyó un elemento relevante para mejorar la interpretación de los resultados de modelación edafoclimática. Más que representar un error del modelo, estas áreas reflejaron la naturaleza continua de los procesos hidrológicos del suelo y la interacción dinámica entre clima, propiedades del suelo y almacenamiento de agua en el pedón.

Cabe destacar que la CAD actúo como un parámetro integrador que sintetiza la influencia de la textura, estructura, densidades del suelo y profundidad efectiva sobre la dinámica del almacenamiento hídrico. Su sensibilidad dentro del modelo de Newhall sugiere que pequeñas variaciones en la estimación pueden inducir cambios no lineales en la clasificación del RH, lo cual coincide con observaciones previas sobre la fuerte dependencia de los modelos hidrológicos respecto a la parametrización edáfica (Beven, 2001). Por lo tanto, los resultados refuerzan la necesidad de priorizar la caracterización detallada del suelo en estudios edafoclimáticos, especialmente en regiones tropicales donde la heterogeneidad edáfica es elevada.

Finalmente, el reconocimiento de estas zonas de incertidumbre espacial proporciona una base conceptual importante para el desarrollo de cartografía edafoclimática más robusta, particularmente en regiones tropicales donde la variabilidad climática interanual puede generar cambios significativos en el balance hídrico del suelo. En consecuencia, la incorporación de análisis de sensibilidad y evaluación de incertidumbre en la modelación de RH representó un paso fundamental para fortalecer la interpretación y aplicación de estos resultados en estudios de suelos y planificación territorial.

En este estudio, dicha limitación se manifiesta en la tendencia del modelo a sobreestimar condiciones de mayor disponibilidad de agua bajo escenarios de alta CAD, lo que sugiere una posible falta de sensibilidad a restricciones físicas presentes en suelos tropicales, como la baja permeabilidad en horizontes subsuperficiales o la presencia de capas endurecidas. Estos hallazgos son coherentes con estudios recientes que señalan la necesidad de adaptar o recalibrar modelos hidrológicos cuando se aplican fuera de los contextos para los cuales fueron originalmente concebidos (Fatichi et al., 2016).

Los resultados obtenidos permiten diferenciar entre la incertidumbre paramétrica y la incertidumbre estructural en la modelación del RH. Mientras que el análisis de sensibilidad evidenció la fuerte dependencia del modelo respecto a la CAD (incertidumbre paramétrica), las discrepancias observadas entre los valores simulados y medidos sugieren la presencia de limitaciones inherentes a la estructura del modelo (incertidumbre estructural). Esta distinción es fundamental en el análisis de modelos hidrológicos, ya que ambos tipos de incertidumbre requieren estrategias de abordaje diferentes (Refsgaard et al., 2007).

En este contexto, la predominancia de la incertidumbre paramétrica indica que una mejora en la caracterización edáfica podría reducir significativamente los errores en la estimación del RH. Sin embargo, la persistencia de discrepancias incluso bajo condiciones de parametrización ajustada sugiere que existen procesos no representados en el modelo, lo cual coincide con el marco conceptual propuesto por Beven (2001), quien plantea que todos los modelos hidrológicos son aproximaciones parciales de sistemas altamente complejos.

5.5 Régimen de humedad bajo condiciones de cambio climático

Esta sección responde al objetivo 3 y fase 4. Se ejecutó la simulación del balance hídrico del suelo mediante el modelo Newhall, integrando proyecciones climáticas para el periodo 2021-2100 bajo el escenario de trayectorias socioeconómicas compartidas de altas emisiones (SSP5-RCP8.5) (IDEAM, 2024).

La Figura **5-17** presenta la evolución temporal del área ocupada por los diferentes RH durante el periodo analizado, expresada en kilómetros cuadrados, considerando una resolución espacial aproximada de 1 km^2 por píxel. Cada panel muestra la variación anual del área correspondiente a cada régimen, junto con una curva de tendencia suavizada (LOESS, *locally estimated scatterplot smoothing*) que permitió identificar la dirección general del comportamiento del sistema edafoclimático a lo largo del tiempo.

Los resultados evidenciaron una reorganización progresiva de la distribución espacial de los RH, caracterizada por un incremento en la extensión de las condiciones más secas y una reducción relativa de los regímenes más húmedos. Este comportamiento es consistente con cambios en el balance hídrico regional, asociados principalmente a variaciones en la precipitación y en la evapotranspiración potencial bajo el escenario de cambio climático SSP5-8.5.

Es importante resaltar la aparición del régimen de humedad árido, que mostró una tendencia creciente a lo largo del periodo analizado a partir del año 2066. Durante las primeras décadas del siglo XXI, su presencia es prácticamente nula; sin embargo, a partir de 2070 se observa un aumento progresivo de su superficie, alcanzando valores superiores a los 8000 km^2 hacia finales del siglo. Esta expansión indica la aparición de condiciones edafoclimáticas más restrictivas en términos de disponibilidad hídrica del suelo, lo que podría implicar limitaciones para ciertos usos agropecuarios.

En condiciones más húmedas, el régimen perúdico presentó un comportamiento más variable. Inicialmente se observó un aumento moderado de su superficie, alcanzando un máximo durante las primeras décadas del periodo analizado. Posteriormente, se registra una tendencia decreciente hacia mediados del siglo, seguida de una ligera recuperación en las últimas décadas. Este patrón sugiere una redistribución espacial de las condiciones más húmedas, probablemente asociada a cambios en la estacionalidad de las precipitaciones y en la dinámica del almacenamiento hídrico en los perfiles del suelo.

El régimen údico, caracterizado por condiciones de humedad relativamente estables a lo largo del año, muestra una tendencia general a la disminución de su superficie en 80 años. La reducción gradual del área ocupada sugiere una transición hacia condiciones más estacionales o secas en parte del territorio, reflejando alteraciones en el balance hídrico que afectan la permanencia de la humedad en la sección control del suelo.

En contraste, el régimen ústico continúa siendo el dominante en términos de extensión espacial. Aunque se

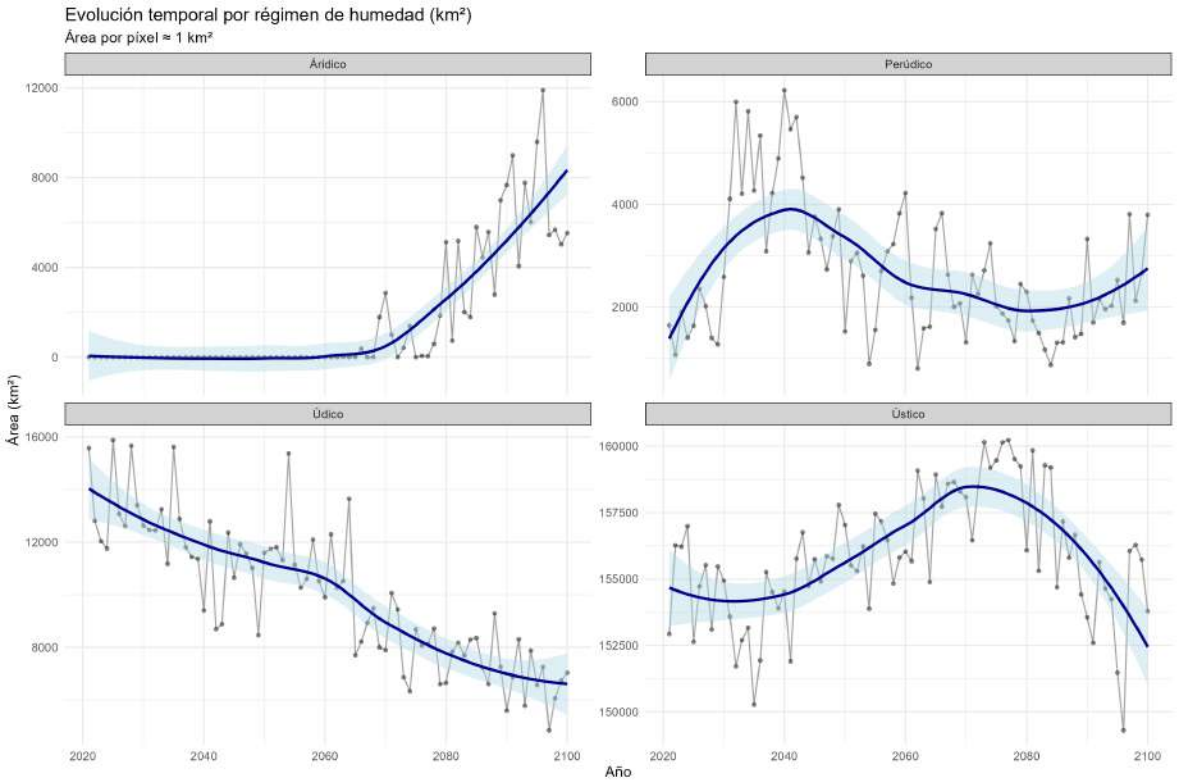

Figura **5-17**: Evolución del área por clases del régimen de humedad de 2021 a 2100.

observan fluctuaciones interanuales, la tendencia general mostró un aumento progresivo de su superficie durante gran parte del periodo analizado, alcanzando un máximo aproximadamente hacia el último tercio del siglo. Posteriormente se observa una leve reducción hacia el final del periodo, lo que podría indicar procesos de transición hacia condiciones más secas en algunas áreas, asociados a la expansión del régimen árido.

De acuerdo con lo anterior, los resultados sugieren una tendencia hacia una mayor estacionalidad en la disponibilidad hídrica del suelo, evidenciada por la expansión relativa de los regímenes más secos (ústico y arídico) y la disminución de los más húmedos (údico y perúdico). Visto desde la pedología, este comportamiento podría tener implicaciones significativas en los procesos de formación del suelo, en la dinámica de lixiviación de nutrientes y en la aptitud agrícola de la región, particularmente en contextos de cambio climático. Asimismo, estos hallazgos constituyen una base relevante para la planificación territorial y la toma de decisiones en materia de manejo sostenible de los recursos suelo y agua.

Para analizar la variabilidad espacial del RH tanto en condiciones históricas como proyectadas, la Figura **5-18** presenta los mapas correspondientes a los años 2023 y 2024, así como la NC del periodo 1991-2020. Adicionalmente, se incluyen las proyecciones bajo el escenario SSP5-8.5 para los intervalos 2021-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

La Figura **5-18** sintetiza los resultados de todos los periodos analizados, donde se observó que el régimen ústico dominó ampliamente el área de estudio en casi todos los escenarios (a excepción para 1991-2020), particularmente en las zonas de la Altillanura plana de Meta y Vichada, mientras que el údico se restringe principalmente al sector suroccidental, asociado al piedemonte de la cordillera oriental y parte de la Altillanura disectada.

De acuerdo con los resultados de la Tabla **5-25** correspondiente a las áreas de los periodos analizados, para el periodo 1991-2020, el régimen údico presentó la mayor extensión espacial, con 52.46 % del área de estudio

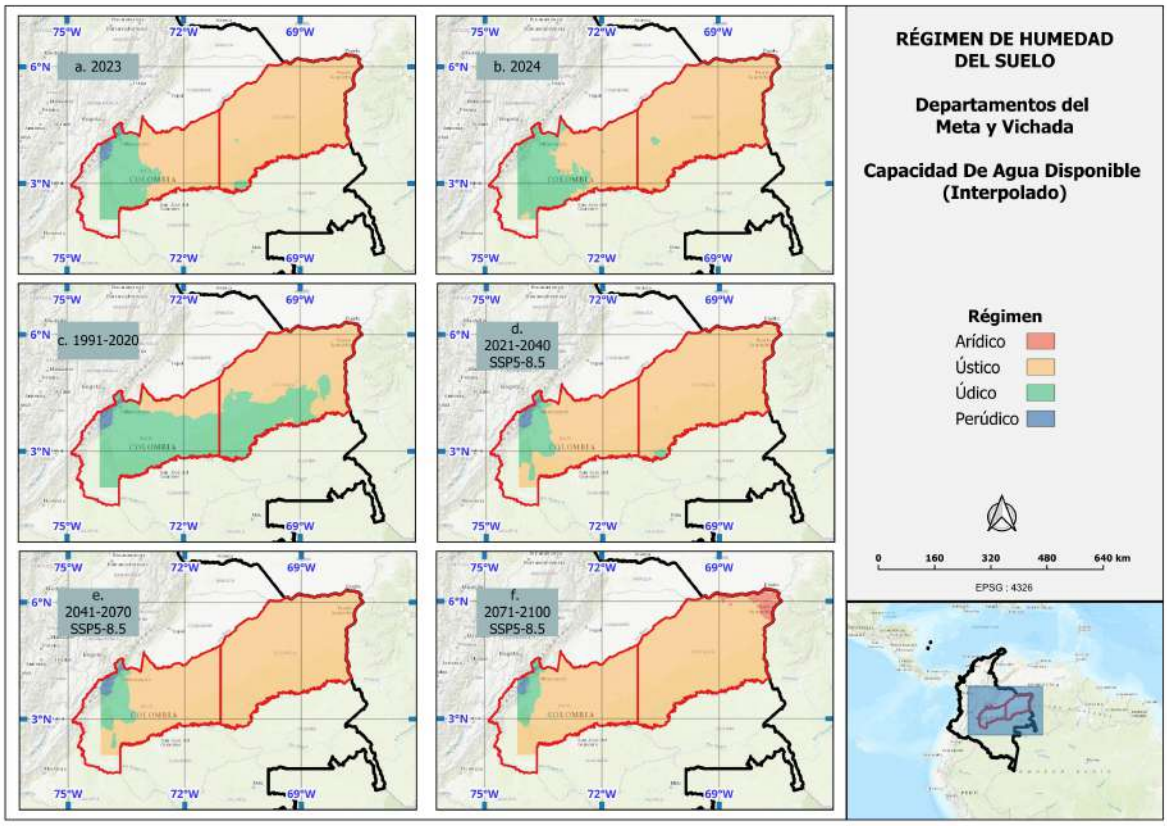

Figura **5-18**: Régimen de humedad histórico y en cambio climático.

Tabla **5-25**: Distribución del área de los regímenes de humedad para distintos periodos

RH	**1991--2020**		**2021--2040**		**2041--2070**		**2071--2100**	
	Área [km²]	**%**	**Área [km²]**	**%**	**Área [km²]**	**%**	**Área [km²]**	**%**
Arídico	0	0.00	0	0.00	0	0.00	4615	2.71
Ústico	78281	45.94	153157	89.88	155885	91.48	156344	91.75
Údico	89392	52.46	14134	8.29	11430	6.71	7250	4.25
Perúdico	2732	1.60	3114	1.83	3090	1.81	2196	1.29
Total	**170405**	**100**	**170405**	**100**	**170405**	**100**	**170405**	**100**

(89 392 km^2), seguido por el régimen ústico con 45.94 % (78 281 km^2), mientras que el régimen perúdico representó una proporción marginal (1.60 %). Este patrón refleja un balance hídrico edafoclimático dominado por condiciones relativamente húmedas en el largo plazo. No obstante, bajo el escenario de cambio climático SSP5--8.5, se evidencia una transformación sustancial en la distribución de los RH, caracterizada por la rápida expansión del régimen ústico y la contracción progresiva del régimen údico.

Para el periodo 2021-2040, el régimen ústico alcanzó 89.88 % del área, mientras que el régimen údico se reduce a 8.29 %, evidenciando una transición abrupta hacia condiciones más estacionales. Esta tendencia se intensifica en el periodo 2041-2070, donde el régimen ústico se consolida como dominante (91.48 %) y el régimen údico continúa su disminución (6.71 %). Hacia finales de siglo (2071-2100), el patrón alcanza su máxima expresión, con el régimen ústico ocupando 91.75 % del territorio y la emergencia del régimen arídico (2.71 %), lo que indica un incremento en la frecuencia e intensidad de condiciones de déficit hídrico en el suelo.

Estos resultados son coherentes con las proyecciones globales y regionales que indican un incremento sostenido de la temperatura y cambios en los patrones de precipitación en regiones tropicales bajo escenarios de altas emisiones (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [IPCC], 2023). Bajo el escenario SSP5-8.5, se prevé un secado y prolongación de la estación seca en Suramérica, lo que incrementa el riesgo de estrés hídrico en ecosistemas estratégicos (Arias et al., 2021). En la región de la Orinoquia, la dinámica de la precipitación está controlada por la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Mesa et al., 2021, Molina & Bernhofer, 2019). Alteraciones en la intensidad o posición de la ZCIT pueden modificar drásticamente el balance hídrico del suelo, acortando los periodos húmedos y exacerbando el déficit hídrico en el perfil (Arias et al., 2021, Hastenrath, 2012, Molina & Bernhofer, 2019).

Adicionalmente, la variabilidad interanual asociada al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) desempeña un papel clave, ya que los eventos El Niño reducen la precipitación, aumentan la radiación y elevan la evapotranspiración en Colombia (Manciu et al., 2023, Poveda et al., 2006). Esta modulación climática impacta directamente la humedad del suelo, favoreciendo la expansión del régimen ústico y la posible aparición de condiciones arídicas en años extremos (Gomez et al., 2019, Navarro-Monterroza et al., 2019, Poveda, 2004).

Sin embargo, los resultados también ponen de manifiesto la incertidumbre inherente a la modelación de los RH, especialmente en zonas de transición údico-ústico. Se ha evidenciado que el modelo Newhall puede presentar discrepancias significativas respecto a los balances hídricos medidos en campo en suelos tropicales altamente meteorizados (Camacho-Umaña et al., 2025). Esta sensibilidad estructural implica que pequeñas variaciones en la precipitación o en la parametrización de la CAD pueden alterar la clasificación final debido a la proximidad a los umbrales críticos del modelo (Treier et al., 2022)

En este contexto, las zonas de transición deben interpretarse como áreas de alta sensibilidad edafoclimática, donde la interacción entre el forzamiento climático y las propiedades hidrofísicas de los Oxisoles como su baja capacidad de retención de agua útil y su bimodalidad de poros, determina respuestas no lineales en el balance hídrico (Amézquita et al., 2004, Florian-Vergara et al., 2021). En conjunto, estos resultados evidenciaron que el cambio climático podría inducir una reconfiguración de los RH en la Orinoquia colombiana, con implicaciones directas sobre la aptitud de uso del suelo y la resiliencia de los sistemas productivos ante la variabilidad futura (Guzmán et al., 2022, Rincón et al., 2023).

Los resultados discutidos hasta aquí se orientaron a cuantificar la incertidumbre asociada con la determinación del régimen de humedad del suelo, un atributo de naturaleza taxonómica. Sin embargo, la información generada durante el monitoreo admite una lectura aplicada que conviene ampliar, dado que la conclusión central de la investigación tiene un corolario directo sobre la ingeniería de riego. Si la capacidad de agua disponible constituyó la principal fuente de incertidumbre en la clasificación, superando la influencia de los productos climáticos, entonces ese mismo parámetro gobierna el diseño de los sistemas de riego que se establecen en la región, y un proyecto que adopte valores generalizados de almacenamiento reproducirá el sesgo que se documentó para el modelo de Newhall con láminas de 150 y 200 mm, aunque con consecuencias de orden económico antes que clasificatorio.

El recálculo del agua aprovechable a partir de las propiedades físicas por horizonte de la Tabla 5-3 permite precisar esa afirmación. Mientras la capacidad de agua disponible ponderada en la sección control de humedad mostró una notable convergencia entre sitios, con valores entre 28.77 y 32.47 mm, la lámina aprovechable por unidad de profundidad en el intervalo que las raíces efectivamente exploran presentó una variabilidad mucho mayor, con un promedio de 68 mm por metro y un rango de 36 mm/m en VEGAS a 93 mm/m en LALIBERTAD. Estos valores se ubican en el extremo inferior de lo que se reporta para texturas medias y finas en otras regiones, comportamiento atribuible a la bimodalidad de poros ya discutida en el numeral 5.1.3.3, donde la fracción microporosa de los microagregados cementados por óxidos de hierro y aluminio retiene agua a tensiones que la planta no vence. La coincidencia de magnitudes entre perfiles texturalmente opuestos, como YUCAO con más del 67 % de arena y CARIMAGUA con menos del 9 %, confirma que la textura por sí sola no permite estimar la reserva útil en estos suelos y que las funciones de pedotransferencia calibradas en ambientes templados conducen a sobreestimaciones sistemáticas.

Al combinar esa reserva con la profundidad radical efectiva que imponen la acidez y la saturación de aluminio crecientes en profundidad, cercana a 0.40 m según las descripciones morfológicas y los análisis químicos de los perfiles, la lámina aprovechable en la zona de raíces se reduce a un intervalo de 15 a 36 mm. Frente a demandas atmosféricas del orden de 6.5 mm diarios durante la estación seca, el intervalo entre aplicaciones resulta de uno a tres días, lo que sitúa a la Altillanura plana en un régimen de manejo de alta frecuencia y lámina reducida. Esta condición, derivada enteramente de los datos del estudio, resulta incompatible con los esquemas de turnos semanales y láminas superiores a 40 mm empleados en distritos de riego del interior del país, y refuerza la idea de que el suelo no dispone aquí de capacidad para actuar como reservorio intermedio. La sensibilidad que se evidenció en el numeral 5.2.2.1, donde la reducción del 50 % en la lámina aprovechable modificó el régimen de seis de los ocho sitios, es la expresión clasificatoria del mismo fenómeno.

La coexistencia de déficit y exceso estacional en el mismo perfil, que la investigación documentó con nitidez, sugiere además que las estrategias de manejo del agua en la región no pueden abordarse de manera separada. Los sitios con predominio de condiciones secas persistentes durante la estación seca son en varios casos los mismos que registraron plintita blanda o condiciones de saturación prolongada durante el período lluvioso, como ocurrió en NUBES, CARIMAGUA y de manera marcada en VEGAS, donde la condición saturada alcanzó el 59 % del año en el sensor profundo. Esta simultaneidad abre una posibilidad de manejo que merece atención: el control del drenaje mediante estructuras regulables, orientado a evacuar excesos en el período lluvioso y a conservar humedad en el perfil durante el período deficitario.

Las zonas de transición identificadas en el numeral 5.4.1.2, que ocuparon el 39.36 % del territorio, adquieren también un significado práctico en este contexto. Corresponden a los sectores donde una decisión de inversión basada en un solo año de información tiene mayor probabilidad de resultar equivocada, y donde la proyección bajo el escenario SSP5-RCP8.5, con la contracción del régimen údico del 52.46 % al 8.29 % del área entre la normal climática y el período 2021-2040, introduce un elemento adicional de riesgo para la planificación de infraestructura de larga vida útil.

Para mayor aclaración de las implicaciones se eralizó un capítulo digital, ubicado en el siguiente vínculo, relacioando de recomendaciones para Riego y Drenaje con base en la investigación: Repositorio de GitHub - Capítulo 8 (Anexo Tesis)

6 Conclusiones

Esta investigación permitió evaluar de manera global la incertidumbre asociada a la determinación y espacialización del régimen de humedad del suelo en la Altillanura plana del departamento del Meta, evidenciando limitaciones estructurales tanto en la disponibilidad de información como en la parametrización de los modelos edafoclimáticos.

Para la estimación de la sección control de humedad del suelo (SCH) en la altillanura plana del departamento del Meta, se encontró una alta variabilidad asociada a las características físicas del suelo. La SCH definida a partir de datos de campo difiere de los valores teóricos sugeridos en la taxonomía de suelos, lo que evidencia, la necesidad de su determinación apoyada en datos de campo para las condiciones específicas del trópico, de manera tal, que se reduzca la incertidumbre en la clasificación del régimen de humedad.

Respecto a la determinación y modelación de los regímenes de humedad del suelo (RH), se concluye que el modelo de Newhall permite reproducir de manera general la dinámica del régimen de humedad; sin embargo, su desempeño está fuertemente condicionado por la parametrización edáfica, especialmente por la capacidad de agua disponible (CAD). Con valores de CAD cercanos a los observados en campo, el modelo presenta una concordancia moderada con los datos medidos, mientras que el uso de valores generalizados o estándar conduce a una sobreestimación sistemática de condiciones más húmedas, evidenciando limitaciones en su aplicación en ambientes tropicales.

En cuanto a la espacialización y simulación de los regímenes de humedad del suelo, se pudo establecer que la distribución espacial del régimen de humedad es altamente sensible a la variación de la CAD, generando cambios significativos en la proporción de áreas clasificadas bajo diferentes regímenes. Asimismo, bajo el escenario de cambio climático SSP5-RCP8.5, se evidenció una tendencia hacia la intensificación del déficit hídrico y modificaciones en la distribución espacial del RH, lo que sugiere posibles implicaciones para la disponibilidad de agua en el suelo y la planificación del uso del territorio en la región.

La investigación, permitió identificar la CAD como principal fuente de incertidumbre en la determinación y espacialización del régimen de humedad del suelo en la parametrización edáfica, superando la influencia de los datos climáticos. Esto resalta la necesidad de incorporar información edáfica detallada y específica del sitio en los procesos de modelación y cartografía de suelos en ambientes tropicales.

7 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y considerando las limitaciones identificadas en la investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para el desarrollo de estudios futuros orientados a mejorar la determinación y modelación del RH en regiones tropicales:

En primer lugar, se recomienda ampliar el tamaño muestral mediante la instalación de nuevos sitios instrumentados y el fortalecimiento de redes de monitoreo de humedad del suelo. Esto permitiría mejorar la robustez estadística de los análisis de validación, reducir la incertidumbre asociada al coeficiente Kappa y facilitar la identificación de patrones espaciales y categóricos más consistentes.

En segundo lugar, profundizar en la caracterización edáfica, particularmente en la estimación de la capacidad de agua disponible en especial en la sección control de humedad del suelo. Dado que este parámetro fue identificado como la principal fuente de incertidumbre en la modelación del RH, es necesario avanzar hacia metodologías que integren mediciones directas, funciones de pedotransferencia y análisis de variabilidad vertical dentro del perfil del suelo, con el fin de representar de manera más realista la dinámica hidrológica edáfica.

Asimismo, se recomienda realizar procesos de calibración local del modelo de Newhall, ajustando sus parámetros a las condiciones específicas de los suelos tropicales con alta hetereogeneidad pedológica. La incorporación de propiedades como la textura, la densidad aparente, la estructura del suelo y la profundidad efectiva podría contribuir a mejorar la capacidad predictiva del modelo y reducir los sesgos asociados al uso de valores generalizados.

En relación con la modelación climática, incorporar datos provenientes de estaciones meteorológicas locales o redes densificadas, así como evaluar la incertidumbre asociada a productos climáticos globales. La integración de múltiples fuentes de datos climáticos permitiría mejorar la representación de la variabilidad espacial y temporal de los forzantes atmosféricos.

Adicionalmente, se recomienda ampliar el análisis de escenarios de cambio climático mediante la inclusión de múltiples trayectorias socioeconómicas y horizontes de ventanas temporales mas pequeños que un año normal climático, lo que permitiría evaluar la sensibilidad del RH bajo diferentes contextos de emisiones y fortalecer la robustez de las proyecciones.

Desde una perspectiva metodológica, complementar el análisis de concordancia con métricas adicionales de evaluación por clase (precisión, sensibilidad, especificidad), así como implementar enfoques probabilísticos o bayesianos que permitan cuantificar explícitamente la incertidumbre en la clasificación del RH.

Finalmente, se recomienda avanzar hacia enfoques integrados de modelación que combinen modelos de balance hídrico con técnicas de mapeo digital de suelos y aprendizaje automático, con el fin de capturar de manera más adecuada la complejidad espacial de los sistemas edafoclimáticos y mejorar la aplicabilidad de los resultados en la planificación territorial y la gestión sostenible del suelo.

Referencias Bibliográficas

Ahrens, R. J., Bockheim, J. G., & Ping, C. L. (2004). The Gelisol Order in Soil Taxonomy. En J. M. Kimble (Ed.), *Cryosols: Permafrost-Affected Soils* (pp. 783-801). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-06429-0_32

Amer, A. M. M. (2009). Moisture adsorption capacity and surface area as deduced from vapour pressure isotherms in relation to hygroscopic water of soils. *Biologia*, *64*(3), 516-521. https://doi.org/10.2478/s11756-009-0073-z

Amézquita, E., Thomas, R. J., Rao, I. M., Molina, D., & Hoyos, P. (2004). Use of deep-rooted tropical pastures to build-up an arable layer through improved soil properties of an Oxisol in the Eastern Plains (Llanos Orientales) of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *103*(2), 269-277. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.017

Arenas-Bautista, M. C., Arboleda-Obando, P. F., Duque-Gardeazábal, N., Saavedra-Cifuentes, E., & Donado, L. D. (2018, julio). Hydrological Modeling in Tropical Regions via TopModel. Study Case: Central Sector of the Middle Magdalena Valley - Colombia [Versión 1. Este es un preprint que no ha sido revisado por pares. Publicado: 12 de julio de 2018]. https://doi.org/10.20944/preprints201807.0210.v1

Arguez, A., & Vose, R. S. (2011). The Definition of the Standard WMO Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *92*(6), 699-704. https://doi.org/10.1175/2010BAMS2955.1

Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). La climatología colombiana en modelos CMIP5/CMIP6: Sesgos persistentes y mejoras. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (100), 75-96. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525

Bardhan, G., Chaudhari, S. K., & Mohapatra, P. K. (2007). Effect of Irrigation Water Quality on Saturated Hydraulic Conductivity of Typic Haplustert, Vertic Haplustept, and Lithic Ustorthent Soils [Indian Society of Agrophysics]. *Journal of Agricultural Physics*, *7*, 38-46. https://www.researchgate.net/publication/267757848

Beaudette, D., Roudier, P., & Brown, A. (2023). *aqp: Algorithms for Quantitative Pedology* [R package version 2.0]. https://CRAN.R-project.org/package=aqp

Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & de Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*, 589-615. https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017

Beven, K. J. (2001). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons.

Billaux, P. (1978). Estimation du régime hydrique des sols au moyen des données climatiques. La méthode graphique: son utilisation dans le cadre de la taxonomie américaine des sols [English summary available]. *Cahiers ORSTOM - Série Pédologie*, *16*(3), 317-338.

Biswas, A., Zeleke, T. B., & Si, B. (2012). Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. *Nonlinear Processes in Geophysics*, *19*(2), 227-240. https://doi.org/10.5194/npg-19-227-2012

Bockheim, J. G., Gennadiyev, A. N., Hartemink, A. E., & Brevik, E. C. (2014). Soil-forming factors and Soil Taxonomy. *Geoderma*, 231-237. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.016

Bockheim, J. G. (2015). *Cryopedology* (1st). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08485-5

Bockheim, J. G., & Hartemink, A. E. (2017). *The Soils of Wisconsin*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52144-2

Boizard, H., Peigné, J., Sasal, M. C., Guimarães, M. d. F., Piron, D., Tomis, V., Vian, J.-F., Cadoux, S., Ralisch, R., Tavares Filho, J., Heddadj, D., de Battista, J., Duparque, A., Franchini, J. C., & Roger-Estrade, J. (2016). Developments in the "profil cultural" method for an improved assessment of soil structure under no-till. *Soil and Tillage Research*, *173*, 92-103. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.007

Bonfante, A., Basile, A., Manna, P., & Terribile, F. (2010). Soil moisture regime classification of Soil Taxonomy through physically based soil water balance modelling. *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world*, 27-30. https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/1858.pdf

Bonfante, A., Basile, A., Manna, P., & Terribile, F. (2011). Use of Physically Based Models to Evaluate USDA Soil Moisture Classes. *Soil Science Society of America Journal*, *75*(1), 181-191. https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0403

Borges, M. I. S. (2023). Distribución espacial de los períodos de disponibilidad de agua en los llanos venezolanos y su proyección para los escenarios de cambio climático SSP y modelo GISS-E2-1-G. *Revista de Climatología*, *23*, 125. https://doi.org/10.59427/rcli/2023/v23.125-138

Bui, E. N., & Moran, C. J. (2001). Discrete and continuous modeling of soil attributes for land resource assessment. *Soil Science Society of America Journal*, *65*(4), 1198-1207. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6541198x

Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C., & McDaniel, P. A. (2011). *Soil genesis and classification* (6.ª ed.) [Incluye láminas en color y bibliografía (p. 437-529)]. Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9780470960622

Buringh, P., & Sombroek, W. G. (1971). *Ferrallitic and Plinthitic Soils* (Technical Report). Wageningen Agricultural University. Wageningen, Netherlands. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/304251

Calì, A., Ceotto, E., & Costantini, E. A. C. (1996). Applicazione del modello EPIC per la classificazione del pedoclima e confronto con altri metodi e con indici climatici. *Bollettino della Società Italiana della Scienza del Suolo*, *8*(1), 61-86. https://www.siss.it/en/journal

Calzolari, C., & Filippi, N. (2016). Evolution of key concepts in modern pedology with reference to Italian soil survey history. *Geoderma*, *264*, 275-283. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.024

Camacho-Umaña, M. E., Forsythe, W. M., & Alvarado-Hernández, A. (2025). Un método sencillo para determinar el régimen de humedad en suelos tropicales altamente meteorizados [Publicado: 2025-07-14]. *Agronomía Costarricense*, *49*(2). https://doi.org/10.15517/e0cqsz43

Campbell Scientific, Inc. (2021). *PC400 Datalogger Support Software: Manual* (Revision 3/21). Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, USA.

Campbell Scientific, Inc. (2026). *CS616 and CS625 Water Content Reflectometers: Instruction Manual* (Revision 1/26). Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, USA.

Carranza, C., van der Ploeg, M., & Torfs, P. J. J. F. (2018). Using lagged dependence to identify (de)coupled surface and subsurface soil moisture values. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(4), 2255-2267. https://doi.org/10.5194/hess-22-2255-2018

Cartacuzencu, S., Coman, A., Roșu, G., Tincu, R., & Lazăr, G. (2016). Analysis of hydric erosion produced by the Siret River, Romania during 1989 - 2008. *Environmental Engineering and Management Journal*, *15*(3), 537-544. https://doi.org/10.30638/eemj.2016.058

Chen, S., Ma, W., Xu, D., Li, S., Ji, W., & Shi, Z. (2017). Soil classification of multi-horizontal profiles using support vector machines and vis-NIR spectroscopy [⟨hal-01606621⟩]. *Pedometrics 2017*, 298. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01606621

Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, *20*(1), 37-46.

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, *37*(1), 35-46.

Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices* (3rd). CRC Press.

Costantini, E. A. C., Castelli, F., Raimondi, S., & Lorenzoni, P. (2002). Assessing Soil Moisture Regimes with Traditional and New Methods. *Soil Science Society of America Journal*, *66*, 1889-1896. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1889

D'Avello, T. P., Waltman, W. J., Waltman, S. W., Thompson, J. A., & Brennan, J. (2019). Revisiting the Pedocal/Pedalfer boundary and Soil Moisture Regimes using the javaNewhall simulation model and PRISM data. *Geoderma*, *353*, 125-132. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.042

Diaz, J. D., Monterroso, A. I., Ruiz, P., Lechuga, L. M., Álvarez, A. C., & Asensio, C. (2019). Soil moisture regimes in Mexico in a global 1.5°C warming scenario. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *11*(4), 465-482. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2018-0062

Drohan, P. J., Thompson, J. A., Lindbo, D., Beaudette, D., & Dadio, S. (2020). Redefining the fragipan to improve field recognition and land use relevance. *Soil Science Society of America Journal*, *84*(4), 1055. https://doi.org/10.1002/saj2.20098

Feddes, R. A. (1971). Water, heat and crop growth [Doctoral Dissertation]. Wageningen University [Promotor: Prof. dr. C. T. de Wit]. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/106454

Florian-Vergara, C., Salas, H. D., & Builes-Jaramillo, A. (2021). Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE. *TecnoLógicas*, *24*(52), e2144. https://doi.org/10.22430/22565337.2144

Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, *80*(1), 185-201. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4

Forbes Colombia. (2025, 3 de julio). Cómo la Orinoquía colombiana puede convertirse en una potencia agrícola mundial. Consultado el 21 de abril de 2026, desde https://forbes.co/2025/07/03/editors-picks/como-la-orinoquia-colombiana-puede-convertirse-en-una-potencia-agricola-mundial

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes [Número de artículo: 150066]. *Scientific Data*, *2*, 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Funk, C. C., Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H., Verdin, J. P., Rowland, J. D., Romero, B. E., Husak, G. J., Michaelsen, J. C., & Verdin, A. P. (2014). *A quasi-global precipitation time series for drought monitoring* (inf. téc. N.º Data Series 832). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ds832

Ganatsios, H. P., Tsioras, P. A., Papaioannou, A. G., & Blinn, C. R. (2021). Short Term Impacts of Harvesting Operations on Soil Chemical Properties in a Mediterranean Oak Ecosystem. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *42*(3), 16. https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.1100

Gao, L., Shao, M., Peng, X., & She, D. (2015). Spatio-temporal variability and temporal stability of water contents distributed within soil profiles at a hillslope scale. *CATENA*, *132*, 29-36. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.022

Gile, L. H., Hawley, J. W., & Grossman, R. B. (1981). *Soils and geomorphology in the Basin and Range area of southern New Mexico: Guidebook to the Desert Project* [Memoir 39, New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources]. https://doi.org/10.58799/m-39

Gomez, J. D., Monterroso, A. I., Ruiz, P., Lechuga, L. M., Álvarez, A. C. C., & Asensio, C. (2019). Soil moisture regimes in Mexico in a global 1.5°C warming scenario. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *11*, 465-482. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-08-2018-0062

González-Orozco, C. E., Diaz-Giraldo, R. A., & Rodriguez-Castañeda, C. (2023). An early warning for better planning of agricultural expansion and biodiversity conservation in the Orinoco high plains of Colombia [Disponible en: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2023.1192054/full]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *7*, 1192054. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1192054

Google Earth Engine Team. (2025). Google Earth Engine [Plataforma para análisis geoespacial en la nube.]. https://earthengine.google.com/

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [Special Issue: Big Remotely Sensed Data: tools, applications and experiences]. *Remote Sensing of Environment*, *202*, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Guarín Giraldo, G. W. (2023). Variabilidad espacial y temporal del almacenamiento de agua en el suelo en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *37*(142), 99-121. https://doi.org/10.18257/raccefyn.37(142).2013.2537

Guzmán, F. J. H., Leguízamo, J. A. C., & Díaz-Almanza, E. D. (2022). A methodological proposal for quality control of the soil moisture variable, measured in Colombian automatic agrometeorological stations. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *75*(3), 10023-10031. https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n3.99145

Hartemink, A. E., Krasilnikov, P., & Bockheim, J. G. (2013). Soil maps of the world. *Geoderma*, 256-267. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.003

Hastenrath, S. (2012). Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. *Climatic Change*, *112*(2), 243-251. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0227-1

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis [Disponible en: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.3803]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Hillel, D. (2013). *Introduction to Environmental Soil Physics* (1st). Academic Press. https://www.elsevier.com/books/introduction-to-environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348655-4

Hohenbrink, T. L., Jackisch, C., Durner, W., Germer, K., Iden, S. C., Kreiselmeier, J., Leuther, F., Metzger, J. C., Naseri, M., & Peters, A. (2023). Soil water retention and hydraulic conductivity measured in a wide saturation range. *Earth System Science Data*, *15*(10), 4417. https://doi.org/10.5194/essd-15-4417-2023

Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology* (Rev. ed) [With photographic supplement prepared by Joseph A. Tosi, Jr. Includes bibliographical references (p. 200-206)]. Tropical Science Center. https://catalog.princeton.edu/catalog/996798193506421

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). *Atlas Climatológico de Colombia* [Versión 2018. Disponible en: http://atlas.ideam.gov.co/]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. http://atlas.ideam.gov.co

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023a). Coberturas de la tierra de Colombia [Conjunto de datos geoespaciales. Escala 1:100.000.].

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023b). *Normales Climatológicas 1991-2020* [Precipitación total mensual y anual. Resolución: 1 km.]. IDEAM - Subdirección de Meteorología. https://catalogo.ideam.gov.co/

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2024). *Escenarios de cambio climático para la planificación y la toma de decisiones en Colombia* (Reporte técnico). IDEAM.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Meta: Tomo I* (**1**). Subdirección de Agrología, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2015). *Suelos y Tierras de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2023). *Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos* (Novena edición). Subdirección de Agrología, IGAC.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Subdirección de Agrología. (2014). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Vichada: escala 1:100.000* [Incluye 1 CD-ROM con memoria técnica, análisis de laboratorio, perfiles y cartografía temática. Bibliografía p. 365-369, glosario p. 372-385]. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Water Cycle Changes [Open Access under Creative Commons CC-BY-NC-ND 4.0]. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 1055-1210). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.010

Jabro, J. D., Stevens, W. B., Iversen, W. M., Allen, B. L., & Sainju, U. M. (2020). Irrigation scheduling based on wireless sensors output and soil-water characteristic curve in two soils. *Sensors*, *20*(5), 1336. https://doi.org/10.3390/s20051336

Jamieson, P., Porter, J., & Wilson, D. (1991). A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, *27*(4), 337-350. https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3

Jarauta, E. (1989). Modelos matemáticos del régimen de humedad de los suelos. Aplicación a la determinación del régimen de humedad de los suelos del área meridional de Lleida [Doctoral Thesis]. Universitat Politècnica de Catalunya [Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología]. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93773

Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. McGraw-Hill Book Company.

Kim, H.-Y. (2016). Statistical notes for clinical researchers: Sample size calculation 2. Comparison of two independent proportions [Este artículo es clave para justificar el cálculo de tamaño muestral. Explica que cuando se esperan frecuencias esperadas menores a 5 en alguna celda, se debe usar la prueba exacta de Fisher.]. *Restorative Dentistry & Endodontics*, *41*(2), 154-156. https://doi.org/10.5395/rde.2016.41.2.154

Kim, H.-Y. (2017). Statistical notes for clinical researchers: Chi-squared test and Fisher's exact test [Este artículo detalla cuándo la prueba de Chi-cuadrado no es fiable (frecuencias esperadas < 5 en alguna celda) y por qué Fisher's exact test es la alternativa adecuada. Es la referencia perfecta para respaldar tu elección metodológica.]. *Restorative Dentistry & Endodontics*, *42*(2), 152-155. https://doi.org/10.5395/rde.2017.42.2.152

Kirsten, M., Mikutta, R., Kimaro, D. N., Feger, K., & Kalbitz, K. (2021). Aluminous clay and pedogenic Fe oxides modulate aggregation and related carbon contents in soils of the humid tropics. *SOIL*, *7*(2), 363. https://doi.org/10.5194/soil-7-363-2021

Kühn, V. d. O., Lopes, B. d. C. F. L., Borges, C. R., Massocco, N. S., & Neto, M. P. C. (2021). Relationship between pore-size distribution and compressibility of a lateritic soil. *Géotechnique Letters*, *11*(4), 326. https://doi.org/10.1680/jgele.21.00063

Kühn, V. d. O., Lopes, B. d. C. F. L., Caicedo, B., & Neto, M. P. C. (2021). Micro-structural and volumetric behaviour of bimodal artificial soils with aggregates. *Engineering Geology*, *288*, 106139. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106139

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977a). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, *33*(1), 159-174.

Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977b). The measurement of observer agreement for categorical data [Establece la escala de interpretación del coeficiente Kappa (0.41-0.60 = moderado, 0.61-0.80 = sustancial)]. *Biometrics*, *33*(1), 159-174. https://doi.org/10.2307/2529310

Li, M., Wu, P., Sexton, D. M. H., & Ma, Z. (2021). Potential shifts in climate zones under a future global warming scenario using soil moisture classification. *Climate Dynamics*, *56*(7), 2071-2092. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05576-w

Liang, X., Liakos, V., Wendroth, O., & Vellidis, G. (2016). Scheduling irrigation using an approach based on the van Genuchten model. *Agricultural Water Management*, *176*, 170-179. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.030

Lin, H. (2010). Earth's Critical Zone and hydropedology: concepts, characteristics, and advances [Acceso abierto bajo licencia Creative Commons]. *Hydrology and Earth System Sciences*, *14*(1), 25-45. https://doi.org/10.5194/hess-14-25-2010

Lin, H., Drohan, P. J., & Green, T. R. (2015). Hydropedology: The last decade and the next decade [Hydropedology Symposium: 10 Years Later and 10 Years into the Future]. *Soil Science Society of America Journal*, *79*(2), 357-361. https://doi.org/10.2136/sssaj2015.02.0069

Litalien, A., & Zeeb, B. (2020). Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. *Science of the Total Environment*, *698*, 134235. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134235

Liu, M., & Han, G. (2020). Assessing soil degradation under land-use change: insight from soil erosion and soil aggregate stability in a small karst catchment in southwest China. *PeerJ*, *8*, e8908. https://doi.org/10.7717/peerj.8908

Lizcano, A., Herrera, M. C., & Santamaría, J. C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia / Volcanic ash soils in Colombia. *Revista de Ingeniería*, *6*(23), 167-175. https://doi.org/10.16924%2Friua.v0i23.332

Loaiza, J. C., Poch, R., & Pauwels, V. R. (2010). Evaluation of soil water moisture regime prediction methods in the mountain region of Catalan Pre-Pyrenees. *Suelos Ecuatoriales*, *40*(1), 38-50.

Loaiza-Usuga, J. C., & Poch, R. M. (2009). Evaluation of soil water balance components under different land uses in a mediterranean mountain catchment (Catalan Pre-Pyrenees NE Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, *53*(4), 519-537. https://doi.org/10.1127/0372-8854/2009/0053-0519

Long, X., Ji, J., Barrón, V., & Torrent, J. (2016). Climatic thresholds for pedogenic iron oxides under aerobic conditions: Processes and their significance in paleoclimate reconstruction. *Quaternary Science Reviews*, *150*, 264-277. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.08.031

Lundström, U. S., van Breemen, N., & Bain, D. (2000). The podzolization process. A review. *Geoderma*, *94*(2-4), 91-107. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00036-1

Ma, Y. .-., Li, X. .-., Guo, L., & Lin, H. (2017). Hydropedology: Interactions between pedologic and hydrologic processes across spatiotemporal scales. *Earth-Science Reviews*, *171*, 181-195. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.001

Malagón Castro, D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - Énfasis en génesis y aspectos ambientales. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *27*(104), 319-341. https://doi.org/10.18257/raccefyn.27(104).2003.2082

Malone, B. P., Minasny, B., & Brungard, C. (2019). Some methods to improve the utility of conditioned Latin hypercube sampling. *PeerJ*, *7*, e6451. https://doi.org/10.7717/peerj.6451

Manciu, A., Rammig, A., Krause, A., & Quesada, B. (2023). Impacts of land cover changes and global warming on climate in Colombia during ENSO events. *Climate Dynamics*, *61*(1), 111-129. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06545-1

Mapfumo, E., Chanasyk, D. S., & Willms, W. D. (2004). Simulating daily soil water under foothills fescue grazing with the soil and water assessment tool model (Alberta, Canada). *Hydrological Processes*, *18*, 2787-2800. https://doi.org/10.1002/hyp.1493

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (Eds.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, *117*(1-2), 3-52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4

McDaniel, P. A., Lowe, D. J., Arnalds, O., & Ping, C.-L. (2012). Andisols. En P. M. Huang, Y. Li & M. E. Summer (Eds.), *Handbook of Soil Sciences: Properties and Processes* (2.ª ed., pp. 29-1-29-26, **1**). CRC Press.

McGechan, M. B. (2002). Effects of timing of slurry spreading on leaching of soluble and particulate inorganic phosphorus explored using the MACRO model. *Biosystems engineering*, *83*(2), 237-252. https://doi.org/10.1006/BAE.2001.0115

Mesa, O. J., Urrea, V., & Ochoa, A. (2021). Trends of hydroclimatic intensity in Colombia [Publicado el 16 de julio de 2021]. *Climate*, *9*(7), 120. https://doi.org/10.3390/cli9070120

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, *32*(9), 1378-1388. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2013). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, *199*, 133-140. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.014

Mohseni, F., & Mokhtarzade, M. (2020). A new soil moisture index driven from an adapted long-term temperature–vegetation scatter plot using MODIS data. *Journal of Hydrology*, *581*, 124420. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124420

Molina, O. D., & Bernhofer, C. (2019). Projected climate changes in four different regions in Colombia. *Environmental Systems Research*, *8*(1), 33. https://doi.org/10.1186/s40068-019-0161-1

Monteverde, C. A. (2014). Contribución al conocimiento de los regímenes de humedad de los suelos de la isla de Tenerife [Doctoral Thesis]. Universidad de La Laguna. https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/54 ISBN: 978-84-15939-20-7.

Moreno-Conn, L. M., Rodríguez-Hernández, N. S., Arguello, J. O., Gordillo, O. J. G., Bernal-Riobo, J. H., Arango, M., & Baquero, J. E. (2022). Land use change and its effect on ecosystem services in an Oxisol of the eastern high plains of Meta department in Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 687804. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.687804

Muñoz Sabater, J. (2019). *ERA5-Land hourly data from 1981 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store. https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac

Nachtergaele, F. O., Spaargaren, O., Deckers, J. A., & Ahrens, B. (2000). New developments in soil classification World Reference Base for Soil Resources. *Geoderma*, *96*, 345-357. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00023-9

NASA/NGA and Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2011). *Modelo Digital de Elevación SRTM 30 metros - Colombia* (Ver. SRTM v3.0) [Resolución: 30 m.]. Plataforma Colombia en Mapas - IGAC.

Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2019). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *43*(166), 120-133. https://doi.org/10.18257/raccefyn.704

Newhall, F., & Berdanier, C. R. (1996). *Calculation of Soil Moisture Regimes from the Climatic Record* (Soil Survey Investigation Report N.º 46) (Revision 4, originally published 1972, revised 1996). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/SSIR46_0.pdf

Organization, W. M. (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. World Meteorological Organization.

Owen, R. K., Webb, E. B., Haukos, D. A., Fritschi, F. B., & Goyne, K. W. (2020). Barnyardgrass (Echinochloa crusgalli) emergence and growth in a changing climate in great plains wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, *28*(1), 35-50. https://doi.org/10.1007/s11273-019-09693-0

Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J., & Lin, H. S. (2006). Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*, *131*(3-4), 308-316. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.012

Papendick, R. I., & Campbell, G. S. (1981). Theory and Measurement of Water Potential. En J. F. Parr, W. R. Gardner & L. F. Elliott (Eds.), *Water Potential Relations in Soil Microbiology* (pp. 1-22). Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub9.c1

Parra, A. S., Rojas, B. A. R., & Arrieta, N. V. (2020). Análisis textural en la regulación de funciones ecosistémicas en sistemas agroforestales de un oxisol de Piedemonte Llanero en época seca, Colombia. *Idesia*, *38*(3), 43. https://doi.org/10.4067/s0718-34292020000300043

Pérez-Cutillas, P., Barberá, G. G., & Conesa-García, C. (2018). Effects of the texture and organic matter values in the estimation of the soil water content at a regional scale. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, *44*(2), 697-718. https://doi.org/10.18172/cig.3484

Physical Sciences Laboratory. (2026). Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2) [Última actualización de datos: 6 de febrero de 2026. Consultado: 15 de marzo de 2026]. *National Oceanic, Atmospheric Administration (NOAA)*. Consultado el 15 de marzo de 2026, desde https://psl.noaa.gov/enso/mei/

Pimentel, J. N., Rogéliz, C. A., & Walschburger, T. (2021). Hydrological Modeling for Multifunctional Landscape Planning in the Orinoquia Region of Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.673215

Pires, L. F. (2023). Changes in Soil Water Retention and Micromorphological Properties Induced by Wetting and Drying Cycles. *Soil Systems*, *7*(2), 51. https://doi.org/10.3390/soilsystems7020051

Portela, M., Santos, J., & Studart, M. T. D. C. (2020, enero). Effect of the Evapotranspiration of Thornthwaite and of Penman-Monteith in the Estimation of Monthly Streamflows Based on a Monthly Water Balance Model [asdfasdf]. En *Current Practice in Fluvial Geomorphology - Dynamics and Diversity* (pp. 1-14). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.88441

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *28*(107), 201-221. https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1991

Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *234*(1), 3-27. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031

Quénard, L., Samouëlian, A., Laroche, B., & Cornu, S. (2011). Lessivage as a major process of soil formation: A revisitation of existing data. *Geoderma*, 135-147. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.031

Quevedo-Nolasco, A., Ortiz-Solorio, C. A., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., Tijerina-Chávez, L., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2005). La sección de control de humedad en suelos aluviales con fines taxonómicos. *Ingenieria Hidraulica en Mexico*, *20*, 61-69.

R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

R Core Team. (2026). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

Ramachandran, J., Lalitha, R., Kannan, S. V., & Sivasubramanian, K. (2024). Geo-statistical assessment of spatial variability of soil water-holding capacity for optimal irrigation under semi-arid vertisols in South India. *Journal of Agriculture and Ecology*, *19*, 103. https://doi.org/10.58628/jae-2419-212

Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process: A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, *22*(11), 1543-1556. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.004

Reinhart, K. G. (1961). The Problem of Stones in Soil-Moisture Measurement. *Soil Science Society of America Journal*, *25*(4), 268-270. https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500040012x

Rincón, A., Hoyos, F. E., & Candelo-Becerra, J. E. (2023). Comparison, validation and improvement of empirical soil moisture models for conditions in Colombia. *Mathematical Biosciences & Engineering*, *20*(10), 17747-17764. https://doi.org/10.3934/mbe.2023789

Rippstein, G., Escobar, G., & Motta, F. (2001). *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia* [Disponible en CGSpace (Repositorio institucional del CGIAR)]. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/56151

Rivera, M., Amézquita, E., Bernal, J. H., & Rao, I. M. (2020). *Las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia: caracterización biofísica e importancia para la producción agropecuaria* [Disponible en el repositorio institucional de AGROSAVIA]. Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA). http://hdl.handle.net/20.500.12324/35790

Rodríguez, A., Rubiano S., Y., Gutierrez V., A. J., Bernal R., J. H., Rodríguez H., N. S., Arguello, O., & Pulido C., S. X. (2013, junio). *Cobertura vegetal y usos del suelo de la altillanura plana de los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, Meta: escala 1:25.000* [Convenio MADR-Corpoica-CIAT 2011-2012. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.12324/1267]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA).

Rodríguez-Vásquez, A. F. (2026a, abril). Modelación espacial de Newhall. Repositorio para la Incertidumbre en la Determinación y Espacialización del Régimen de Humedad del Suelo. Caso aplicado a la Altillanura plana- Departamento del Meta. https://doi.org/10.5281/zenodo.19423712

Rodríguez-Vásquez, A. F. (2026b, abril). Modelación puntual Newhall: Incertidumbre en la Determinación y Espacialización del Régimen de Humedad del Suelo. Caso aplicado a la Altillanura plana - Departamento del Meta. https://doi.org/10.5281/zenodo.19422692

Rogobete, G., & Grozav, A. (2013). Soil genesis and classification. *Research Journal of Agricultural Science*, *45*(2), 252-258. https://rjas.ro/paper_detail/2929

Roudier, P. (2021). *clhs: Conditioned Latin Hypercube Sampling* [R package version 0.8.0].

Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1994). *Fisiología Vegetal* (4.ª ed.) [Traducción al español de: Plant Physiology, 4th ed.]. Grupo Editorial Iberoamericana.

Salley, S. W., Sleezer, R. O., Bergstrom, R. M., Martin, P. H., & Kelly, E. F. (2016). A long-term analysis of the historical dry boundary for the Great Plains of North America: Implications of climatic variability and climatic change on temporal and spatial patterns in soil moisture. *Geoderma*, *274*, 104-113. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.020

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons.

Sanabria-Blandón, M. C. (2017). Effects of agricultural landscape of the Colombian Llanos on ecosystem services and assemblages of soil engineers [Tesis doctoral, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI] [Tesis doctoral]. https://theses.hal.science/tel-01585242

Sánchez, E. J. A., & Rubiano, S. Y. (2015). Procesos específicos de formación en Andisoles, Alfisoles y Ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, 85-97.

Sánchez, I., Inzunza, M. A., Catalán, E. A., González, J. L., González, G., & Velásquez, M. (2012). Variabilidad climática y productividad agrícola en zonas con errático régimen pluvial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *3*(4), 805-811. https://doi.org/10.29312/remexca.v3i4.1433

Schelling, J. (1970). Soil genesis, soil classification and soil survey. *Geoderma*, *4*, 165-193. https://doi.org/10.1016/0016-7061(70)90002-9

Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Staff, S. S. (2012). *Field Book for Describing and Sampling Soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., & Boris Orlowsky, A. J. T. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, *99*, 125-161. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004

Sidle, R. C., Gomi, T., Usuga, J. C. L., & Jarihani, B. (2017). Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. *Earth-Science Reviews*, *175*, 75-96. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.010

Silva Borges, M. I. (2023). Distribución espacial de los períodos de disponibilidad de agua en los llanos venezolanos y su proyección para los escenarios de cambio climático SSP y modelo GISS-E2-1-G [Publicado el 14 de noviembre]. *Revista de Climatología*, *23*, 125-138. https://doi.org/10.59427/rcli/2023/v23.125-138

Šimůnek, J., van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2012). Hydrus: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the asabe*, *55*(4), 1263-1274. https://doi.org/10.13031/2013.42239

Smith, G. D. (1986). *The Guy Smith interviews: Rationale for concepts in soil taxonomy* (SMSS Technical Monograph N.º 11) (Soil Management Support Services (SMSS) Technical Monograph No. 11). Cornell University, Department of Agronomy. Ithaca, NY. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/The%20Guy%20Smith%20Interviews.pdf

Soil and Plant Science Division Staff, USDA-NRCS & Brown, A. G. (2024). *Interface to the Java Newhall Simulation Model (jNSM) -- A Traditional Soil Climate Simulation Model* [R package version 0.3.1]. https://github.com/ncss-tech/jNSMR/

Soil Survey Staff. (1975). *Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA, United State Departament of Agriculture.

Soil Survey Staff. (1999, abril). *Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys* (2.ª ed., **436**).

Soil Survey Staff. (2010). *Keys to soil taxonomy* (Eleventh). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Consultado el 15 de marzo de 2026, desde https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050915.pdf

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy* (.-. NRCS/USDA, Ed.; 12.ª ed., **12**). Soil Conservation Service. https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494

Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13.ª ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy

Spaargaren, O. C., & Deckers, J. (1998). The World Reference Base for Soil Resources. En A. Schulte & D. Ruhiyat (Eds.), *Soils of Tropical Forest Ecosystems* (pp. 21-28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03649-5_2

Staff, S. S. D. (2017). *Soil survey manual* (C. Ditzler, K. Scheffe & H. Monger, Eds.) [Issued March 2017, 4th edition]. Government Printing Office.

Stehman, S. V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, *62*, 77-89. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00083-7

Stöckle, C. O., Kemanian, A. R., Nelson, R. L., Adam, J. C., Sommer, R., & Carlson, B. (2014). CropSyst model evolution: From field to regional to global scales and from research to decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, *62*, 361-369. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.006

Stolt, M. H., & Needelman, B. A. (2015). Fundamental Changes in Soil Taxonomy. *Soil Science Society of America Journal*, *79*, 1001-1007. https://doi.org/10.2136/sssaj2015.02.0088

Tejedor, M., Jiménez, C. C., & Díaz, F. (2002). Soil Moisture Regime Changes in Tephra-Mulched Soils: Implications for Soil Taxonomy. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(1), 202-206. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.2020

Tenelanda, D., Crespo, P., & Mosquera, G. M. (2018). Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *MASKANA*, *9*(2), 53. https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.07

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, *38*(1), 55-94. https://doi.org/10.2307/210739

Treier, C. L., Mietkiewicz, N., Loehman, R. A., Nauman, T. W., O'Donnell, M. C., Yackulic, C. B., & Duniway, M. C. (2022). Spatial Estimates of Soil Moisture for Understanding Ecological Potential and Risk: A Case Study for Arid and Semi-Arid Ecosystems. *Land*, *11*(10), 1856. https://doi.org/10.3390/land11101856

Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2018). *Metodología de evaluación de tierras para la zonificación con fines agropecuarios a escala general* (Guía Técnica N.º 1). Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). Bogotá, D.C., Colombia. https://www.upra.gov.co/documents/10184/104284/Evaluaci%C3%B3n+de+tierras+para+la+Zonificaci%C3%B3n+con+Fines+Agropecuarios+a+nivel+Nacional

van Dam, J. C., Groenendijk, P., Hendriks, R. F. A., & Kroes, J. G. (2008). Advances of Modeling Water Flow in Variably Saturated Soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, *7*(2), 640-653. https://doi.org/10.2136/vzj2007.0060

Vereecken, H., Kamai, T., Harter, T., Kasteel, R., Hopmans, J., & Vanderborght, J. (2007). Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: A stochastic unsaturated flow perspective. *Geophysical Research Letters*, *34*. https://doi.org/10.1029/2007GL031813

Visconti-Moreno, E. F., & Valenzuela-Balcázar, I. G. (2022). Pores distribution influences the soil microorganism's response to changes in temperature and moisture. *Eurasian Journal of Soil Science*, *12*(1), 28-37. https://doi.org/10.18393/ejss.1182338

Waltman, W. J., Goddard, S., Reichenbach, S. E., Gu, G., Cottingham, I. J., Peake, J. S., Tadesse, T., Harms, S. K., & Deogun, J. S. (2004). Digital Government: Reviving the Newhall Simulation Model to Understand the Patterns and Trends of Soil Climate Regimes and Drought Events. *5th Annual National Conference on Digital Government Research (dg.o 2004)*, 117-126. http://www.digitalgovernment.org/library/library/dgo2004/

Wambeke, A. R. V. (2000). *The Newhall Simulation Model for estimating soil moisture and temperature regimes* (Technical report). Department of Crop y Soil Sciences Cornell University. https://bfenvironmental.com/pdfs/nsmt.pdf

Wambeke, A. V. (1981). *Calculated Soil Moisture and Temperature Regimes of South America* (inf. téc. N.º 2). New York State College of Agriculture y Life Sciences, Cornell University, Department of Agronomy.

Wanders, N., Karssenberg, D., Bierkens, M., Parinussa, R., de Jeu, R., van Dam, J., & de Jong, S. (2012). Observation uncertainty of satellite soil moisture products determined with physically-based modeling. *Remote Sensing of Environment*, *127*, 341-356. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.004

Wang, J., Zhang, X., & Chen, Y. (2019). Evaluation of soil water classification methods using machine learning approaches. *Agricultural Water Management*, *216*, 315-326.

Wang, Y., Ma, J., & Guan, H. (2016). A mathematically continuous model for describing the hydraulic properties of unsaturated porous media over the entire range of matric suctions. *Journal of Hydrology*, *541*, 873-888. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.046

Welsch, D. R. W. (2024). *newhall: R Implementation of the USDA-NRCS Newhall Simulation Model* [R package.]. GitHub.

Western, A. W., Grayson, R. B., & Blöschl, G. (2002). Scaling of Soil Moisture: A Hydrologic Perspective. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *30*, 149-180. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.30.091201.140434

Western, A. W., Zhou, S.-L., Grayson, R. B., McMahon, T. A., Blöschl, G., & Wilson, D. J. (2004). Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, *286*(1-4), 113-134. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.014

Williams, J. R. (1990). The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *329*(1255), 421-428. https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0184

Winzeler, H. E., Owens, P. R., Waltman, S. W., Waltman, W. J., Libohova, Z., & Beaudette, D. (2013). A Methodology for Examining Changes in Soil Climate Geography through Time: U.S. Soil Moisture Regimes for the Period 1971-2000. *Soil Science Society of America Journal*, *77*, 213-225. https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0123

Wolf, J. M., & Drosdoff, M. (1976). Soil Water Studies in Oxisols and Ultisols of Puerto Rico: I. Water Movement. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, *60*(3), 375-385. https://doi.org/10.46429/jaupr.v60i3.10530

Yao, S., & Zhao, C. (2019). Impact of Different Yearly Rainfall Patterns on Dynamic Changes of Soil Moisture of Fixed Sand Dune in the Horqin Sandy Land. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *234*(1), 012020. https://doi.org/10.1088/1755-1315/234/1/012020

Yu, D., Zha, Y., Shi, L., Bolotov, A. G., & Tso, C.-H. M. (2021). Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *35*(3), 737-757. https://doi.org/10.1007/s00477-020-01882-1

Zaidel'man, F. R. (2007). Lessivage and its relation to the hydrological regime of soils. *Eurasian Soil Science*, *40*(2), 115-125. https://doi.org/10.1134/S1064229307020019

Zarei, E., Nobakht Dalir, A., & Nasiri Saleh, F. (2025). Assessment of climate change impacts on floods with a hybrid data-driven and conceptual model across a data-scarce region. *Journal of Water and Climate Change*, *16*(4), 1422-1442. https://doi.org/10.2166/wcc.2025.557

Zhang, C., & Lu, N. (2020). Soil Sorptive Potential: Its Determination and Predicting Soil Water Density [Article No. 04019122]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *146*(1), 04019122. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002188

Zhou, H., Mooney, S. J., & Peng, X. (2017). Bimodal Soil Pore Structure Investigated by a Combined Soil Water Retention Curve and X-Ray Computed Tomography Approach. *Soil Science Society of America Journal*, *81*(6), 1270. https://doi.org/10.2136/sssaj2016.10.0338

Zhu, Q., & Lin, H. (2009). Simulation and validation of concentrated subsurface lateral flow paths in an agricultural landscape. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(8), 1503. https://doi.org/10.5194/hess-13-1503-2009

Zimmermann, B., Elsenbeer, H., & De Moraes, J. M. (2005). The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management*, *222*(1-3), 29-38. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070

Zobeck, T. M., & Daugherty, L. A. (1982). Calculating the depths of soil moisture control sections from laboratory data. *Soil Science Society of America Journal*, *46*(4), 792-795. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600040026x

Zounemat-Kermani, M., Batelaan, O., Fadaee, M., & Hinkelmann, R. (2021). Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. *Journal of Hydrology*, *598*, 126266-126266. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126266

A Propiedades de los suelos

A.1 Sitios instrumentados

En la Tabla **A-1** se presentan las características generales de los sitios instrumentados. Adicionalmente, se incluye como ejemplo el sitio VEGAS, para el cual se detallan las propiedades químicas (ver Tabla **A-3**) y físicas (ver Tabla **A-4**).

Debido al volumen de información recopilada, se estructuró una base de datos organizada para su manejo y análisis mediante la librería *aqp* en R (Beaudette et al., 2023). Para mayor detalle, se recomienda consultar el repositorio de datos asociado (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

Es importante señalar que no se dispone de información detallada sobre las propiedades morfológicas y químicas de los sitios LALIBERTAD y TALUMA, correspondientes a perfiles ubicados en los centros de investigación AGROSAVIA (sedes La Libertad y Taluma). Esto se debe a que dichos datos forman parte de un proyecto doctoral en curso, cuya información aún no ha sido publicada, por lo que su acceso se encuentra restringido para publicación.

Tabla **A-1**: Características de sitios instrumentados

Atributo	LALIBERTAD	VEGAS	ARBORADA	MAVALLE	TALUMA	YUCAO	NUBES	CARIMAGUA	SHEEFER
Fecha	20/04/2023	6/10/2023	5/10/2023	4/10/2023	25/04/2023	18/08/2023	17/08/2023	15/08/2023	16/08/2023
Departamento	Meta	Meta	Meta	Meta	Meta	Meta	Meta	Meta	Vichada
Municipio	Villavicencio	Villavicencio	Puerto López	Puerto López	Puerto Gaitán	Puerto Gaitán	Puerto Gaitán	Puerto Gaitán	Cumaribo
Longitud	-73.462618	-73.375127	-72.594311	-72.565992	-72.227149	-72.133876	-71.816872	-71.571871	-70.966902
Latitud	4.061391	4.001949	4.17042	4.252227	4.369926	4.286239	4.261297	4.574046	4.707475
Altitud [m.s.n.m]	333	268	211	191	178	191	204	164	167
Paisaje	Piedemonte	Planice Aluvial	Altiplanicie	Altiplanicie	Altiplanicie	Altiplanicie		Altiplanicie	Altiplanicie
Tipo de Relieve	Abanico de terraza	Terraza nivel 3	Mesas	Mesas	Mesas	Mesas	Mesas	Mesas	Mesas
Forma de Terreno	Bajo	Bajo	Plano de mesa	Plano de mesa	Plano de mesa	Plano de mesa	Plano de mesa	Plano de mesa	Plano de mesa
Material Parental	Depósitos aluviales finos	Sedimentos Mixtos, Sedimentos aluviales finos	Arcillas	Arcillas	Depósitos finos	Depósitos eólicos sobre arcillas	Sedimentos Mixtos	Sedimentos Mixtos	Depósitos finos
Relieve	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano
Disección	No disectado	No disectado	No disectado	No disectado	No disectado	No disectado	No disectado	No disectado	No disectado
Microrelieve	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano	Plano
Gradiente de la Pendiente	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %	0 a 3 %
Longitud de la Pendiente	Muy larga >300 metros	Media 50-100 metros	Larga 100-300 metros	Larga 100-300 metros	Muy larga >300 metros	Larga 100-300 metros	Media 50-100 metros	Muy larga >300 metros	Muy larga >300 metros
Forma de la Pendiente	Recta	Recta	Recta	Recta	Recta	Recta	Irregular	Recta	Recta
Piso Térmico	Cálido	Cálido	Cálido	Cálido	Cálido	Cálido	Cálido	Cálido	Cálido
Provincia de Húmedad	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Húmeda
Régimen Temperatura	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico	Isohipertérmico
Drenaje Interno	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Rápido	Rápido	Moderado	Rápido
Drenaje Externo	Lento	Lento	Lento	Lento	Lento	Lento	Moderado	Lento	Lento
Drenaje Natural	Bien Drenado	Moderado	Bien Drenado	Bien Drenado	Bien Drenado	Bien Drenado	Bien Drenado	Bien Drenado	Bien Drenado
Inundaciones	No	Sí	No	No	No	No	No	No	No
Frecuencia de Inundación	NA	Muy Frecuente	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Duración de Inundación	NA	Muy corta - De 1 a 2 días	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Encharcamientos	No	Sí	No	No	No	No	No	No	No
Frecuencia de Encharcamiento	NA	Frecuente	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Duración de Encharcamiento	NA	Muy corta - De 1 a 2 días	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Plinitita	No	No	No	No	No	No	Sí	Sí	No
Volumen Plintita	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5 %	5 %	NA
Fase Plintita	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Blanda	Blanda	NA
Taxón	Typic Hapludoxs	Oxyc Dystrudepts	Typic Haplustoxs	Typic Haplustoxs	Typic Hapludoxs	Typic Quartizpsamments	Typic Haplustoxs	Typic Haplustoxs	Typic Haplustoxs
Vegetación Natural	Pastura	De la zona	Pastos	Pastos y jardín clonal de caucho	Pastura	Pastos	Pastos, frutales varios	Pastos	Pastos
Uso Actual	Agroforestal	Agrícola	Agrícola	Agrícola	Conservación	Conservación	Agrícola	Conservación	Agrícola, Conservación
Horizonte Diagnóstico	Óxico	Órcico	Óxico	Óxico	Óxico	Órcico	Óxico	Óxico	Óxico

Atributo	LALIBERTAD	VEGAS	ARBORADA	MAVALLE	TALUMA	YUCAO	NUBES	CARIMAGUA	SHEEFER
Limitante del Uso	Déficit hídricos finales de año, acidez.	Inundaciones muy frecuentes	Clima y déficit hídricos finales de año, acidez.	Clima y déficit hídricos finales de año, acidez.	Humedad en el suelo	Clima y déficit hídricos finales de año, textura arenosa	Clima y déficit hídricos finales de año, acidez.	Clima y déficit hídricos finales de año, acidez.	Clima y déficit hídricos finales de año, acidez.

Tabla **A-2**: Morfología para VEGAS

Sitio	**VEGAS**	**VEGAS**	**VEGAS**
Horizonte	**A**	**B**	**B**
Sub	**p**	**w1**	**w2**
Límite inferior horizonte [cm]	0	10	63
Límite superiror horizonte [cm]	10	63	101
Color rimario	7.5 YR 4/3	7.5 YR 4/6	7.5 YR 4/6
% Color rimario	100 %	70 %	50 %
Color secundario	NA	5YR 5/2	5YR 5/2
% Color secundario	NA	30 %	50 %
Color moteos	NA	NA	NA
% Moteos	NA	NA	NA
Tamaño moteos	NA	NA	Medianos, Grandes
Nitidez	NA	Diferenciable	Diferenciable
Textura	FArL	ArL	ArL
Fragmentos de roca	NA	Cantos Rodados	NA
Formas de roca	NA	Subredondeada	NA
Volumen rocas	NA	Pocas	NA
Alteración rocas	NA	Sin Alteración	NA
Naturaleza rocas	NA	Sedimentarias	NA
Tipo de estructura	B Subangulares	B Subangulares	B Subangulares
Clase de estructura	Fino, Media	Media, Gruesa	Fino, Media
Grado de estructura	Moderada	Moderada	Moderada
Consistencia en seco	Lig. Dura	Lig. Dura	Lig. Dura
Consistencia en húmedo	Friable	Friable	Friable
Consistencia en mojado	Lig. Pegajosa, Lig. Plástica	Lig. Pegajosa, Plastica	Lig. Pegajosa, Plastica
Cantidad de concentraciones	NA	Pocas	NA
Composición de concentraciones	NA	Carbonato	NA
Clase de concentraciones	NA	Nódulos	NA
Forma de concentraciones	NA	Redondeadas	NA
Tamaño de concentraciones	NA	Finas, Medias	NA
Consistencia concentraciones	NA	Blandas	NA
Distribución concentraciones	NA	Irregular	NA
Color concentraciones	NA	Negras	NA
Cantidad poros	Muchos	Pocos	Pocos
Tamaño poros	Finos, Medianos, Gruesos	NA	Muy Finos, Finos
Forma de poros	Tubulares, Irregulares	Tubulares, Irregulares	Tubulares, Irregulares
Continuidad de poros	Continuos	Continuos	Continuos
Localización de poros	Imped, Exped	Imped, Exped	Imped, Exped
Cantidad de raíces	Muchas	Pocas	NA
Tamaño de raíces	Finas, Medias	Muy Finas, Finas	NA
Estado de raíces	Vivas	Vivas	NA
Distribución de raíces	Normal	Normal	NA
Localización raíces	Imped, Exped	Imped, Exped	NA
Actividad macro organismos	Baja	Baja	Ni hay
Reacción HCl	Ligera	No Hay	No Hay
Reacción NaF	No Hay	No Hay	No Hay
Reacción H2O2	Fuerte	Ligera	No Hay
Nitidez del límite	Clara	Difusa	Difusa
Topografía del límite	Plana	Plana	Plana

Sitio	**VEGAS**	**VEGAS**	**VEGAS**
Horizonte	**A**	**B**	**B**
Sub	**p**	**w1**	**w2**
Valor pH campo	5	4.5	4.5

Tabla **A-3**: Propiedades químicas VEGAS

Propiedad	**VEGAS**	**VEGAS**	**VEGAS**
Horizonte	A	B	B
Sub horizonte	p	w1	w2
Límite superiror horizonte [cm]	0	10	63
Límite inferiror horizonte [cm]	10	63	101
Fe [mg kg^{-1}]	119.31	66.7	48.6
Cu [mg kg^{-1}]	1.58	1.81	0.78
Mn [mg kg^{-1}]	21.81	14.55	8.58
Zn [mg kg^{-1}]	1.54	0.78	0.64
pH(1:2.5)	4.95	5.04	5.06
Conductividad eléctrica [dS m^{-1}]	0.15	0.36	0.09
Carbono Orgánico [g/100g]	0.71	0.45	0.26
Materia Orgánica [g/100g]	1.22	0.78	0.45
P disponible [mg kg^{-1}]	14.87	6.73	6.15
S disponible [mg kg^{-1}]	2.94	33.59	8.02
Capacidad de Intercambio Catiónico [cmol(+) kg^{-1}]	8.01	6.78	7.11
B disponible [mg kg^{-1}]	0.2	0.13	0.11
Acidez [cmol(+) kg^{-1}]	1.1	1.67	1.77
Al intercambiable [cmol(+) kg^{-1}]	0.92	1.49	1.69
Ca disponible [cmol(+) kg^{-1}]	5.37	3.57	4.11
Mg disponible [cmol(+) kg^{-1}]	1.36	1.28	1.05
K disponible [cmol(+) kg^{-1}]	0.1	0.19	0.12
Na disponible [cmol(+) kg^{-1}]	<0.14	<0.14	<0.14
Saturación de Ca [%]	67	53	58
Saturación de Mg [%]	17	19	15
Saturación de K [%]	1	3	2
Saturación de Na [%]	1	1	1
Saturación de Al [%]	11	22	24

Tabla **A-4**: Propiedades físicas VEGAS

Sitio	**VEGAS**	**VEGAS**	**VEGAS**
Horizonte	A	B	B
Sub horizonte	p	w1	w2
Límite superior horizonte [cm]	0	10	63
Límite inferior horizonte [cm]	10	63	101
Arena [%]	28.89	23.34	44.54
Limo [%]	52.06	49.88	36.92
Arcilla [%]	19.05	26.78	18.54
Densidad aparente [g cm^{-1}]	1.47	1.56	1.59
Densidad real [%] [g cm^{-1}]	2.32	2.34	2.43
Saturación [%]	24.86	21.38	18.04
Capacidad de campo [%]	24.34	21.1	16.96
100 KPa [%]	23.52	20.58	13.37

Sitio	**VEGAS**	**VEGAS**	**VEGAS**
500 Kpa [%]	22.06	19.9	12.02
1000 Kpa [%]	21.17	19.37	11.12
Punto de marchitez Permanente [%]	20.69	18.99	10.67

A.1.1 Fotos Perfiles

Figura **A-1**: Perfil y sensor de ARBORADA.

Figura **A-2**: Perfil y sensor de CARIMAGUA.

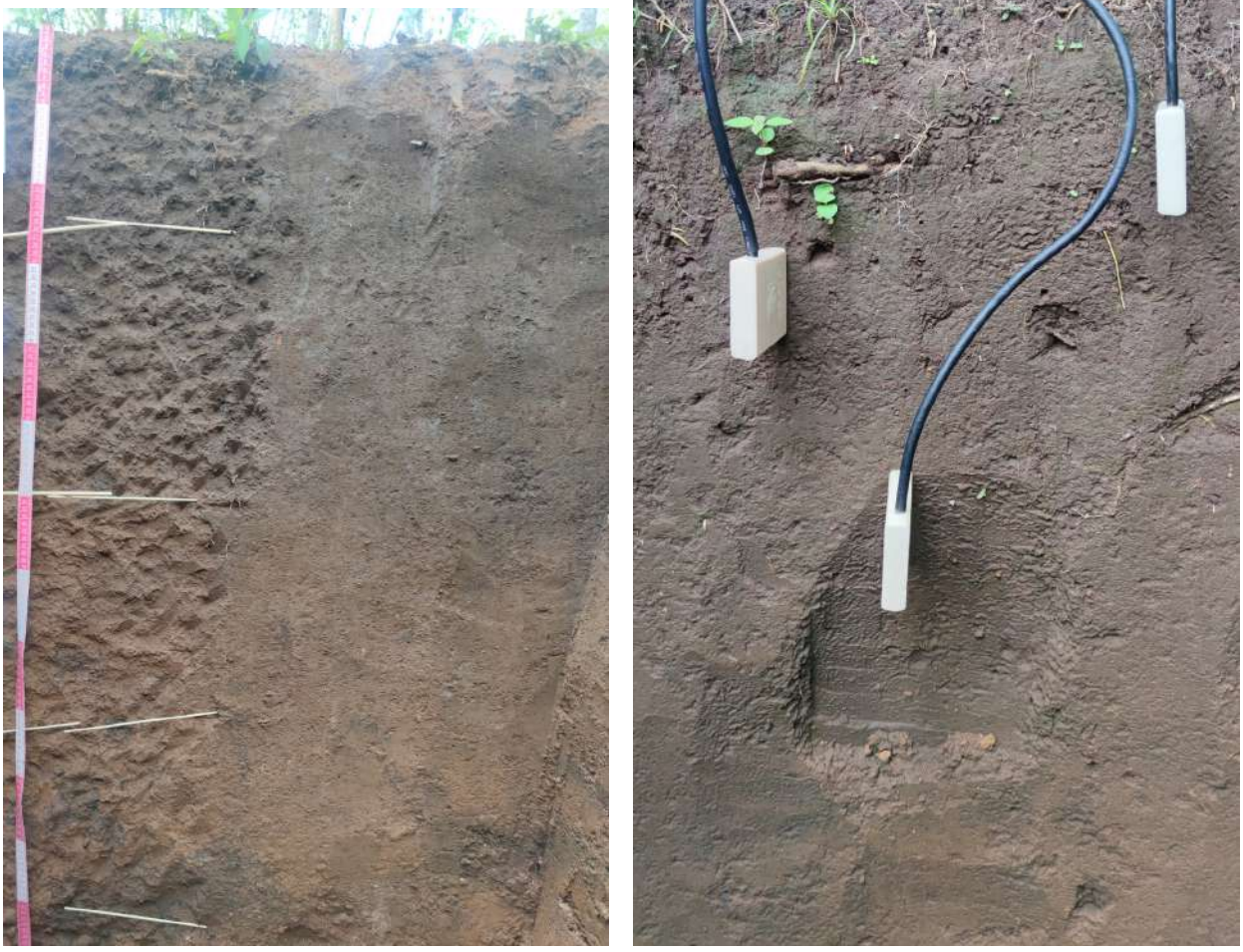

Figura **A-3**: Perfil y sensor de LALIBERTAD.

Figura **A-4**: Perfil y sensor de MAVALLE.

Figura **A-5**: Perfil y sensor de NUBES.

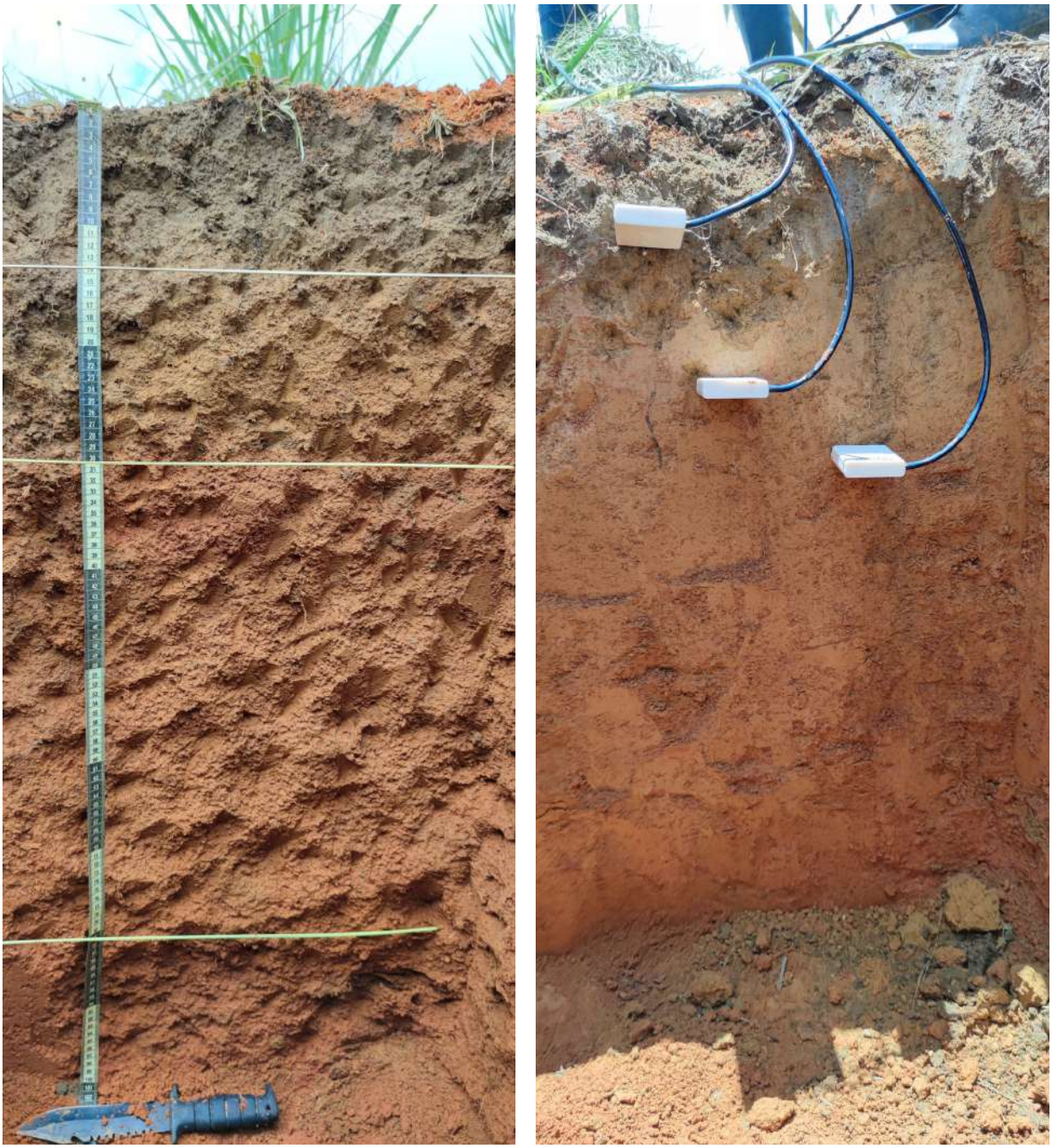

Figura **A-6**: Perfil y sensor de SHEEFER.

Figura **A-7**: Perfil y sensor de VEGAS.

Figura **A-8**: Perfil y sensor de YUCAO.

B Pruebas estadísticas de los datos de humedad en los sitios

En esta sección se muestran de manera detallas los análisis y pruebas estadísticas realizadas para los datos de humedad del suelo.

La implementación detallada del algoritmo puede consultarse en el código 01_Humedad_sensores_estadisticas.R, disponible en el repositorio de datos asociado a la investigación (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

B.1 Comparación entre sitios

La comparación del contenido de humedad volumétrica del suelo entre sitios se realizó mediante la prueba no paramétrica de Kruskal--Wallis, debido a la naturaleza no normal de los datos y a la heterogeneidad de varianzas observada (ver Tabla **B-1**).

Tabla **B-1**: Comparación estadística entre sitios (prueba de Kruskal--Wallis).

Variable	Sitio									p-valor	q-valor
	ARBORADA	CARIMAGUA	LALIBERTAD	MAVALLE	NUBES	SHEEFER	TALUMA	VEGAS	YUCAO		
Humedad del suelo (m^3 m^{-3})	0.198 (0.048)	0.279 (0.047)	0.229 (0.044)	0.237 (0.054)	0.210 (0.040)	0.282 (0.036)	0.242 (0.035)	0.322 (0.033)	0.174 (0.034)	$< 0{,}001$	$< 0{,}001$

Nota: Los valores por sitio corresponden a media (DE). p-valor: prueba de suma de rangos de Kruskal--Wallis. q-valor: corrección por tasa de falsos descubrimientos para comparaciones múltiples.

Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre sitios ($p < 0{,}001$), indicando que al menos uno de los sitios presenta una distribución de humedad distinta respecto a los demás.

En términos de valores medios, VEGAS presentó el mayor contenido promedio de humedad (0.322 m^3 m^{-3}), seguido por SHEEFER (0.282 m^3 m^{-3}) y CARIMAGUA (0.279 m^3 m^{-3}). En contraste, YUCAO registró el menor valor promedio (0.174 m^3 m^{-3}), seguido por ARBORADA (0.198 m^3 m^{-3}).

La dispersión, representada por la desviación estándar, fue mayor en MAVALLE (0.054) y ARBORADA (0.048), mientras que VEGAS presentó la menor variabilidad relativa (0.033), indicando mayor estabilidad en el contenido hídrico en este sitio.

Las diferencias observadas en los estadísticos descriptivos son consistentes con el resultado del contraste global, confirmando una marcada diferenciación espacial en el régimen de humedad del suelo entre los sitios evaluados.(Ver Figura **B-1**)

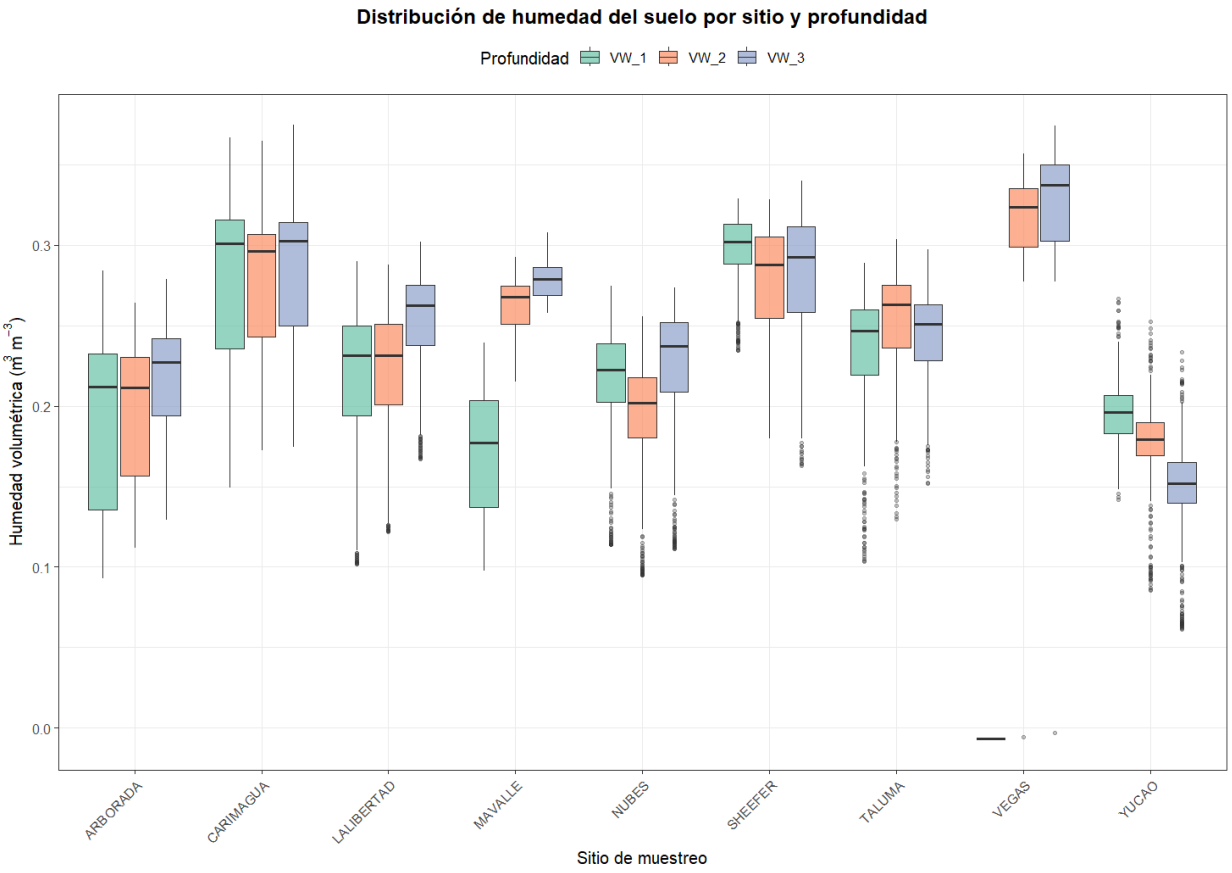

Figura **B-1**: Distribución del contenido de humedad del suelo por sitio (transformación Box-Cox).

B.2 Comparación de profundidades

La Tabla **B-2** muestra una comparación del contenido de humedad volumétrica del suelo entre profundidades (VW_1, VW_2 y VW_3); dentro de cada sitio evidenció diferencias estadísticamente significativas en todos los casos evaluados ($p < 0.001$; prueba de Kruskal–Wallis).

Tabla **B-2**: Diferencias entre profundidades dentro de cada sitio.

Característica	VW_1	VW_2	VW_3	p-valor
ARBORADA				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.188 (0.054)	0.194 (0.044)	0.212 (0.040)	< 0,001
CARIMAGUA				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.276 (0.056)	0.276 (0.042)	0.285 (0.042)	< 0,001
LALIBERTAD				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.215 (0.048)	0.221 (0.040)	0.252 (0.033)	< 0,001
MAVALLE				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.171 (0.040)	0.263 (0.018)	0.279 (0.011)	< 0,001
NUBES				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.215 (0.035)	0.193 (0.036)	0.222 (0.042)	< 0,001
SHEEFER				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.294 (0.026)	0.278 (0.034)	0.280 (0.042)	< 0,001
TALUMA				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.233 (0.039)	0.251 (0.034)	0.243 (0.029)	< 0,001
VEGAS				
Humedad (m^3 m^{-3})	-0.007 (NA)	0.317 (0.028)	0.327 (0.032)	< 0,001
YUCAO				
Humedad (m^3 m^{-3})	0.196 (0.022)	0.177 (0.028)	0.149 (0.032)	< 0,001

Nota: Los valores corresponden a la media (Desviación estándar). NA: No aplica. *p*-valor: prueba de suma de rangos de Kruskal--Wallis.

En ARBORADA se observó un incremento progresivo del contenido medio de humedad con la profundidad, pasando de 0.188 m^3 m^{-3} en VW_1 a 0.212 m^3 m^{-3} en VV_3. Un patrón similar se registró en CARIMAGUA, donde VW_3 presentó el mayor valor promedio (0.285 m^3 m^{-3}), mientras que VW_1 y VW_2 mostraron valores iguales (0.276 m^3 m^{-3}).

En LALIBERTAD también se evidenció un aumento con la profundidad, con valores de 0.215, 0.221 y 0.252 m^3 m^{-3} para VW_1, VW_2 y VW_3, respectivamente. MAVALLE presentó el gradiente vertical más marcado, con un incremento de 0.171 m^3 m^{-3} en VW_1 a 0.279 m^3 m^{-3} en VV_3, lo que representa una diferencia de 0.108 m^3 m^{-3} entre la capa superficial y la profunda.

En NUBES se observó un comportamiento no monotónico: VW_2 registró el valor más bajo (0.193 m^3 m^{-3}), mientras que VW_1 y VW_3 presentaron valores superiores (0.215 y 0,222 m^3 m^{-3}, respectivamente). SHEEFER mostró una ligera disminución en VW_2 respecto a VW_1, seguida de un incremento leve en VW_3, manteniendo variaciones de baja magnitud entre profundidades.

TALUMA presentó un patrón intermedio, con el mayor valor en VW_2 (0.251 m^3 m^{-3}), mientras que VW_1 y VW_3 registraron valores similares (0.233 y 0.243 m^3 m^{-3}, respectivamente).

En VEGAS se observó un valor atípico en VW_1 (-0,007), asociado a ausencia de datos válidos, por lo que la comparación efectiva se concentra en VW_2 (0.317 m^3 m^{-3}) y VW_3 (0.327 m^3 m^{-3}), evidenciando un ligero incremento en profundidad.

Finalmente, YUCAO mostró un patrón inverso al observado en la mayoría de los sitios, con una disminución progresiva del contenido de humedad con la profundidad (0.196; 0,177 y 0.149 m^3 m^{-3} para VW_1, VW_2 y VW_3, respectivamente).

En conjunto, los resultados indicaron que, aunque la tendencia predominante corresponde a un aumento del contenido de humedad con la profundidad, el comportamiento vertical no es homogéneo entre sitios, presentándose gradientes positivos, negativos y no monotónicos. La significancia estadística observada en todos los sitios confirma la existencia de diferencias sistemáticas en la distribución vertical de la humedad del suelo.

B.3 Análisis trimestral de datos de humedad en los sitios

La variación estacional del contenido de humedad del suelo se obtuvo a partir del conjunto de datos de humedad por sitio, considerando y agregando únicamente los registros con información válida por 4 trimestres (T1: enero - febrero - marzo. etc.).

Posteriormente, los datos se estratificaron por estación, generando resúmenes independientes para cada periodo trimestral (T1–T4). Para cada combinación estación–sitio se estimó la media y la desviación estándar (DE) del contenido de humedad volumétrica.

Los resultados se muestran en la Tabla **B-3**.

Tabla **B-3**: Variación trimestral de la humedad del suelo por sitio.

Característica	N	ARBORADA	CARIMAGUA	LALIBERTAD	MAVALLE	NUBES	SHEEFER	TALUMA	VEGAS	YUCAO
T1 (enero - febrero - marzo)										
Profundidad	2002									
VW_1		91 (33 %)	91 (33 %)	91 (33 %)	0	91 (33 %)	0	91 (33 %)		91 (33 %)
VW_2		91 (33 %)	91 (33 %)	91 (33 %)	0	91 (33 %)	91 (50 %)	91 (33 %)	91 (50 %)	91 (33 %)
VW_3		91 (33 %)	91 (33 %)	91 (33 %)	0	91 (33 %)	91 (50 %)	91 (33 %)	91 (50 %)	91 (33 %)
Humedad	2002	0.159 (0.040)	0.233 (0.045)	0.186 (0.049)	NA (NA)	0.162 (0.036)	0.242 (0.035)	0.203 (0.040)	0.296 (0.022)	0.161 (0.041)
T2 (abril - mayo - junio)										
Profundidad	2434									
VW_1		92 (33 %)	92 (33 %)	128 (33 %)	35 (33 %)	92 (33 %)	86 (32 %)	129 (33 %)	0 (0 %)	92 (33 %)
VW_2		92 (33 %)	92 (33 %)	128 (33 %)	35 (33 %)	92 (33 %)	92 (34 %)	129 (33 %)	92 (50 %)	92 (33 %)
VW_3		92 (33 %)	92 (33 %)	128 (33 %)	35 (33 %)	92 (33 %)	92 (34 %)	129 (33 %)	92 (50 %)	92 (33 %)
Humedad	2434	0.178 (0.053)	0.253 (0.051)	0.224 (0.045)	0.216 (0.064)	0.212 (0.041)	0.265 (0.037)	0.243 (0.035)	0.330 (0.023)	0.169 (0.041)
T3 (julio - agosto - septiembre)										
Profundidad	2851									
VW_1		91 (33 %)	109 (33 %)	184 (33 %)	0 (NA %)	107 (33 %)	106 (33 %)	184 (33 %)	0 (0 %)	106 (33 %)
VW_2		92 (33 %)	109 (33 %)	184 (33 %)	0 (NA %)	107 (33 %)	108 (34 %)	184 (33 %)	92 (50 %)	106 (33 %)
VW_3		92 (33 %)	109 (33 %)	184 (33 %)	0 (NA %)	107 (33 %)	108 (34 %)	184 (33 %)	92 (50 %)	106 (33 %)
Humedad	2851	0.236 (0.013)	0.308 (0.010)	0.249 (0.022)	NA (NA)	0.237 (0.018)	0.307 (0.012)	0.266 (0.013)	0.337 (0.013)	0.188 (0.025)
T4 (octubre - noviembre - diciembre)										
Profundidad	2751									
VW_1		85 (32 %)	123 (33 %)	125 (33 %)	57 (33 %)	123 (33 %)	32 (12 %)	124 (33 %)	1 (0.5 %)	123 (33 %)
VW_2		90 (34 %)	123 (33 %)	125 (33 %)	57 (33 %)	123 (33 %)	123 (44 %)	124 (33 %)	91 (50 %)	123 (33 %)
VW_3		90 (34 %)	123 (33 %)	125 (33 %)	57 (33 %)	123 (33 %)	123 (44 %)	124 (33 %)	91 (50 %)	123 (33 %)
Humedad	2751	0.219 (0.027)	0.307 (0.019)	0.236 (0.040)	0.250 (0.042)	0.220 (0.019)	0.297 (0.019)	0.235 (0.022)	0.323 (0.047)	0.175 (0.022)

Nota: N:observaciones Totales, en Humedad Los valores corresponden a media (Desviacón estándar).

La variación trimestral del contenido de humedad volumétrica del suelo mostró diferencias consistentes entre los periodos evaluados (T1–T4) y entre sitios.

En términos generales, el periodo T1 registró los valores promedio más bajos en la mayoría de los sitios, mientras que T3 presentó los valores más altos de humedad. Posteriormente, en T4 se observó una ligera disminución respecto a T3, aunque los valores permanecieron superiores a los registrados en T1.

En ARBORADA, la humedad promedio aumentó de 0.159 m^3 m^{-3} en T1 a 0.236 m^3 m^{-3} en T3, seguida de una disminución a 0.219 m^3 m^{-3} en T4. Un comportamiento similar se observó en CARIMAGUA, donde los valores incrementaron de 0.233 (T1) a 0.308 (T3), manteniéndose relativamente altos en T4 (0.307).

LALIBERTAD presentó un incremento progresivo desde 0.186 (T1) hasta 0.249 (T3), con una leve reducción en T4 (0.236). MAVALLE no registró datos en T1 ni T3; sin embargo, entre T2 (0.216) y T4 (0.250) se evidenció un aumento en el contenido medio de humedad.

En NUBES se observó un patrón creciente desde T1 (0.162) hasta T3 (0.237), con una ligera reducción en T4 (0.220). SHEEFER mostró valores relativamente altos durante todo el periodo, con un máximo en T3 (0.307) y una disminución moderada en T4 (0.297).

TALUMA presentó un incremento sostenido entre T1 (0.203) y T3 (0.266), seguido de una reducción en T4 (0.235). VEGAS registró los valores más altos en todos los periodos, alcanzando 0.337 m^3 m^{-3} en T3; aunque en T4 disminuyó a 0.323, se mantuvo como el sitio con mayor contenido promedio.

YUCAO mostró el patrón de menor humedad entre sitios, con valores de 0.161 (T1), 0.169 (T2), 0.188 (T3) y 0.175 (T4), evidenciando una variación estacional de menor amplitud en comparación con los demás sitios.

En términos de dispersión, T2 presentó en general las mayores desviaciones estándar, particularmente en ARBORADA (0.053) y CARIMAGUA (0.051), mientras que T3 evidenció menor variabilidad intraestacional en la mayoría de los sitios, con desviaciones estándar entre 0.010 y 0.025 m^3 m^{-3}.

En conjunto, los resultados muestran un patrón estacional coherente caracterizado por un incremento progresivo del contenido de humedad desde T1 hasta T3, seguido de una disminución moderada en T4, con diferencias en magnitud entre sitios.

B.4 Magnitud del incremento trimestral

Con el fin de cuantificar la magnitud del cambio estacional en los trimestres de mayor variación (T1 y T3), se calculó en la Tabla **B-4** el porcentaje de incremento del contenido medio de humedad entre T1 y T3 para cada sitio, utilizando la expresión:

$$\% \; Incremento = \frac{T3 - T1}{T1} \times 100$$

Los mayores incrementos relativos se registraron en ARBORADA (48.4 %) y NUBES (46.3 %), evidenciando una marcada recuperación del contenido de humedad entre ambos periodos. LALIBERTAD (33.9 %) y CARIMAGUA (32.2 %) presentaron incrementos intermedios, seguidos por TALUMA (31.0 %) y SHEEFER (26.9 %).

En contraste, VEGAS (13.9 %) y YUCAO (16.8 %) mostraron los menores incrementos porcentuales, indicando una variación estacional de menor magnitud relativa en comparación con los demás sitios.

En conjunto, los resultados evidencian que la magnitud del incremento trimestral no fue homogénea entre sitios, presentándose una amplitud relativa mayor en aquellos con menores valores iniciales en T1.

Tabla **B-4**: Incremento estacional del contenido medio de humedad entre T1 y T3 por sitio.

Sitio	**T1**	**T3**	**Incremento (%)**
ARBORADA	0.159	0.236	48.4
CARIMAGUA	0.233	0.308	32.2
LALIBERTAD	0.186	0.249	33.9
NUBES	0.162	0.237	46.3
SHEEFER	0.242	0.307	26.9
TALUMA	0.203	0.266	31.0
VEGAS	0.296	0.337	13.9
YUCAO	0.161	0.188	16.8

C Clasificación de los RH a partir de datos de humedad

C.1 Estados de humedad por sitio

Uitilizando algoritmos propios desarrollados para esta investigación, para mayor detalle, se recomienda consultar el repositorio de datos asociado (Rodríguez-Vásquez, 2026b). Se presenta un esquema del procedimiento del algorimo en la Figura **C-1**

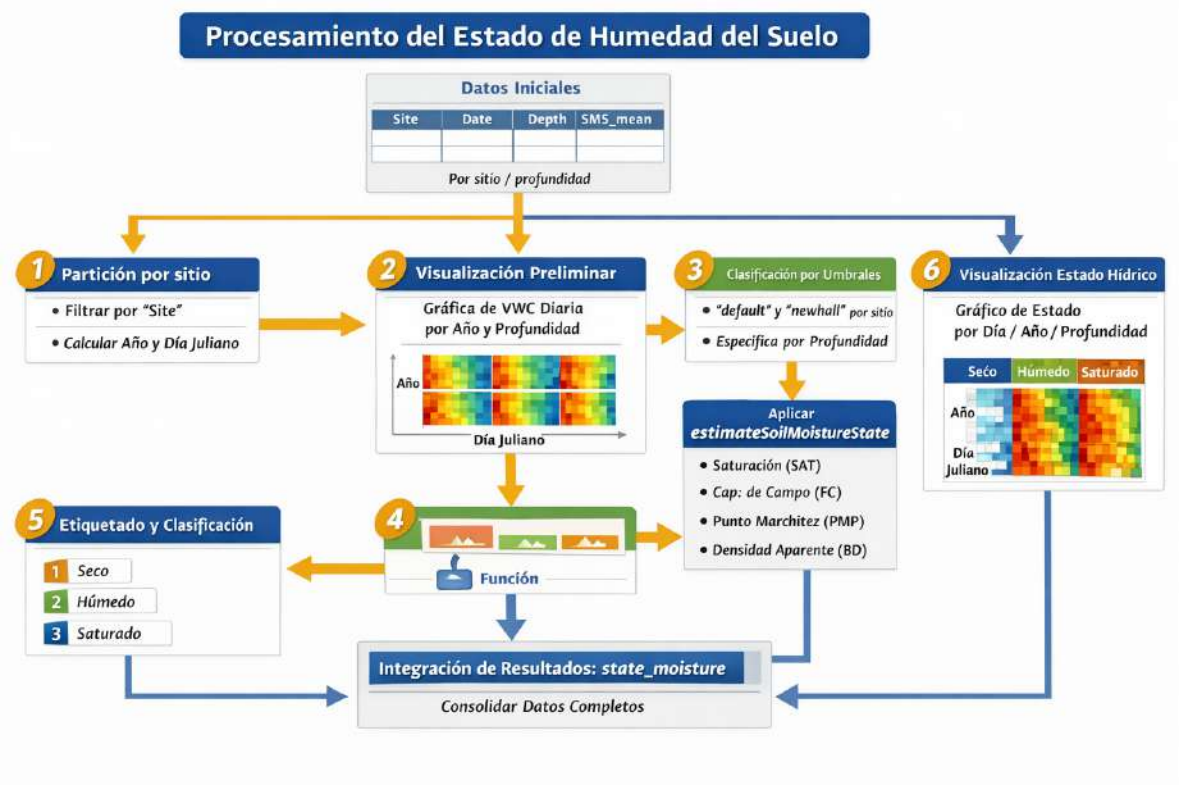

Figura **C-1**: Procedimiento para la clasificación de la condición de humedad.

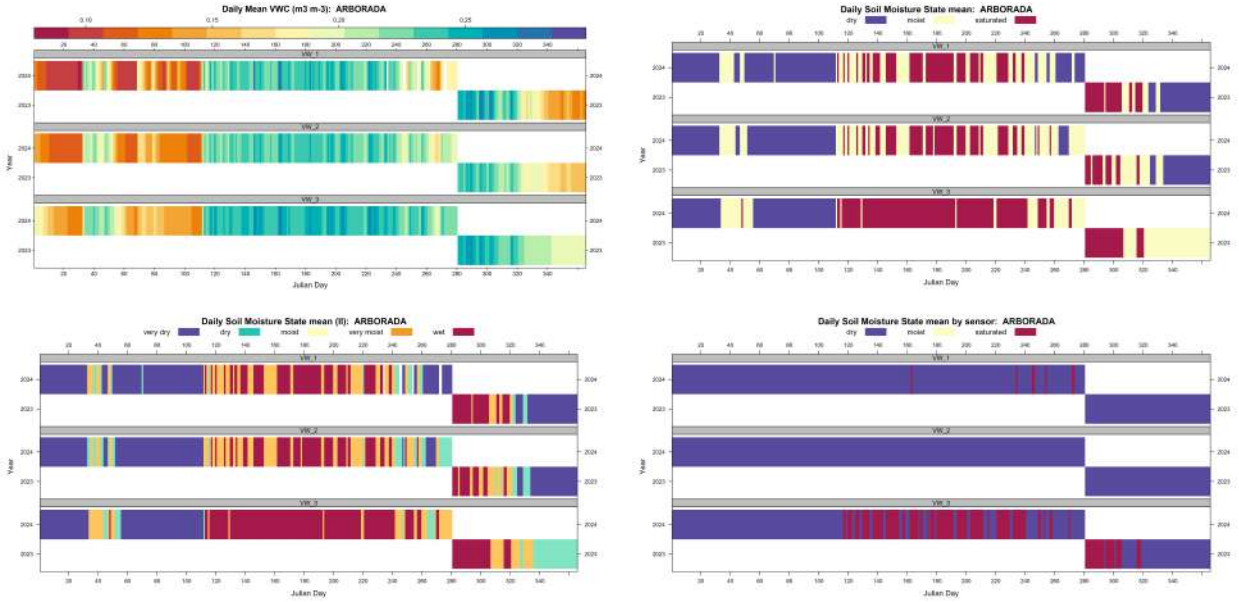

Figura **C-2**: ARBORADA

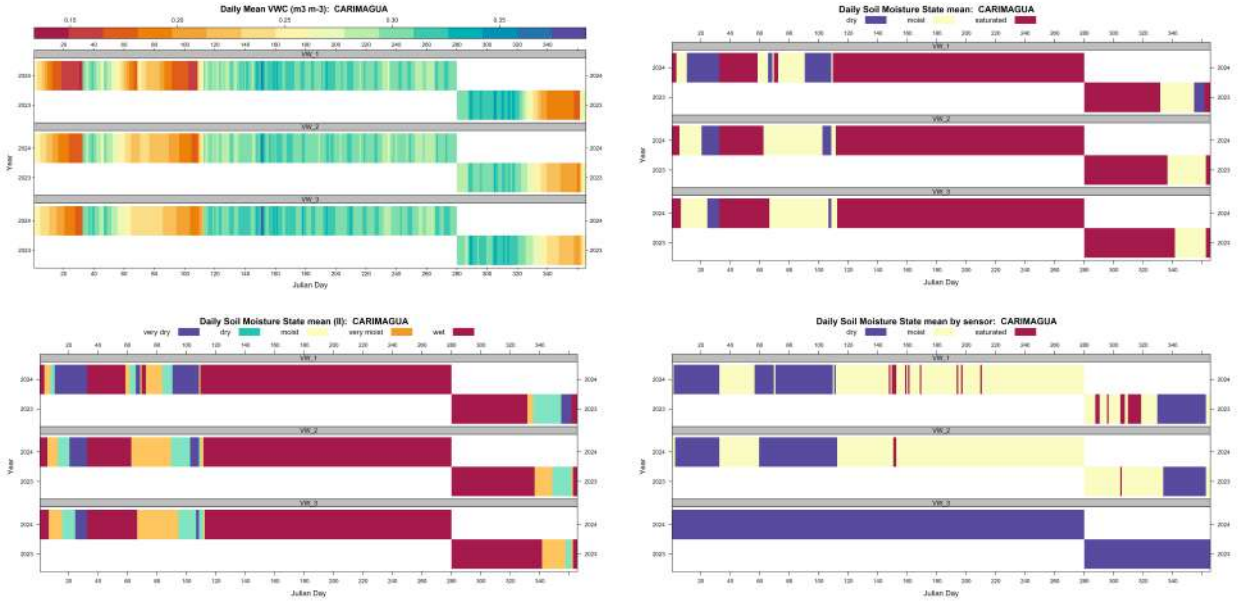

Figura **C-3**: CARIMAGUA

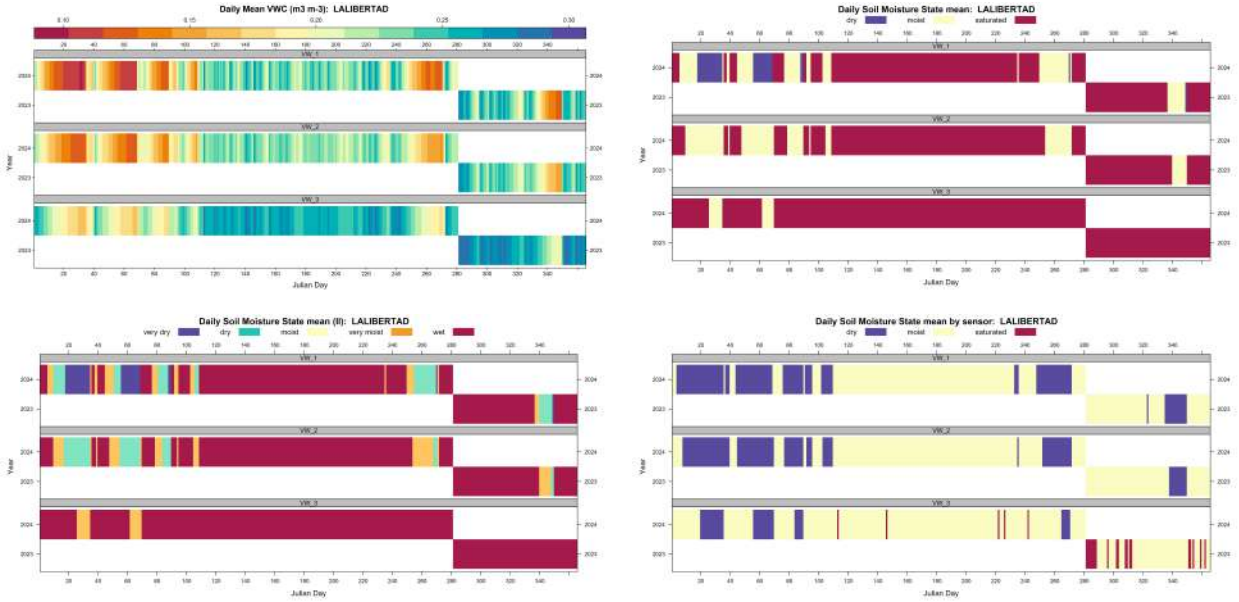

Figura **C-4**: LALIBERTAD

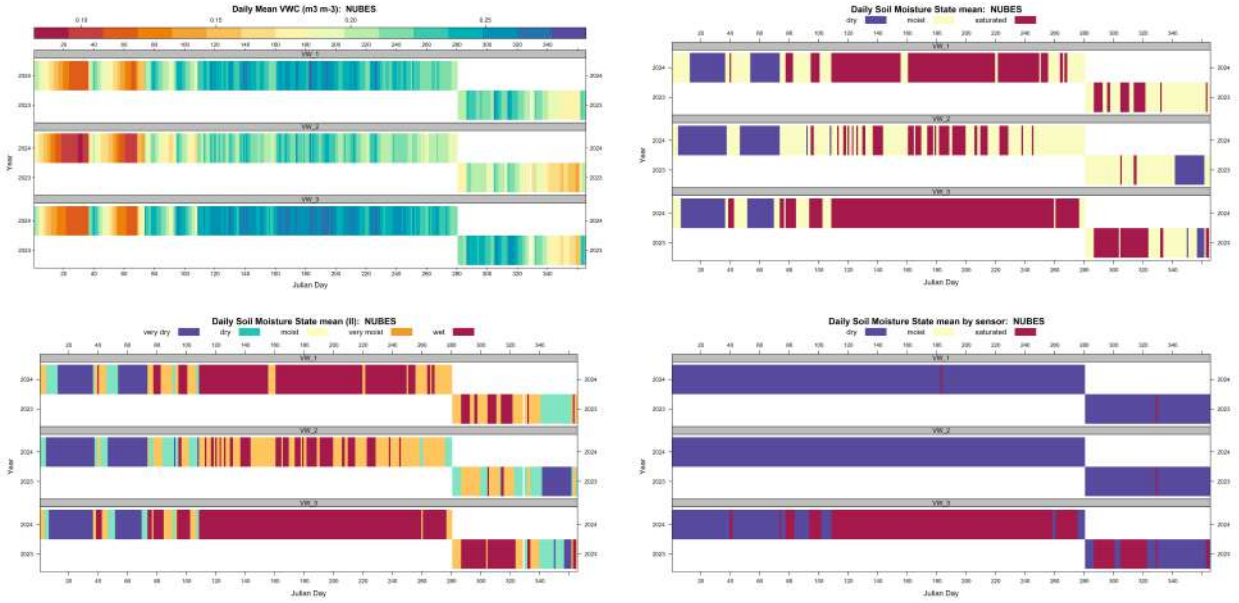

Figura **C-5**: NUBES

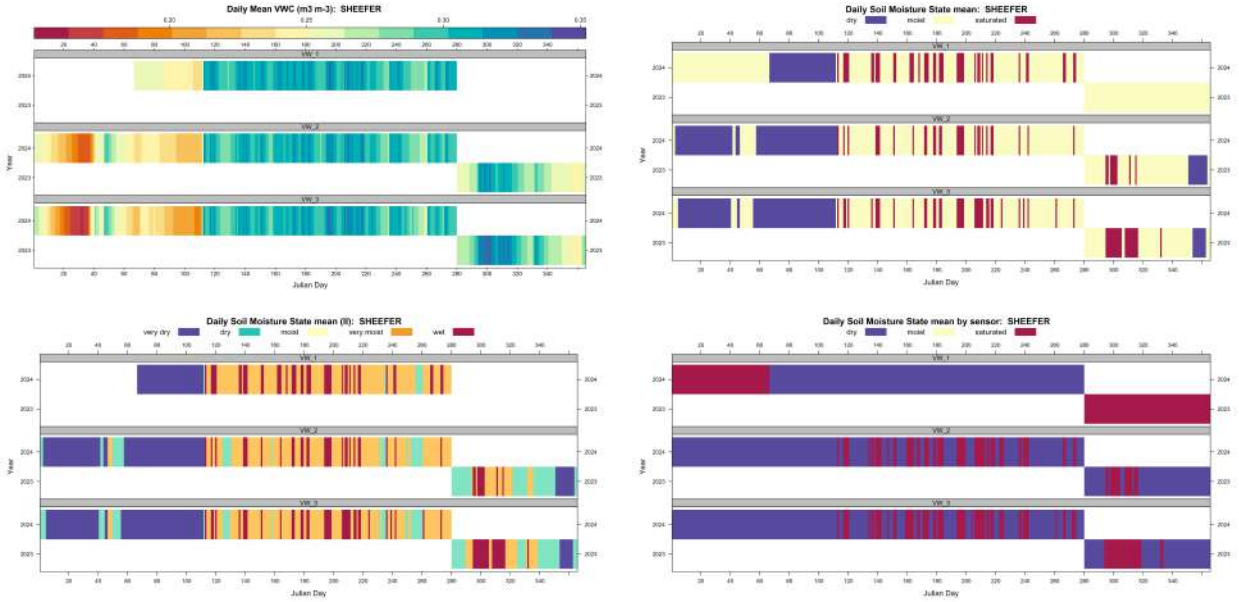

Figura **C-6**: SHEEFER

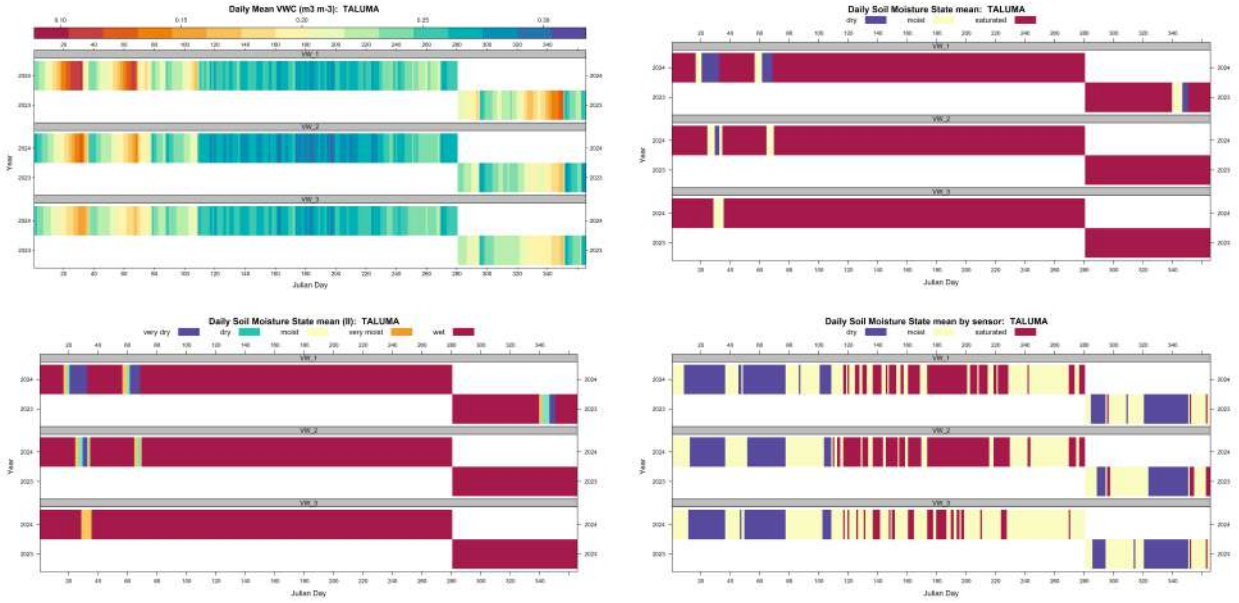

Figura **C-7**: TALUMA

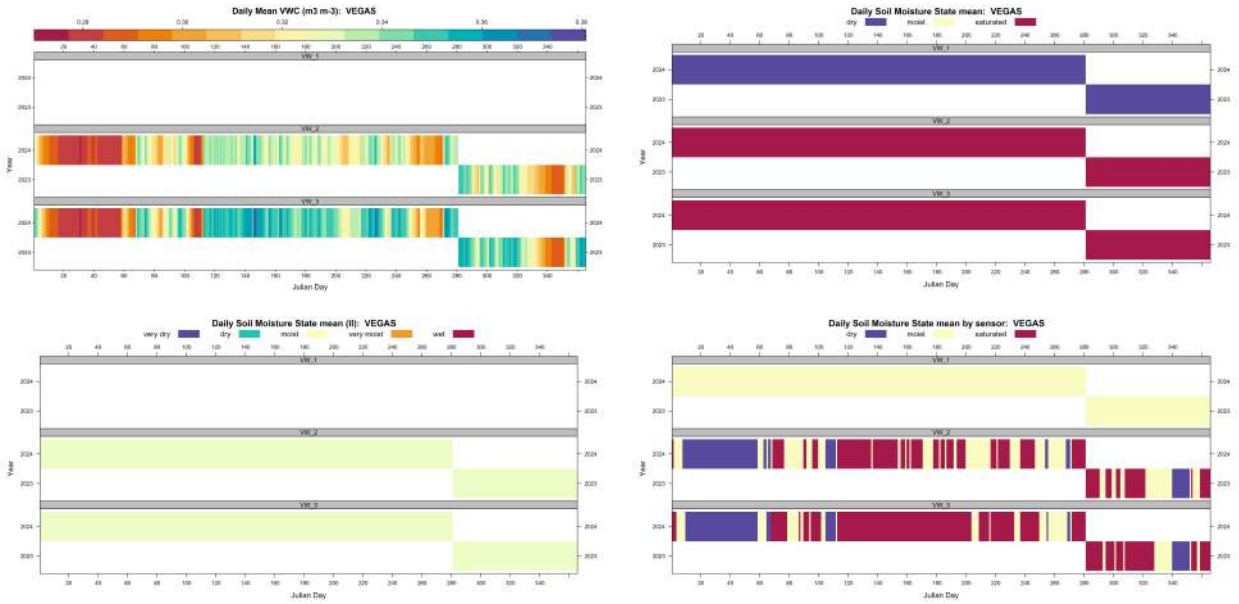

Figura **C-8**: VEGAS

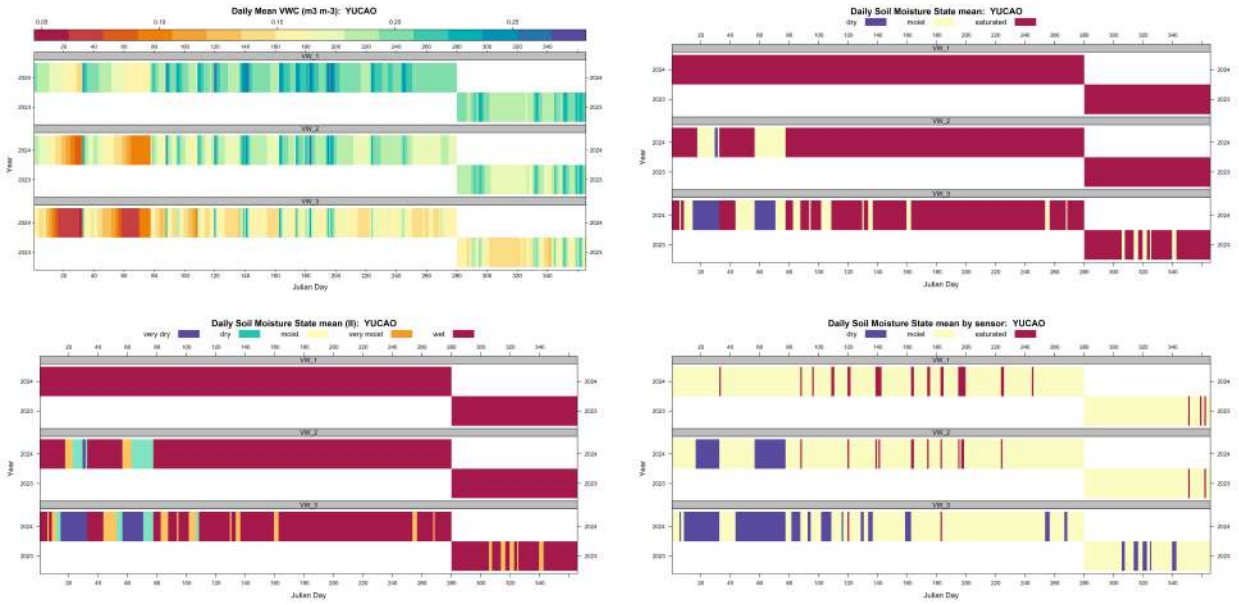

Figura **C-9**: YUCAO

C.2 Conteo de días

Se evaluó la duración de las rachas de días consecutivos en función de los estados de humedad del suelo. Los resultados se presentan de forma detallada en la Tabla **C-3** y de manera sintética en la Tabla **C-4**.

La implementación detallada del algoritmo puede consultarse en el código *03_Conteo_humedad.R*, disponible en el repositorio de datos asociado a la investigación (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

Sitio	Sensor	Estado	n_rachas	Mín.*	Máx.*	Media*	Mediana*	D.E.*	p25*	p75*	Total*
ARBORADA	VW_1	dry	6	4	244	58.7	13.5	94.1	7.8	56.8	352
	VW_1	moist	5	1	2	1.4	1	0.5	1	2	7
	VW_2	dry	1	359	359	359	359	NA	359	359	359
	VW_3	dry	25	1	163	9.6	2	32.1	2	3	240
	VW_3	moist	25	1	12	4.8	3	3.4	2	7	119
CARIMAGUA	VW_1	dry	5	1	39	23.4	31	15.8	13	33	117
	VW_1	moist	18	1	66	11.9	5.5	16.7	2	11.8	215
	VW_1	saturated	12	1	9	2.2	1	2.3	1	3	26
	VW_2	dry	3	29	53	37.3	30	13.6	29.5	41.5	112
	VW_2	moist	6	5	124	40.5	27.5	42.3	22.5	35.5	243
	VW_2	saturated	2	1	2	1.5	1.5	0.7	1.2	1.8	3
	VW_3	dry	1	358	358	358	358	NA	358	358	358
LALIBERTAD	VW_1	dry	10	1	32	13	11	10.9	3.5	21.8	130
	VW_1	moist	11	1	123	20.9	7	35.5	5	15.5	230
	VW_2	dry	8	1	32	14.2	12.5	10.7	6.2	21.2	114
	VW_2	moist	9	2	125	27.3	7	40	7	23	246
	VW_3	dry	4	6	16	10.5	10	5.3	6	14.5	42
	VW_3	moist	18	1	75	16.4	11	18.4	4	22	296
	VW_3	saturated	14	1	5	1.6	1	1.1	1	2	22
NUBES	VW_1	dry	3	45	218	119	94	89.2	69.5	156	357
	VW_1	moist	2	1	1	1	1	0	1	1	2
	VW_2	dry	2	45	313	179	179	189.5	112	246	358
	VW_2	moist	1	1	1	1	1	NA	1	1	1
	VW_3	dry	11	2	40	12.9	6	14.5	3	21	142
	VW_3	moist	10	1	150	21.7	7	45.5	2	14.8	217
SHEEFER	VW_1	dry	1	210	210	210	210	NA	210	210	210
	VW_1	moist	1	148	148	148	148	NA	148	148	148
	VW_2	dry	26	1	161	10.7	3	31.1	1	6.8	279
	VW_2	moist	25	1	7	3.2	3	1.7	2	4	79
	VW_3	dry	26	1	144	10.2	3.5	27.7	1.2	8.2	265
	VW_3	moist	25	1	25	3.7	2	4.7	2	4	93
TALUMA	VW_1	dry	8	1	30	13.6	9	13.1	1.8	28.2	109
	VW_1	moist	28	1	27	5.8	3.5	5.9	1	9.2	163
	VW_1	saturated	20	1	27	4.3	2.5	5.8	1	5.2	87
	VW_2	dry	5	5	27	17.6	24	11.1	6	26	88
	VW_2	moist	21	1	26	7.4	3	8.8	2	12	155
	VW_2	saturated	16	1	42	7.2	4	9.9	2	8.2	116
	VW_3	dry	7	1	30	14.3	9	12.9	3.5	26.5	100
	VW_3	moist	26	1	42	8.4	6	9	2	10	218
	VW_3	saturated	18	1	7	2.3	1.5	1.8	1	3.5	41
VEGAS	VW_1	moist	1	360	360	360	360	NA	360	360	360
	VW_2	dry	7	2	51	11.3	3	17.9	2	9.5	79
	VW_2	moist	28	1	18	4.6	3	4.9	1	6.2	130
	VW_2	saturated	22	1	23	6.9	5.5	5.3	3.2	8	151
	VW_3	dry	6	1	49	12.3	5	18.4	2.2	10.8	74
	VW_3	moist	19	1	13	3.9	2	3.7	1	5.5	75
	VW_3	saturated	15	1	91	14.1	7	21.8	5.5	12	211
YUCAO	VW_1	moist	16	2	67	20.6	14.5	18.2	8.5	25.8	330
	VW_1	saturated	15	1	5	1.9	2	1.2	1	2	28
	VW_2	dry	2	16	21	18.5	18.5	3.5	17.2	19.8	37
	VW_2	moist	15	1	67	20.5	18	18.3	9.5	24.5	307
	VW_2	saturated	12	1	2	1.2	1	0.4	1	1	14
	VW_3	dry	17	1	34	5.9	3	9	2	4	101
	VW_3	moist	20	2	70	12.8	7.5	15.5	3.8	15.5	255
	VW_3	saturated	2	1	1	1	1	0	1	1	2

Nota: * Unidades en días

Tabla **C-1**: Estadísticas de rachas por sitio, profundidad y estado de humedad.

En la Tabla **C-2** se muestran de forma resumida las estadísticas por sitio (*site*), profunidad del sensor (VW_1, VW_2, VW_3) y estados de humedad (seco:*dry*, húmedo:*mosit* y saturado:*saturated*).

Site	Depth	Dry	Moist	Saturated
ARBORADA	VW_1	n=6, media=58.7 (4-244)	n=5, media=1.4 (1-2)	Sin datos
	VW_2	n=1, media=359 (359-359)	Sin datos	Sin datos
	VW_3	n=25, media=9.6 (1-163)	n=25, media=4.8 (1-12)	Sin datos
CARIMAGUA	VW_1	n=5, media=23.4 (1-39)	n=18, media=11.9 (1-66)	n=12, media=2.2 (1-9)
	VW_2	n=3, media=37.3 (29-53)	n=6, media=40.5 (5-124)	n=2, media=1.5 (1-2)
	VW_3	n=1, media=358 (358-358)	Sin datos	Sin datos
LALIBERTAD	VW_1	n=10, media=13 (1-32)	n=11, media=20.9 (1-123)	Sin datos
	VW_2	n=8, media=14.2 (1-32)	n=9, media=27.3 (2-125)	Sin datos
	VW_3	n=4, media=10.5 (6-16)	n=18, media=16.4 (1-75)	n=14, media=1.6 (1-5)
NUBES	VW_1	n=3, media=119 (45-218)	n=2, media=1 (1-1)	Sin datos
	VW_2	n=2, media=179 (45-313)	n=1, media=1 (1-1)	Sin datos
	VW_3	n=11, media=12.9 (2-40)	n=10, media=21.7 (1-150)	Sin datos
SHEEFER	VW_1	n=1, media=210 (210-210)	n=1, media=148 (148-148)	Sin datos
	VW_2	n=26, media=10.7 (1-161)	n=25, media=3.2 (1-7)	Sin datos
	VW_3	n=26, media=10.2 (1-144)	n=25, media=3.7 (1-25)	Sin datos
TALUMA	VW_1	n=8, media=13.6 (1-30)	n=28, media=5.8 (1-27)	n=20, media=4.3 (1-27)
	VW_2	n=5, media=17.6 (5-27)	n=21, media=7.4 (1-26)	n=16, media=7.2 (1-42)
	VW_3	n=7, media=14.3 (1-30)	n=26, media=8.4 (1-42)	n=18, media=2.3 (1-7)
VEGAS	VW_1	Sin datos	n=1, media=360 (360-360)	Sin datos
	VW_2	n=7, media=11.3 (2-51)	n=28, media=4.6 (1-18)	n=22, media=6.9 (1-23)
	VW_3	n=6, media=12.3 (1-49)	n=19, media=3.9 (1-13)	n=15, media=14.1 (1-91)
YUCAO	VW_1	Sin datos	n=16, media=20.6 (2-67)	n=15, media=1.9 (1-5)
	VW_2	n=2, media=18.5 (16-21)	n=15, media=20.5 (1-67)	n=12, media=1.2 (1-2)
	VW_3	n=17, media=5.9 (1-34)	n=20, media=12.8 (2-70)	n=2, media=1 (1-1)

Nota: Los valores corresponden a n: número de eventos continuos, días promedio y días consecutivos (mínimo -- máximo).

Tabla **C-2**: Estadísticas compactas de rachas por sitio, profundidad y estado de humedad.

C.3 Conteo modificando CAD

Se realizó el conteo de días consecutivos (rachas) modificando la CAD al 50 %, de acuerdo con los estados de humedad. Se utilizó el algorimo *03_ Conteo_ humedad.R* (Rodríguez-Vásquez, 2026b) resumida las estadísticas en la Tabla **C-3** y de manera compacta en la Tabla **C-4**.

Sitio	Sensor	Estado	n_rachas	Mín.*	Máx.*	Media*	Mediana*	D.E.*	p25*	p75*	Total*
ARBORADA	VW_1	dry	5	4	315	70.6	10	136.7	7	17	353
	VW_1	moist	4	1	2	1.5	1.5	0.6	1	2	6
	VW_2	dry	1	359	359	359	359	NA	359	359	359
	VW_3	dry	2	114	244	179	179	91.9	146.5	211.5	358
	VW_3	moist	1	1	1	1	1	NA	1	1	1
CARIMAGUA	VW_1	dry	8	1	73	18.8	2.5	30.5	2	18.8	150
	VW_1	moist	21	1	24	8.7	6	7.1	3	12	182
	VW_1	saturated	12	1	9	2.2	1	2.3	1	3	26
	VW_2	dry	10	1	74	16	3.5	27.8	2	5	160
	VW_2	moist	13	1	79	15	11	20.3	3	17	195
	VW_2	saturated	2	1	2	1.5	1.5	0.7	1.2	1.8	3
	VW_3	dry	1	358	358	358	358	NA	358	358	358
LALIBERTAD	VW_1	dry	34	1	96	7.4	2.5	16.8	1	4.8	253
	VW_1	moist	34	1	11	3.1	3	2.3	2	3	107
	VW_2	dry	28	1	112	10.3	3.5	21.3	2	8.2	288
	VW_2	moist	28	1	8	2.6	2	2.1	1	3	72
	VW_3	dry	6	1	53	21.7	17.5	19.1	9	30.5	130
	VW_3	moist	20	1	75	10.4	5	17.1	3	7.2	208
	VW_3	saturated	14	1	5	1.6	1	1.1	1	2	22
NUBES	VW_1	dry	2	45	313	179	179	189.5	112	246	358
	VW_1	moist	1	1	1	1	1	NA	1	1	1
	VW_2	dry	2	45	313	179	179	189.5	112	246	358
	VW_2	moist	1	1	1	1	1	NA	1	1	1
	VW_3	dry	2	45	313	179	179	189.5	112	246	358
	VW_3	moist	1	1	1	1	1	NA	1	1	1
SHEEFER	VW_1	dry	1	210	210	210	210	NA	210	210	210
	VW_1	moist	1	148	148	148	148	NA	148	148	148
	VW_2	dry	1	358	358	358	358	NA	358	358	358
	VW_3	dry	1	358	358	358	358	NA	358	358	358
TALUMA	VW_1	dry	11	1	38	16.3	13	13.2	6	26	179
	VW_1	moist	27	1	8	3.4	3	2	2	4.5	93
	VW_1	saturated	20	1	27	4.3	2.5	5.8	1	5.2	87
	VW_2	dry	9	2	36	17.4	12	12.9	11	30	157
	VW_2	moist	22	1	13	3.9	2.5	3.4	1.2	6	86
	VW_2	saturated	16	1	42	7.2	4	9.9	2	8.2	116
	VW_3	dry	9	2	75	21.2	12	25.2	6	18	191
	VW_3	moist	24	1	13	5.3	4.5	3.7	2	7.2	127
	VW_3	saturated	18	1	7	2.3	1.5	1.8	1	3.5	41
VEGAS	VW_1	moist	1	360	360	360	360	NA	360	360	360
	VW_2	dry	9	1	64	14.7	5	20.1	3	20	132
	VW_2	moist	27	1	10	2.9	2	2.3	1	3.5	77
	VW_2	saturated	22	1	23	6.9	5.5	5.3	3.2	8	151
	VW_3	dry	7	3	54	15	9	17.9	5	14.5	105
	VW_3	moist	19	1	7	2.3	2	1.7	1	3	44
	VW_3	saturated	15	1	91	14.1	7	21.8	5.5	12	211
YUCAO	VW_1	dry	7	1	30	11.9	4	12.2	2.5	21.5	83
	VW_1	moist	20	2	31	12.3	9	7.5	7	17.5	247
	VW_1	saturated	15	1	5	1.9	2	1.2	1	2	28
	VW_2	dry	20	1	37	11.6	7	11.2	4	15.5	231
	VW_2	moist	27	1	12	4.2	4	2.9	2	5.5	113
	VW_2	saturated	12	1	2	1.2	1	0.4	1	1	14
	VW_3	dry	20	1	54	16.1	9.5	14.7	4	26.5	323
	VW_3	moist	18	1	4	1.8	1.5	1	1	2	33
	VW_3	saturated	2	1	1	1	1	0	1	1	2

Nota: * Unidades en días

Tabla **C-3**: Estadísticas de rachas por sitio con CAD al 50 %

Site	Depth	dry	moist	saturated
ARBORADA	VW_1	n=5, media=70.6 (4-315)	n=4, media=1.5 (1-2)	Sin datos
	VW_2	n=1, media=359 (359-359)	Sin datos	Sin datos
	VW_3	n=2, media=179 (114-244)	n=1, media=1 (1-1)	Sin datos
CARIMAGUA	VW_1	n=8, media=18.8 (1-73)	n=21, media=8.7 (1-24)	n=12, media=2.2 (1-9)
	VW_2	n=10, media=16 (1-74)	n=13, media=15 (1-79)	n=2, media=1.5 (1-2)
	VW_3	n=1, media=358 (358-358)	Sin datos	Sin datos
LALIBERTAD	VW_1	n=34, media=7.4 (1-96)	n=34, media=3.1 (1-11)	Sin datos
	VW_2	n=28, media=10.3 (1-112)	n=28, media=2.6 (1-8)	Sin datos
	VW_3	n=6, media=21.7 (1-53)	n=20, media=10.4 (1-75)	n=14, media=1.6 (1-5)
NUBES	VW_1	n=2, media=179 (45-313)	n=1, media=1 (1-1)	Sin datos
	VW_2	n=2, media=179 (45-313)	n=1, media=1 (1-1)	Sin datos
	VW_3	n=2, media=179 (45-313)	n=1, media=1 (1-1)	Sin datos
SHEEFER	VW_1	n=1, media=210 (210-210)	n=1, media=148 (148-148)	Sin datos
	VW_2	n=1, media=358 (358-358)	Sin datos	Sin datos
	VW_3	n=1, media=358 (358-358)	Sin datos	Sin datos
TALUMA	VW_1	n=11, media=16.3 (1-38)	n=27, media=3.4 (1-8)	n=20, media=4.3 (1-27)
	VW_2	n=9, media=17.4 (2-36)	n=22, media=3.9 (1-13)	n=16, media=7.2 (1-42)
	VW_3	n=9, media=21.2 (2-75)	n=24, media=5.3 (1-13)	n=18, media=2.3 (1-7)
VEGAS	VW_1	Sin datos	n=1, media=360 (360-360)	Sin datos
	VW_2	n=9, media=14.7 (1-64)	n=27, media=2.9 (1-10)	n=22, media=6.9 (1-23)
	VW_3	n=7, media=15 (3-54)	n=19, media=2.3 (1-7)	n=15, media=14.1 (1-91)
YUCAO	VW_1	n=7, media=11.9 (1-30)	n=20, media=12.3 (2-31)	n=15, media=1.9 (1-5)
	VW_2	n=20, media=11.6 (1-37)	n=27, media=4.2 (1-12)	n=12, media=1.2 (1-2)
	VW_3	n=20, media=16.1 (1-54)	n=18, media=1.8 (1-4)	n=2, media=1 (1-1)

Nota: Los valores corresponden a n: número de eventos continuos, días promedio y días consecutivos (mínimo -- máximo).

Tabla **C-4**: Estadísticas compactas de rachas con CAD al 50 %

D Propiedades físicas en la sección control de humedad

Se extrajeron las propiedades físicas (densidad aparente, arena, limo, arcilla, y capacidad de agua dispoble) de forma ponderada de acuerdo con límites de la sección control de humedad estimada para los 157 perfiles. Los resultados se presentan en la Tabla **D-1**.

La implementación detallada del algoritmo puede consultarse en el código *04_1_Propiedades_SCH.R*, disponible en el repositorio de datos asociado a la investigación (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

Tabla **D-1**: Propiedades físicas en la sección control de humedad

Perfil	LS	LI	CAD	DA	A	Ar	L	n	num._hte.	hte._zona	n_zona	Cobertura	CAD2
AR-011	13.84	40.19	30.30	1.65	24.00	40.00	236.00	26.35	3.00	1.00	26.35	100.00	1.15
AR-021	13.53	43.67	33.51	1.50	30.79	33.10	236.11	30.14	3.00	3.00	30.14	100.00	1.11
AR-026	11.67	36.85	39.17	1.28	53.46	16.37	430.18	25.18	5.00	2.00	25.18	100.00	1.56
AR-043	16.84	54.41	33.78	1.48	34.00	25.44	340.56	37.58	4.00	3.00	37.58	100.00	0.90
ARBORADA	42.45	160.52	32.47	1.54	42.63	32.32	225.05	118.06	3.00	1.00	118.06	100.00	0.28
CARIMAGUA	32.91	90.86	32.18	1.56	6.06	45.32	348.62	57.95	4.00	2.00	57.95	100.00	0.56
CT-003	20.45	71.28	41.91	1.20	28.14	52.31	319.56	50.83	4.00	3.00	50.83	100.00	0.82
CT-005	41.12	134.24	31.82	1.58	60.84	21.49	217.67	93.12	3.00	2.00	93.12	100.00	0.34
CT-007	22.07	77.08	47.89	1.05	35.29	48.83	215.88	55.01	3.00	2.00	55.01	100.00	0.87
CU-01	12.23	42.67	37.12	1.35	14.86	29.67	355.47	30.44	4.00	2.00	30.44	100.00	1.22
CU-02	7.95	23.84	32.68	1.53	4.80	22.60	372.60	15.89	4.00	1.00	15.89	100.00	2.06
CU-08	18.38	65.81	32.17	1.56	19.62	38.45	441.93	47.43	5.00	2.00	47.43	100.00	0.68
CU-09	12.77	47.99	36.85	1.38	11.31	42.22	346.47	35.22	4.00	3.00	35.22	100.00	1.05
CU-10	12.95	44.88	39.99	1.24	23.64	40.29	336.07	31.93	4.00	3.00	31.93	100.00	1.25
CU-12	11.05	36.34	37.40	1.36	13.23	17.80	368.97	25.30	4.00	2.00	25.30	100.00	1.48
CU-14	11.48	52.49	34.41	1.44	9.16	42.54	348.30	41.01	4.00	2.00	41.01	100.00	0.84
CU-19	10.70	37.12	42.41	1.18	10.36	29.45	460.19	26.42	5.00	3.00	26.42	100.00	1.61
CU-20	9.16	27.85	46.07	1.13	4.57	17.33	378.09	18.68	4.00	2.00	18.68	100.00	2.47
CU-21A	15.56	49.76	36.56	1.37	2.41	57.13	440.46	34.19	5.00	3.00	34.19	100.00	1.07
CU-25	24.86	72.19	32.11	1.57	61.35	18.26	420.39	47.34	5.00	3.00	47.34	100.00	0.68
GU-006	20.42	85.79	37.40	1.34	14.61	64.34	421.05	65.37	5.00	4.00	65.37	100.00	0.57
LALIBERTAD	29.19	80.78	28.77	1.75	49.33	34.72	315.96	51.59	4.00	3.00	51.59	100.00	0.56
LB-005	32.27	83.78	31.30	1.61	61.07	26.00	412.93	51.51	5.00	3.00	51.51	100.00	0.61
LP-01	9.18	27.79	34.95	1.43	8.96	22.33	368.71	18.61	4.00	2.00	18.61	100.00	1.88
LP-04	9.83	40.79	35.81	1.42	12.06	25.11	362.83	30.96	4.00	3.00	30.96	100.00	1.16
LP-05	17.55	70.69	49.21	1.27	12.90	27.00	260.10	53.15	3.00	1.00	53.15	100.00	0.93
LP-06	16.56	50.60	31.39	1.59	7.77	30.62	461.61	34.04	5.00	2.00	34.04	100.00	0.92
LP-09	19.18	41.30	40.29	1.24	3.38	27.37	769.25	22.11	8.00	3.00	22.11	100.00	1.82
LP-12	14.85	50.94	37.98	1.35	4.60	30.57	264.83	36.09	3.00	2.00	36.09	100.00	1.05
LP-13	14.20	45.27	33.74	1.49	41.49	13.48	345.03	31.07	4.00	2.00	31.07	100.00	1.09
LP-14	21.82	67.17	62.37	0.81	1.91	63.70	334.39	45.35	4.00	2.00	45.35	100.00	1.38
LP-18	10.69	32.41	39.48	1.27	10.51	17.25	472.24	21.72	5.00	3.00	21.72	100.00	1.82
LP-20	10.55	35.21	64.41	0.91	25.36	25.23	349.41	24.66	4.00	2.00	24.66	100.00	2.61
LP-21	13.99	46.60	41.99	1.19	16.58	21.05	362.37	32.61	4.00	3.00	32.61	100.00	1.29
LP-22	9.92	45.58	45.96	1.25	5.03	34.35	360.62	35.66	4.00	3.00	35.66	100.00	1.29
LP-23	13.03	43.34	39.84	1.25	10.85	22.72	366.43	30.31	4.00	2.00	30.31	100.00	1.31
LP-24	12.79	41.19	34.34	1.46	16.17	20.89	362.93	28.40	4.00	2.00	28.40	100.00	1.21
LP-25	15.58	49.64	32.62	1.56	28.48	34.04	337.48	34.06	4.00	2.00	34.06	100.00	0.96
LP-26	13.06	38.49	37.18	1.34	3.80	51.95	444.25	25.43	5.00	2.00	25.43	100.00	1.46
LP-27	12.21	41.49	34.68	1.44	6.69	29.29	564.02	29.28	6.00	3.00	29.28	100.00	1.18
LP-28	12.66	49.44	39.15	1.34	4.92	30.41	364.67	36.78	4.00	3.00	36.78	100.00	1.06
LP-33	9.58	32.02	70.87	0.92	5.56	34.93	359.51	22.45	4.00	2.00	22.45	100.00	3.16

Perfil	LS	LI	CAD	DA	A	Ar	L	n	num._hte.	hte._zona	n_zona	Cobertura	CAD2
LP-34	8.94	27.32	78.88	0.64	49.68	6.89	443.44	18.38	5.00	2.00	18.38	100.00	4.29
LP-35	9.89	31.40	35.12	1.45	6.80	22.18	471.02	21.51	5.00	3.00	21.51	100.00	1.63
LP-36	12.51	50.93	31.98	1.56	13.64	26.29	360.07	38.42	4.00	3.00	38.42	100.00	0.83
LP-37	15.03	49.35	38.17	1.31	5.09	25.96	368.96	34.31	4.00	2.00	34.31	100.00	1.11
LP-38	12.90	39.52	39.91	1.25	15.27	20.37	364.36	26.62	4.00	2.00	26.62	100.00	1.50
LP-41	19.87	64.08	29.75	1.69	6.68	29.03	364.29	44.20	4.00	2.00	44.20	100.00	0.67
LP-42	21.12	64.90	42.88	1.17	47.81	11.52	340.67	43.78	4.00	2.00	43.78	100.00	0.98
LP-43	7.06	21.19	42.02	1.19	6.90	20.90	372.20	14.13	4.00	1.00	14.13	100.00	2.97
M-010	24.85	78.67	36.00	1.39	50.19	31.81	218.00	53.82	3.00	2.00	53.82	100.00	0.67
M-012	17.88	49.64	32.63	1.53	33.83	24.96	441.20	31.77	5.00	3.00	31.77	100.00	1.03
M-029	10.88	35.63	35.93	1.40	8.12	44.25	447.63	24.75	5.00	3.00	24.75	100.00	1.45
M-070	25.77	81.83	36.46	1.37	69.28	7.93	322.79	56.06	4.00	3.00	56.06	100.00	0.65
MAVALLE	53.83	187.99	32.47	1.54	22.43	51.19	226.38	134.16	3.00	1.00	134.16	100.00	0.24
NA-009	66.41	152.89	34.59	1.45	7.73	23.45	468.82	86.48	5.00	2.00	86.48	100.00	0.40
NUBES	31.48	78.80	31.72	1.58	40.71	28.92	330.37	47.33	4.00	2.00	47.33	100.00	0.67
PG-04	10.91	38.65	38.54	1.29	21.99	42.62	335.39	27.75	4.00	2.00	27.75	100.00	1.39
PG-11X	8.31	39.33	30.11	1.64	51.58	17.86	330.56	31.02	4.00	3.00	31.02	100.00	0.97
PG-13X	11.05	48.34	34.28	1.46	16.71	41.17	342.13	37.30	4.00	3.00	37.30	100.00	0.92
PG-14X	23.22	70.17	40.89	1.31	17.35	40.08	342.57	46.95	4.00	2.00	46.95	100.00	0.87
PG-15X	11.55	40.91	39.73	1.27	15.81	29.93	454.26	29.36	5.00	2.00	29.36	100.00	1.35
PV-005	11.16	34.03	35.38	1.42	15.53	13.29	371.18	22.87	4.00	2.00	22.87	100.00	1.55
PV-005b	28.04	100.69	36.33	1.38	16.86	51.00	332.14	72.65	4.00	2.00	72.65	100.00	0.50
PV-013	13.55	47.96	47.84	1.04	11.55	36.94	351.51	34.41	4.00	3.00	34.41	100.00	1.39
SHEEFER	31.88	85.61	32.14	1.56	4.89	51.98	343.13	53.73	4.00	2.00	53.73	100.00	0.60
SHM-116	9.02	27.80	34.30	1.46	32.33	19.21	448.45	18.78	5.00	2.00	18.78	100.00	1.83
SHM-202	3.62	14.67	45.91	1.30	34.50	14.45	351.05	11.04	4.00	2.00	11.04	100.00	4.16
SHM-210	10.68	33.08	33.25	1.50	29.30	20.30	450.40	22.41	5.00	2.00	22.41	100.00	1.48
SHM-211	6.88	21.62	36.90	1.38	21.81	20.00	358.19	14.74	4.00	2.00	14.74	100.00	2.50
SHM-232	9.19	51.60	33.33	1.50	23.30	38.40	338.30	42.41	4.00	1.00	42.41	100.00	0.79
SHM-250	9.86	29.28	32.83	1.53	13.44	23.73	662.84	19.42	7.00	2.00	19.42	100.00	1.69
SHM-251	11.75	42.32	34.09	1.48	10.96	37.96	351.08	30.58	4.00	2.00	30.58	100.00	1.11
SHM-253	7.48	22.21	38.22	1.31	0.10	37.80	262.10	14.73	3.00	2.00	14.73	100.00	2.60
SHM-256	9.85	28.32	31.84	1.57	43.15	14.02	342.83	18.47	4.00	2.00	18.47	100.00	1.72
SHM-257	10.57	35.17	32.59	1.55	18.19	27.90	353.91	24.60	4.00	2.00	24.60	100.00	1.32
SME-05	7.04	21.00	33.65	1.49	0.33	19.87	379.80	13.97	4.00	2.00	13.97	100.00	2.41
SME-105	13.69	44.56	32.12	1.56	68.46	6.42	425.11	30.87	5.00	3.00	30.87	100.00	1.04
SME-121	10.55	39.47	32.72	1.53	7.38	29.61	363.01	28.92	4.00	2.00	28.92	100.00	1.13
SME-123	22.78	49.40	35.46	1.41	2.64	15.31	482.05	26.62	5.00	1.00	26.62	100.00	1.33
SME-125	10.87	40.69	32.06	1.57	17.78	18.02	464.21	29.82	5.00	3.00	29.82	100.00	1.08
SME-126	10.49	41.57	30.25	1.67	19.70	25.48	354.82	31.08	4.00	2.00	31.08	100.00	0.97
SME-127	15.35	52.37	31.56	1.60	35.10	31.29	333.61	37.03	4.00	3.00	37.03	100.00	0.85
SME-129	22.79	52.05	30.47	1.64	28.01	14.38	957.62	29.26	10.00	2.00	29.26	100.00	1.04
SME-13	26.90	90.50	40.66	1.23	11.55	62.39	326.05	63.60	4.00	2.00	63.60	100.00	0.64
SME-131	14.52	43.38	32.16	1.55	17.54	24.90	357.56	28.86	4.00	3.00	28.86	100.00	1.11

Perfil	LS	LI	CAD	DA	A	Ar	L	n	num._hte.	hte._zona	n_zona	Cobertura	CAD2
SME-133	9.13	29.63	30.72	1.62	26.91	21.72	351.37	20.50	4.00	2.00	20.50	100.00	1.50
SME-134	12.01	50.20	39.00	1.19	30.21	13.94	455.84	38.20	5.00	2.00	38.20	100.00	1.02
SME-136	21.03	32.67	34.01	1.47	12.13	37.56	450.31	11.64	5.00	1.00	11.64	100.00	2.92
SME-138	8.96	26.13	35.49	1.41	18.54	31.61	349.85	17.17	4.00	2.00	17.17	100.00	2.07
SME-139	19.86	67.43	33.42	1.53	45.54	30.80	223.65	47.58	3.00	3.00	47.58	100.00	0.70
SME-146	12.22	34.79	36.15	1.38	30.25	22.75	347.00	22.57	4.00	2.00	22.57	100.00	1.60
SME-15	12.75	46.12	36.00	1.38	49.83	11.44	438.73	33.37	5.00	2.00	33.37	100.00	1.08
SME-163	21.86	64.75	31.66	1.58	6.91	34.87	358.22	42.88	4.00	2.00	42.88	100.00	0.74
SME-17	18.40	60.98	36.33	1.38	56.80	20.81	422.39	42.58	5.00	2.00	42.58	100.00	0.85
SME-18	10.21	37.05	44.42	1.21	66.34	8.06	425.61	26.84	5.00	3.00	26.84	100.00	1.66
SME-21	7.42	21.57	36.57	1.37	1.38	18.60	480.02	14.15	5.00	2.00	14.15	100.00	2.58
SME-230	18.45	69.90	35.75	1.41	5.11	40.51	254.38	51.45	3.00	2.00	51.45	100.00	0.69
SME-31	14.83	48.08	50.51	1.01	17.66	38.69	343.65	33.25	4.00	2.00	33.25	100.00	1.52
SME-32	9.99	29.86	78.75	0.66	7.18	48.62	244.19	19.87	3.00	2.00	19.87	100.00	3.96
SME-35	23.82	50.95	35.90	1.40	27.39	9.74	462.87	27.12	5.00	2.00	27.12	100.00	1.32
SME-36	18.90	74.65	40.76	1.32	1.73	56.74	441.53	55.75	5.00	3.00	55.75	100.00	0.73
SME-37	13.95	46.03	33.22	1.51	47.45	16.04	336.51	32.08	4.00	3.00	32.08	100.00	1.04
SME-39	8.83	27.03	55.67	0.93	0.44	56.08	443.48	18.20	5.00	2.00	18.20	100.00	3.06
SME-42	11.37	38.19	31.59	1.58	36.68	24.74	338.58	26.82	4.00	3.00	26.82	100.00	1.18
SME-57A	8.25	22.64	35.77	1.40	59.61	10.70	329.69	14.39	4.00	2.00	14.39	100.00	2.49
SME-62A	68.66	108.44	48.84	1.11	20.92	17.35	461.72	39.77	5.00	3.00	39.77	100.00	1.23
SME-63A	17.08	57.53	34.50	1.51	18.77	17.19	364.05	40.45	4.00	2.00	40.45	100.00	0.85
SME-66A	23.53	74.96	31.79	1.57	44.12	21.72	234.16	51.43	3.00	2.00	51.43	100.00	0.62
SME-92	27.12	79.57	34.67	1.43	2.51	70.40	327.09	52.45	4.00	2.00	52.45	100.00	0.66
SME-96	16.28	52.77	28.25	1.77	65.21	9.36	225.43	36.49	3.00	2.00	36.49	100.00	0.77
SME-97	7.62	26.09	52.30	1.03	10.28	41.42	448.30	18.47	5.00	2.00	18.47	100.00	2.83
SMT-178	9.62	30.23	34.80	1.44	2.34	28.38	569.28	20.60	6.00	2.00	20.60	100.00	1.69
SMT-182	22.25	68.89	30.20	1.68	9.04	37.45	353.51	46.63	4.00	2.00	46.63	100.00	0.65
SMT-183	31.60	85.21	33.53	1.49	8.75	29.67	361.58	53.61	4.00	2.00	53.61	100.00	0.63
SMT-185	16.52	50.94	40.53	1.23	22.76	39.10	338.14	34.42	4.00	2.00	34.42	100.00	1.18
SMT-186	11.65	34.81	38.07	1.31	8.78	17.85	573.37	23.16	6.00	2.00	23.16	100.00	1.64
SMT-187	13.69	41.11	36.92	1.35	11.89	16.58	471.53	27.43	5.00	2.00	27.43	100.00	1.35
SMT-188	13.40	36.64	32.73	1.53	34.42	20.27	345.31	23.25	4.00	2.00	23.25	100.00	1.41
SMT-189	8.87	26.09	35.56	1.40	6.47	16.72	376.81	17.22	4.00	2.00	17.22	100.00	2.07
SMT-194	10.83	31.98	38.39	1.30	3.51	36.76	359.72	21.14	4.00	2.00	21.14	100.00	1.82
SMT-195	11.79	35.22	41.15	1.23	23.98	35.67	240.35	23.43	3.00	2.00	23.43	100.00	1.76
SMT-196	11.90	50.65	30.51	1.64	52.61	7.52	439.87	38.74	5.00	2.00	38.74	100.00	0.79
SMT-197	13.51	42.65	36.63	1.37	23.69	28.71	347.60	29.15	4.00	2.00	29.15	100.00	1.26
TALUMA	57.18	192.18	30.81	1.62	20.69	55.67	323.64	134.99	4.00	2.00	134.99	100.00	0.23
VC-030	10.88	35.44	35.78	1.40	16.99	26.42	256.59	24.56	3.00	2.00	24.56	100.00	1.46
VC-031	18.66	50.74	26.60	1.88	5.70	48.50	145.80	32.08	2.00	1.00	32.08	100.00	0.83
VC-032	9.66	38.69	30.74	1.64	24.45	32.71	142.83	29.03	2.00	2.00	29.03	100.00	1.06
VC-033	21.73	60.23	29.74	1.68	16.97	40.35	142.68	38.49	2.00	2.00	38.49	100.00	0.77
VC-035	13.60	44.53	30.59	1.64	22.59	42.12	235.29	30.93	3.00	3.00	30.93	100.00	0.99

Perfil	LS	LI	CAD	DA	A	Ar	L	n	num._hte.	hte._zona	n_zona	Cobertura	CAD2
VC-036	11.83	35.93	35.67	1.46	45.89	29.51	124.60	24.10	2.00	2.00	24.10	100.00	1.48
VC-037	27.79	58.71	52.01	0.97	19.88	50.78	229.34	30.93	3.00	2.00	30.93	100.00	1.68
VC-039	15.90	47.69	28.90	1.73	81.40	16.60	102.00	31.80	2.00	1.00	31.80	100.00	0.91
VC-040	11.92	36.75	37.10	1.35	12.29	50.04	237.67	24.83	3.00	2.00	24.83	100.00	1.49
VC-041	10.08	32.03	38.84	1.29	10.50	31.00	258.50	21.95	3.00	2.00	21.95	100.00	1.77
VC-049	10.86	37.21	32.85	1.52	56.09	27.44	116.47	26.35	2.00	2.00	26.35	100.00	1.25
VC-051	23.50	49.94	62.38	0.80	34.26	52.70	213.04	26.44	3.00	2.00	26.44	100.00	2.36
VC-053	10.96	34.28	27.47	1.82	67.10	10.40	222.50	23.32	3.00	1.00	23.32	100.00	1.18
VC-054	11.17	31.96	36.47	1.37	2.57	82.73	214.70	20.80	3.00	2.00	20.80	100.00	1.75
VC-055	12.23	32.12	35.71	1.40	14.20	31.60	254.20	19.89	3.00	1.00	19.89	100.00	1.80
VC-056	11.54	37.87	39.34	1.27	34.77	28.81	136.42	26.34	2.00	2.00	26.34	100.00	1.49
VC-057	20.57	51.85	42.28	1.18	32.08	37.93	129.99	31.28	2.00	2.00	31.28	100.00	1.35
VC-071	6.78	20.44	31.03	1.61	20.40	10.73	168.87	13.67	2.00	2.00	13.67	100.00	2.27
VC-073	11.62	34.28	33.54	1.49	76.98	17.94	305.07	22.66	4.00	2.00	22.66	100.00	1.48
VC-074	10.18	30.47	30.76	1.63	70.12	11.42	318.47	20.29	4.00	2.00	20.29	100.00	1.52
VC-075	10.09	29.93	35.97	1.39	21.10	20.20	258.69	19.84	3.00	3.00	19.84	100.00	1.81
VC-076	11.39	33.59	40.27	1.24	23.46	21.11	355.44	22.20	4.00	2.00	22.20	100.00	1.81
VC-078	12.90	38.24	34.24	1.50	34.72	22.27	343.01	25.34	4.00	2.00	25.34	100.00	1.35
VC-079	17.55	51.57	34.68	1.44	34.40	21.91	343.70	34.02	4.00	3.00	34.02	100.00	1.02
VC-080	20.40	52.23	33.33	1.50	41.25	26.76	331.98	31.83	4.00	2.00	31.83	100.00	1.05
VC-081	11.63	40.29	33.27	1.50	20.89	28.07	351.04	28.66	4.00	3.00	28.66	100.00	1.16
VC-082	14.02	39.50	45.32	1.10	9.76	58.21	232.03	25.48	3.00	3.00	25.48	100.00	1.78
VC-084	15.27	48.01	31.98	1.56	52.16	16.72	331.13	32.74	4.00	2.00	32.74	100.00	0.98
VC-085	18.87	58.68	31.14	1.61	52.70	16.31	330.99	39.82	4.00	3.00	39.82	100.00	0.78
VC-088	17.41	55.18	32.07	1.56	80.84	2.20	316.96	37.77	4.00	2.00	37.77	100.00	0.85
VEGAS	66.93	116.93	31.45	1.59	44.54	18.54	236.92	49.99	3.00	1.00	49.99	100.00	0.63
YUCAO	28.79	86.91	30.86	1.62	67.03	15.83	117.14	58.12	2.00	1.00	58.12	100.00	0.53

Nota: LS: Límite superior de la SCH [cm]; LI: Límite inferior de la SCH [cm]: CAD: Capacidad de Agua Dsiponible [mm] ; DA: Densidad aparente [g cm^{-1}]; A: Arena [%]; Ar: Arcilla [%]; L: Limo [%]: n: espesor efectivo [cm]; num._hte.: Número de horizontes en la SCH; hte._zona: Horizonte en la SCH; n_zona: espesor en la SCH [cm]; Cobertura; coberut cubierta [%] & CAD2: CAD en mm por cm [mm/cm]

E Resultados modelo de Newhall a escala puntual

Se ejecutó el modelo para los diferentes periodos 2023-2024, 2023 y 2024, y para la normal climática 1981-2010. Los resultados se presentan en la Tabla **E-1**.

En el repositorio de información se incluyen los informes generados de manera individual para cada sitio, en formato PDF, los cuales fueron desarrollados mediante scripts en R y organizados en la carpeta *report_ newhall*. Dichos informes contienen:

- Resumen ejecutivo
- Datos climpaticos mensuales
- Climogramas
- Balance hídrico
- Resumen de indicadores de Newhall

La implementación detallada del algoritmo puede consultarse en el código *06_ Newhall_ puntual.R*, disponible en el repositorio de datos asociado a la investigación (Rodríguez-Vásquez, 2026b).

Tabla **E-1**: Resultados puntuales del Modelo de Newhall

Site	Y	AR	AWB	SWB	WHC	MR	TR	RS1	RS2	NM	ND	NMO	NDO	NMD	NMDO	NCM	NCM	DS	DW
ARBORADA	2023_2024	3019.76	1366.33	472.75	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	248	73	248	73	39	39	237	237	0	34
CARIMAGUA		2827.76	1130.34	365.11	32.18	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	226	97	226	97	37	37	203	203	10	17
LALIBERTAD		3485.10	1983.46	825.53	28.77	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	297	47	297	47	16	16	295	295	0	95
MAVALLE		2855.45	1181.54	463.83	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	242	80	242	80	38	38	234	234	0	32
NUBES		2841.99	1175.87	376.03	31.72	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	237	77	237	77	46	46	236	236	0	34
SHEEFER		2868.45	1176.38	234.86	32.14	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	228	104	228	104	28	28	203	203	15	32
TALUMA		2836.06	1138.34	382.43	30.81	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	230	83	230	83	47	47	233	233	0	31
VEGAS		2831.05	1237.75	627.97	31.45	Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	260	54	260	54	46	46	292	292	0	78
YUCAO		2868.27	1170.85	407.16	30.86	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	235	80	235	80	45	45	234	234	0	33
ARBORADA	2023	2632.61	1013.54	757.03	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	208	93	208	93	59	59	196	196	14	15
CARIMAGUA		2451.03	788.11	660.64	32.18	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	217	115	217	115	28	28	202	202	0	15
LALIBERTAD		4035.05	2602.63	962.57	28.77	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	323	29	323	29	8	8	322	322	0	45
MAVALLE		2631.62	987.03	748.38	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Aridic	Tropustic	201	104	201	104	55	55	179	179	16	15
NUBES		2656.05	1017.62	782.65	31.72	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	209	103	209	103	48	48	205	205	0	15
SHEEFER		2414.33	774.76	753.58	32.14	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	218	114	218	114	28	28	202	202	0	15
TALUMA		2591.70	923.68	803.28	30.81	Ustic	Isohyperthermic	Aridic	Tropustic	197	123	197	123	40	40	166	166	14	15
VEGAS		3255.17	1724.88	721.64	31.45	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	298	41	298	41	21	21	298	298	0	45
YUCAO		2606.12	943.20	758.77	30.86	Ustic	Isohyperthermic	Aridic	Tropustic	199	120	199	120	41	41	166	166	14	15
ARBORADA	2024	3008.97	1359.45	816.04	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	245	62	245	62	53	53	266	266	0	23
CARIMAGUA		2872.03	1182.87	866.64	32.18	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	238	87	238	87	35	35	229	229	0	15
LALIBERTAD		3573.18	2091.62	628.14	28.77	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	296	47	296	47	17	17	293	293	0	28
MAVALLE		2878.00	1212.59	686.09	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	241	70	241	70	49	49	235	235	0	23
NUBES		2776.11	1118.14	735.00	31.72	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	232	77	232	77	51	51	233	233	0	15
SHEEFER		2947.42	1268.17	931.74	32.14	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	242	96	242	96	22	22	230	230	0	15
TALUMA		2840.67	1146.79	751.81	30.81	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	231	90	231	90	39	39	207	207	0	15
VEGAS		2915.76	1340.79	438.71	31.45	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	271	57	271	57	32	32	288	288	0	24
YUCAO		2852.73	1163.57	696.99	30.86	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	238	75	238	75	47	47	233	233	0	19
ARBORADA	1981_2010	2572.60	1111.77	629.83	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	255	73	255	73	32	32	263	263	0	22
CARIMAGUA		2402.22	804.10	562.02	32.18	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	236	95	236	95	29	29	229	229	0	15
LALIBERTAD		2986.11	1469.43	646.18	28.77	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	273	64	273	64	23	23	266	266	0	29
MAVALLE		2542.89	1017.19	603.40	32.47	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	249	80	249	80	31	31	260	260	0	20
NUBES		2424.44	975.26	600.95	31.72	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	248	75	248	75	37	37	262	262	0	15
SHEEFER		2567.80	922.68	610.98	32.14	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	246	91	246	91	23	23	232	232	0	15
TALUMA		2405.73	884.53	579.48	30.81	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	240	94	240	94	26	26	235	235	0	15
VEGAS		2731.96	1242.19	584.62	31.45	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	272	67	272	67	21	21	265	265	0	29
YUCAO		2327.90	820.96	579.68	30.86	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	234	98	234	98	28	28	229	229	0	15

Tabla **E-2**: Resultados por escenarios de WHC para la normal climática

Site	AR	AWB	SWB	WHC	MR	TR	RS1	RS2	NM	ND	NMO	NDO	NMD	NMDO	NCM	NCM	DS	DW
ARBORADA	2572.602779	1111.771699	629.8341274	40	Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	265	69	265	69	26	26	266	266	0	25
CARIMAGUA	2402.21924	804.0980453	562.0217962		Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	244	74	244	74	42	42	262	262	0	15
LALIBERTAD	2986.112537	1469.431534	646.1789821		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	286	54	286	54	20	20	287	287	0	45
MAVALLE	2542.8892	1017.187859	603.3976252		Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	259	75	259	75	26	26	263	263	0	24
NUBES	2424.441995	975.2632261	600.9540555		Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	255	68	255	68	37	37	266	266	0	15
SHEEFER	2567.800594	922.6782818	610.9823007		Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	252	69	252	69	39	39	265	265	0	15
TALUMA	2405.725594	884.5320035	579.4813968		Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	246	80	246	80	34	34	262	262	0	15
VEGAS	2731.960861	1242.188868	584.6204692		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	280	60	280	60	20	20	269	269	0	28
YUCAO	2327.902622	820.9586602	579.6841887		Ustic	Isohyperthermic	Typic	Tropustic	245	80	245	80	35	35	262	262	0	15
ARBORADA	2572.602779	1111.771699	629.8341274	100	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	285	53	285	53	22	22	299	299	0	45

Site	AR	AWB	SWB	WHC	MR	TR	RS1	RS2	NM	ND	NMO	NDO	NMD	NMDO	NCM	NCM	DS	DW
CARIMAGUA	2402.21924	804.0980453	562.0217962		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	282	58	282	58	20	20	296	296	0	45
LALIBERTAD	2986.112537	1469.431534	646.1789821		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	299	35	299	35	26	26	313	313	0	45
MAVALLE	2542.8892	1017.187859	603.3976252		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	278	60	278	60	22	22	292	292	0	45
NUBES	2424.441995	975.2632261	600.9540555		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	288	49	288	49	23	23	305	305	0	45
SHEEFER	2567.800594	922.6782818	610.9823007		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	287	50	287	50	23	23	304	304	0	45
TALUMA	2405.725594	884.5320035	579.4813968		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	275	64	275	64	21	21	290	290	0	45
VEGAS	2731.960861	1242.188868	584.6204692		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	289	42	289	42	29	29	308	308	0	45
YUCAO	2327.902622	820.9586602	579.6841887		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	277	62	277	62	21	21	292	292	0	45
ARBORADA	2572.602779	1111.771699	629.8341274	150	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	294	32	294	32	34	34	320	320	0	45
CARIMAGUA	2402.21924	804.0980453	562.0217962		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	261	40	261	40	59	59	314	314	0	15
LALIBERTAD	2986.112537	1469.431534	646.1789821		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	309	17	309	17	34	34	343	343	0	45
MAVALLE	2542.8892	1017.187859	603.3976252		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	258	41	258	41	61	61	311	311	0	15
NUBES	2424.441995	975.2632261	600.9540555		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	297	38	297	38	25	25	322	322	0	45
SHEEFER	2567.800594	922.6782818	610.9823007		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	265	35	265	35	60	60	319	319	0	15
TALUMA	2405.725594	884.5320035	579.4813968		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	256	45	256	45	59	59	309	309	0	15
VEGAS	2731.960861	1242.188868	584.6204692		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	298	26	298	26	36	36	324	324	0	45
YUCAO	2327.902622	820.9586602	579.6841887		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	257	50	257	50	53	53	310	310	0	15
ARBORADA	2572.602779	1111.771699	629.8341274	200	Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	278	12	278	12	70	70	348	348	0	23
CARIMAGUA	2402.21924	804.0980453	562.0217962		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	273	22	273	22	65	65	338	338	0	18
LALIBERTAD	2986.112537	1469.431534	646.1789821		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	330	0	330	0	30	30	360	360	0	45
MAVALLE	2542.8892	1017.187859	603.3976252		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	267	31	267	31	62	62	329	329	0	15
NUBES	2424.441995	975.2632261	600.9540555		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	280	11	280	11	69	69	349	349	0	25
SHEEFER	2567.800594	922.6782818	610.9823007		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	278	18	278	18	64	64	342	342	0	23
TALUMA	2405.725594	884.5320035	579.4813968		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	265	33	265	33	62	62	327	327	0	15
VEGAS	2731.960861	1242.188868	584.6204692		Udic	Isohyperthermic	Dry	Tropudic	312	1	312	1	47	47	359	359	0	45
YUCAO	2327.902622	820.9586602	579.6841887		Ustic	Isohyperthermic	Udic	Tropustic	267	32	267	32	61	61	328	328	0	15

Nota: AR: annual rainfall [mm]; AWB: annual water balance [mm]; SWB: summer water balance [mm]; WHC: water holding capacity [mm]; MR: moisture regime; TR: temperature regime; RS1: regime subdivision1; RS2: regime subdivision2; NM: number cumulative days moist; ND: number cumulative days dry; NMO: number cumulative days moist over5C; NDO: number cumulative days dry over5C; NMD: number cumulative days moist dry; NMDO: number cumulative days moist dry over5C; NCM: number consecutive days moist; NCM: number consecutive days moist over8C; DS: dry days after summer solstice; DW: moist days after winter solstice.