

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

“Balance hídrico del suelo de páramo en función de la cobertura vegetal en una cuenca altoandina al sur del Ecuador”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental


Autores:

Mery Fernanda Contreras García

Katherine Alexandra Morales Pacha

Director:

Marco Tulio Ramírez Matamoros

ORCID:  0000-0002- 2253-456X

Cuenca, Ecuador

2024-06-05

Resumen

El ecosistema del páramo es un ambiente frágil y evidentemente vulnerable a los efectos del cambio climático y a las actividades antrópicas que en él se generan. La vegetación juega un papel esencial en la dinámica del suelo, principalmente en la capacidad de retención de agua en el suelo. Es por esto que esta investigación se enfocó en determinar un balance hídrico del suelo de páramo bajo coberturas vegetales de bosque (*Polylepis*), almohadilla y pajonal en la microcuenca Cuevas al sur del Ecuador. Se analizó la información descargada respecto al contenido volumétrico de agua de sondas TDR, instaladas en la zona de estudio. El modelo Hydrus 1D fue utilizado para modelar y simular el contenido de agua bajo las tres coberturas vegetales y comparar con los datos observados. Considerando el índice de error PBIAS, empleando en la modelación inversa se alcanzó resultados aceptables en la simulación del contenido de agua en el suelo bajo cobertura de pajonal. El estudio revela que el almacenamiento de agua tiene un comportamiento similar bajo las tres coberturas vegetales, sin embargo, el suelo bajo cobertura de bosque estaría almacenando un 3 % más de agua en comparación con la almohadilla y el pajonal.

Palabras clave del autor: sondas TDR, páramo, Hydrus 1D



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The paramo ecosystem is a fragile environment and evidently vulnerable to the effects of climate change and the anthropogenic activities that are generated there. Vegetation plays an essential role in soil dynamics, mainly in the water retention capacity of the soil. This is why this research focused on determining a water balance of the paramo soil under forest (Polylepis), cushion-forming plants and grassland vegetation covers in the Cuevas micro-basin south of Ecuador. The information downloaded regarding the volumetric water content from TDR sensors installed in the study area was analyzed. The Hydrus 1D model was used to model and simulate the water content under the three vegetation covers and compare with the observed data. Considering the PBIAS error rate, using inverse modeling, acceptable results were achieved in the simulation of the water content in the soil under grassland cover. The study reveals that water storage has a similar behavior under the three vegetation covers, however, the soil under forest cover would be storing 3% more water compared to cushion-forming plants and the grassland.

Author Keywords: TDR sensor, paramo, Hydrus 1D



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Resumen	2
Abstract	3
Índice de contenido	4
Índice de figuras	6
Índice de tablas	7
Agradecimientos	8
Capítulo 1. Introducción	10
1.1. Identificación del problema y justificación	11
1.2. Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
Capítulo 2. Marco Teórico	12
2.1. Páramo	12
2.1.1 Características generales	12
2.1.2 Cobertura vegetal	13
2.1.3 Importancia de la cobertura vegetal	14
2.1.4 Suelo de páramo.....	14
2.1.5 Propiedades hidrofísicas del suelo de páramo	15
2.1.6 Topografía / Geología.....	16
2.2. Contenido de agua en el suelo	17
2.3. Cobertura vegetal y la relación con el contenido de agua en el suelo	17
2.4. Técnica de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).....	18
2.5. Modelo HYDRUS 1D.....	19
2.6. Balance hídrico del suelo.....	20
2.6.1 Variables que intervienen en el balance hídrico del suelo.....	20
Variables meteorológicas	20
Precipitación	20
Humedad relativa	21
Temperatura del aire	21
Radiación solar.....	21
Viento y velocidad del viento.....	22
Evapotranspiración.....	22
Evapotranspiración Potencial.....	23
Infiltración	23
Drenaje profundo.....	24

Escorrentía superficial	25
2.6.2 Relación entre variables del balance hídrico	25
Humedad del suelo y temperatura del suelo	25
Precipitación y radiación solar	26
Evapotranspiración real (actual) y tipo de vegetación	26
Precipitación y drenaje del suelo	27
2.6.3 Tratamiento de variables	27
Datos faltantes.....	27
Patrones de datos faltantes.....	28
Imputación de datos faltantes	29
Imputación múltiple.....	29
Validación de la imputación de los datos faltantes y análisis exploratorio de datos (EDA)	31
2.6.4 Criterios de bondad de ajuste para modelos hidrológicos.....	32
Capítulo 3. Metodología	33
3.1. Área de estudio	33
3.2. Materiales	34
3.3. Puntos de muestro	35
3.4. Muestreo de suelo en campo.....	36
3.5. Ejecución del ensayo en laboratorio	37
3.6. Análisis y evaluación de los datos recopilados	39
3.6.1 Datos de los sensores TDR.....	39
3.6.2 Datos Meteorológicos	40
3.6.3 Parámetros Hidráulicos	41
3.6.4 Procesamiento de datos	43
3.6.5 Evaluación de la calidad de datos	43
3.6.6 Correlación entre variables meteorológicas e imputación de datos faltantes ..	43
3.6.7 Análisis Exploratorio de Datos (EDA).....	44
Capítulo 4. Modelación en HYDRUS 1D	45
4.1. Calibración y modelación en Hydrus 1D	45
4.2. Modelo Hydrus 1D.....	48
4.3. Ecuaciones rectoras y configuración del modelo	49
Capítulo 5. Resultados y discusión.....	52
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	60
Capítulo 7. Referencias	62
Anexos	72

Índice de figuras

FIGURA 1. MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO DENTRO DEL ECUADOR CONTINENTAL-----	34
FIGURA 2. MAPA DEL ÁREA DE ESTUDIO-----	34
FIGURA 3. MUESTRAS DE SUELO -----	37
FIGURA 4. ESQUEMA PARA LA SATURACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO -----	38
FIGURA 5. ESQUEMA OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE HUMEDAD DEL SUELO----	38
FIGURA 6. ESQUEMA IMPLEMETACIÓN DE SENSORES Y EQUIPO-----	39
FIGURA 7. ESTACIONES DE HUMEDAD DEL SUELO-----	40
FIGURA 8. MAPA DE LAS ESTACIONES DE DATOS METEOROLÓGICOS -----	41
FIGURA 9. CURVAS DE CALIBRACIÓN -----	47
FIGURA 10 CURVAS DE CALIBRACIÓN DE TDR PREDETERMINADAS Y AJUSTADAS	48
FIGURA 11. CONDICIONES DE FRONTERA DEL MODELO-----	50
FIGURA 12. DATOS DE CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA OBSERVADOS Y SIMULADOS PARA LAS ESTACIONES FR3-UP, PR5-MD Y CU4-LW.-----	54
FIGURA 13. BALANCE DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO A ESCALA DIARIA.	57

Índice de tablas

TABLA 1. FUENTE DE LAS BASES DE DATOS PARA EL ESTUDIO	35
TABLA 2. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO.....	36
TABLA 3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SUELO	42
TABLA 4. ESTADÍSTICOS DE LA BASE DE DATOS DE LOS PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL SUELO.....	42
TABLA 5. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS CALCULADOS PARA LAS DIFERENTES VARIABLES.....	44
TABLA 6. PERFILES ÓPTIMOS PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO	45
TABLA 7. ECUACIONES DE CALIBRACIÓN DE LOS REFLECTÓMETROS.....	46
TABLA 8. CRITERIOS DE LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO, RANGOS Y CLASIFICACIÓN.....	51
TABLA 9. PARÁMETROS HIDRÁULICOS AJUSTADOS EN EL MODELO.....	52
TABLA 10. CRITERIOS DE BONDAD DE AJUSTE DEL MODELO.....	53
TABLA 11. ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LA HUMEDAD (01/06/2022 - 31/05/2023) OBSERVADA Y SIMULADA POR HORIZONTE DEL SUELO.....	55
TABLA 12. BALANCE HÍDRICO MEDIO ANUAL (JUNIO 2022 - MAYO 2023) Y PORCENTAJE CORRESPONDIENTE DE ENTRADA DE LLUVIA	57

Agradecimientos

Queremos agradecer al Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca y al proyecto ParamoSUS por brindarnos la oportunidad de realizar esta investigación. Además, de haber facilitado el acceso a la información y a las herramientas necesarias para la realización del presente trabajo de titulación agradeciendo de manera especial a los Ingenieros; Veerle Vanacker. PhD, Sebastián Páez PhD y Armando Molina. PhD.

De igual manera, queremos agradecer a nuestro director de tesis Ing. Marco Ramírez por la apertura y confianza en nosotras. Al Ing. Oscar Morales un sincero agradecimiento quien ha dedicado su conocimiento y experiencia al desarrollo de esta investigación y sobre todo por la paciencia brindada durante la ejecución de este proyecto.

Agradecemos también a Diego Zuñiga, compañero de salidas de campo, largos viajes y caminatas. Y a todos demás colaboradores que han hecho posible la ejecución y culminación de este trabajo. A todos simplemente gracias.

Katherine y Fernanda

Agradecimientos

Agradezco la oportunidad de haber estudiado en la Universidad de Cuenca, donde he podido alcanzar mi desarrollo tanto intelectual como psicosocial. De manera especial quiero agradecer a todas aquellas personas que han sido parte importante de esta etapa de mi vida, a mi familia, a mis amigas: Carolina, Daniela, Gabriela, María José, Mery y Mónica que han sido un gran apoyo y compañía, haciendo que esta experiencia sea inolvidable. A mi querida hermana Gissella, quien junto con Nezuko han sido fuente de alegría en momentos difíciles.

Dedicatoria

Quiero dedicar este proyecto a mi familia, en especial a mis padres: Segundo y Janeth, quienes son el pilar fundamental en mi vida, me siento afortunada y agradecida por todo su apoyo, su paciencia y cariño. A mis hermanas Elisabeth y Gissella.

Katherine

Quiero agradecer primero a Dios por brindarme salud y sabiduría a lo largo de este camino. Estar conmigo por sobre todas las cosas. Agradecer a mis padres Jaime y Esther por su infinito amor y conocimiento, gracias por tenerme paciencia y enseñarme que cada día se puede ser mejor. A mi familia y un profundo agradecimiento a Kathe, amiga y compañera de tesis que con su apoyo y conocimiento no hubiera sido posible este suceso.

Mis demás amigas: Majo, Moni, Caro, Dani, Gabi, que han sido parte fundamental en esta etapa, que con sus risas y alegrías compartieron grandes recuerdos. Y de todo corazón agradezco a todas las personas que me brindaron su apoyo y que compartieron conmigo sus risas y palabras de aliento.

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mis papás, que con esfuerzo y cariño me brindan siempre todo su apoyo para alcanzar mis metas y cumplir todos mis objetivos. A mi familia, a mi hermana Karina que ha sido y es parte fundamental de mi vida y a esas personas especiales que siempre tendré un lugarcito en mi corazón.

Fernanda

Capítulo 1. Introducción

En los últimos años los ecosistemas de páramo han tomado gran relevancia debido a que contribuyen a la seguridad hídrica. Su aporte a la calidad y cantidad de agua disponible para el entorno natural, el consumo humano y para el riego en las zonas andinas han generado numerosas investigaciones de estos ecosistemas; así también, como su dinámica, funcionamiento y rol ecológico (Hofstede, et al., 2003). Los componentes que comprenden los ecosistemas de páramo corresponden a recursos naturales fundamentales tanto para la regulación hídrica, como para el desarrollo sostenible de las comunidades que se asientan en sus inmediaciones (Célleri & Feyen, 2009).

Los suelos de páramo poseen características específicas tales como: baja densidad aparente, bajo pH, gran capacidad de regulación hídrica, retención de humedad alta, susceptibilidad al secamiento como proceso irreversible cuando haya existido actividades antropogénicas severas y contenido elevado de carbono, lo que los hacen suelos negros y húmedos (Morocho & Chuncho, 2019).

Factores tales como la altitud, precipitación, cobertura vegetal y geología local pueden marcar diferencias significativas entre una zona de páramo y otra (Buytaert, et al., 2007). El estudio de variables tales como las variables meteorológicas, humedad del suelo y la geoquímica de las cuencas se emplean para comprender la complejidad de los ecosistemas de páramo y su influencia en la retención de agua (Blume, et al., 2009).

El suelo de páramo tiene una capacidad de retención de agua excepcional. La conservación de estos ecosistemas contribuye a mantener tal capacidad de retención en el tiempo. Sin embargo, las actividades antropogénicas han degradado los suelos de dichos ecosistemas (Ochoa-Tocachi, 2016). Por otro lado, estudios afirman que, aunque la retención de agua sigue siendo alta en los ecosistemas de páramo, puede presentar una disminución considerable, debido al gran impacto del cambio de uso de suelo, derivando a problemas en la gestión del recurso hídrico (Buytaert, et al., 2002).

En el estudio de la dinámica hidrológica de una cuenca, un análisis detallado de la variación espacio-temporal de la humedad del suelo es importante para el estudio, comprensión y manejo de los procesos biofísicos (Loaiza & Pauwels, 2011). A lo largo de los años se han elaborado numerosos métodos de campo y laboratorio para determinar las funciones hidráulicas de los suelos (Klute, 1986); sin embargo, la mayoría presenta limitaciones como altos costos y/o de difícil implementación (Van Genuchten et al., 1991). En la actualidad, los modelos hidrológicos se han visto como una alternativa; siendo uno de los métodos más rápidos y confiables para la determinación de las propiedades del suelo.

Hermosilla, T. (2018), simuló los efectos del cambio climático en la disponibilidad y transporte de agua para un suelo Andisol usando el software Hydrus 1D. El estudio se llevó a cabo en una estación experimental agropecuaria Austral en la cordillera de los Andes, Chile; para la toma de datos de humedad y potencial hídrico se utilizaron lisímetros a tres profundidades diferentes de suelo. Se correlacionaron los resultados simulados de contenido volumétrico de agua en el programa y los datos observados en el lisímetro a diferentes profundidades (10, 20 y 60 cm); observándose que, el modelo permite además la reconstrucción de datos cuando estos no son registrados por el lisímetro teniendo un coeficiente de correlación que varía entre 0.94 a 0.96 a profundidad, demostrando así, la capacidad de este software de modelar sistemas reales.

1.1. Identificación del problema y justificación

Los ecosistemas de alta montaña específicamente el páramo, son de considerable importancia en la actualidad en la región debido a los diversos servicios ecosistémicos que prestan, tanto para el bienestar humano como para las diferentes especies que en ellos se desarrollan (Patiño, et al., 2021). El páramo posee una capacidad considerable de regulación de caudales bases, lo que prevé un continuo abastecimiento de agua para consumo humano a las comunidades aledañas a las cuencas (Torres & Proaño, 2018). A lo largo del tiempo, la acción antropogénica ha degradado de forma significativa estos ecosistemas contribuyendo a impactos ambientales negativos que ponen en riesgo sus funciones, así como su conservación y sostenibilidad; lo que ha ocasionado la pérdida de servicios como: regulación climática e hídrica (Amay, 2018).

El páramo es un ecosistema frágil y evidentemente vulnerable a las actividades antrópicas que generan alteraciones a su estado natural provocando impactos en las coberturas vegetales nativas como: los bosques de *Polylepsis*, almohadillas y pajonal. Además, las actividades como la ganadería, agricultura, deforestación y expansión urbana cambian el uso de los suelos de páramo agravando así, la situación crítica en la que se encuentran (Pazmiño, 2020). Ahondando en lo previamente mencionado, de manera específica, el área de estudio definido presenta un significativo impacto debido a las acciones antrópicas mencionadas anteriormente. Motivo por el cual, la Empresa Pública Municipal de Telefonía, Agua Potable y Alcantarillado – ETAPA EP – en el marco de la preservación y recuperación de fuentes de agua, ha realizado la adquisición de extensas áreas de páramo, en este caso la zona de Cuevas (Asanza & Barahona, 2015). En este ámbito, el rol del suelo y la cobertura vegetal de estos ecosistemas son fundamentales en la capacidad de mantenimiento de su funcionalidad respecto al balance hídrico para una óptima regulación hídrica. El conocimiento de las relaciones de los diversos factores ambientales de los ecosistemas de páramo es de gran

relevancia científica y social para la toma de decisiones para una adecuada gestión y conservación.

En Ecuador actualmente, aunque ya se han realizado diversas investigaciones referentes a los ecosistemas de páramo, existe un vacío de información respecto a estudios enfocados a la regulación hídrica, contenido de agua en los suelos y balance hídrico. Tomando en cuenta esta información, es necesario establecer una línea base en la región del balance hídrico de los suelos de páramo con diferentes coberturas vegetales nativas, con moderado impacto antropogénico y a través de metodologías poco invasoras que permitan su conservación y no generan alteraciones adicionales, como son las sondas TDR (Caicedo, et al, 2021).

La información que se generó en este estudio permitirá la toma de decisiones en lo referente a la conservación de áreas de páramo y al correcto manejo no solo del área de estudio, sino también de las cuencas aledañas logrando así, asegurar el abastecimiento del recurso hídrico a un gran porcentaje de la población perteneciente al cantón Cuenca.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar el balance hídrico del suelo de páramo bajo tres diferentes coberturas vegetales: bosque (*Polylepis*), almohadillas y pajonal en una cuenca altoandina al sur del Ecuador.

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir un modelo de balance hídrico del suelo de páramo mediante el software HYDRUS 1D bajo diferentes tipos de cobertura vegetal.
- Evaluar las dinámicas de humedad del suelo bajo diferentes coberturas vegetales durante un año hidrológico.
- Comparar los valores simulados de contenido de agua en el suelo con los obtenidos a través del monitoreo de humedad del suelo mediante sondas TDR.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Páramo

2.1.1 Características generales

El páramo es un ecosistema tropical húmedo que se encuentra mayormente por encima de la línea de árboles. Se caracteriza por una vegetación dominada por hierbas y arbustos, con

clima frío en áreas situadas a más de 3200 metros sobre el nivel del mar. Además de su valor como ecosistema de alta montaña, el páramo también tiene importancia como zona de producción y trabajo, y está estrechamente ligado a una historia, cultura y política ricas en significado (Castañeda & Montes, 2017).

En Sudamérica, el páramo abarca aproximadamente 46000 km², distribuidos principalmente en Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú. Este ecosistema forma parte integral de la biodiversidad de la región, destacándose por su singularidad y endemismo. La diversidad biológica en los páramos se caracteriza por su alta especialización y adaptación genética, así como por la presencia de paisajes fragmentados y aislados (Serrano & Galárraga, 2015).

Existen dos clasificaciones principales en relación con el páramo. Por un lado, se encuentra el páramo natural, que no ha experimentado cambios significativos en el uso del suelo debido a la intervención humana, está cubierto principalmente por pastizales con bosques dispersos y algunos humedales. Por otro lado, tenemos el páramo intervenido, que incluye áreas donde se han establecido poblaciones humanas con organizaciones culturales que contribuyen a la riqueza patrimonial del planeta. Este tipo de páramo también se considera un espacio social que genera beneficios económicos (Pinos et al., 2021).

En Ecuador, los páramos se encuentran a una altitud promedio de 3 300 metros sobre el nivel del mar y ocupan alrededor del 7% del territorio del país. Estos ecosistemas desempeñan un papel crucial al proporcionar agua a los valles interandinos y abastecer a las poblaciones de las ciudades cercanas. Estas características se deben a factores como la baja evaporación de agua, alta humedad, acumulación de materia orgánica y la forma de ciertas plantas presentes en los páramos. Además, los páramos tienen una importancia significativa como depósitos de carbono, ya que almacenan una cantidad considerable de carbono, incluso más que los bosques tropicales (Chuncho & Chuncho, 2019).

2.1.2 Cobertura vegetal

La vegetación de los páramos se puede dividir en tres zonas (Podwojewski & Poulénard, 2004):

- El superpáramo, que se encuentra a altitudes elevadas entre los 4200 y 4800 m s.n.m., representa un ambiente periglacial con una cobertura vegetal escasa. Las especies que se adaptan a este entorno presentan características xeromórficas en sus hojas, como reducción de superficie, hojas plegadas y densamente peludas de color blanquecino. Estas adaptaciones les permiten resistir las heladas nocturnas y la alta radiación solar.

- El páramo propiamente dicho (3500 a 4200 m s.n.m.) se caracteriza por una vegetación abierta dominada por gramíneas en forma de macollas (tussocks), principalmente de la familia *Poaceae*, como *Calamagrostis sp.* y *Festuca sp.* Además, se encuentran pequeños bambúes enanos. Los arbustos y las formaciones en forma de cojín (especialmente en áreas pantanosas) también son parte de la vegetación. Las plantas más destacadas son las rosetas gigantes, como las especies *Espeletia sp.* y *Puya sp.* También se pueden encontrar parches de bosque de *Polylepis sp.* que se extienden hasta los 4200 m de altitud.
- El subpáramo (3200 a 3500 m s.n.m.) es una zona de transición entre el páramo y el bosque andino. Aquí, la cobertura de árboles pequeños y arbustos es mayor que en el páramo propiamente dicho. Esta zona se extiende a altitudes más bajas debido a la deforestación realizada por actividades humanas, como la creación de pastizales, áreas de cultivo y en algunos casos para zonas de ganado.

2.1.3 Importancia de la cobertura vegetal

La cobertura vegetal en el páramo desempeña un papel vital en la preservación y equilibrio de este ecosistema de montaña. Las plantas juegan un papel fundamental al proteger el suelo de la erosión, ya que sus raíces evitan el desprendimiento y retienen la humedad. Además, la vegetación participa en el ciclo hidrológico al capturar la humedad atmosférica y contribuir a la formación de nubes y neblinas, así como al infiltrar el agua en el suelo. La diversidad de especies vegetales del páramo proporciona hábitats y recursos alimenticios para numerosas especies animales, y la conservación de la cobertura vegetal es esencial para mantener la biodiversidad. En adición, las plantas presentes en los páramos tienen la capacidad de acumular grandes cantidades de carbono, lo que desempeña un papel importante en la mitigación del cambio climático. Por otro lado, la vegetación actúa como reguladora del clima local y regional al proporcionar sombra, reducir la temperatura del suelo y regular la precipitación (Llambí et al., 2012).

2.1.4 Suelo de páramo

Los suelos de los páramos desempeñan un papel clave en la provisión de agua al regular el flujo de los arroyos y fomentar al aumento del caudal base. Esta capacidad de un ecosistema terrestre para proporcionar un amortiguador estacional de flujo de agua, es decir, almacenar agua durante las temporadas húmedas y mantener el flujo de agua durante las temporadas secas, a veces se denomina amortiguación del flujo de agua o regulación hidrológica. La cobertura del suelo y las prácticas de uso de la tierra controlan la dinámica de este proceso.

Se ha descrito que los suelos de los páramos tienen una estructura predominantemente abierta, desmenuzable y granular, y un alto contenido de materia orgánica que resulta en una alta porosidad. Los suelos altamente porosos proporcionan las condiciones para un alto almacenamiento de agua y capacidades de amortiguación que sostienen y regulan los flujos de agua, contribuyendo así a la amortiguación del flujo de agua en los arroyos (Patiño et al., 2021).

Los suelos de los páramos, en su mayoría de origen volcánico, se caracterizan por ser húmedos, ácidos y con un pH que varía entre 3.9 y 5.4; estos suelos presentan una alta concentración de humus bien descompuesto, con un grado de acidez elevado, presencia de moho y un color oscuro o negro. Su espesor varía desde pocos centímetros hasta aproximadamente un metro, y la descomposición de la materia orgánica ocurre de manera lenta debido a las bajas temperaturas y la alta humedad del entorno. Estos suelos son altamente porosos y tienen una conductividad hidráulica elevada, lo que resulta en una alta infiltración de agua. Es importante destacar que la retención de agua en los primeros 30 cm de profundidad es particularmente significativa, ocupando alrededor del 61.7% del volumen total del suelo (Díaz et al., 2005).

El páramo está compuesto principalmente por suelos andosoles, que son suelos volcánicos jóvenes y ricos en materia orgánica. Estos suelos se forman a partir de la descomposición de materiales volcánicos y la acumulación de materia orgánica a lo largo del tiempo. La presencia de suelos andosoles contribuye a las propiedades hidrofísicas únicas del páramo: alta capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica (Llambí et al., 2012).

2.1.5 Propiedades hidrofísicas del suelo de páramo

El suelo de páramo exhibe una variedad de propiedades hidrofísicas distintivas según los datos proporcionados. En el caso del páramo seco, se observa una densidad aparente relativamente alta, una menor concentración de materia orgánica y una conductividad hidráulica saturada moderada. Por otro lado, el páramo semi-húmedo muestra una densidad aparente más baja, un contenido de materia orgánica más elevado y una conductividad hidráulica saturada más reducida. En contraste, el suelo Histosol presenta una densidad aparente muy baja, abundante presencia de materia orgánica y conductividad hidráulica saturada extremadamente baja. Estas características indican que el suelo de páramo posee una porosidad variable y una notable capacidad de retención de agua, influida por la densidad, contenido de materia orgánica y la textura del suelo. En conjunto, las propiedades hidrofísicas reflejan las condiciones particulares de los suelos de páramo, lo cual es relevante

para comprender su comportamiento hídrico y su función ecológica en los ecosistemas de montaña (Llambí et al., 2012).

Los suelos de páramo son reconocidos por su destacada capacidad de retención de agua. Esto se debe a su baja densidad aparente y a su estructura abierta y porosa, que les permite almacenar grandes cantidades de agua. Incluso bajo presiones de -1500 kPa, los suelos de páramo pueden retener contenido de agua de más de 0.3 g/cm^3 , lo cual es significativamente mayor que en otros tipos de suelos. Esta capacidad de retención de agua es esencial para mantener una disponibilidad constante de agua en los ecosistemas de páramo. Además de su alta capacidad de retención, los suelos de páramo exhiben una alta conductividad hidráulica, lo que significa que permiten que el agua fluya a través de ellos con relativa facilidad. Los valores informados de capacidad de infiltración varían entre 10 y 60 mm/h, lo que indica buena capacidad de drenaje y rápida absorción de agua en el suelo. Esta característica es importante para prevenir la acumulación excesiva de agua y facilitar su movimiento hacia capas más profundas del suelo (Buytaert et al., 2014).

La presencia predominante de microporos en el suelo de páramo contribuye a su capacidad de retención de agua. Estos microporos son el resultado de la presencia de minerales amorfos de arcilla, como alofana e imogolita, así como de la acumulación de materia orgánica. Los microporos actúan como pequeños reservorios de agua inactivos en el suelo, que no contribuyen significativamente al ciclo hidrológico del ecosistema de páramo. Sin embargo, entre el punto de saturación y -1500 kPa, los suelos de páramo tienen una capacidad de almacenamiento de agua regularmente superior a $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$, lo que indica la existencia de un reservorio significativo de agua activa. Es importante tener en cuenta que los suelos de páramo son sensibles a la degradación estructural y a la compactación, incluso bajo presiones ligeras. Su estructura abierta y ligera, junto con su baja densidad aparente, los hace susceptibles a sufrir daños cuando se realizan intervenciones como la toma de muestras con anillos de Kopecky. Estos suelos requieren un manejo cuidadoso y medidas de conservación para preservar su estructura y mantener su capacidad hidrofísica óptima (Buytaert et al., 2014).

2.1.6 Topografía / Geología

El páramo es un ecosistema de gran altitud que se ubica en las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur y Central. Su topografía se caracteriza por presentar terrenos montañosos, con elevaciones que oscilan entre los 3000 y 4500 metros sobre el nivel del mar. Estas altitudes generan condiciones climáticas particulares, con temperaturas frías y alta humedad relativa. El paisaje del páramo se distingue por la presencia de crestas,

valles, laderas y mesetas. Las crestas son las zonas más altas y estrechas del terreno, mientras que los valles corresponden a áreas más bajas y estrechas que se encuentran entre las crestas. Por su parte, las laderas con pendientes pronunciadas que conectan las crestas con los valles, y las mesetas son áreas planas o ligeramente inclinadas que se sitúan entre las crestas (Buytaert et al., 2014).

En cuanto a la geología, el páramo se encuentra en regiones montañosas y está asociado con la presencia de volcanes y procesos geológicos relacionados. Muchas de las formaciones geológicas presentes en el páramo son el resultado de actividades volcánicas pasadas, como la acumulación de cenizas volcánicas y la presencia de rocas ígneas.

2.2. Contenido de agua en el suelo

El contenido de agua presente en los espacios porosos del suelo desempeña un papel crucial en varios procesos y propiedades del suelo. Su variabilidad se debe a factores como el clima, estructura del suelo, vegetación y prácticas de gestión. Ambientalmente, conocer el contenido de agua en el suelo es esencial para determinar la capacidad de producción sostenida, almacenamiento y la regulación del agua que posee un ecosistema en especial. El equilibrio de agua en el suelo es fundamental para el sano crecimiento y desarrollo de las plantas. En el suelo de páramo el contenido de agua está determinado por factores meteorológicos y la capacidad de retención de agua, debido a que existe una considerable acumulación de materia orgánica y a la morfología de la cobertura vegetal característica de este ecosistema. Este tipo de suelos presentan densidad aparente baja y ciertas características estructurales, que favorecen a una conductividad hidráulica y capacidad de retención del agua considerablemente alta (-1500 kPa) (Chuncho & Chuncho, 2019).

2.3. Cobertura vegetal y la relación con el contenido de agua en el suelo

La vegetación desempeña un papel fundamental en la relación entre las plantas y el contenido de agua en el suelo. La presencia y la densidad de la vegetación tienen un impacto significativo en la cantidad y distribución del agua en el suelo. La vegetación afecta la evaporación y la transpiración, procesos mediante los cuales el agua se pierde desde el suelo hacia la atmósfera, también actúa como una barrera natural que intercepta la lluvia antes de que llegue al suelo, lo que ralentiza la entrada de agua y favorece una mejor infiltración y menos escorrentía superficial. Además, la vegetación proporciona sombra y protección al suelo, lo que reduce la evaporación directa y promueve una mayor retención de agua en el suelo (Bittelli, 2011).

La presencia de raíces y la materia orgánica asociada a la vegetación mejora la estructura del suelo; favoreciendo a una mejor infiltración y retención de agua. Se evita también, la erosión y el lavado excesivo de nutrientes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la relación entre la cobertura vegetal y el contenido de agua en el suelo está influenciada por el tipo de vegetación, su densidad y distribución espacial, así como por las características del suelo y las condiciones climáticas (Ni et al., 2019).

La interacción de factores tales como el uso y cobertura del suelo, topografía, tipo de suelo, elevación, tamaño de la cuenca, condicionan la disponibilidad de agua en el suelo. Una cobertura vegetal nativa produce mayores servicios ecosistémicos, las interacciones antes mencionadas en este tipo cobertura permiten que se retenga mayor cantidad de agua en el año a diferencia de áreas donde se ha producido un cambio en el uso de suelo, lo que es más evidente, especialmente en la época seca cuando la demanda de este recurso es más alta (Díaz, 2018).

2.4. Técnica de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

Es una técnica poco invasiva y de alta precisión que estima el contenido volumétrico de humedad del suelo. Su principio de funcionamiento se basa en la relación entre el contenido de agua en el suelo y sus propiedades dieléctricas, fundamentado en la diferencia entre la constante dieléctrica del suelo seco (≈ 2.9) y la del agua pura (≈ 81) (Caicedo, et al, 2021).

Utiliza la medición del tiempo de propagación de un pulso electromagnético en un material para determinar la cantidad de agua presente, la cual se sustenta en la propiedad de que la permitividad aparente de un material poroso, la cual está relacionada con el contenido de agua, afecta el tiempo de propagación de la señal electromagnética y utiliza un dispositivo de medición que emite un pulso electromagnético corto y registra el tiempo que tarda en reflejarse desde el extremo del cable de medición. El tiempo de propagación está directamente vinculado con la cantidad de agua presente en el material, por lo que, mediante el uso de características de calibración, es posible calcular el contenido de agua a partir de la permitividad aparente medida (Suchora et al., 2022).

La precisión de la medición de TDR depende de varios elementos tales como el diseño de la sonda y la longitud de las varillas de medición. Las varillas de la sonda se insertan en el material y actúan como guías de ondas para la señal electromagnética. El diseño de la sonda y el espaciado entre las varillas influyen en la forma de la señal reflejada y, por lo tanto, en la precisión de la medición. Es importante tener en cuenta que el TDR es una técnica sensible a la presencia de otros materiales y componentes en el suelo, como minerales y materia

orgánica. Además, la temperatura y la salinidad del suelo pueden afectar la precisión de la medición; por lo que, es necesario realizar calibraciones y considerar las condiciones específicas del suelo y así obtener resultados más precisos (Suchora et al., 2022).

2.5. Modelo HYDRUS 1D

HYDRUS 1D (Šimůnek et al., 2005) es un software de dominio público que simula el movimiento de agua, calor y solutos en una dimensión en un medio parcialmente saturado. El software usa elementos finitos para resolver la ecuación de Richards para flujo de agua saturado y no saturado y una ecuación de advección-dispersión para simular el transporte de solutos. La región de flujo (perfil de suelo) puede ser discretizada en varias capas u horizontes. Las propiedades hidráulicas del suelo, o relaciones constitutivas, son descritas usando alguna de estas opciones: Brooks y Corey (1964), Van Genuchten (1980), entre otras. El crecimiento de raíces es simulado por medio de la función de crecimiento logístico, la función de estrés hídrico y estrés salino. El software utiliza una interfaz gráfica para la gestión de los datos de entrada, la edición y discretización de nodos, la asignación de parámetros, la simulación y la visualización de resultados.

La modelización de la dinámica del agua y las sales en la zona vadosa permite comprender los procesos de transporte y gestionar los riesgos de contaminación mediante el estudio de escenarios. En los últimos años se han creado diversos modelos con el fin de lograr ese objetivo, siendo uno de los más utilizados el modelo Hydrus-1D. Este modelo se fundamenta en principios físicos que describen el flujo de agua y el transporte de sustancias, utilizando la ecuación de Richards para modelar el movimiento del agua y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos; no obstante, a pesar de su utilidad, uno de los principales desafíos de estos modelos es el gran número de parámetros de entrada que requieren y la falta de validación en condiciones de campo (Kanzari et al., 2018).

El modelo Hydrus-1D tiene un diseño modular que consta de tres secciones principales: una sección de preprocesamiento para configurar los parámetros básicos, una sección de ejecución para llevar a cabo la modelización iterativa del transporte del agua en el suelo, y una sección de post-procesamiento que proporciona los resultados y la información del proceso. El modelo se configura de forma secuencial, ajustando progresivamente los parámetros y opciones según las características específicas del estudio. En el núcleo de este modelo se encuentra la configuración de los parámetros hidrodinámicos del suelo dentro del módulo de flujo de agua en la sección de preprocesamiento (Yu et al., 2022).

2.6. Balance hídrico del suelo

El equilibrio hídrico en el suelo es un concepto fundamental para comprender los procesos de transporte y almacenamiento de agua en este medio. El suelo está compuesto por partículas sólidas y una red de poros que permiten el movimiento y almacenamiento del agua, por lo que, el estado del agua en el suelo puede variar desde condiciones húmedas hasta secas, indicando el grado de saturación de los espacios porosos. Este estado se puede cuantificar mediante el contenido de agua en el suelo (volumen de agua por unidad de volumen de suelo) o el potencial de agua en el suelo (energía del agua en relación a un nivel de referencia), estas dos medidas están relacionadas a través de una función específica de retención de agua que caracteriza las propiedades hidráulicas del suelo, junto con la relación entre el potencial matricial y la conductividad hidráulica (Nolz, 2016).

Bajo condiciones naturales, los flujos de agua en el suelo, como la evapotranspiración (ET), la precipitación (P), la percolación profunda (DP) y la ascensión capilar (CR), contribuyen al cambio en el contenido de agua (ΔW).

2.6.1 Variables que intervienen en el balance hídrico del suelo

Variables meteorológicas

El balance hídrico del suelo es esencial para comprender cómo se distribuye y está disponible el agua en los ecosistemas terrestres. Para analizar y modelar este balance, es necesario considerar diversas variables meteorológicas que influyen en el intercambio de agua entre la atmósfera y el suelo, tales como la precipitación, la precipitación real, humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar y velocidad del viento. Estos factores desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico y en la regulación de la cantidad y distribución del agua en el suelo, por lo que, comprender cómo estas variables interactúan y afectan el balance hídrico del suelo es fundamental para una gestión sostenible de los recursos hídricos y el desarrollo de estrategias de conservación eficientes (Cardoso et al., 2022).

Precipitación

La precipitación, en sus diferentes formas como lluvia, granizo o nieve, ocurre cuando la humedad en la atmósfera se condensa y cae al suelo por efecto de la gravedad. Es la forma en la que el agua atmosférica ingresa al suelo (Nolz, 2016). Es una variable fundamental en el balance hídrico del suelo, siendo la principal entrada, aportando el agua necesaria para mantener la humedad y garantizar la disponibilidad para las plantas y organismos. Su variabilidad espacial y temporal afecta la humedad del suelo, el crecimiento de las plantas y

la recarga de acuíferos. La falta de precipitación adecuada puede causar sequías y disminución de agua disponible, con impactos negativos en los ecosistemas y actividades humanas dependientes del agua. Comprender la variabilidad de la precipitación es esencial para una gestión adecuada de recursos hídricos y la planificación sostenible (Wang et al., 2018). En las áreas de páramo del Ecuador, la precipitación dentro de un año hidrológico presenta una variación de entre 800 y 2000 mm y, en general en este territorio, se observa un patrón con dos estaciones lluviosas: febrero a mayo y octubre a diciembre. (Chuncho & Chuncho, 2019).

Humedad relativa

La humedad relativa es una medida que indica la cantidad de humedad presente en el aire en comparación con su capacidad máxima de retener humedad a una determinada temperatura. Esta variable juega un papel importante en el balance hídrico del suelo al influir en la tasa de evaporación. Cuando la humedad relativa es alta, la evaporación del agua del suelo se ve dificultada, mientras que, en condiciones de baja humedad relativa, la evaporación es más rápida. La evaporación del agua del suelo contribuye a la pérdida de humedad y puede afectar la disponibilidad de agua para las plantas y otros organismos, además, la humedad relativa también puede tener efectos indirectos en procesos como la transpiración de las plantas, formación de nubes y precipitación. Por lo tanto, comprender la variabilidad de la humedad relativa y su relación con otros factores climáticos es esencial para evaluar la disponibilidad de agua en el suelo (Boulard et al., 2016). En la zona de páramo en el sur del Ecuador la humedad relativa presenta valores superiores al 80% (Cáceres, 2020).

Temperatura del aire

Esta variable tiene un impacto directo en la tasa de evaporación del agua presente en el suelo. A medida que la temperatura aumenta, las moléculas de agua ganan energía cinética, lo que acelera el proceso de evaporación. En condiciones de altas temperaturas, el agua en el suelo se evapora más rápidamente, lo que puede resultar en una disminución de la humedad del suelo y una menor disponibilidad de agua para las plantas y otros organismos. Además de la evaporación, la temperatura del aire también influye en la transpiración de las plantas. Altas temperaturas estimulan una mayor tasa de transpiración, lo que aumenta la demanda de agua del suelo. Esto puede agravar la sequedad del suelo y tener consecuencias para la productividad agrícola (Boulard et al., (2016).

Radiación solar

La radiación provee la energía necesaria para la fotosíntesis en las plantas y para la transpiración a través de los estomas de las hojas. A medida que aumenta la radiación solar, las plantas tienden a transpirar más agua, ya que la energía solar estimula la apertura de los estomas y facilita la evaporación del agua. En consecuencia, la radiación solar tiene un impacto directo en la cantidad de agua que se pierde del suelo, lo que afecta su disponibilidad para las plantas y otros procesos hidrológicos (Boulard et al., 2016).

Viento y velocidad del viento

La presencia de viento y velocidad del viento son factores determinantes en el balance hídrico del suelo, ya que influyen en las tasas de evaporación. El viento fomenta la evaporación al incrementar la transferencia de vapor de agua desde la superficie del suelo hacia la atmósfera. Cuando el viento sopla sobre la superficie del suelo, arrastra las moléculas de vapor de agua, reduciendo la resistencia al transporte y acelerando la evaporación. En consecuencia, mayores velocidades del viento se asocian con tasas de evaporación más rápidas, pudiendo afectar la humedad del suelo y el balance hídrico en general (Boulard et al., 2016).

Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de la evaporación y la transpiración, donde la evaporación se refiere a la vaporización del agua desde la superficie del suelo o cuerpos de agua, y la transpiración está relacionada con la absorción de agua por las plantas y su liberación a través de los estomas de las hojas. La evapotranspiración depende de factores atmosféricos como la radiación solar, la temperatura, la humedad del aire, la velocidad del viento y las características de las plantas. Es un proceso continuo siempre que haya agua disponible en el suelo (Nolz, 2016).

Es un proceso que tiene un papel fundamental en el balance hídrico del suelo, ya que representa una parte significativa de la precipitación en áreas con condiciones semiáridas y áridas e influye en la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos. Estimar la evapotranspiración es crucial para comprender la disponibilidad de agua y mantener un equilibrio hídrico adecuado. Para ello, se utilizan modelos como el modelo GG y el modelo Makkink, modelo Penman-Monteith Fao, entre otros métodos de estimación. Estos modelos permiten predecir la evapotranspiración real y su impacto en diversos aspectos, como el balance hídrico del suelo, la recarga de acuíferos y el contenido de humedad en el suelo (Xu & Chen, 2005). Cualquier variación en la evapotranspiración puede tener impactos

significativos en el balance hídrico-energético y en el rendimiento de agua en diferentes regiones (Montaldo & Oren, 2018).

Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial (ET_o) es un importante parámetro utilizado para estimar el límite superior o el potencial teórico de la evapotranspiración sin limitaciones de suministro de agua, advección o calentamiento. La evapotranspiración potencial se define como el volumen de evaporación y transpiración que ocurriría con una cantidad suficiente de agua sin el efecto de la advección y el calentamiento, mientras que la evaporación potencial se mide en una estación meteorológica utilizando un recipiente con suficiente agua y en condiciones abiertas sin transpiración. Aunque la evaporación potencial y la evapotranspiración potencial tienen diferentes significados físicos, muchos estudios han utilizado la evaporación potencial del recipiente para representar la evapotranspiración potencial (Suwarman et al., 2021).

Al medir la evaporación potencial o utilizar la evaporación del recipiente como una aproximación, se puede estimar el máximo requerimiento de agua por parte de la atmósfera en ausencia de limitaciones de agua (Suwarman et al., 2021).

Es importante tener en cuenta que la evapotranspiración potencial proporciona una estimación teórica sin considerar las limitaciones reales de agua disponibles en el suelo y la vegetación. Por lo tanto, es fundamental combinar la estimación de la evapotranspiración potencial con la disponibilidad real de agua en el suelo para obtener una evaluación más precisa del balance hídrico. Además, el uso de diferentes métodos y modelos para calcular la evapotranspiración potencial puede generar variaciones en los resultados, por lo que es necesario seleccionar el enfoque más adecuado para cada situación específica. El modelo de balance hídrico considera la evapotranspiración potencial junto con otros factores como la precipitación, el almacenamiento de agua en el suelo y la pérdida de agua a través de la evapotranspiración (Liu, 2022).

La evapotranspiración potencial (ETP) puede ser simulada mediante el balance hídrico, el balance energético o la evapotranspiración potencial. Además, solo puede ser calculada utilizando datos meteorológicos. (Liu Z., 2022).

Infiltración

La infiltración se refiere al proceso por el cual el agua penetra en el suelo desde la superficie. Es un proceso fundamental en el ciclo del agua y en la recarga de acuíferos. Durante la infiltración, el agua atraviesa los poros y espacios interconectados del suelo, moviéndose

hacia capas más profundas. La tasa de infiltración depende de varios factores, como la textura y estructura del suelo, el contenido de humedad existente, la compactación del suelo, la pendiente del terreno y las características de la vegetación. Los suelos con una estructura más porosa y una mayor permeabilidad permiten una mayor tasa de infiltración, ya que el agua puede moverse más fácilmente a través de ellos. Por otro lado, los suelos compactados o con una alta proporción de arcilla pueden tener una tasa de infiltración más baja. La infiltración es importante para el almacenamiento y la disponibilidad de agua en el suelo. Un alto índice de infiltración es beneficioso, ya que permite que el agua se infiltre rápidamente y recargue los acuíferos subterráneos. Sin embargo, en ciertos casos, como suelos saturados o superficies impermeables, la infiltración puede verse limitada, lo que puede dar lugar a problemas de encharcamiento o escorrentía superficial (Kirkham, 2014).

Drenaje profundo

Implica el movimiento descendente del agua desde la zona de las raíces hacia capas más profundas y eventualmente, hacia los acuíferos subterráneos. Este proceso desempeña un papel importante en la recarga de los recursos hídricos subterráneos y en la eliminación de nutrientes a través de la lixiviación. Además, el drenaje profundo puede tener implicaciones significativas en la gestión adecuada de los recursos hídricos (Timms et al., 2011).

El drenaje profundo es una salida importante en el balance hídrico del suelo, que ocurre cuando el agua infiltrada supera la capacidad de retención del suelo y las necesidades de las plantas. En esta situación, el exceso de agua se mueve verticalmente hacia capas más profundas del suelo. Este proceso es esencial para evitar el encharcamiento y la saturación del suelo, lo que podría afectar negativamente el crecimiento de las plantas al restringir el acceso al oxígeno y dañar las raíces. Además, el drenaje profundo ayuda a prevenir la acumulación excesiva de sales y nutrientes en la zona de las raíces, lo que podría tener efectos perjudiciales en el desarrollo de las plantas (Timms et al., 2011).

La cantidad de drenaje profundo que ocurre en un determinado suelo depende de varios factores, como la textura del suelo, la estructura, la pendiente del terreno, la vegetación presente y las condiciones climáticas. Suelos con alta permeabilidad, como los arenosos, pueden permitir un drenaje profundo más rápido, mientras que suelos con baja permeabilidad, como los arcillosos, pueden retener el agua por más tiempo, limitando así el drenaje profundo (Timms et al., 2011).

La caracterización del drenaje profundo implica comprender su variabilidad espacial y temporal, esto se puede lograr mediante diferentes enfoques, como modelos hidrológicos

complejos o modelos distribuidos de balance hídrico del suelo, este último se efectúa considerando factores como la precipitación, la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en el suelo. En algunos casos, se realizan mediciones directas de la humedad en capas profundas del suelo para estimar las tasas de drenaje profundo. Al obtener información precisa sobre el drenaje profundo, los investigadores y profesionales pueden estimar con mayor precisión las tasas de recarga de agua, evaluar la eficacia de las estrategias de gestión del agua (Liu et al., 2015).

A diferencia de la percolación profunda, la ascensión capilar actúa en la dirección opuesta. Los estudios del agua en el suelo a menudo pasan por alto la ascensión capilar, ya que solo se presenta en lugares con un alto nivel freático y las tasas de flujo suelen ser pequeñas (Nolz, 2016). En la zona de páramo, existe una ausencia de nivel freático de agua, además de una significativa variación en el espesor del suelo, por lo que no se considera la capilaridad dentro del balance hídrico del suelo de este ecosistema (Amay, 2018).

Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se produce cuando el suelo no puede absorber toda el agua proveniente de la lluvia, el deshielo u otras fuentes y el exceso fluye sobre la superficie del suelo. Este proceso es una parte esencial del ciclo hidrológico y se produce cuando la tasa de precipitación en una superficie supera la velocidad a la cual el agua puede ser absorbida por el suelo y cuando cualquier almacenamiento previo en depresiones ya está lleno. (Pal & Samanta, 2011).

2.6.2 Relación entre variables del balance hídrico

Humedad del suelo y temperatura del suelo

Según Lakshmi et al., (2003) existe una relación estrecha entre la humedad del suelo y la temperatura del suelo en el balance hídrico. Tanto la humedad del suelo como la temperatura del suelo son variables fundamentales para determinar el equilibrio de calor y agua en la superficie terrestre. La humedad del suelo desempeña un papel importante al influir en la distribución de la lluvia entre la escorrentía, el almacenamiento en la superficie y la infiltración, así como en la partición de la radiación solar entrante y saliente, el calor latente y el calor sensible. Además, la humedad del suelo afecta el albedo de la superficie, que está relacionado con el contenido de humedad. Por otro lado, la temperatura de la superficie también es una variable crucial para determinar el equilibrio de calor y agua en la superficie terrestre. La temperatura de la superficie influye en los flujos de radiación de onda larga

saliente, el calor sensible y el calor del suelo. Estos flujos determinan la magnitud del flujo de calor latente, que incluye la evaporación y la transpiración según el principio del balance de energía. Por lo tanto, cualquier cambio en la temperatura de la superficie afectará la humedad del suelo y viceversa. Es decir, existe una interacción bidireccional entre la humedad del suelo y la temperatura del suelo, y ambos factores son importantes para comprender y modelar el balance hídrico en la superficie terrestre.

Precipitación y radiación solar

La relación entre la precipitación y la radiación solar es crucial para el ciclo del agua y los patrones climáticos. La radiación solar proporciona la energía necesaria para el calentamiento de la superficie terrestre y la evaporación del agua, lo que a su vez impulsa la formación de nubes y la posterior precipitación. A medida que la radiación solar llega a la superficie, calienta la tierra y los cuerpos de agua, lo que genera diferencias de temperatura y presión atmosférica. Estas diferencias son uno de los factores que impulsan la circulación atmosférica y los sistemas de alta y baja presión que están asociados con los patrones de precipitación (Kumar et al., 2019).

El vapor de agua absorbe la radiación solar lo que provoca una reducción del flujo radiativo que llega a la superficie terrestre. Lo antes mencionado condiciona de manera directa la formación de nubes, las tasas de evaporación y precipitación a nivel global. En resumen, la radiación solar es una fuerza motriz clave para el ciclo del agua y la distribución de la precipitación en la tierra (Moreno, 2018).

Evapotranspiración real (actual) y tipo de vegetación

La evapotranspiración real (ETa) se refiere a la pérdida de agua desde la superficie del suelo debido a la evaporación directa y la transpiración de las plantas. El tipo de vegetación puede tener un significativo impacto en la tasa de evapotranspiración y en el balance hídrico del suelo. Las plantas tienen diferentes características morfológicas y fisiológicas que influyen en su capacidad para transpirar agua. Por ejemplo, las plantas con hojas grandes y densas, como los árboles, tienden a tener una mayor tasa de transpiración debido a su mayor superficie foliar y mayor actividad metabólica. Estas plantas suelen tener una mayor demanda de agua y pueden extraer agua del suelo a tasas más altas. Por otro lado, las plantas con hojas pequeñas y adaptaciones para reducir la transpiración, como los arbustos xerófitos, tienden a tener una tasa de transpiración más baja. Estas plantas han desarrollado adaptaciones para sobrevivir en condiciones secas, lo que les permite conservar agua en sus tejidos y reducir la pérdida de agua a través de estomas especializados. La vegetación

también desempeña un papel importante en otros aspectos del balance hídrico del suelo, como la infiltración y la escorrentía. Por ejemplo, cuando hay una cobertura vegetal densa, se favorece una mayor infiltración de agua en el suelo, ya que la vegetación ayuda a reducir la erosión y aumenta la capacidad de retención de agua (Porporato et al., 2004; Silva et al., 2021).

La evapotranspiración real (ETa) se contempla como una función lineal de la evapotranspiración potencial (ETo), y que, a su vez, depende la humedad del suelo. Las diferencias entre ETa y ETo son mínimas en áreas con disponibilidad de agua suficiente, pudiendo la evapotranspiración real igualar a la potencial (Rodríguez, et al., 2023).

Precipitación y drenaje del suelo

La relación entre la precipitación y el drenaje del suelo es influenciada por la intensidad, duración y cantidad de la precipitación, así como por las características del suelo y la cobertura vegetal. Si la precipitación es intensa, puede superar la capacidad de infiltración del suelo, resultando en mayor escurrimiento superficial y menor infiltración. La duración de la precipitación también afecta el drenaje, con precipitaciones prolongadas que saturan el suelo y promueven el movimiento del agua hacia capas más profundas. Las propiedades del suelo, como su textura y permeabilidad, influyen en su capacidad de retener y drenar agua. La vegetación puede mejorar la estructura del suelo, aumentar la infiltración y retener agua. En conjunto, estos factores determinan la disponibilidad de agua en el suelo y el flujo de agua en la superficie y hacia capas subterráneas (Short et al., 2020).

2.6.3 Tratamiento de variables

Datos faltantes

Los datos faltantes, también conocidos como valores perdidos, se refieren a la ausencia de valores para una variable específica en una observación determinada. La presencia de datos faltantes es un fenómeno común en la mayoría de las investigaciones y puede tener implicaciones importantes en las conclusiones y resultados obtenidos a partir de los datos. Sin embargo, hasta hace poco tiempo, la mayoría de los investigadores han sacado conclusiones basadas en la suposición de un conjunto completo de datos. Los datos faltantes presentan varios problemas. Primero, la ausencia de datos reduce el poder estadístico, que se refiere a la probabilidad de que la prueba rechace la hipótesis nula cuando es falsa. En segundo lugar, los datos perdidos pueden causar sesgos en la estimación de los parámetros. En tercer lugar, puede reducir la representatividad de las muestras. En cuarto lugar, puede

complicar el análisis del estudio. Cada una de estas distorsiones puede amenazar la validez de los ensayos y conducir a conclusiones inválidas (Kang, 2013).

Patrones de datos faltantes

Según la información proporcionada por Liu (2016) los patrones de datos faltantes se refieren a la forma en que los valores faltantes están distribuidos en un conjunto de datos. Estos patrones pueden variar en función de las características y el contexto de los datos. Existen diferentes tipos de patrones de datos faltantes que pueden observarse en un conjunto de datos:

- Datos faltantes completamente al azar (MCAR, por sus siglas en inglés): En este patrón, la probabilidad de que los datos falten es independiente de los valores observados o no observados. En otras palabras, la ausencia de datos no está relacionada con ninguna característica o condición particular. El patrón MCAR implica que no hay ningún sesgo sistemático en los datos faltantes.
- Datos faltantes aleatorios (MAR, por sus siglas en inglés): En este patrón, la probabilidad de que los datos falten puede depender de las variables observadas, pero no de los valores no observados. En otras palabras, la probabilidad de que los datos falten puede estar relacionada con información disponible en el conjunto de datos, lo que permite imputar los valores faltantes utilizando las variables observadas.
- Datos faltantes no aleatorios (MNAR, por sus siglas en inglés): En este patrón, la probabilidad de que los datos falten depende de los valores no observados. En otras palabras, la ausencia de datos está relacionada con la información que falta y puede estar influenciada por factores desconocidos o no medidos. Los datos MNAR pueden introducir sesgos en el análisis si no se tienen en cuenta adecuadamente.

La comprensión del patrón de datos faltantes es importante para seleccionar el método adecuado de imputación de datos y para realizar inferencias válidas a partir de los datos completados. Los métodos de imputación deben tener en cuenta el patrón de datos faltantes para garantizar que los valores imputados sean representativos y no introduzcan sesgos adicionales en el análisis.

MCAR: Missing Completely at Random
MAR: Missing at Random
MNAR: Missing not at Random

Imputación de datos faltantes

La imputación es un procedimiento estadístico en el que se reemplazan los datos faltantes con algunos valores. Existen dos tipos de imputación: imputación de unidades (punto de datos individuales) e imputación de elementos (valor de una característica individual). La imputación se ve a menudo de manera negativa debido a que se suele realizar incorrectamente, lo que introduce sesgo en las estimaciones, y solo se puede aplicar correctamente a un rango limitado de problemas. La imputación puede ser útil para la predicción, ya que permite reducir el error estándar al incluir información de otras variables en los datos disponibles (Adibah et al., 2021).

Imputación múltiple

La imputación múltiple es un enfoque utilizado para abordar los datos faltantes en el análisis estadístico. Bajo el supuesto de que los datos faltantes son aleatorios (MAR, por sus siglas en inglés), la imputación múltiple busca retener las ventajas de los estimadores de máxima verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés), al tiempo que permite incorporar la incertidumbre causada por la imputación en el análisis de datos completos. Este enfoque implica crear más de un conjunto de valores de reemplazo para los datos faltantes basados en modelos plausibles, generando así múltiples conjuntos de datos completos para el análisis. El razonamiento estadístico detrás de la imputación múltiple es que la verosimilitud de los datos observados puede aproximarse mediante el promedio de la verosimilitud de los datos completos sobre los valores faltantes desconocidos. Es decir, el análisis de imputación múltiple que combina el análisis basado en la verosimilitud de cada conjunto de datos completos es aproximadamente equivalente al análisis basado en la verosimilitud de los datos observados, mientras que la incertidumbre de la imputación se refleja en la variación entre los múltiples conjuntos de datos completos (He, 2010).

El procedimiento de análisis de datos imputados múltiples se lleva a cabo de la siguiente manera (He, 2010):

- Analizar cada conjunto de datos completos por separado utilizando un paquete de software adecuado diseñado para datos completos (por ejemplo, SAS, STATA o R).
- Extraer el estimador puntual y el error estándar de cada análisis.

ML: Maximum likelihood

- Combinar los múltiples conjuntos de estimaciones puntuales y errores estándar para obtener una estimación puntual única, un error estándar y el intervalo de confianza asociado o el valor de probabilidad.
- Las reglas de combinación en el paso 3 contienen algunas fórmulas para calcular el promedio de las estimaciones entre las imputaciones y las varianzas de las estimaciones, tanto dentro como entre las imputaciones. Estas reglas se han incorporado en paquetes de imputación para realizar cálculos automáticos

Los métodos utilizados en la imputación múltiple son (Slade & Naylor, 2022):

- Comparación predictiva media (PMM) es un método utilizado en la imputación múltiple de datos para evaluar la calidad de las imputaciones generadas. PMM compara las imputaciones obtenidas en cada conjunto de datos completos con los valores reales observados en los datos incompletos. Se calcula la discrepancia entre las imputaciones y los valores observados y se obtiene una medida resumen de esta discrepancia, que representa la precisión de las imputaciones.
- La Media Ponderada Predictiva (PMM) es una forma específica de calcular esta medida resumen en la imputación múltiple. En PMM, se calcula la discrepancia promedio entre las imputaciones y los valores observados, pero se da un mayor peso a los casos con menos información. Esto se debe a que los casos con más información tienen menos incertidumbre y, por lo tanto, sus imputaciones deben ser más precisas. La PMM pondera la discrepancia de cada caso por un factor que refleja la incertidumbre de la imputación para ese caso en particular.
- Los árboles de clasificación y regresión (CART) y los bosques aleatorios (RF) son métodos no paramétricos basados en árboles para modelar datos complejos y capturar relaciones complejas entre variables. Estos métodos no requieren la especificación de un modelo de imputación paramétrico y pueden capturar interacciones y no linealidades en los datos. En el contexto de la imputación múltiple, los árboles CART y los bosques aleatorios RF se pueden utilizar para generar imputaciones utilizando todos los demás predictores como variables predictoras. Estos métodos son especialmente útiles cuando hay una compleja estructura de datos y relaciones no lineales que pueden ser difíciles de capturar con un modelo de imputación paramétrico.

Validación de la imputación de los datos faltantes y análisis exploratorio de datos (EDA)

El análisis de datos implica diferentes procesos de limpieza, transformación, evaluación de datos y creación de modelos para extraer información específica y relevante. Estos son beneficiosos para asegurar resultados más cercanos a los reales reduciendo el porcentaje de error en una investigación. El análisis exploratorio de datos es importante para tener una visión completa de la información que se dispone para la toma de decisiones dentro de un estudio. Permite al investigador analizar los datos antes de llegar a una conclusión, por lo tanto, es una de las técnicas utilizadas para extraer características y tendencias vitales de la información a emplear en el estudio. Por lo tanto, EDA se ha convertido en un hito importante para cualquiera que trabaje con bases de datos (Komorowski et al., 2016). En el EDA, se utilizan diversas herramientas y lenguajes de programación, como Python, R y MATLAB, que ofrecen librerías y funciones específicas para facilitar el análisis exploratorio de datos y ofrece varias ventajas, como obtener información sobre las tendencias y patrones subyacentes en los datos, comprender mejor las variables, optimizar la preparación de datos y tomar decisiones basadas en evidencias (Madhugiri, 2023).

El Análisis Exploratorio de Datos (EDA) es un proceso fundamental en la exploración y comprensión de conjuntos de datos. Implica una serie de pasos clave (Madhugiri, 2023):

- **Recopilación de datos:** Consiste en obtener los datos necesarios para la investigación de diversas fuentes, como bases de datos, estaciones climáticas, redes de monitoreo, etc.
- **Identificación de variables y comprensión:** Se analizan todas las variables presentes en los datos y se busca comprender su significado y relevancia para el análisis.
- **Limpieza del conjunto de datos:** Se eliminan los valores nulos y la información irrelevante para asegurar que los datos sean coherentes y completos.
- **Identificación de variables correlacionadas:** Se busca determinar la relación entre las variables para comprender cómo se influyen mutuamente.
- **Selección de métodos estadísticos adecuados:** Se eligen las técnicas estadísticas adecuadas según el tipo de datos y los objetivos del análisis.
- **Visualización y análisis de resultados:** Se realizan gráficos y visualizaciones para observar los patrones, tendencias y relaciones en los datos. Los resultados se analizan de manera crítica para obtener información relevante.

Existen tres tipos principales de EDA (Madhugiri, 2023):

- **Univariable:** Se analiza una sola variable y se examina su distribución y características estadísticas.
- **Bivariable:** Se estudia la relación entre dos variables y se busca comprender cómo se influyen mutuamente.
- **Multivariable:** Se analizan más de dos variables y se exploran las interacciones y patrones complejos entre ellas.

2.6.4 Criterios de bondad de ajuste para modelos hidrológicos.

La calibración de modelos hidrológicos, usualmente se enfoca en un “criterio de exactitud”, criterio que apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo usando diferentes “medidas de bondad de ajuste” los cuales evalúan el desempeño del modelo entre los datos observados y simulados. (Cabrera, 2012; Catimay et al., 2019). Los criterios a ser utilizados en este estudio son:

- **El sesgo porcentual (PBIAS)**

Mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que los datos observados. Los valores de baja magnitud indican una simulación precisa del modelo, siendo 0 el número óptimo. Valores positivos $PBIAS > 0$ indican subestimación del modelo y valores negativos $0 < PBIAS$ indican sobrestimación; en el sentido de que tan ancha es la campana en las curvas comparativas Simulación vs. Observación (López et al., 2012; Navárez et al., 2021; Moriasi et al., 2007). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad \text{Ecuación 1.}$$

- **Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)**

Estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido), comparado con la variación de los datos medidos (información). Indica qué tan bien se adapta la curva de datos observados versus simulados a la línea 1:1 (45°). Toma valores comprendidos entre $-\infty$ y 1; siendo el valor óptimo 1, si es 0 o inferior a 0, implica que la media

tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo cual implica que los valores simulados son malos (López et al., 2012; Moriasi et al., 2007). Se calcula a partir de la ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{med})^2 \right]} \quad \text{Ecuación 2.}$$

- **Coefficiente de determinación (R^2)**

Describe la variación de los datos observados con respecto a los simulados por el modelo. El rango de R^2 varía de 0 a 1; los valores más altos indican un menor error de variación y valores mayores a 0.5 se consideran aceptables. Este estadístico es demasiado sensible a los valores extremos altos e insensible a las diferencias aditivas y proporcionales entre las predicciones del modelo y los datos medidos (Nevárez et al., 2021; Moriasi et al., 2007). Este índice se calcula con la ecuación:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}_i^{obs}) * (Y_i^{sim} - \bar{Y}_i^{sim}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}_i^{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}_i^{sim})^2} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Capítulo 3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia del Azuay-Ecuador (Véase Figura 1), aproximadamente a 30 km al Sur-Oeste de la ciudad de Cuenca dentro de las áreas protegidas por ETAPA EP (Cancán – Sigsihuayco) (Asanza & Barahona, 2015). En la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Yanuncay, perteneciente a la cuenca del río Sigsihuayco, se seleccionó la quebrada Cuevas, la cual tiene un tamaño aproximado de 5 km²; con una gradiente altitudinal que va desde los 3000 a 3900 m.s.n.m. como se muestra en la Figura 2. Esta zona está cubierta predominantemente por pajonal 76%, en adelante páramo, 7% de almohadilla y 1.3% de bosque de polylepis, que se encuentra solamente en la parte alta de la cuenca (Amay, 2018).

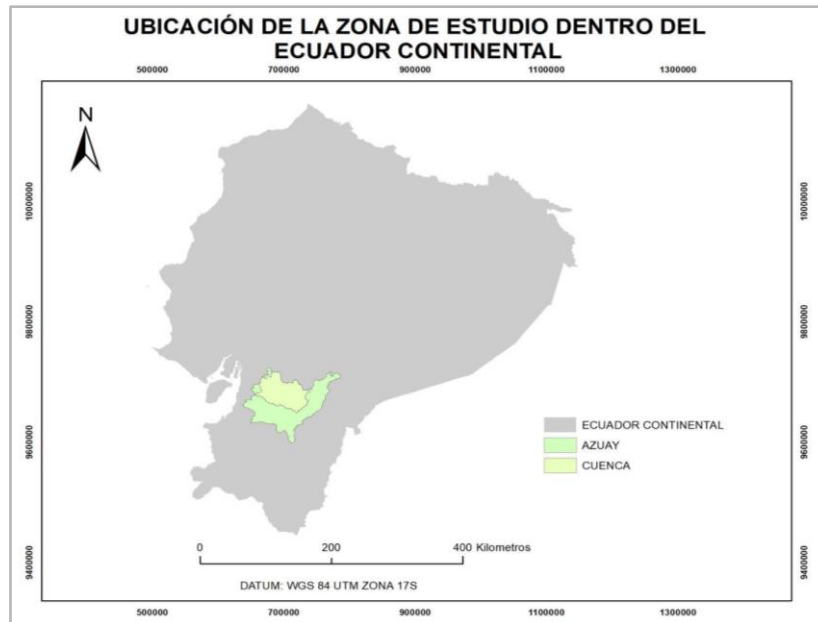


Figura 1.

Mapa de ubicación de la zona de estudio dentro del Ecuador continental
 Fuente: IGM, 2018

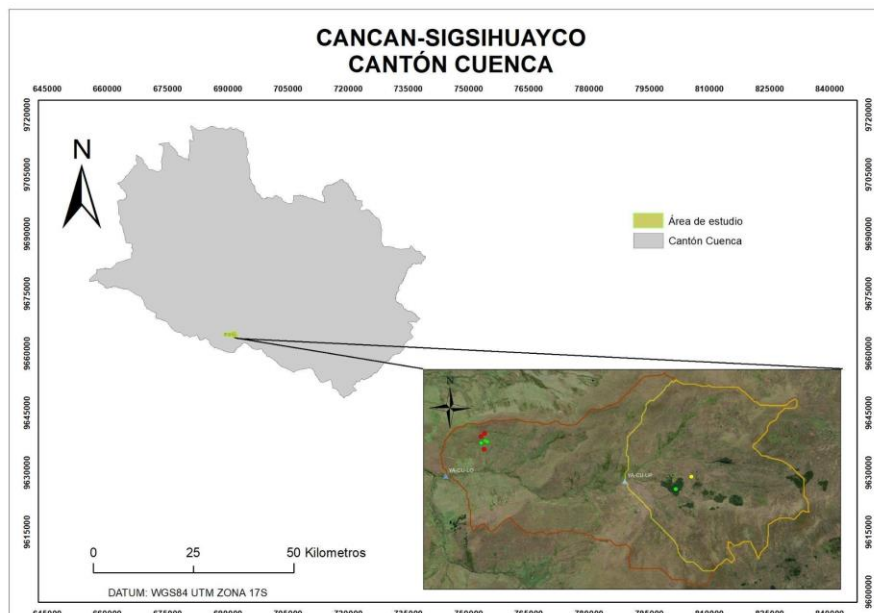


Figura 2.

Mapa del área de estudio
 Fuente: IGM, 2022

3.2. Materiales

La información empleada para la modelación en el software Hydrus 1D y para el posterior balance hídrico comprende series de datos temporales de humedad del suelo, clima, características hidrofísicas de los perfiles de suelo, parámetros hidráulicos de suelo, pendiente, tipo de suelo y cobertura vegetal. La fuente, escala temporal y el porcentaje de información faltante de cada uno de los datos, se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1

Fuente de las Bases de Datos para el Estudio

Data	Escala	Fuente	Datos Faltantes
Serie de datos temporales: Clima	15 min	PROMAS: Temperatura del aire, precipitación y humedad relativa	0%
Serie de datos temporales: Reflectómetros en el dominio del tiempo	15 min	PROMAS: Contenido volumétrico de agua, conductividad eléctrica, temperatura del suelo, permitividad y resistividad.	3.24%
Serie de datos temporales: Clima	5 min	Base de datos Proyecto Quimsacocha: Radiación solar y velocidad del viento	6.44%
Características Hidrofísicas del suelo: Parámetros hidráulicos	--	PROMAS: Conductividad hidráulica, contenido de agua residual, contenido de agua de saturación, y parámetros empíricos α y n .	0%

3.3. Puntos de muestro

Se determinaron 5 puntos de muestreo en función de las 5 estaciones de monitoreo actualmente en funcionamiento a cargo del Programa de Manejo de Agua y Suelo - PROMAS, ubicadas cada una en diferentes coberturas vegetales: dos estaciones en pajonal, dos en almohadilla y una en bosque de polylepis respectivamente. En la Tabla 2 se detallan las coordenadas de cada estación, la cobertura vegetal en la que se encuentra y el perfil de suelo.

Tabla 2

Ubicación y descripción de los perfiles de suelo

Perfil de suelo	PR		FR	CU	
	PR3-UP	PR5-MD	FR3	CU4-MD	CU4-LW
Coordenadas WGS84	3°1'54.21"S / 79°16'41.12"O	3°1'43.93"S / 79°17'44.80" O	3°1'58.00"S / 79°16'45.80"O	3°1'43.50"S / 79°17'43.10"O	3°1'43.20"S / 79°16'43.50' O
Altitud [m.s.n.m]	3 754	3 647	3 748	3 651	3 636
Profundidad de los horizontes [cm]					
A					
A1	28				
A2	49	20	25	12	11
AC		50	47		
C		73	58	28	35
Especies de vegetación dominante	<i>Calamagrostis intermedia</i>		<i>Polylepis</i>	<i>Azorella</i> <i>Pendunculata</i>	

Nota: Los perfiles del suelo están codificados de la siguiente forma: las dos primeras letras del ID del perfil se refieren al tipo de vegetación, siendo FR = bosque de *Polylepis*, PR = pastos de matas (pajonal) y CU = plantas formadoras de cojines (almohadilla). A esto le sigue un número que se refiere a la toposecuencia replicada del suelo (1 a 5) y la posición topográfica del pozo de suelo a lo largo de la pendiente con UP = pendiente superior, MD = pendiente posterior o pendiente media, y LW = pendiente inferior.

3.4. Muestreo de suelo en campo

Establecidos los puntos de muestreo, se llevó a cabo una campaña de muestreo en campo en el mes de marzo 2023 para la toma de muestras de suelo y posterior determinación del contenido de humedad y densidad aparente. En campo, cada muestra se tomó en un anillo de PVC con dimensiones de aproximadamente de 37.38 cm de diámetro y 29.6 cm de altura. En total se extrajeron 4 muestras del horizonte A (estaciones FR3, PR3-UP, CU4-MD, PR5-MD) y una muestra del horizonte C (tomada entre las estaciones PR5-MD y CU4-LW). Todas

las muestras se trasladaron del área de estudio al laboratorio de hidro-física de suelos del PROMAS en la Universidad de Cuenca para su posterior análisis. Cada muestra fue colocada en un recipiente de mayor diámetro para permitir su fácil manipulación, mismas que fueron cuidadosamente cubiertas con láminas de plástico para evitar la evaporación hasta dar inicio al experimento tal como se muestra en la Figura 3.



Figura 3.

Muestras de suelo

3.5. Ejecución del ensayo en laboratorio

El contenido de agua del suelo se calculó a partir de términos gravimétricos (w).

$$w = \frac{M_w \text{ gr}}{M_s \text{ gr}} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde M_s es la masa de suelo seco y M_w es la masa de agua del suelo, calculada con la siguiente expresión:

$$M_w = M_t - M_s \quad \text{Ecuación 5.}$$

La humedad de suelo porcentual se determina por diferencia de masas y se expresa en porcentaje.

$$w\% = \frac{\text{Masa suelo húmedo} - \text{masa suelo seco}}{\text{Masa suelo seco}} * 100 \quad \text{Ecuación 6.}$$

Con las muestras de suelo en laboratorio, se dio inicio al ensayo con la saturación de las muestras en función de la capilaridad, tal como se muestra en la Figura 4.

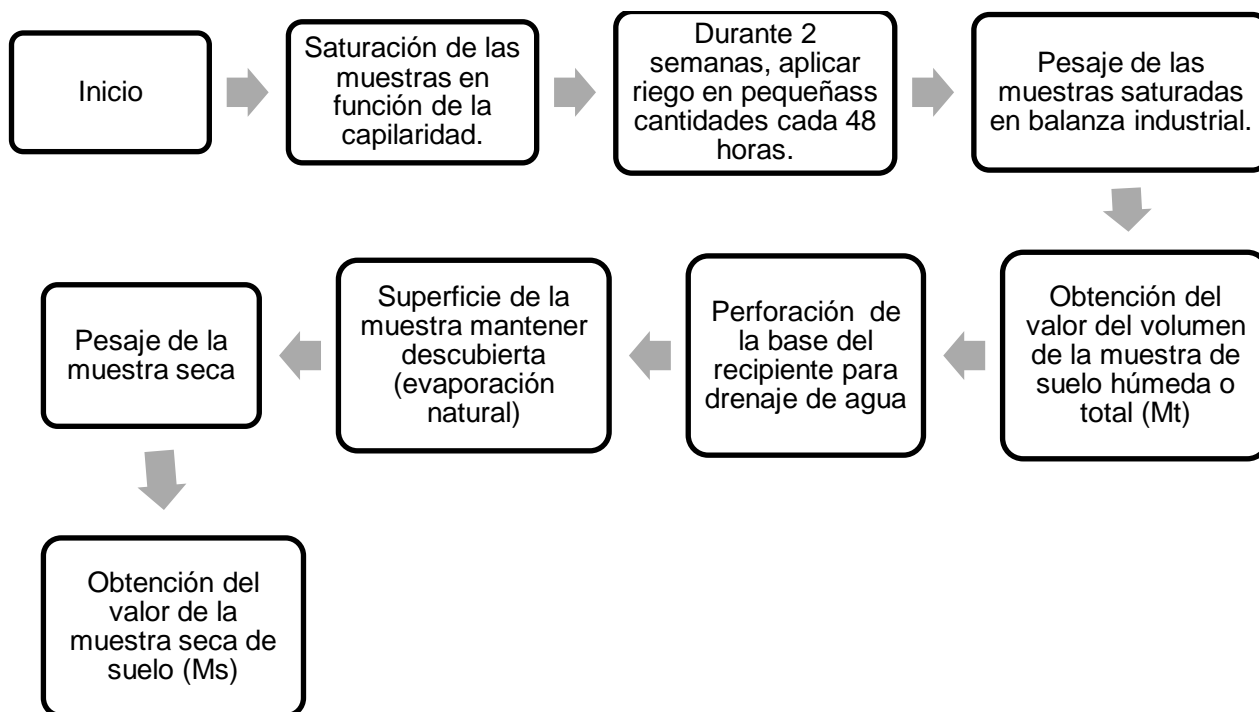


Figura 4

Esquema para la saturación de las muestras de suelo

La relación existente entre el contenido gravimétrico y volumétrico se puede expresar a través de la densidad aparente (δ) del suelo (véase Ecuación 4).

$$\Theta = W \times \delta$$

Ecuación 7.

Además, se realizó otro procedimiento mismo que se detalla a continuación en la Figura 5 y Figura 6.

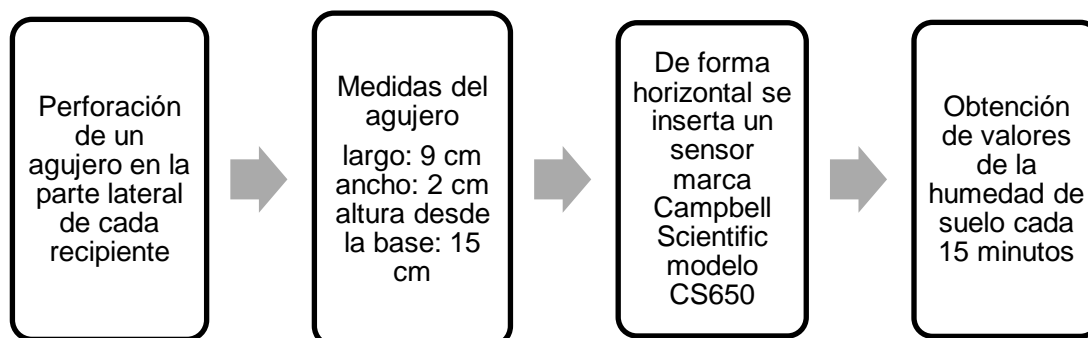


Figura 5

Esquema obtención de los valores de humedad del suelo

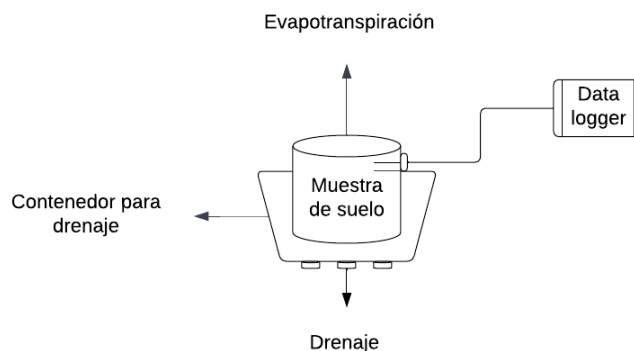


Figura 6

Esquema implementación de sensores y equipo

Los contenidos relativos de humedad θ , procedentes del experimento en laboratorio, se graficaron en función del valor del TDR que corresponde al tiempo de tránsito del pulso eléctrico entre las dos varillas del sensor. Los datos experimentales se ajustaron mediante una ecuación no lineal y se graficaron las curvas de calibración para el contenido de agua en cada tipo de suelo, lo que se puede observar en el Capítulo 4, Figura 9 y 10.

Cabe recalcar que todo el procedimiento se llevó a cabo en un espacio amplio y cerrado evitando el contacto directo de las muestras de suelo con la lluvia, pero permitiendo el flujo de corrientes de aire y calor para la evaporación natural de agua de cada muestra de suelo.

3.6. Análisis y evaluación de los datos recopilados

3.6.1 Datos de los sensores TDR

Los contenidos volumétricos de humedad del suelo y resistividad para los horizontes de suelo a diferentes profundidades, se tomaron de la red hidrometeorológica del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, instalada en el año 2013 en la zona del estudio, se cuenta con 5 estaciones funcionales, donde se miden a intervalos de 15 minutos utilizando las sondas TDR. Las mediciones que se emplearon en el estudio se extienden en el periodo desde el 1 de junio de 2022 hasta el 31 de mayo de 2023. El procesamiento y análisis de las series temporales se realizaron en el software RStudio versión 4.1. y en el programa Microsoft Excel 2019. La ubicación de las estaciones y sondas TDR se muestran en la Figura 7.

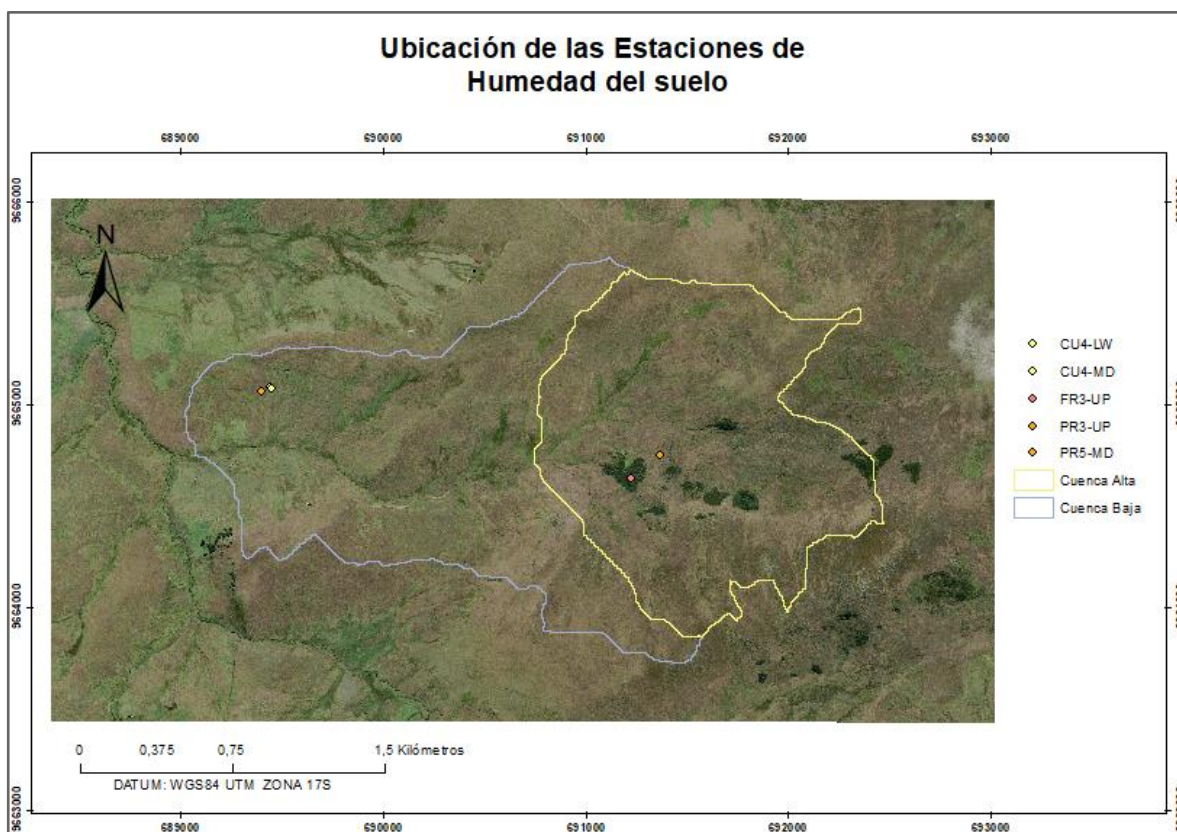


Figura 7

Estaciones de humedad del suelo

3.6.2 Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos como la temperatura del aire, precipitación y humedad relativa se obtuvieron de las estaciones pluviométricas de la red hidrometeorológica del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, ubicadas dentro del área de estudio como se ilustra en la Figura 8. La información fue recopilada para el mismo período de tiempo. Adicional, se obtuvo datos de velocidad del viento y de radiación solar a partir de una estación meteorológica del proyecto Quimsacocha, perteneciente a la minera Dundee Precious Metals, ubicada a una distancia aproximada de 7 km del área de estudio.

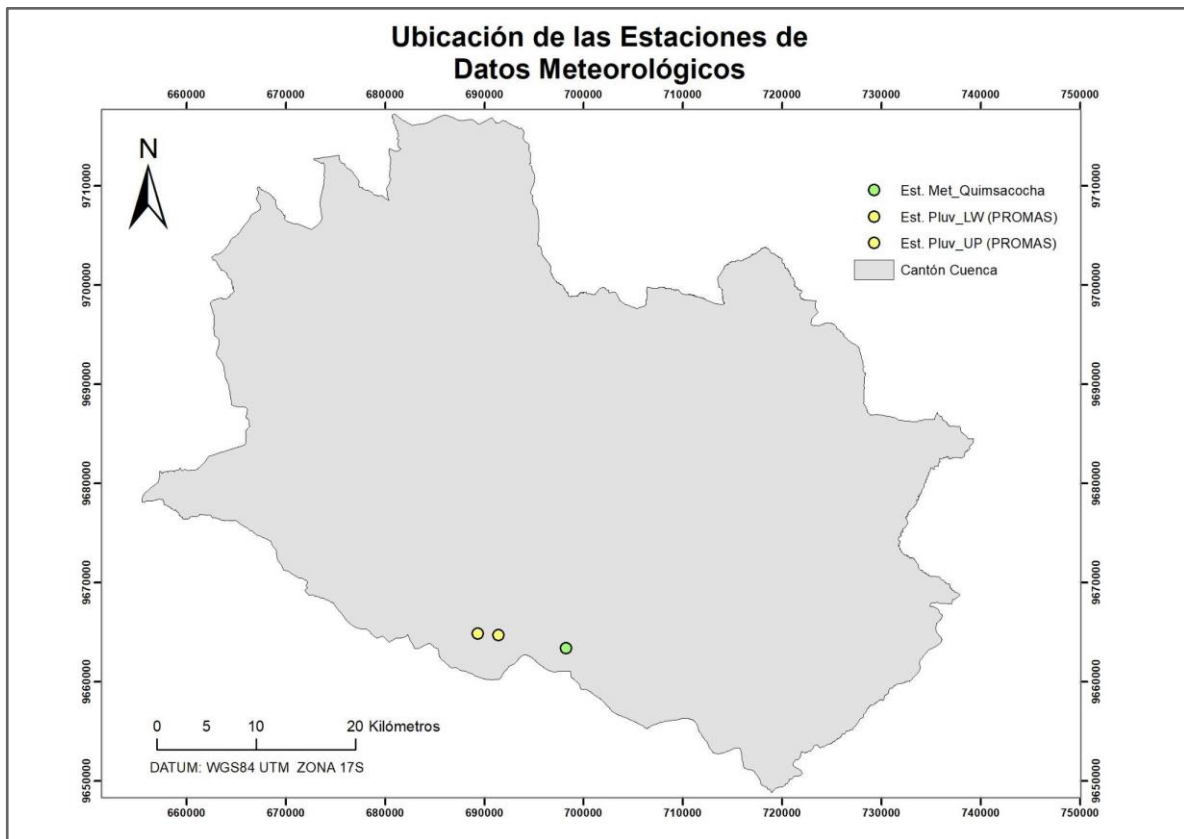


Figura 8.

Mapa de las Estaciones de Datos Meteorológicos
Fuente: IGM, 2022

3.6.3 Parámetros Hidráulicos

Los parámetros hidráulicos del suelo como: conductividad hidráulica saturada (K_s), contenido de agua residual (θ_r) y contenido de agua de saturación (θ_s), así como los parámetros empíricos α y n , requeridos en el modelo de (Van Genuchten, 1980), fueron recopilados de la base de datos del proyecto ParamoSus. Al ser un suelo de páramo, los valores para los parámetros hidráulicos corresponden al tipo de suelo Andosol y se detallan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3*Parámetros hidráulicos del suelo*

Perfil	Horizonte	K_s^1	θ_r	θ_s	α^2	N
FR3-UP	A	9.91	0.22	0.69	0.003	1.38
	AC	18.83	0.23	0.63	0.04	1.13
	C	2.21	0.28	0.72	0.01	1.29
PR3-UP	A1	7.33	0.42	0.77	0.003	2.57
	A2	3.68	0.33	0.78	0.001	1.71
PR5-MD	A	5.905	0.46	0.69	0.01	2.29
	AC	18.83	0.23	0.63	0.04	1.13
	C	2.34	0.28	0.72	0.01	1.29
CU4 - MD	A	3.47	0.29	0.76	0.001	2.94
	C	2.34	0.28	0.72	0.01	1.29
CU4_LW	A	12.00	0.29	0.72	0.003	2.03
	C	1.20	0.28	0.72	0.01	1.29

Nota: ¹ K_s - Unidades: centímetros por día [cm d^{-1}], ² α - Unidades: uno sobre centímetros [1 cm^{-1}]

Los valores que se visualizan en la Tabla 3., fueron extraídos de la base de datos del proyecto ParamoSus, obtenida por medio de varios ensayos de laboratorio realizados en muestras correspondientes a cada uno de los perfiles de suelo empleados para el presente estudio. Los estadísticos de la base de datos se presentan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4*Estadísticos de la base de datos de los parámetros hidráulicos del suelo*

Horizonte	Estadísticos	K_s^1	θ_r	θ_s	α^2	n
A	Máximo	63.12	0.46	0.76	0.01	2.94
	Mínimo	0.00	0.00	0.61	0.00	1.09
	Media	9.84	0.28	0.68	0.01	1.65
	σ^3	1.44	0.12	0.05	0.00	0.54
AC	Máximo	25.44	0.46	0.82	0.04	6.49
	Mínimo	11.04	0.00	0.53	0.00	1.08
	Media	18.72	0.12	0.66	0.01	2.44
	σ	7.20	0.17	0.09	0.01	2.33

C	Máximo	2.64	0.43	0.76	0.02	4.21
	Mínimo	0.00	0.00	0.48	0.00	1.07
	Media	0.72	0.16	0.66	0.01	1.50
	σ	1.20	0.16	0.09	0.00	0.96
A1	Máximo	7.90	0.43	0.79	0.00	3.33
	Mínimo	6.91	0.00	0.76	0.00	1.75
	Media	7.33	0.41	0.78	0.00	2.29
	σ	0.51	0.18	0.01	0.00	0.67
A2	Máximo	4.82	0.33	0.78	0.07	1.93
	Mínimo	2.13	0.00	0.71	0.00	1.05
	Media	3.68	0.22	0.74	0.02	1.56
	σ	1.39	0.19	0.03	0.04	0.46

Nota: ¹Ks - Unidades: centímetros por día [cm d^{-1}], ² α - Unidades: uno sobre centímetros [1 cm^{-1}], σ = Desviación Estándar

3.6.4 Procesamiento de datos

Al tener datos provenientes de diferentes estaciones, se realizó un tratamiento inicial debido a que éstos no se encontraban con un mismo formato y presentaban periodos de datos faltantes. Este tratamiento es esencial ya que estas diferencias podrían afectar los resultados de la investigación (Tsinko et al., 2018).

3.6.5 Evaluación de la calidad de datos

Para el análisis de la calidad de los datos se siguió el Manual de control de datos hidrometeorológicos elaborado por Guallpa, (2014). La evaluación se enfocó en la calidad de los datos crudos, para lo cual se automatizaron procesos con el software R. Al contar con dos diferentes bases de datos se precisó unificar el formato de fechas y horas de las diferentes observaciones y su continuidad en un periodo de tiempo establecido. Se realizó una evaluación visual determinando el número de observaciones y vacíos existentes en cada una de las bases de datos.

3.6.6 Correlación entre variables meteorológicas e imputación de datos faltantes

Para la aplicación de los diferentes métodos de imputación se construyeron bases de datos de una misma variable, tanto para los datos de las estaciones TDR como para los datos de la estación meteorológica. En dichas bases de datos las variables son constituidas por cada estación, mientras que las observaciones corresponden a los registros de cada una de ellas. Para imputar datos faltantes se aplicó IM, que utiliza simultáneamente múltiples variables, mediante el paquete MICE del software R. Por la falta de estaciones cercanas y el volumen

de datos que se maneja en la investigación, los métodos utilizados fueron, árboles de clasificación y regresión (CART) y bosques aleatorios (RF) (Campoverde & Urgilés, 2020).

En base a los datos obtenidos, se calculó el porcentaje de desviación (PBIAS), el Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R^2). En base a estos estadísticos se seleccionaron los métodos con mejor desempeño y posterior a ello se imputaron datos faltantes.

3.6.7 Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

En esta sección se aplicó un sumario del análisis estadístico del conjunto de datos. Se presenta valores mínimos, máximos, mediana, media y cuartiles tanto de los datos meteorológicos como de los reflectómetros, tal como se muestra en la Tabla 4.

Medidas estadísticas descriptivas

Desde el punto de vista descriptivo se examinó cada variable del estudio. En la Tabla 5 se presenta los estadísticos calculados para las diferentes variables.

Tabla 5

Estadísticos descriptivos calculados para las diferentes variables

Variable	Unidad	Mínimo	1er.Q	Mediana	Media	3er.Q	Máximo	NA'S
Humedad del suelo	cm ³ cm ⁻³	X	X	X	X	X	X	X
Precipitación	Mm	X	X	X	X	X	X	X
Temperatura del aire	°C	X	X	X	X	X	X	X
Humedad relativa	%	X	X	X	X	X	X	X
Radiación solar	W m ⁻²	X	X	X	X	X	X	X
Velocidad del viento	m s ⁻¹	X	X	X	X	X	X	X

Nota: 1er. Q =Primer Cuartil, 3er. Q = Tercer Cuartil, NA'S = Número de vacíos

Los resultados obtenidos se resumieron para un análisis posterior facilitando la toma de decisiones respecto a la información disponible.

Luego de la evaluación de los datos obtenidos en cada una de las estaciones mencionadas en el ítem anterior, se descartaron los perfiles de las estaciones PR3-UP y CU4-MD por la inconsistencia de valores en la base de datos y el exceso de datos faltantes respectivamente. En la Tabla 6 se muestran los perfiles descartados y aprobados para la aplicación del modelo.

Tabla 6

Perfiles óptimos para la aplicación del modelo

Perfil	Aceptado	Descartado
FR3 – UP	X	
PR3 – UP		X
PR5 – MD	X	
CU4 – MD		X
CU4 – LW	X	

Capítulo 4. Modelación en HYDRUS 1D

4.1. Calibración y modelación en Hydrus 1D

La calibración de los reflectómetros de contenido de humedad de suelo marca CS650 Campbell Scientific, se realizó midiendo simultáneamente la permitividad y el contenido volumétrico de agua a través de la descarga de datos de los sensores instalados en las muestras de suelos intactas de la zona de estudio, recolectadas en campo con tubos PVC (TIGRE Ecuador). De las muestras se extrajeron periódicamente cuatro submuestras (diámetro = ~3 cm, altura = ~7 cm) a partir de las cuales se determinó el contenido volumétrico de agua. Se derivaron cinco ecuaciones de calibración relacionando la permitividad con el contenido volumétrico de agua. La validación independiente de las curvas de calibración, se realizó en muestras no perturbadas (100 cm³) tomadas en el campo durante el período de monitoreo.

Luego de haber graficado los contenidos relativos de humedad en función del tiempo de tránsito del pulso eléctrico (TDR) del sensor, haber ajustado los datos experimentales mediante una ecuación no lineal, se obtuvo las curvas de calibración para el contenido de agua en cada tipo de suelo; como se observa en la Tabla 7 y Figura 9 respectivamente.

Tabla 7*Ecuaciones de calibración de los reflectómetros*

Perfil	Horizonte	Profundidad ¹	Ecuación de calibración	R²
FR3-UP	A	25	$y = 0.2532\ln(x) - 0.1778$	0.9776
	AC	47	$y = 0.2532\ln(x) - 0.1778$	0.9776
	C	58	$y = 0.2799\ln(x) - 0.3626$	0.9917
PR3-UP	A1	28	$y = 0.7981\ln(x) - 2.2304$	0.9365
	A2	49	$y = 0.7981\ln(x) - 2.2304$	0.9365
PR5-MD	A	20	$y = 0.7981\ln(x) - 2.2304$	0.9365
	AC	50	$y = 0.4582\ln(x) - 1.1139$	0.9787
	C	73	$y = 0.2799\ln(x) - 0.3626$	0.9917
CU4-MD	A	12	$y = 0.5846\ln(x) - 1.5346$	0.9596
	C	28	$y = 0.2799\ln(x) - 0.3626$	0.9917
CU4-LW	A	11	$y = 0.5846\ln(x) - 1.5346$	0.9596
	C	35	$y = 0.2799\ln(x) - 0.3626$	0.9917

Nota: ¹ Profundidad-Unidades: centímetros [cm]. ² x es la permitividad medida a partir de reflectómetros de contenido de agua, * Ecuación adaptada a los datos observados.

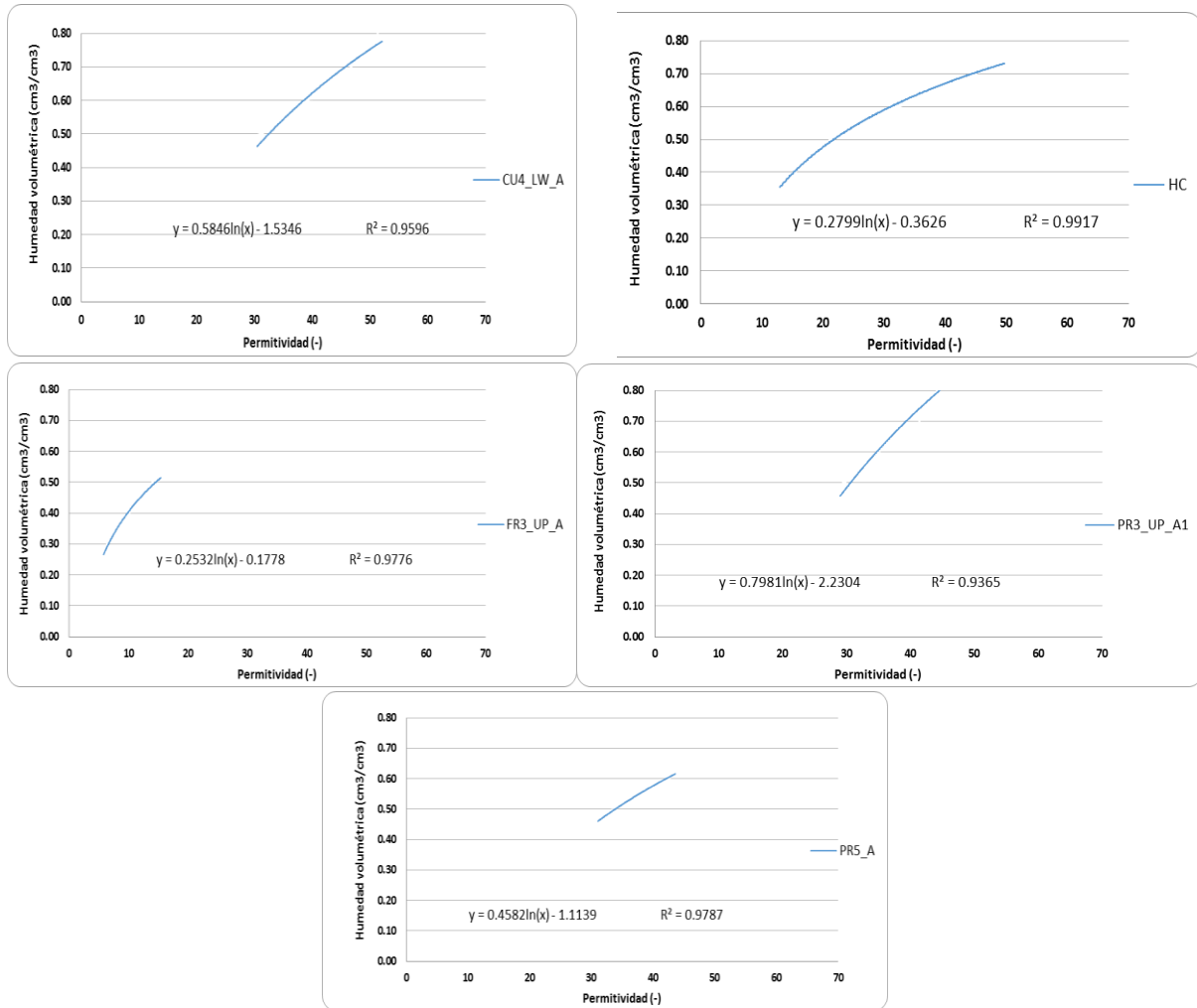


Figura 9.
Curvas de calibración

En la Figura 10. se muestra la comparación entre las graficas de las curvas de calibración que viene predeterminada en los TDRs y las curvas ajustada en el presente estudio para los diferentes perfiles de suelo, cuyos valores fueron obtenidos en laboratorio. Como se puede observar las curvas con linea roja están mas arriba de las curvas con linea negra, esto debido a que los sensores vienes predeterminados para suelos minerales y no orgánicos por lo que los valores están por debajo de los valores calibrados.

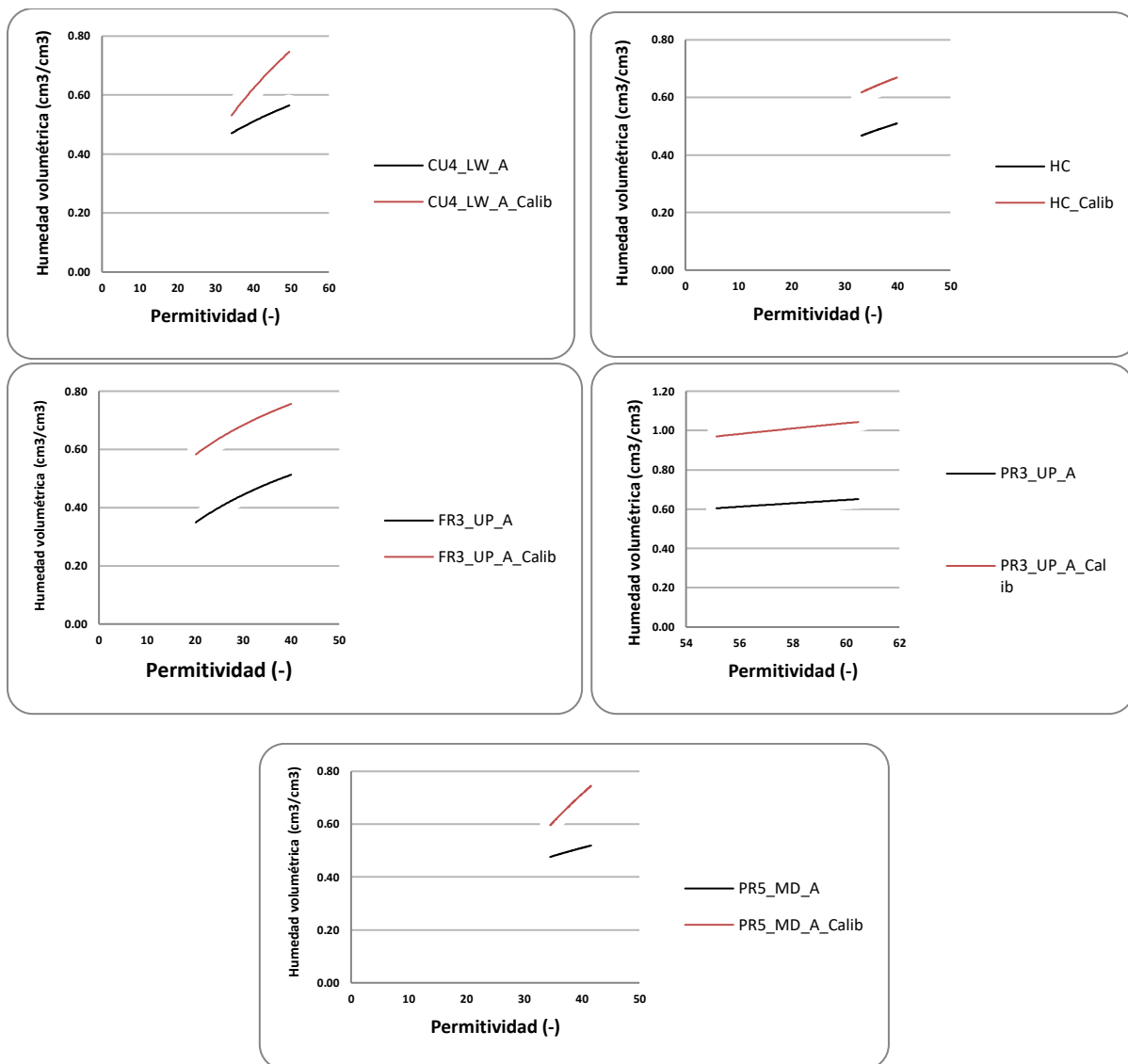


Figura 10

Curvas de calibración de TDR predeterminadas y ajustadas

4.2. Modelo Hydrus 1D

La modelación de la hidrología del suelo en los diferentes perfiles se realizó utilizando el modelo unidimensional HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2018) para el período comprendido entre junio de 2022 y mayo de 2023. Se empleó el modelo unimodal de van Genuchten - Mualem para representar las funciones de retención de agua y conductividad hidráulica (Priesack y Durner, 2006; Dettmann et al., 2014) del suelo en una dimensión considerando únicamente el flujo vertical del agua. La condición de límite superior se fijó en un límite atmosférico con escorrentía superficial y el límite inferior en drenaje libre. El modelo se configuró para ejecutarse en un intervalo de tiempo diario con un período de calibración de un año hidrológico (01/06/2022 al 31/05/2023). Posterior a la calibración del modelo, se

realizó una modelación inversa para el mismo período de calibración mediante el algoritmo de Marquardt-Levenberg (Šimůnek y Hopmans, 2002) basado en el contenido volumétrico de agua del suelo observados y simulado a dos y tres profundidades según corresponde a cada uno de los perfiles.

4.3. Ecuaciones rectoras y configuración del modelo

El modelo representa el movimiento del agua, los solutos y el calor en un medio poroso rígido de saturación variable. En el presente estudio se simula en una dimensión el flujo vertical del agua. La ejecución del modelo resuelve la ecuación de Richards para flujo vertical (Páez et al., 2022).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad \text{Ecuación 8.}$$

donde, θ es el contenido volumétrico de agua [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$], t es el tiempo [día], x es la coordenada espacial, K es el nivel insaturado conductividad hidráulica [cm día^{-1}], h es la altura matricial [cm], positiva hacia arriba [cm], el ángulo α en flujo vertical corresponde a 0 y S corresponde al sumidero, en este caso corresponde a entradas horizontales por las raíces de las plantas, valor que no se tienen en cuenta para el área de estudio. La ecuación se puede resolver ingresando las condiciones iniciales, de contorno y definiendo los parámetros hidráulicos del suelo; conductividad hidráulica saturada (K_s), contenido de agua residual (θ_r), contenido de agua de saturación (θ_s), parámetros empíricos α y n , además de un factor τ referente a la tortuosidad macroscópica de la conductividad determinada en 0.5 para suelos con contenido de carbono orgánico $\leq 18\%$ (Páez et al., 2022), el suelo en estudio presentó un contenido de carbono orgánico de 11.99% en el horizonte superior (A) (Contreras & Fernández, 2021). Para proporcionar los parámetros iniciales de la función hidráulica del suelo, primero, se realizó la función unimodal de van Genuchten (van Genuchten, 1980). Se realizó el modelado inverso para optimizar las propiedades hidráulicas del suelo observadas (K_s , θ_r , θ_s) y los parámetros empíricos (α , n), los cuales se ajustan basándose en los contenidos de agua del suelo observados a tres profundidades para bosque y pajonal y dos profundidades para almohadilla. Con el fin de obtener un mejor resultado se realizaron tres simulaciones inversas, ajustando diferentes parámetros hidráulicos y empíricos en cada una. Siendo la segunda modelación inversa la de mejor resultado, en la que se trabajó con todos los parámetros y se ajustaron θ_r , θ_s , α (cm^{-1}), n (-) y se mantuvo constante la conductividad hidráulica K_s observada, es decir, no se ajustó este parámetro. Para la ejecución del modelo se obtuvo un valor del coeficiente de Nash aceptable en comparación al modelo directo y los dos inversos adicionales.

Los perfiles del suelo se representaron desde el horizonte A hasta el C. Los modelos se construyeron con 2 o 3 capas según corresponda a cada uno de los perfiles. Los nodos de observación se ubicaron en correspondencia con la distribución de los reflectómetros de contenido de agua instalados en el campo para cada horizonte en los diferentes perfiles. Como se mencionó anteriormente, las condiciones del límite superior e inferior como se observa en la Figura 12. se definió para la primera condición como límite atmosférico con escorrentía superficial, siendo representado por la precipitación en escala diaria y la evapotranspiración potencial (ETP) calculada en el modelo con base en la ecuación de Penman-Montheith a partir de variables medidas desde la estación meteorológica de Quimsacocha y la estación pluviométrica de la red ParamoSus (Páez et al, 2022). Para la condición de límite inferior se definió como drenaje libre tomando en cuenta la ausencia del nivel freático del agua en el área de estudio (Amay, 2018).

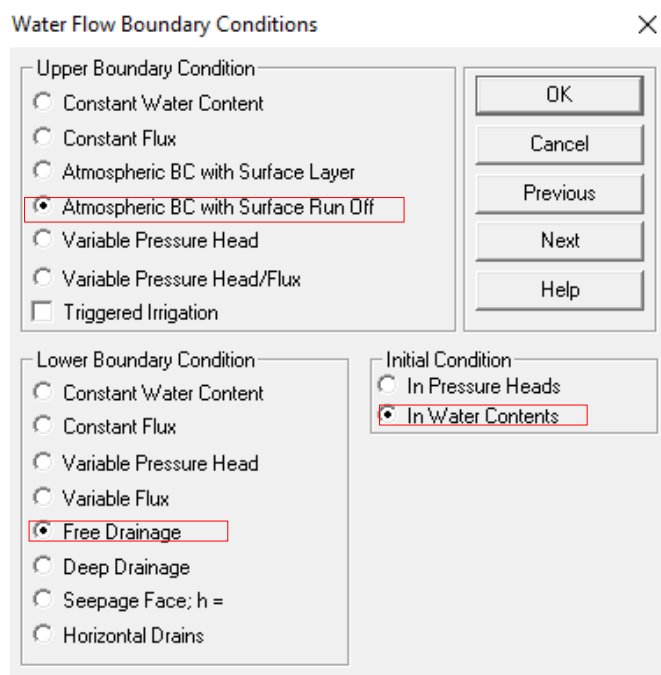


Figura 11

Condiciones de frontera del modelo.

Fuente. Software Hydrus 1D

Las condiciones iniciales se establecieron como contenido de agua y se obtuvieron en base a la humedad del suelo observada y la función de retención de agua. El modelo se configuró para ejecutarse diariamente durante el período de calibración comprendido entre el 01/06/2022 y el 31/05/2023.

La bondad de ajuste para los resultados obtenidos de la aplicación del modelo para el período de calibración se evaluó mediante 3 parámetros, el Porcentaje de sesgo (PBIAS), Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), uno de los criterios más empleados para la evaluación del desempeño de modelos hidrológicos basados en datos observados (Gupta et al, 2009) y el coeficiente de determinación (R^2). En la Tabla 8 se muestran los rangos de valores y la clasificación para cada uno de ellos.

Tabla 8

Criterios de la evaluación del desempeño del modelo, rangos y clasificación

PBIAS	NSE	R2	Clasificación
PBIAS < ± 10	0.75 < NSE < 1.00	0.75 < $R^2 \leq 1.00$	Muy bueno
$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$	0.65 < NSE < 0.75	0.60 < $R^2 \leq 0.75$	Bueno
$\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$	0.50 < NSE < 0.65	0.50 < $R^2 \leq 0.60$	Satisfactorio
PBIAS > ± 25	NSE < 0.50	0.25 < $R^2 \leq 0.50$	Insatisfactorio

Nota: Información recuperada de Cevallos, G. 2023., Amay, E. 2018., Gupta et al, 2009 y Moriasi, Arnold et al., 2007.

Para evaluar la influencia de la cobertura vegetal correspondiente a cada uno de los perfiles de este estudio en la distribución del agua, se estableció un balance hídrico del suelo ($\Delta S = P - ET_a - D$). Los valores de los componentes del balance hídrico del suelo se obtuvieron tanto en escala de tiempo diario como anual: precipitación (P), evapotranspiración real o actual (ET_a), almacenamiento de agua en el suelo (ΔS) y drenaje profundo (D). La precipitación corresponde a la empleada en el modelo, la ET_a se obtuvo como un parámetro de los archivos de salida que ofrece el modelo, el parámetro se denomina Flujo límite superior real (tasa de evaporación real), obtenida a partir de la evapotranspiración potencial (ET_o , calculada en el modelo con la ecuación combinada de Penman-Monteith), de acuerdo con la presión superficial y la humedad del suelo. El drenaje profundo corresponde al flujo de agua en el nodo más profundo del perfil.

Capítulo 5. Resultados y discusión

Aplicación del modelo Hydrus 1D

Calibración

Los parámetros hidráulicos del suelo ajustados durante la calibración del modelo que derivaron en mejores resultados en el rendimiento del mismo, fueron: θ_r , θ_s , α y n . Los valores ajustados en el modelo se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Parámetros Hidráulicos ajustados en el modelo

Perfil	Horizonte	θ_r	θ_s	α^1	n
FR3-UP	A	0.24	0.70	0.0068	1.10
	AC	0.15	0.71	0.027	1.05
	C	0.49	0.57	0.0171	1.29
PR5-MD	A	0.60	0.76	0.01	2.31
	AC	0.23	0.57	0.039	1.11
	C	0.350	0.727	0.002	1.260
CU4-LW	A	0.422	0.795	0.0038	1.010
	C	0.374	0.730	0.0103	1.180

Nota: $^1\alpha$ - Unidades: uno sobre centímetros [1 cm^{-1}]

Después de la calibración del modelo Hydrus-1D con el enfoque unidimensional de Van Genuchten – Maulem basado en los contenidos volumétricos de agua del suelo (VWC por sus siglas en inglés) observados y simulados; los criterios de bondad de ajuste y la clasificación para los resultados obtenidos de la aplicación del modelo para el período de calibración se muestran en la Tabla 10. A manera general, para el parámetro PBIAS (porcentaje de sesgo), todos los horizontes definidos en cada perfil corresponden a una clasificación de “Muy bueno”. Los valores varían entre -1.1 a 7.5. No obstante, para los parámetros NSE (índice de eficiencia) y R^2 (coeficiente de determinación), el rendimiento del modelo disminuye considerablemente con valores entre -12.17 a 0.58 y de 0.32 a 0.66 respectivamente.

Para el horizonte A del perfil de suelo PR5-MD correspondiente a vegetación de pajonal, se obtuvieron los resultados más favorables en el rendimiento del modelo alcanzando una

clasificación de “Muy satisfactorio”. Sin embargo, para los demás horizontes, PBIAS cuenta con un sesgo de sobre estimación del modelo, en especial, para los horizontes AC y C por los valores negativos obtenidos (Moriasi et al., 2007). En cuanto al criterio NSE, se alcanzó una clasificación de “Insatisfactorio” para todos los horizontes de este perfil, compartiendo tal clasificación con el perfil de suelo en almohadilla. Finalmente, para el coeficiente de determinación (R^2) se alcanza una clasificación en dos categorías diferentes: “Bueno” e “Insatisfactorio” con valores de 0.61 para el horizonte A, 0.63 para horizonte AC y 0.32 para horizonte C, siendo este el valor más bajo para este criterio en todo el modelo. Estos resultados muestran que las estimaciones del enfoque inverso en su mayoría no son estables para el perfil de suelo de pajonal y almohadilla, muy al contrario de las estimaciones obtenidas para el perfil de bosque nativo que presenta resultados favorables.

Tabla 10

Criterios de bondad de ajuste del modelo

PBIAS				NSE			R^2		
Horizonte	FR3_UP	PR5_MD	CU4_LW	FR3_UP	PR5_MD	CU4_LW	FR3_UP	PR5_MD	CU4_LW
A	0.60	-0.1	7.50	0.52	0.38	0.68	0.59	0.61	0.54
AC	0.30	-0.30	-	0.54	-1.06	-	0.62	0.63	-
C	0.20	-1.1	2.20	0.58	-12.17	6.29	0.66	0.32	0.37
Clasificación	Muy bueno			Satisfactorio	Insatisfactorio		Satisfactorio/ Bueno/ Bueno	Bueno/ Bueno/ Insatisfactorio	Satisfactorio/ Insatisfactorio

El error del balance de masa en la solución numérica del modelo fue inferior al 1.2 % para el perfil del bosque FR3-UP, 1.5% para pajonal PR5-MD y 1% para la almohadilla CU4-LW.

En la Figura 12 se muestra gráficamente los valores observados y simulados de humedad del suelo para el periodo de calibración.

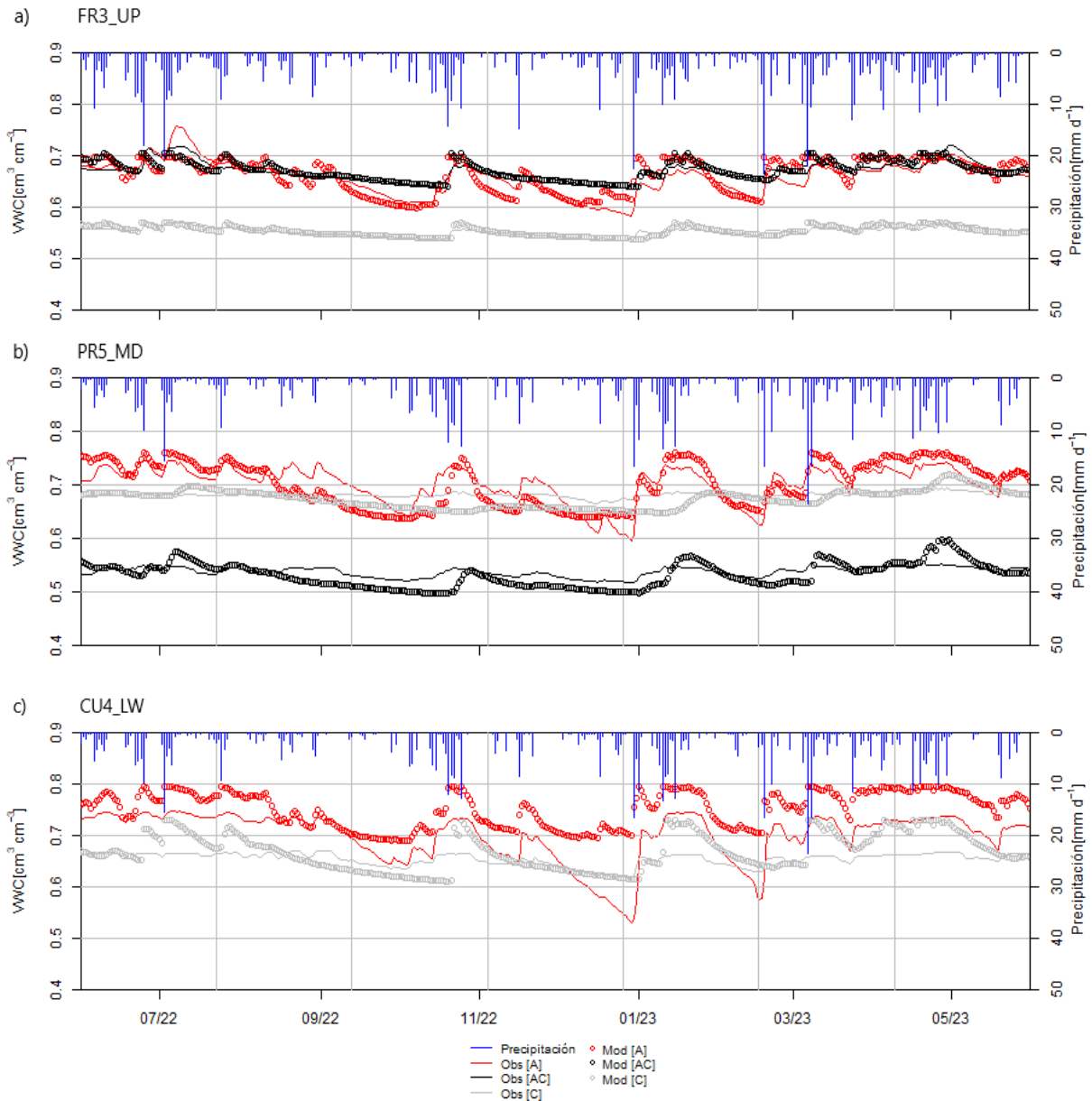


Figura 12

Datos de contenido volumétrico de agua observados y simulados para las estaciones FR3-UP, PR5-MD y CU4-LW.

La humedad del suelo (contenido volumétrico de agua VWC) varió según la profundidad de cada horizonte. Para los tres perfiles, tanto para el perfil de bosque, almohadilla y pajonal, la humedad media anual del suelo es mayor en el horizonte A ($0.7057 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), disminuye en el horizonte AC ($0.6019 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), en el caso de los perfiles de bosque y pajonal y presenta un ligero aumento en el horizonte C respecto al AC ($0.6320 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Los estadísticos descriptivos de la humedad observada y simulada para cada horizonte de suelo se detallan en la Tabla 11. Aquí, se obtiene que la humedad simulada es ligeramente mayor a la humedad observada, lo que justifica la realidad del modelo.

Tabla 11

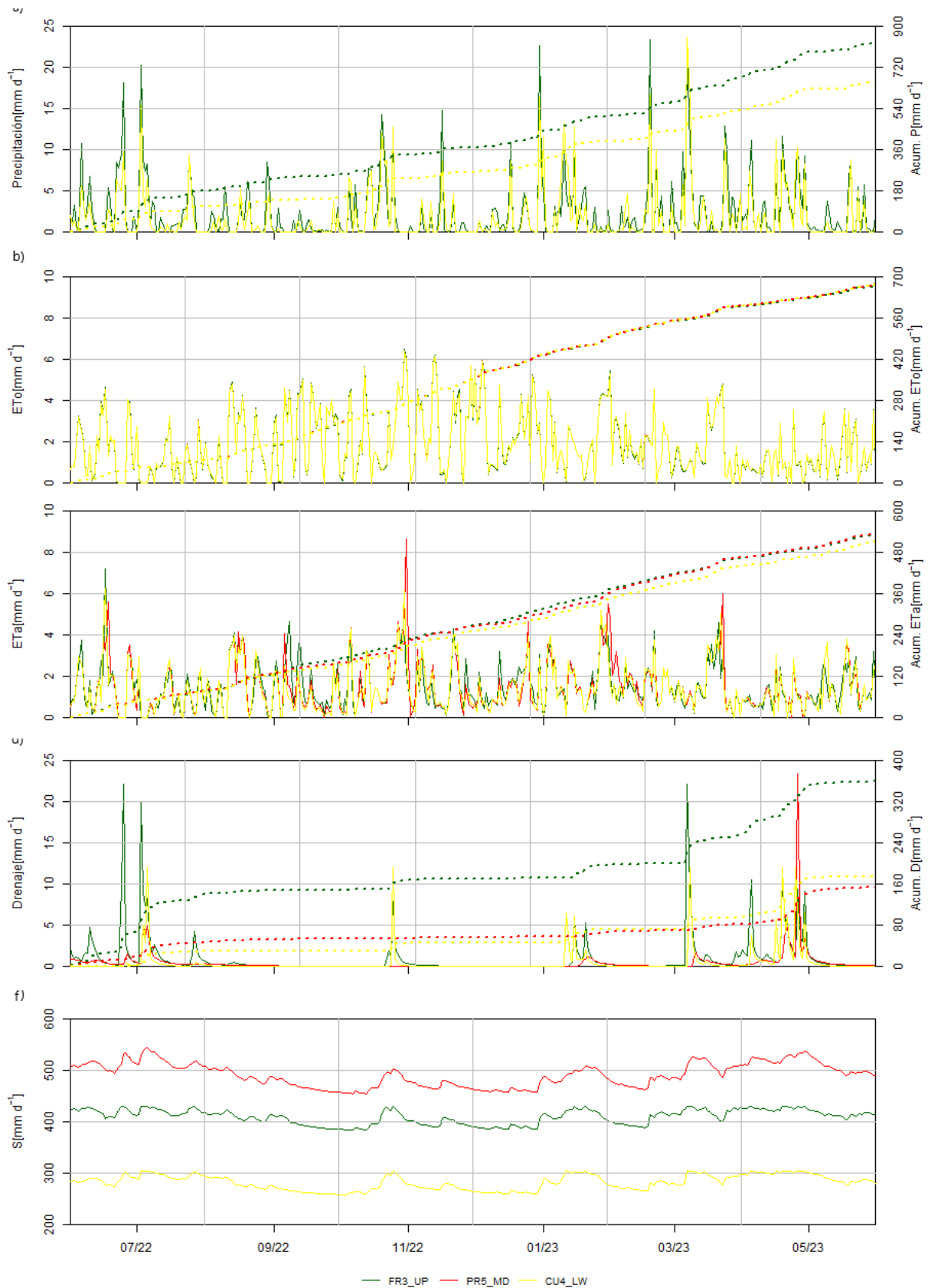
Estadísticos descriptivos de la humedad (01/06/2022 - 31/05/2023) observada y simulada por horizonte del suelo

Horizonte	Variable	Mínimo	1er Q	Mediana	Media	3er Q	Máximo
A	VWC Observada	0.5310	0.6595	0.6917	0.6870	0.7247	0.7563
	VWC Modelada	0.5989	0.6698	0.6975	0.7057	0.7497	0.7950
AC	VWC Observada	0.5171	0.5403	0.5964	0.6040	0.6709	0.7193
	VWC Modelada	0.4976	0.5329	0.6192	0.6019	0.6703	0.7060
C	VWC Observada	0.5335	0.5577	0.6582	0.6295	0.6794	0.6957
	VWC Modelada	0.5382	0.5625	0.6525	0.6320	0.6814	0.7301

Nota: 1er. Q = Primer Cuartil, 3er. Q = Tercer Cuartil,

Balance hídrico del suelo

Para el balance hídrico del suelo de cada uno de los perfiles se comparó la base de la serie temporal (entre junio de 2022 y mayo de 2023) de precipitación (P), evapotranspiración real o actual (ETa), drenaje (D) y almacenamiento de agua del suelo (S) a escala diaria y acumulada anual como se observa en la Figura 13.



Nota. (a) Precipitación (P), (b) evapotranspiración potencial (ETp), (c) evapotranspiración actual o real (Eta), (d) Drenaje (D), (e) almacenamiento de agua (S). La línea roja, verde y amarilla representan a los perfiles PR5-MD, FR3-UP y CU4-LW respectivamente.

Figura 13

Balance del contenido de agua en el suelo a escala diaria.

Las precipitaciones, aunque presentan una distribución más o menos uniforme durante todo el tiempo de este estudio, los valores medios anuales (2022-2023) variaron significativamente entre el perfil de bosque y los perfiles de pajonal y almohadilla (826.1 mm para FR3-UP y 651.8 mm para PR5-MD y CU4-LW) respectivamente. Para la precipitación en la zona de bosque, se descargaron datos del primer pluviómetro ubicado en la zona alta de la cuenca, mientras que para las estaciones PR5-MD y CU4-LW se descargaron del segundo pluviómetro ubicado en la zona baja la cuenca. A pesar de que los pluviómetros de los cuales se obtuvieron los datos de precipitación se encuentran a una distancia de 2 km aproximadamente, la diferencia en la topografía y viento en la zona baja pueden influir en la variación de aproximadamente 174.3 mm de precipitación. Tal como lo cita Buytaert (2004) los eventos de lluvia en el páramo son típicamente de frecuencia alta y de baja intensidad, además sumado a la combinación de vientos fuertes y diferencia topográfica (sombra de lluvia) puede resultar en una alta variabilidad espacio temporal de la lluvia y de grandes errores en el registro de la precipitación.

La intensidad de las precipitaciones diarias alcanzó hasta los 23.4 mm día⁻¹ en el perfil FR3-UP y 23.6 mm día⁻¹ para los perfiles PR5-MD y CU4-LW.

Existen diferencias notables en la distribución del agua media anual y el equilibrio hídrico del suelo entre los perfiles de suelo bajo cobertura vegetal de bosque, pajonal y almohadilla, tal como se indica en la Tabla 12.

Tabla 12

Balance hídrico medio anual (junio 2022 - mayo 2023) y porcentaje correspondiente de entrada de lluvia

Perfil	P [mm]	ETP [mm]	ETR [mm]	D [mm]	ΔS [mm]	ETa [mm d ⁻¹]
FR3_UP	826.10	670.45 (81.5)	533.95 (64.6)	359.22 (43.5)	-67.07 (8.1)	1.46
PR5_MD	651.80	674.14 (103.42)	537.89 (77.9)	153.63 (24.73)	-39.72 (6.09)	1.39
CU4_LW	651.80	673.94 (103.40)	512.13 (78.57)	173.85 (26.67)	-34.18 (5.24)	1.40

Con excepción de la evapotranspiración real (ETa) media anual que presenta diferencias poco significativas entre los diferentes perfiles de suelo, en las demás variables se observa todo lo contrario.

La constante presencia de niebla en la zona de estudio puede influir en bajos valores de evapotranspiración. En los páramos, la niebla ayuda reducir el efecto de la radiación solar en el suelo y a mantener una alta humedad relativa del aire, lo que a su vez limita las pérdidas de agua por evapotranspiración (Berrones et al., 2022).

A nivel de perfil, la evaporación potencial es mayor en el perfil de bosque, con máximos de 1.46 mm día^{-1} y para almohadilla y pajonal los valores son 1.4 y 1.39 respectivamente. Estos valores difieren a lo encontrado por Amay en 2018 para la misma zona de estudio, cuyo valor máximo se encontró en el perfil de almohadilla (1.88 mm día^{-1}), (1.75 mm día^{-1}) pajonal y (1.59 mm día^{-1}) bosque. Las diferencias encontradas en este caso de estudio con Amay pueden explicarse debido a que en el modelo no se incorporó parámetros morfológicos de cada vegetación.

La explicación de que ETa es mayor para almohadilla que pajonal, puede deberse a que como se menciona en (Páez et al., 2022), los suelos bajo vegetación de almohadilla son más propensos a la evapotranspiración que el pajonal esto debido a la exposición directa de la capa superior del suelo de las almohadillas a la radiación solar, mientras que las plantas de pajonal limitan esta exposición produciendo un efecto de sombra con sus hojas.

Otra de las variables analizadas para el balance hídrico es el drenaje, en donde se observa que el promedio anual del drenaje profundo (D) es mayor en el perfil de bosque (359.22 mm) a comparación del perfil de suelo bajo almohadilla (173.85 mm) y pajonal (153.63 mm). El drenaje profundo en los tres perfiles no es estable en el tiempo, se visualiza una variación significativa respecto a las precipitaciones. Se observa una relación directa entre los valores de drenaje profundo con los valores de la precipitación; a periodos más intensos de lluvia el drenaje también será mayor.

Por otro lado, el almacenamiento de agua en el suelo (S) presenta una dinámica similar en los tres perfiles de suelo, tal como se indica en la Tabla 12 mostrando un mayor rango para el perfil de bosque (-67.07 mm) en comparación con el perfil de pajonal (-39.72 mm) y almohadilla (-34.18 mm). Encontrándose que estos resultados están de acuerdo a lo encontrado por (Amay, 2018) en donde se indica que los suelos bajo la vegetación de bosque presentan una capacidad de almacenamiento de agua hasta 10% mayor que en suelos formados bajo las coberturas de páramo y almohadilla. La diferencia de almacenamiento de

agua entre las coberturas de bosque con las demás coberturas de vegetación puede ser conferida al tipo y a la intercepción del follaje.

El bosque al tener especies variadas de árboles y arbustos caracterizadas por tener hojas y ramas anchas interceptan la precipitación e influyen a que llegue mayor cantidad de agua en el suelo. Proceso casi inexistente o que no se observa en suelos con cobertura de páramo y almohadillas que están constituidas por una vegetación pequeña (Amay, 2018). Además, las raíces de los árboles confieren una alta porosidad al suelo por lo tanto el agua infiltra de mejor manera llenando los poros y permitiendo mayor cantidad de agua almacenada. Dado que el perfil de bosque tiene mayor profundidad a comparación del pajonal y almohadilla la infiltración a las zonas más profundas es lenta.

Un punto importante a tener en cuenta es que a pesar de que el bosque presenta un mayor almacenamiento de agua, en las simulaciones con el modelo los resultados para bosque y almohadilla no fueron muy buenos o satisfactorios; siendo la cobertura de pajonal el perfil de suelo con mejores resultados en el modelo. Por lo tanto, se debe considerar que el modelo podría estar subestimando la alta capacidad de almacenamiento de la almohadilla debido al pobre ajuste alcanzado en la simulación bajo esta cobertura vegetal. Un estudio hecho por Páez en 2022 utilizando Hydrus-1D para simular el flujo de agua y nitratos en el suelo de páramo en el norte del Ecuador, específicamente en el Antisana donde obtuvo resultados satisfactorios para los dos tipos de cobertura vegetal (pajonal y almohadilla), indicaría una de las limitaciones que existe en el modelo y es la diferencia en la variación de profundidad del perfil de suelo. Los suelos del páramo en el sur del Ecuador generalmente presentan poca profundidad más o menos homogénea de 0.5 m, cubriendo roca madre metamórfica (FAO). En el caso del perfil bajo cobertura de almohadilla para este estudio la profundidad del horizonte A no supera los 0.35 m, mientras que en el estudio de Páez la profundidad varía de entre 0.7 a 1 metro, debido a los procesos eruptivos típicos en la región. Entonces, se podría inferir que Hydrus-1D podría dar mejores resultados de simulación para perfiles de suelo no saturados con profundidades cercanas a 1 metro.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados confirman que, gracias a las propiedades físicas del suelo de páramo, su alta porosidad, la baja densidad aparente y la presencia de gran cantidad de materia orgánica, el suelo de páramo bajo las tres coberturas vegetales (pajonal, almohadilla y bosque Polylepis) presenta buena permeabilidad y gran capacidad de retención de agua especialmente en suelo bajo cobertura de bosque de Polylepis.

Considerando el índice de error PBIAS, empleado en la modelación inversa se alcanzó resultados aceptables en la simulación del contenido de agua en el suelo bajo cobertura de pajonal. El estudio revela que el almacenamiento de agua tiene un comportamiento similar bajo las tres coberturas vegetales, sin embargo, el suelo bajo cobertura de bosque estaría almacenando un 3 % más de agua en comparación con la almohadilla y el pajonal.

Las correlaciones obtenidas entre los valores medidos por los TDR y lo simulado por el Software HYDRUS-1D fueron muy bajas. Considerando que al ser una modelación 1D el efecto de la topografía es despreciado y los procesos del movimiento del agua a lo largo de la pendiente son ignorados por el modelo, la topografía jugó un papel muy importante en las diferencias de precipitación detectadas por los dos pluviómetros a pesar de encontrarse en la misma cuenca. Lo que indica que es necesario incorporar al estudio un análisis más profundo sobre la influencia de procesos como la intercepción de la niebla y nubes en ecosistemas de páramo que a menudo no están incorporados en los modelos hidrológicos.

Teniendo en cuenta que en la zona existen muy pocos estudios respecto al tema, así como de la implementación de sondas TDR para la medición de humedad en suelos altoandinos, es necesario incorporar al modelo el efecto del follaje y parámetros morfológicos de cada vegetación para evitar la subestimación en los perfiles de suelo.

Finalmente, esta investigación, supone un importante aporte al conocimiento científico de los ecosistemas de páramo. La información presente en este documento, podría ser utilizada dentro de los planes y proyectos relacionados con la seguridad hídrica y la gestión sostenible del agua dentro de la zona de estudio, además de ayudar en la planeación de futuras investigaciones dentro del eje de la modelación hidrológica y geoquímica.

Recomendaciones

- Una de las limitaciones del estudio se relaciona principalmente con las bases de datos analizadas, donde la información de los sensores temporales de variables de viento, temperatura y radiación solar observados, no se encuentran actualizados y muchos

de ellos incompletos por fallos en los sensores, se recomienda que se use datos más actuales de las estaciones meteorológicas.

- Debido a la falta de estudios en la zona se recomienda levantar información con mayor cantidad de puntos de monitoreo y bajo condiciones de pendiente semejantes para comprobar su relación.
- El software Hydrus -1d requiere un gran número de parámetros de entrada por falta de validación de las condiciones de campo, presenta limitaciones para la simulación de la humedad de suelo bajo coberturas de pajonal y almohadilla. Se recomienda el uso de otros programas para la comparación y validación del mismo específicamente en suelo de páramo, ya que el modelo se limita a simular únicamente suelos que se encuentra parcialmente saturados.

Referencias

- Adibah, F., Rijal, K., Azman, W., & Miskon, S. (2021). A Review of Current Publications Trend on Missing Data Imputation Over Three Decades: Direction and Future. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-996596/v1>
- Amay, E. (2018). Modelación del flujo de agua y nitrato en el suelo de la microcuenca Cuevas en el sur de los Andes ecuatorianos empleando Hydrus 1D. [Doctoral dissertation, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional - Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31129/1/Tesis.pdf>
- Asanza, J., & Barahona Méndez, J. A. (2015). Impacto de la cobertura vegetal y las actividades antrópicas sobre la formación del suelo en una microcuenca de páramo en la cuenca del Río Yanuncay-Quebrada Cuevas [Bachelor thesis, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional - Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21930>
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., & Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA*. Quito, 14-150.
- Berrones, G., Crespo, P., Ochoa-Sánchez, A., Wilcox, BP y Céleri, R. (2022). Importancia de los aportes de niebla y agua de nubes a la humedad del suelo en el Páramo Andino. *Hidrología*, 9 (4), 54.
- Bittelli, M. (2011). Measuring Soil Water Content: A Review. *IPC Print Services*, 21(3). <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.293>
- Blume, T., Zehe, E., & Bronstert, A. (2009). Use of soil moisture dynamics and patterns at different spatio-temporal scales for the investigation of subsurface flow processes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1215–1233. doi:10.5194/hess-13-1215
- Boulard, D., Castel, T., Camberlin, P., Sergent, A., Bréda, N., Badeau, V., Pohl, B. (2016). Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation: a case study over northeastern France. *Climate Dynamic*, 46. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-015-2724-9>
- Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, B. D., & Cisneros, F. (2014). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. <https://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/Hidroparamo2.pdf>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G. y Deckers, J.: El uso del concepto de embalse lineal para cuantificar el impacto de los cambios en el uso de la tierra en la hidrología de las cuencas de los Andes, *Hydrol. Sistema Tierra. Sci.*, 8, 108–114, <https://doi.org/10.5194/hess-8-108-2004>, 2004.
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., Bievre, D., Poesen, J., & Govers, G. (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. doi: doi: 10.1111/j.1475-2743.2002.tb00226.x.

- Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. D. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2), 22–30. doi:10.1016/j.foreco.2007.06.035
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 1(1).
- Cáceres, J. (2020). Los páramos de la parte altoandina de la reserva de la biosfera macizo del Cajas (Ecuador): gestión para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos. [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona]. Repositorio digital de documentos de la UAB
- Caicedo, L., Méndez, F., Gutiérrez, E., & Flores, J. (2021). Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características. *Pádi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(17), 1-8.
- Cardoso, T., Constantino, M., Cabral, J., Bergson, B., & Tôrres, D. (2022). Climate and water balance influence on agricultural productivity over the Northeast Brazil. Artículo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1445346/v1>
- Campoverde, H. & Urgilés, C. (2020). Análisis espacio-temporal meteorológico en una cuenca andina tropical del sur de Ecuador. [Bachelor thesis, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional - Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35041/1/Trabajo%20de%20Titulacion.pdf>
- Castañeda, A., & Montes, C. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1). <https://dx.doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Catimay, Jeniffer Tabares, Martínez, Laura Marely Gallo y Muñoz, Néstor Alonso Mancipe. (2019). Modelación del desempeño hidrológico de techos verdes en ciudades andinas tropicales usando SWMM. *Producción + Limpia*, 14 (1), 46-60. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a2>
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives. doi: doi: <http://dx.doi.org/10.1659/mrd.00007>.
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cer*, 9(2). <https://www.researchgate.net/publication/344180955>
- Cleves, J. A., Toro, J., & Martínez, L. F. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 149-163.
- Condo, A. & Juella, M. (2019). Análisis del Comportamiento Hidrológico y Estado Actual del Recurso Hídrico en las Cuencas del Rio Tomebamba y Yanuncay Durante el Año 2015 [Unpublished mastersthesis]. Universidad de Cuenca

- Contreras Arévalo, T. A., & Fernández Zhinín, R. F. (2021). Análisis de la variabilidad espacial en el desarrollo del suelo y su relación con el almacenamiento de carbono en una microcuenca en el sur del Ecuador: Interacción de la cobertura vegetal y topografía (Bachelor's thesis, Universidad de Cuenca).
- Curtis, J., Flint, L., & Stern, M. (2019). A Multi-Scale Soil Moisture Monitoring Strategy for California: Design and Validation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 55(3). <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12744>
- Daly, E., & Porporato, A. (06 de 2006). Impact of hydroclimatic fluctuations on the soil water balance. *Water Resources Research*, 42(6). doi:10.1029/2005WR004606
- Dávila, Emilia. (2010). Influencia en la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo. [Bachelor thesis, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio Digital- USFQ <https://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1070>
- Díaz, L. (2018). Influencia de la cobertura vegetal en los caudales de agua de un ecosistema bosque andino en el sur del Ecuador (Master's thesis, Universidad Estatal Amazónica).
- Díaz, M., Navarrete, J., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *rev.ing.*, 22. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200008
- Dong, K., & Guo, T. (2021). A Literature Review of Spatio-temporal Data Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1792(1). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1792/1/012056>
- Dumkhana, B., Emmanuel, G., Ntesat, U., & Miebaka, o. (2022). Design and Construction of a Small Scale Combined Weighing and Non-Weighing Lysimeter. *Journal of Scientific Research and Reports*, 28(9). doi:10.9734/jsrr/2022/v28i930548
- Functional model of water balance variability at the catchment scale: 1. Evidence of hydrologic similarity and space-time symmetry. (2011). *Water Resources Research*, 47(2). doi:10.1029/2010WR009568
- Gualpa, M. (2014). Protocolo de control de calidad de datos hidrometeorológicos de la red de etapa. Programa de Monitoreo y Vigilancia de Recursos Hídricos y de Clima Sub Gerencia de Gestión Ambiental.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 80-91.
- He, Y. (2010). Missing Data Analysis Using Multiple Imputation. *Primer on Statistical Interpretation or Methods*. doi:10.1161/CIRCOUTCOMES.109.875658
- Hermosilla, Tihare. (2018). Validación de un modelo hidrológico para simular el movimiento del agua en un suelo de la serie Valdivia. [Thesis project, Universidad Austral de Chile] <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2018/fah556v/doc/fah556v.pdf>

- Hidalgo, A. (2019). Técnicas estadísticas en el análisis cuantitativo de datos. *Revista sigma*, 15(1), 28-44.
- Hofstede, R. (1997). La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo. *EcoPar*, Agosto.
- Hofstede, R., Segarra, P., Vásconez, P. (2003). The páramos of the world. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia.
- Huanyuan Wang, Xiaotang Ju, Yongping Wei, Baoguo Li, Lulu Zhao, Kelin Hu (2010). Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain, *Agricultural Water Management*. Volume 97, Issue 10, 2010, Pages 1646-1654, ISSN 0378-3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.022>.
- Kanzari, S., Ben, B., Ben, S., & Rezig, M. (11 de 2018). Hydrus-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia. *Sustainable Environment Research*, 28(6). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468203918301729#bib8>
- Kirkham, M. (2014). Infiltration. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. doi:10.1016/b978-0-12-420022-7.00013-6
- Klute, A. (1986) *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. 2nd Edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Ko, H., Choo, H., & Ji, K. (2023). Effect of temperature on electrical conductivity of soils – Role of surface conduction. *Engineering Geology*, 321. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795223001655>
- Komorowski, M., Marshall, D., Saliccioli, J., & Crutain, Y. (2016). Chapter 15 Exploratory Data Analysis. (Springer, Ed.) Cham (CH). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK543641/>
- Kumar, A., Thapa, A., & Gautam, H. (2019). Solar Radiation, Air Temperature, Relative Humidity, and Dew Point Study: Damak, Jhapa, Nepal. *International Journal of Photoenergy*. <https://doi.org/10.1155/2019/8369231>
- Lakshmi, V., Jackson, T., & Zehrhuhs, D. (2003). Soil moisture–temperature relationships: results from two field experiments. *hydrological processes*, 17. <https://naldc.nal.usda.gov/download/47946/PDF>
- Lekshmi, S., & Shojaei, M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Liu, X. (2016). Introduction. *Methods and Applications of Longitudinal Data Analysis*. doi:10.1016/b978-0-12-801342-7.00001-0
- Liu, X., He, Y., Zhao, X., Zhang, T., Zhang, L., Ma, Y., Wei, S. (2015). Characteristics of deep drainage and soil water in the mobile sandy lands of Inner Mongolia, northern China.

- Journal of Arid Land, 7. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40333-014-0095-4>
- Liu, Z. (08 de 2022). Estimating land evapotranspiration from potential evapotranspiration constrained by soil water at daily scale. *Science of The Total Environment*, 834. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155327>
- Llambí, L., Soto, A., Célleri, R., Bievre, B. D., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino*. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56480.pdf>
- Loaiza, J., & Pauwels, V., (2011). Development of hydrological models and surface process modelization Study case in High Mountain slopes. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 23-32.
- López, M. P. (2012). *Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Lund, B., & Ma, J. (2021). A review of cluster analysis techniques and their uses in library and information science research: k-means and k-medoids clustering. *Performance Measurement and Metrics*, 22(3). <https://doi.org/10.1108/PMM-05-2021-0026>
- Madhugiri, D. (2023). *Exploratory Data Analysis (EDA): Types, Tools, Process*. Recuperado el 17 de 06 de 2023, de *Exploratory Data Analysis (EDA): Types, Tools, Process*: <https://www.knowledgehut.com/blog/data-science/eda-data-science>
- Méllo, A., Osorio, L., Billerbeck, O., & Marcellini, P. (2022). Rainfall Runoff Balance Enhanced Model Applied to Tropical Hydrology. *Water*, 14(12). doi:10.3390/w14121958
- Mensegue, H., O.P. Caviglia, A. Degioanni, J. Marcos, E. Bonadeo. (2021). Calibration and validation of soil water balance (SWB) model in the Inner Argentinian Pampas. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 181, 2021, 105892. ISSN 0168-1699. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105892>.
- Molina, A., Vanacker, V., Corre, M. D., & Veldkamp, E. (2019). Patterns in soil chemical weathering related to topographic gradients and vegetation structure in a high Andean tropical ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, 666–685. <https://doi.org/10.1029/2018JF004856>
- Montaldo, N., & Oren, R. (05 de 2018). Changing Seasonal Rainfall Distribution With Climate Directs Contrasting Impacts at Evapotranspiration and Water Yield in the Western Mediterranean Region. *Water Resources Research*, 6(6). <https://doi.org/10.1029/2018EF000843>
- Moreno, V. (2018). *Radiación solar y vapor de agua: implicancias en el ciclo hidrológico y atmósfera terrestre bajo forzamiento radiativo por CO2*. [Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168697>

- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., y Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885–900.
- Morocho, C., & Chunchu, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.
- Nevárez-Favela, M. M., Fernández-Reynoso, D. S., Sánchez-Cohen, I., Sánchez-Galindo, M., Macedo-Cruz, A., & Palacios-Espinosa, C. (2021). Comparación de los modelos WEAP y SWAT en una cuenca de Oaxaca. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(1), 358-401.
- Ni, J., Cheng, Y., Wang, Q., Wai, C. W., & Garg, A. (2019). Effects of vegetation on soil temperature and water content: Field monitoring and numerical modelling. *Journal of Hydrology*, 571. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419301453>
- Nolz, R. (2016). review on the quantification of soil water balance components as a basis for agricultural water management with a focus on weighing lysimeters and soil water senso. *Journal of Land Management, Food and Environment*, 67(3). doi:10.1515/boku-2016-0012
- Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. doi:10.1002/hyp.10980
- Páez, S., Molina, A., Calispa, M., Delmelle, P., Lahuate, B., Villacís, M., Muñoz, T., and Vanacker, V.: Soil-vegetation-water interactions controlling solute flow and transport in volcanic ash soils of the high Andes, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2022-294>, in review, 2022.
- Pal, B., & Samanta, S. (2011). Surface runoff Estimation and Mapping Using Remote Sensing and Geographic Information System. *International Journal of Advances in Science and Technology*, 3(3).
- Pan, B., & Cong, Z. (2016). Information Analysis of Catchment Hydrologic Patterns across Temporal Scales. *Advances in Meteorology*, 1891465. <https://www.hindawi.com/journals/amete/2016/1891465/>
- Patiño, S., Hernández, Y., Plata, C., Domínguez, I., Daza, M., Oviedo, R., & Buytaert, W. (2021). Influence of land use on hydro-physical soil properties of Andean páramos and its effect on streamflow buffering. *CATENA*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105227>
- Pazmiño, M. (2020). Influencia de la intervención en los suelos del páramo de Navag-Chimborazo en el contenido de materia orgánica. [Bachelor thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional - Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14067/1/236T0480.pdf>

- Pinos, D., Morales, O., & Durán, M. (2021). Suelos de páramo: Análisis de percepciones de los servicios ecosistémicos y valoración económica del contenido de carbono en la sierra sureste del Ecuador. *Ciencias Ambientales*, 55(2).
- Podwojewski, P., & Poulénard, J. (2004). Paramos Soils. *Encyclopedia of Soil Science*. <https://core.ac.uk/download/pdf/39843915.pdf>
- Porporato, A., Daly, E., & Rodriguez, I. (2004). Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change. *The American Society of Naturalists*, 164(5). <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/424970>
- Quichimbo, Pablo & Tenorio, Gustavo & Borja, Pablo & Cárdenas, Irene & Crespo, Patricio & Célleri, Rolando. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*. 42. 138-156.
- Rafiei, V., Ghahramani, A., & Mushtaq, S. (2020). Modelling Hydrological Processes and Identifying Soil Erosion Sources in a Tropical Catchment of the Great Barrier Reef Using SWAT. *Water: an open access journal*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/w12082179>
- Rodríguez, C., Garfias, J., Martel, R., Navarro-de León, I., (2023). Estimación espacio-temporal de la distribución de la recarga potencial en el Valle de Toluca: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 75 (2), A080523. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2023v75n2a080523>
- Rodríguez, E. (2016). La afectación de la cobertura vegetal en el balance hídrico de los suelos en la subcuenca hidrográfica del río Agua salud -Panamá. [Tesis de pregrado, Universidad de Cundinamarca Facultad De Ciencias Agropecuarias]. Repositorio ucundinamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/283>
- Ruezzene, C., Parizotto, D., Cidin, A., Pinto, T., Oliveira, D., Miranda, R., & Mauad, F. (2019). Water balance and net radiation in forest and pasture area in Southwest Amazon. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental*, 23(e37). <https://doi.org/10.5902/2236117039840>
- Sánchez, J., Campoy, J., Montoya, F., López, R., Pérez, Y., González, J., Calera, A. (2023). Assessment of remote sensing-based soil water balance and FAO56 dual crop coefficient approach on almond orchards. *EGU23(14257)*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14257>
- Santillán Gutiérrez, E., Davila-Vazquez, G., Sánchez, J. D. A., & Díaz Torres, J. D. J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Água*, 8, 104-117.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, (34-35),13-30.[fecha de Consulta 24 de Mayo de 2023]. ISSN: 0256-7024. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45437342002>

- Serrano, D., & Galárraga, R. (2015). El páramo andino: Características territoriales y estado ambiental. Aportes interdisciplinarios para su conocimiento. *Estudios Geográficos*, LXXV(I). <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201513>
- Short, D., Akbar, R., Feldman, A., Salvucci, G., & Entekhabi, D. (02 de 2020). Terrestrial Evaporation and Moisture Drainage in a Warmer Climate. *Geophysical Research Letters*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2019GL086498>
- Silva, R., Walfi, P., Negreiros, G., & Lima, A. (2021). Response of Water Balance Components to Changes in Soil Use and Vegetation Cover Over Three Decades in the Eastern Amazon. *Front. Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.749507>
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., & Šejna, M. (2005). The HYDRUS Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Versión 4.0, April 2008, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside. 281 pp.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., & Šejna, M. (2008). Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Valdoso Zone Journal, Madison*, v.7. <https://www.pc-progress.com/Documents/Simunek%20et%20al.,%20VZJ%20-%202008,%20Hydrus%20and%20Stanmod%20models.pdf>
- Šimůnek, J., M. Šejna, G. Brunetti, & M. Th. van Genuchten, (2022). The HYDRUS Software Package for Simulating One-, Two-, and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, Technical Manual I, Hydrus 1D, Version 5.x, PC Progress, Prague, Czech Republic, 334 pp., 2022. https://www.pc-progress.com/downloads/Pgm_Hydrus3D5/HYDRUS_Technical_Manual_1D_V5.pdf
- Singh, P., Sarangi, A., Singh, D., Kumar, V., Dash, S., & Chakrabarti, B. (2021). Performance evaluation of evapotranspiration estimation methods in Sultanpur, Uttar Pradesh, India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 91(3). <https://epubs.icar.org.in/index.php/IJAgS/article/view/112514/43976>
- Sinha, N., Chakraborty, M., & Mohan, M. (2019). Modern rain-isotope data from Indian island and the mainland on the daily scale for the summer monsoon season. *Data in Brief*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103793>
- Slade, E., & Naylor, M. (04 de 2022). A fair comparison of tree-based and parametric methods in multiple imputation by chained equations. *Stat Med.*, 39(8). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9136914/>
- Stocker, B., Spahni, R., & Joos, F. (2014). DYPTOP: a cost-efficient TOPMODEL implementation to simulate sub-grid spatio-temporal dynamics of global wetlands and peatlands. *Articles*, 7(6). <https://doi.org/10.5194/gmd-7-3089-2014>
- Suchora, Z., Malec, A., Sobczuk, H., Łagód, G., & Gorgol, I. (2022). Determination of Time Domain Reflectometry Surface Sensors Sensitivity Depending on Geometry and Material Moisture. *Sensors*, 22(3). <https://doi.org/10.3390/s22030735>

- Sutanto, S., Wenninger, J., Coenders, A., & Uhlenbrook, S. (2012). Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: a comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1D model. *Articles*, 16(8). <https://doi.org/10.5194/hess-16-2605-2012>
- Suwarman, R., Novitasari, N., & Agung, D. (8 de 2021). A Study on Characteristics and Comparison of Evaporation Estimation Methods in Bandung. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 53(2). <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2021.53.2.2>
- The prevention and handling of the missing data. (05 de 2013). *Korean J Anesthesiol*, 64(5). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3668100/>
- Timms, W., Young, R., & Huth, N. (2011). Implications of deep drainage through saline clay for groundwater recharge and sustainable cropping in a semi-arid catchment, Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 8. <https://hess.copernicus.org/preprints/8/10053/2011/hessd-8-10053-2011.pdf>
- Tobio, M. (2023). The Effects Atmospheric Changes Have on Runoff. *Inquiry@Queen's Undergraduate Research Conference Proceedings*, 17. <https://ojs.library.queensu.ca/index.php/inquiryatqueens/article/view/16352>
- Torres, S., & Proaño, C. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 28(2), 52-66. <https://www.redalyc.org/journal/4760/476056688004/html/>
- Tsinko, Y., Bakhshaii, A., Johnson, E. A., & Martin, Y. E. (2018). Comparisons of fire weather indices using Canadian raw and homogenized weather data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 110–119. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2018.07.005>
- Van Genuchten, M., Leij, F. Y Yates, S. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Oklahoma.
- Wafa E. Abaker, Frank Berninger, Mike Starr (2018). Changes in soil hydraulic properties, soil moisture and water balance in Acacia senegal plantations of varying age in Sudan. *Journal of Arid Environments*. Volume 150, 2018, Pages 42-53. ISSN 0140-1963. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.12.004>.
- Wang, C., Wang, S., Fu, B., Zhang, L., Lu, N., & Jiao, L. (2018). Stochastic soil moisture dynamic modelling: a case study in the Loess Plateau, China. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 3(4). <https://doi.org/10.1017/S1755691018000658>
- Wang, Y., Hu, W., Zhu, Y., Shao, M., Xiao, S., & Zhang, C. (2015). Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. *Journal of Hydrology*, 527. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.010>

- Xu, C., & Chen, D. (08 de 2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes*, 19(18). <https://doi.org/10.1002/hyp.5853>
- Yu, J., Wu, Y., L. X., Peng, J., Chen, G., Shen, X., & Lan, R. (2022). Evaluating the Hydrus-1D Model Optimized by Remote Sensing Data for Soil Moisture Simulations in the Maize Root Zone. *Remote Sens.*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/rs14236079>
- Zhang, C., Huang, W., Niu, T., Liu, Z., Li, G., & Cao, D. (2023). Review of Clustering Technology and Its Application in Coordinating Vehicle Subsystems. *Automotive Innovation*, 6. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42154-022-00205-0>

Anexos

Anexo A. Descarga de los datos de los TDR, instalados en campo.



Anexo B. Toma de muestras de suelo en los anillos PVC, para el ensayo en laboratorio.



Anexo C. Secado y manipulación de las muestras de suelo.



Anexo D. Estadísticos descriptivos a escala temporal diaria

VWC_PR3_A1	VWC_PR3_A2	VWC_FR3_A	VWC_FR3_AC
Min. :0.9699	Min. :0.9050	Min. :0.5828	Min. :0.6347
1st Qu.:0.9909	1st Qu.:0.9455	1st Qu.:0.6395	1st Qu.:0.6589
Median :1.0086	Median :0.9704	Median :0.6630	Median :0.6709
Mean :1.0071	Mean :0.9609	Mean :0.6588	Mean :0.6701
3rd Qu.:1.0262	3rd Qu.:0.9805	3rd Qu.:0.6784	3rd Qu.:0.6774
Max. :1.0434	Max. :0.9990	Max. :0.7563	Max. :0.7193

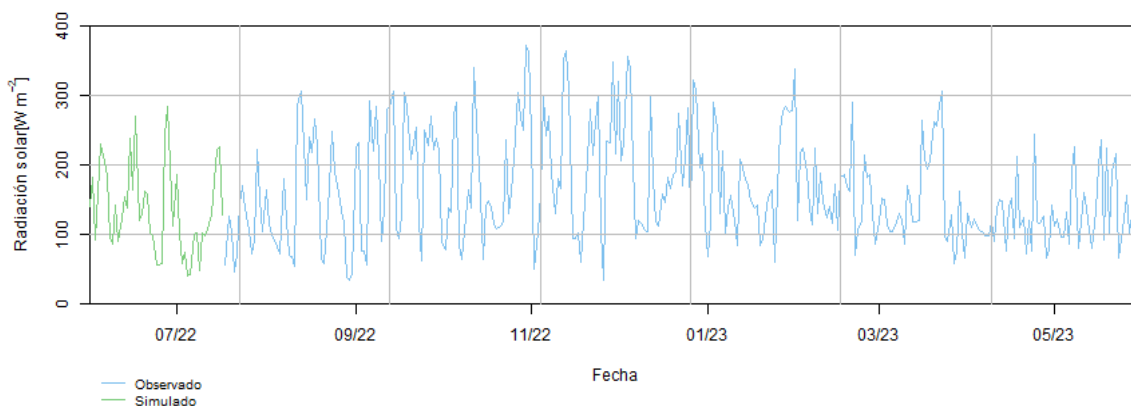
VWC_FR3_C	VWC_PR5_A	VWC_PR5_AC	VWC_PR5_C
Min. :0.5335	Min. :0.5088	Min. :0.5171	Min. :0.6655
1st Qu.:0.5472	1st Qu.:0.5616	1st Qu.:0.5318	1st Qu.:0.6794
Median :0.5539	Median :0.5756	Median :0.5403	Median :0.6814
Mean :0.5529	Mean :0.5704	Mean :0.5379	Mean :0.6814
3rd Qu.:0.5576	3rd Qu.:0.5839	3rd Qu.:0.5455	3rd Qu.:0.6832
Max. :0.5710	Max. :0.5945	Max. :0.5581	Max. :0.6957

CU4_MD_A	CU4_MD_C	CU4_LW_A	CU4_LW_C
Min. :0.6579	Min. :0.6472	Min. :0.5310	Min. :0.6177
1st Qu.:0.7049	1st Qu.:0.6513	1st Qu.:0.6755	1st Qu.:0.6470
Median :0.7077	Median :0.6527	Median :0.7186	Median :0.6582
Mean :0.7056	Mean :0.6526	Mean :0.6991	Mean :0.6542
3rd Qu.:0.7102	3rd Qu.:0.6541	3rd Qu.:0.7339	3rd Qu.:0.6639
Max. :0.7118	Max. :0.6573	Max. :0.7471	Max. :0.6694
NA's :71	NA's :71		

Precipitación_Up	Temp_Aire_Up	Humedad_Relativa_Up	Precipitación_Low	Temp_Aire_Low
Min. : 0.000	Min. :2.407	Min. : 53.63	Min. : 0.000	Min. :3.137
1st Qu.: 0.000	1st Qu.:5.986	1st Qu.: 86.13	1st Qu.: 0.000	1st Qu.:6.051
Median : 0.600	Median :6.731	Median : 91.31	Median : 0.200	Median :6.839
Mean : 2.263	Mean :6.617	Mean : 89.80	Mean : 1.786	Mean :6.804
3rd Qu.: 3.100	3rd Qu.:7.332	3rd Qu.: 95.36	3rd Qu.: 2.000	3rd Qu.:7.639
Max. :23.400	Max. :9.240	Max. :100.00	Max. :23.600	Max. :9.522

Humedad_Relativa_Low	velocidad_viento	Radiación solar
Min. :65.85	Min. :1.117	Min. : 33.61
1st Qu.:85.62	1st Qu.:2.504	1st Qu.:105.57
Median :89.82	Median :3.225	Median :141.06
Mean :88.91	Mean :3.408	Mean :163.62
3rd Qu.:93.11	3rd Qu.:4.142	3rd Qu.:218.94
Max. :99.24	Max. :7.031	Max. :371.66
		NA's :47

Anexo E. Grafica del resultado del relleno de datos para la radiación solar mediante missForest



Anexo F. Resultados de los criterios de bondad de ajuste para la radiación solar.

Criterio	Radiación solar	Clasificación
PBIAS %	4.1	Muy bueno
NSE	0.58	Satisfactorio
R ²	0.72	Bueno