

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**BALANCE HIDROLÓGICO DE UN PEDÓN DE SUELO EN EL
ECOSISTEMA DEL PÁRAMO EN EL NORTE DEL ECUADOR.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

TIBANQUIZA CAUJA JONATAN STALIN

jonatan.tibanquiza@epn.edu.ec

Director: PhD. ZAPATA RÍOS XAVIER EDUARDO

xavier.zapata@epn.edu.ec

Quito, octubre 2021

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, *Tibanquiza Cauja Jonatan Stalin*, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Tibanquiza Cauja Jonatan Stalin

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jonatan Stalin Tibanquiza Cauja, bajo mi supervisión.

Dr. Xavier Zapata Ríos

DIRECTOR DE PROYECTO

DEDICATORIA

A Dios,

a mis padres Jaime Tibanquiza y Estela Cauja

y mis hermanas: Tatiana, Deysi y Evelyn.

Por el apoyo brindado siempre.

AUSPICIO

El presente trabajo de titulación contó con el auspicio financiero del proyecto interno de investigación de la Escuela Politécnica Nacional PIMI-17-04: "Un análisis comparativo de métodos para determinar la evapotranspiración efectiva del ecosistema del páramo en el norte del Ecuador".

AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento primero para Dios ya que mediante la fe me ha ayudado en momentos difíciles. A mis padres Jaime y Estela que gracias a sus consejos y regaños me han hecho una persona de bien y que siempre quiere alcanzar lejos y que gracias a ellos nunca me ha faltado nada y esto va por ustedes. A mis hermanas Tatiana, Deysi que, aunque nos peleamos mucho saben que las amo y de todo regaño siempre me han apoyado en mis decisiones y puntos de vista y son un ejemplo para seguir. A mi hermana menor Evelyn que me ayuda en todo lo que puede y sé que puedo contar con ella en todo momento.

A mi director del proyecto de titulación Dr. Xavier Zapata Ríos, que me supo tener la confianza de brindarme el tema de tesis y me guió con su sabiduría para lograr completar el último escalón a la obtención de mi título de ingeniero. Se lo agradezco mucho la paciencia invertida. A todos los ingenieros que me formaron desde primer semestre, gracias por los conocimientos que sembraron en mí.

A mis amigos de toda la vida Santiago y Héctor, que me acompañaron en muchos momentos de mi vida que ahora ya son anécdotas para contar y esperando que existan muchas más. A Carolina, gracias por estar conmigo en todas las instancias difíciles y lindas en mi carrera profesional y mi vida personal y gracias por ayudarme con mi manera de redactar. A mis amigos más allegados de la EPN, Luis, Isra, Yadi y Ruby gracias por acompañarme en todos estos años de estudio, viajes y salidas por ser mis compañeros de grupo y hacer que disfrute la ingeniería.

CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
CERTIFICACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AUSPICIO.....	V
AGRADECIMIENTO	II
CONTENIDO	III
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE ANEXOS	X
SIGLAS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XV
PRESENTACIÓN.....	XVII
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5. HIPÓTESIS.....	3
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	4
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	4
2.1.1. INVESTIGACIONES INTERNACIONALES	7
2.1.2. INVESTIGACIONES NACIONALES	8
2.2. CICLO HIDROLÓGICO.....	9
2.3. SISTEMA HIDROLÓGICO	10
2.3.1. PRECIPITACIÓN.....	11
2.3.2. PRECIPITACIÓN DIRECTA, NO INTERCEPTADA POR LA VEGETACIÓN.....	11
2.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	12
2.3.4. INFILTRACIÓN.....	12

2.3.5. ESCORRENTÍA.....	13
2.3.6. PERCOLACIÓN	13
2.3.7. ABSORCIÓN DE LAS RAÍCES	13
CAPÍTULO III	14
METODOLOGÍA	14
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	14
3.1.1. UBICACIÓN.....	14
3.1.2. CLIMA	15
3.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	15
3.2. MODELAMIENTO	16
3.3.1. HUMEDAD DEL SUELO	20
3.3.2. PRECIPITACIÓN DIRECTA, NO INTERCEPTADA POR LA VEGETACIÓN.....	21
3.3.3. ESCORRENTÍA.....	21
3.3.4. PERCOLACIÓN	22
3.3.5. FUNCIÓN DE ESTRÉS DE HUMEDAD DEL SUELO.....	22
3.3.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	23
3.3.7. ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS RAÍCES	25
3.3. MÉTRICAS DE DESEMPEÑO.....	26
3.4. RECOPIACIÓN DE DATOS.....	27
CAPÍTULO IV.....	29
RESULTADOS Y DISCUSIONES	29
4.1. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE BALANCE HIDROLÓGICO.....	29
4.1.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO DE LOS HORIZONTES DEL SUELO DENTRO DEL PEDÓN	29
4.1.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	30
4.1.3. FLUJOS SUPERFICIALES.....	33
4.1.4. FLUJOS SUBSUPERFICIALES	36
4.2. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEL MODELO.....	46
4.2.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (CC)	46
4.2.2. ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE)	47
4.2.3. ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE).....	47
4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	48

CAPÍTULO V.....	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1. CONCLUSIONES	56
5.2. RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Ciclo hidrológico	10
Figura 2.	Sistema hidrológico	11
Figura 3.	Ubicación del pedón de suelo junto a la torre Eddy Covariance en la ACHA	14
Figura 4.	Ubicación del área de estudio y el pedón de suelo en el ACHA.....	15
Figura 5.	Pedón de suelo en el que se realizó el balance hidrológico en el ACHA	17
Figura 6.	Representación de los horizontes del pedón de suelo con sus respectivas profundidades	18
Figura 7.	Sistema del horizonte superficial del pedón de suelo	18
Figura 8.	Sistema del horizonte subsuperficial 2 del pedón de suelo.....	19
Figura 9.	Estructura del modelo.....	19
Figura 10.	Estructura del pedón marcado por sus profundidades en centímetros	30
Figura 11.	Temperatura del aire mensual [°C] en la zona de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	31
Figura 12.	Temperatura diaria del aire [°C] en la zona de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	31
Figura 13.	Precipitación mensual [mm] en el área de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	32
Figura 14.	Precipitación diaria [mm/día] en la zona de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	32
Figura 15.	Precipitación directa no interceptada por la vegetación [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	33
Figura 16.	Absorción de agua de las raíces del horizonte 1 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	34
Figura 17.	Evapotranspiración de referencia a escala diaria [mm/día] del horizonte 1 calculada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	35
Figura 18.	Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 1 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	35
Figura 19.	Humedad del suelo diaria [%] en el horizonte 1, modelada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	36

Figura 20. Absorción de agua de las raíces del horizonte 2 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	37
Figura 21. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 2 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	37
Figura 22. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 2, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	38
Figura 23. Absorción de agua de las raíces del horizonte 3 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	39
Figura 24. Evapotranspiración de referencia a escala diaria [mm/día] del horizonte 3 calculada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	39
Figura 25. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 3 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	40
Figura 26. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 3, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	41
Figura 27. Absorción de agua de las raíces del horizonte 4 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	42
Figura 28. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 4 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	42
Figura 29. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 4, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021 ..	43
Figura 30. Absorción de agua de las raíces del horizonte 5 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	44
Figura 31. Evapotranspiración de referencia a escala diaria [mm/día] del horizonte 5 calculada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	45
Figura 32. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 5 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	45
Figura 33. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 5, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021 ..	46
Figura 34. Comparativa de la absorción de agua de las raíces en los distintos horizontes mediante el diagrama de cajas y bigotes	50
Figura 35. Comparativa de la evapotranspiración de referencia en los horizontes 1, 3 y 5 mediante el diagrama de cajas y bigotes.....	52
Figura 36. Evapotranspiración real (ET _r) vs Evapotranspiración de referencia (ET _o), durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021	52

Figura 37. Comparativa de la percolación en los distintos horizontes mediante el diagrama de cajas y bigotes	53
Figura 38. Comparativa de la humedad en los distintos horizontes mediante el diagrama de cajas y bigotes	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Documentos revisados	4
Tabla 2	Datos necesarios para el modelamiento con sus respectivas fuentes ..	27
Tabla 3	Tipos de suelos a diferentes profundidades del pedón de estudio	30
Tabla 4	Valores de la métrica de CC	47
Tabla 5	Valores de la métrica de RMSE	47
Tabla 6	Valores de la métrica de MAE.....	48
Tabla 7	Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la absorción de agua de las raíces en los 5 horizontes	50
Tabla 8	Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración de referencia en 3 horizontes	51
Tabla 9	Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la percolación en los 5 horizontes	53
Tabla 10	Promedios de la humedad modelada y medida	54
Tabla 11	Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la humedad en los 5 horizontes	55

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1 Hojas de resultados obtenidos de los horizontes de suelo por el
LEMSUR**¡Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 2 Conductividad hidráulica saturada (Ks) obtenido de Rosetta Lite
para los diferentes horizontes.**¡Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 3 Fotografías de la zona de estudio e instrumentos de medición
utilizados en dicha zona.**¡Error! Marcador no definido.**

SIGLAS

ACHA	Área de Conservación Hídrica Artesana
FONAG	Fondo para la Protección del Agua
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
EPN	Escuela Politécnica Nacional
LEMSUR	Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas
P	Precipitación
θ	Humedad del suelo
$d\theta/dt$	Variación de la humedad por día
L	Profundidad del horizonte
T	Precipitación directa
R	Escorrentía
q	Percolación
Ks	Conductividad hidráulica saturada
b	Parámetro de distribución del tamaño de los poros
S	Absorción de agua de las raíces
β	Función de estrés de humedad del suelo
θ_c	Contenido crítico de humedad
θ_w	Punto de marchitez
Temp	Temperatura diaria del horizonte
ETr	Evapotranspiración de real

ETp	Evapotranspiración potencial
ETo	Evapotranspiración de referencia
ed	Presión de vapor actual
ea	Presión de vapor de saturación
HR	Humedad relativa
λ	Calor latente de vaporización
γ	Constante psicrométrica
Pa	Presión atmosférica
Rn	Radiación neta en la superficie de la planta
G	Flujo térmico del suelo
U2	Velocidad del viento a 2 m de altura
D	Pendiente de la Curva de Presión de Vapor
CC	Coefficiente de Correlación
RMSE	Error Cuadrático Medio
MAE	Error Absoluto Medio

RESUMEN

Los páramos son ecosistemas frágiles de alta montaña, los cuales han ido disminuyendo aceleradamente con el pasar del tiempo debido al cambio climático y presión antrópica. Parte del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA) es páramo, la cual provee múltiples servicios ecosistémicos, entre ellos está el abastecimiento de agua para el consumo humano. Específicamente la dotación del agua para un 16% de la población de Quito proviene del páramo del ACHA. Por tanto, es necesario comprender los procesos hidrológicos de este ecosistema para mejorar la provisión del agua y el uso sostenible del recurso.

La hidrología del páramo es poco entendida, especialmente en la parte norte del Ecuador, donde se ha desarrollado poca literatura científica y redes de monitoreo de datos hidrológicos. Los detalles del balance hidrológico superficial y subsuperficial a escala de calicata o pedón de suelo son desconocidos. Por tanto, en este estudio se realizó un modelo hidrológico de un pedón de suelo en un páramo de pajonal ubicado en las coordenadas: 0.478° S, 78.217° O a una elevación de 4250 m.s.n.m. dentro del ACHA. Se entiende como pedón a un cubo de suelo que tiene una sección transversal de 1m² por 1m de profundidad aproximadamente. El pedón integra cinco horizontes de suelo de distintos espesores diferenciados por sus características físicas, como: textura, color, porosidad, etc. El objetivo del presente trabajo de titulación fue estimar los flujos superficiales y subsuperficiales a través de un modelo hidrológico en un pedón a escala diaria desde el 1 de noviembre 2020 hasta el 20 de septiembre 2021. El modelo fue validado por medio de 3 sensores de humedad instalados a 30, 58, y 100 centímetros de profundidad dentro del pedón. La instrumentación del pedón se realizó como parte del sistema de la torre Eddy Covariance financiado por el proyecto PIMI-17-04 de la Escuela Politécnica Nacional. La torre Eddy Covariance monitorea los flujos de energía, carbono y agua en el ACHA.

El modelo presentado se basa en el balance hidrológico con la ecuación $d\theta/dt=1/L(T-R-q-S)$ para el horizonte superficial y $d\theta_n/dt=1/L(q_{(n-1)}-S-q_n)$ para los

horizontes subsuperficiales, donde las variables consideradas en el análisis fueron: precipitación directa (T); escorrentía (R); percolación (q); absorción de agua de las raíces (S); variación de la humedad por día ($d\theta/dt$); número del horizonte (n).

La precipitación en la zona del pedón de suelo presenta aumento en los meses de noviembre 2020, marzo y junio de 2021, siendo sus valores de 105.1 mm, 144.2 mm, 105.1 mm, respectivamente. La precipitación durante estos meses representa el período más húmedo del suelo, es decir con mayor ingreso de agua en el sistema e influye en el aumento en todos los flujos de agua a través del pedón desde el horizonte superficial 1 hasta el 5. Los resultados diarios de la variable de estado que constituye la humedad del suelo mostraron una dinámica de valores en la que el promedio en los horizontes del 1 al 5 fue de 30.33, 21.98, 12.25, 10.73 y 10.03 %, respectivamente, denotando que la humedad disminuye mientras más profundo es el horizonte.

Los indicadores de eficiencia se obtuvieron de tres métricas de desempeño que son: Error Absoluto Medio (MAE), Error cuadrático medio (RMSE), para ambas métricas se obtuvo valores cercanos al óptimo y el coeficiente de correlación (CC) con el que se obtuvo valores aceptables de rendimiento del modelo. Llegando a la conclusión, que el modelo hidrológico planteado permite entender la partición de agua superficial y subsuperficial de los distintos horizontes del pedón de suelo. El modelo puede cuantificar los principales flujos hidrológicos de manera aceptable a pesar de su estructura simplificada.

Palabras clave: Balance hidrológico, pedón de suelo, ACHA, páramo.

ABSTRACT

The páramos are fragile high mountain ecosystems, which have been declining rapidly over time due to climate change and human pressure. Among the páramos of Ecuador is the Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), which provides multiple ecosystem services, including the supply of water to the city of Quito, which becomes an important source for human consumption. Due to the importance of water and its preservation over time, it is necessary to understand the hydrology of this ecosystem.

The hydrology of the páramo is poorly understood, especially in the northern part of Ecuador, where little scientific literature and hydrological data monitoring networks have been developed. The details of the surface and subsurface hydrological balance at the scale of the pit or soil pedon are unknown. Therefore, in this study, a hydrological model of a soil pedon was carried out in a pajonal páramo located at the coordinates: 0.478 ° S, 78.217 ° W at an elevation of 4250 m.a.s.l. within the ACHA. A pedon is understood as a cube of soil that has a cross section of approximately 1m² by 1m deep. The pedon integrates five soil horizons of different thicknesses differentiated by their physical characteristics, such as: texture, color, porosity, etc. The objective of this work was to estimate surface and subsurface flows through a hydrological model in a pedon on a daily scale from November 1, 2020 to September 20, 2021. The model was evaluated by 3 humidity sensors installed at 30, 58, and 100 centimeters deep within the pedon, as part of the Eddy Covariance tower system, financed by the PIMI-17-04 project of the Escuela Politécnica Nacional.

The model presented is based on the hydrological balance with the equation $d\theta / dt = 1 / L (T-R-q-S)$ for the surface horizon and $d\theta_n / dt = 1 / L (q_{(n-1)} - S - q_n)$ for the subsurface horizons, where: throughfall (T); runoff (R); the deep drainage (q); root water uptake (S); variation of humidity in a certain time ($d\theta / dt$); horizon number (n).

Precipitation in the area of the soil pedon shows an increase in the months of November 2020, March and June 2021, with values of 105.1 mm, 144.2 mm, 105.1

mm, respectively. Precipitation during these months represents the wettest period of the soil, that is, with the highest entry of water into the system and influences the increase in all water flows through the pedon from surface horizon 1 to 5. The daily results of the state variable that constitutes soil moisture transmitted a dynamic of values in which the average in horizons from 1 to 5 was 30.33, 21.98, 12.25, 10.73 and 10.03, respectively, denoting that the humidity decreases the deeper the horizon.

The efficiency indicators were obtained from three performance metrics that are: Mean Absolute Error (MAE), Mean Square Error (RMSE), for both metrics values close to the optimum were obtained and the correlation coefficient (CC) with which it was obtained acceptable model performance values. Reaching the conclusion that the proposed hydrological model allows us to understand the partition of surface and subsurface water of the different horizons of the soil pedon. The model can quantify the main hydrological flows in an acceptable way despite its simplified structure.

Keywords: *Hydrological balance, pedon, ACHA, páramo*

PRESENTACIÓN

Este trabajo de titulación presenta la modelación hidrológica de un pedón de suelo en un punto de la reserva de conservación hídrica Antisana. El modelo fue validado con la variable de estado del sistema hidrológico que representa la humedad del suelo. La humedad del suelo fue medida a diversas profundidades dentro del pedón, el cual fue instrumentado como parte del sistema Eddy Covariance del proyecto PIMI-17-04 de la EPN. La tesis se desarrolla en cinco capítulos, los cuales son:

- Capítulo I, es el capítulo introductorio donde se presentan los antecedentes, la justificación del trabajo, los objetivos o metas y la hipótesis planteada.
- Capítulo II, es la parte teórica del proyecto donde se presenta el ciclo y sistema hidrológico con los flujos de agua que se presentan en el pedón de suelo a analizar en la ACHA.
- Capítulo III, describe a detalle la metodología a usar para el modelo. El capítulo muestra las características de la zona de estudio, como: la ubicación, tipo de suelo, clima. También el proceso del balance hidrológico y las ecuaciones necesarias para obtener los parámetros de flujos de agua y así obtener la humedad de los horizontes tanto superficial como subsuperficial. Por último, las ecuaciones de las métricas de desempeño que sirven como indicadores de efectividad del modelo en los diferentes horizontes.
- Capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos de las distintas ecuaciones presentadas en la metodología y los valores obtenidos de las métricas de desempeño. Se discute cada uno de los flujos que integran el balance hidrológico.
- Capítulo V, se concluye los objetivos planteados y la hipótesis después de realizado todo el proyecto y se presentan recomendaciones para posibles trabajos futuros.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Los páramos son ecosistemas frágiles neotropicales de alta montaña, que cubren el 7% del territorio continental del Ecuador (Chuncho & Chuncho, 2019). Estos ofrecen varios servicios ecosistémicos importantes, como: la regulación hídrica, recursos hídricos de calidad, sumideros de carbono, mitigación de cambio climático, belleza escénica, entre otros. Por ejemplo: Quito recibe aproximadamente el 80% de agua dulce de los páramos (Hofstede, 2008).

El Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA) fue creada para conservar el hábitat del cóndor andino y preservar los ecosistemas de páramo, para posteriormente aprovechar los servicios ecosistémicos que el lugar puede brindar tales como: abastecimiento de agua a la ciudad de Quito e importantes funciones económicas, culturales y naturales (Camacho, 2013). La ACHA es uno de los lugares de conservación más importantes para el Ecuador. Sin embargo, se presentan evidencias del impacto del cambio climático en esta región. Por ejemplo, debido a la elevación de la temperatura, se ha evidenciado la disminución del nivel de congelación, lo que significa menores cantidades de reservas de agua en los páramos (Schoolmeester et al., 2018). Esto resulta preocupante debido a que el 90% de agua dulce distribuida al sur de Quito es de la laguna La Mica (EPMAPS, 2020). Además, la ciudad de Quito se convirtió desde el 2018 en la ciudad más poblada del Ecuador sobrepasando inclusive a Guayaquil (Carvajal, 2019), y el 36% de esta población vive en el sur de la ciudad siendo actualmente uno de los sectores de la ciudad que mayor cantidad de habitantes acoge (Sandoval, 2021). El consumo de agua promedio en la ciudad es de 200 litros al día, sobrepasando los 100 litros de consumo diario recomendados por la Organización Mundial de la Salud (Encalada, 2019).

Por tanto, para la sostenibilidad del abastecimiento de agua a futuro, es imperante comprender la hidrología del ecosistema de páramo. Mucho más relevantes son los estudios hidrológicos en el páramo cuando existen evidencias que existen cambios climáticos y se desconoce los impactos que puedan tener éstos en el ecosistema, sumado esto al aumento poblacional y la demanda de agua de la ciudad de Quito. Por esta razón el proyecto PIMI-17-04 financiado por la Escuela Politécnica Nacional ha instrumentado una torre Eddy Covariance para el monitoreo de los flujos de energía, carbono y agua en el ACHA. Por lo tanto, la presente tesis plantea realizar un balance hidrológico para comprender la partición de los flujos de agua a escala de pedón del suelo. Los balances hidrológicos a escala de pedón han sido poco estudiados en el Ecuador y pueden brindar información útil para entender los flujos hidrológicos a escalas espaciales más grandes y poder gestionar de mejor forma el agua a futuro.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El ecosistema del páramo altoandino del ACHA es de gran importancia para la ciudad de Quito por sus reservas hídricas, pero a pesar de la importancia de éste, su hidrología es poco entendida. Los datos hidrológicos son limitados al igual que la literatura científica, evidenciándose aún pocos estudios en la parte norte de los páramos andinos del Ecuador (Cuesta et al., 2014). Por ejemplo, la cuantificación de los procesos hidrológicos son temas poco estudiados en el páramo debiéndose a un limitado monitoreo de variables hidrológicas (Crespo et al., 2014). Por lo que resulta imprescindible realizar análisis de este ecosistema como comprender los flujos de agua superficiales y subsuperficiales mediante un modelo hidrológico.

Los modelos matemáticos han sido usados como herramientas predictivas, y constituyen una representación abstracta y simplificada de la realidad (Torres, 2015). A pesar de la complejidad de la naturaleza, los modelos son de valiosa ayuda para comprender procesos ecosistémicos. Los flujos de agua a ser estudiados en esta tesis a nivel de pedón pueden ser utilizados para tomar decisiones en cuanto a cobertura vegetal de la zona. Los estudios a escala de pedón son limitados en el Ecuador y por tanto se plantea que la presente tesis pueda contribuir a la

comprensión del movimiento del agua y así poder tomar mejores decisiones que beneficien al ambiente y al ser humano.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Realizar el balance hidrológico de un pedón de suelo en un punto de la reserva de conservación hídrica Antisana. Además, se validará el modelo hidrológico utilizando la humedad del suelo como variable de estado y la cual es medida en la torre Eddy Covariance.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar los flujos de agua superficiales a escala de pedón.
- Estimar los flujos de agua subsuperficiales del suelo a escala de pedón.
- Evaluar la eficiencia del modelo al comparar la humedad del suelo obtenida del modelo versus la humedad del suelo medida a diferentes profundidades como parte del sistema de la torre Eddy Covariance.

1.5. HIPÓTESIS

Un modelo hidrológico a escala de pedón permite entender la partición de agua superficial y cuantificar los principales flujos hidrológicos subsuperficiales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. ESTADO DEL ARTE

Los modelos hidrológicos se han empleado en todo el mundo para la cuantificación de los procesos hidrológicos y consecuentemente tomar mejores decisiones en el manejo del agua. Estudios de balances hidrológicos se realizan motivados por la necesidad de determinar la disponibilidad del recurso hídrico a específicas escalas espaciales y temporales. Existen por ejemplo escalas espaciales, como: el pedón, ladera, subcuenca, cuenca, y temporales, como un: evento, estacional, anual y período largo (Gómez et al., 1998). La Tabla 1 muestra un resumen de las referencias bibliográficas consultadas ordenadas de acuerdo con el tipo de fuente consultada: artículos científicos, libros, etc., y los años de publicación en forma de intervalos de tiempo.

Tabla 1

Documentos revisados

Autor(es)	Año	Título	Principales hallazgos
Al-Kaisi, M., Brun, L., & Enz, W.	1989	Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index.	Flujos de agua Parámetro de absorción de agua de las raíces S
Apaydin, H., Feizi, H., Sattari, M. T., Colak, M. S., Shamshirband, S., & Chau, K.-W.	2020	Comparative Analysis of Recurrent Neural Network Architectures for Reservoir Inflow.	Ejemplos de métricas de desempeño aplicables para modelos hídricos
Aranda, D.	1998	Capítulo 1: Generalidades. In Procesos del ciclo hidrológico.	Ciclo hidrológico Sistema hidrológico
Betson, R. P.	1964	What is watershed runoff?	Flujos de agua Definición de escorrentía
Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F.	2003	Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad.	Hidrología de páramos Importancia de los páramos

Camacho, M.	2013	Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible.	Servicios ecosistémicos del páramo Importancia del páramo
Campbell, G. S.	1974	A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data.	Flujos de agua Percolación Determinación de la conductividad hidráulica
Carchi, E.	2015	Elaboración de un balance hídrico de la Cuenca del Río Machángara.	Ejemplo de balance hidrológico Balance hidrológico en Ecuador
Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J.	2019	The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador.	Valores de Evapotranspiración real (ET _r) y Evapotranspiración de referencia (ET _o).
Carvajal, A.	2019	Quito se convirtió en la ciudad más poblada del Ecuador con más de 2,7 millones de habitantes en el 2018.	Estadísticas de datos poblacionales Crecimiento en la población de Quito-Ecuador
Chuncho, C., & Chuncho, G.	2019	Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión.	Problemática en el páramo Importancia del páramo
Chuncho, G., Chuncho, C., & Aguirre, Z.	2019	Anatomía y morfología vegetal.	Función de la raíz Definición de absorción de agua de las raíces
Cisneros, P., Cajamarca, J., & Pacheco, E.	2010	Estudios para establecer la línea base de suelos inalterados en el páramo de Quimsacochoa.	Características del suelo del páramo Definición de histosoles y andisoles
Coral, A., García, J., & Leal, A.	2015	Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador.	Balance hidrológico en una cuenca Ejemplo de balance hidrológico Balance hidrológico en Ecuador
Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B.	2014	Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos.	Problemática en el páramo Opinión de expertos sobre investigación en páramos
Deiana, A. C., Granados, D., & Sardella, M.	2018	Introducción a la ingeniería. Capítulo VI-Balance de masa.	Definición de balance de masas de agua
Echeverría, C., Huber, A., & Taberlet, F.	2007	Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile.	Ejemplo de balance hidrológico Investigaciones internacionales
Encalada, M.	2019	El consumo de agua en Quito crece en un 20% durante el verano.	Estadísticas de consumo de agua en Quito
EPMAPS.	2020	Más de 25 millones de metros cúbicos abastecen al sur de Quito.	Valores de suministro de agua para el sur de Quito

Fernández, J., Algeet, N., Salazar, C., Salazar, S., Vargas, O., Chinchilla, M., & Mata, R.	2002	Balance hídrico de suelos para determinación del régimen de humedad en clasificación de suelos.	Ejemplo de balance hidrológico Investigación internacional
Fondo para la Protección del Agua	2018	Actualización del plan de manejo del Área de Conservación Hídrica Antisana.	Características del páramo en el ACHA (Temperatura media anual, elevación, clima, precipitación)
Gómez, A., Castillo, V., & Albadalejo, J.	1998	Estudio de procesos hidrológicos a diferentes escalas.	Ejemplos de escalas espaciales y temporales
Guevara, E., & Cartaya, H.	1991	HIDROLOGIA. Una introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada.	Ciclo hidrológico Sistema hidrológico
Hofstede, R.	2008	Los Servicios Del Ecosistema Páramo: Una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio.	Definiciones de páramos Problemática Servicios ecosistémicos
Hofstede, R. G. M., Chilito, E. J. P., & Sandovals, E. M.	1995	Vegetative structure, microclimate, and leaf growth of a páramo tussock grass species, in undisturbed, burned and grazed conditions.	Índice de área Foliar (LAI)
Johnson, W. M.	1963	The Pedon and the Polypedon.	Escalas espaciales Definición de pedón
Lado, J., Martínez, V., Leal, M., & García, R.	2009	El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión.	Componentes del ciclo hidrológico
LI-COR.	2021	Eddy Covariance.	Definición de torre Eddy Covariance
Llambí, L. D., Soto-w, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P.	2012	Páramos Andinos Ecología, hidrología y suelos de páramos.	Importancia del páramo
Mata, R.	2003	Principios generales sobre pedología y taxonomía de suelos.	Ventajas de estudio a escala de pedón
Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., & Célleri, R.	2018	Quantification of rainfall interception in the high Andean tussock grasslands.	Intercepción de la lluvia
Ochsner, T.	1992	Rain or Shine. An Introduction to Soil Physical Properties and Processes.	Parámetro para la percolación
Oki, T., Entekhabi, D., & Harrold, T. I.	2004	The global water cycle.	Evapotranspiración Escorrentía
Ordoñez, J. J.	2011	Balance Hídrico Superficial, Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico.	Definiciones Balance hidrológico Sistema hidrológico
FAO	1990	Cálculo de ETo: Método de Penman-Monteith.	Método para obtención de la Evapotranspiración de referencia

Ortiz Silla, R.	2015	Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología.	Definición de pedón
Rhett, A.	2008	¿Qué es el dosel?	Definición de dosel
Sánchez, J.	2008	Experiencia de Darcy.	Ley de Darcy Percolación
Sandoval, F.	2016	El 36% de los habitantes de Quito vive en el Sur.	Estadísticas de distribución poblacional en Quito
Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K.	2018	Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos.	Problemática de los páramos
Torres, M.	2015	Modelos matemáticos en las ciencias.	Modelos matemáticos
Villegas, J. A., & Torres, B. E.	1977	Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.	Ejemplo de cálculo de la Eto
Zhao, L., Xia, J., Xu, C. yu, Wang, Z., Sobkowiak, L., & Long, C.	2013	Evapotranspiration estimation methods in hydrological models.	Definición de evapotranspiración

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La literatura revisada cubre información de metodologías del balance hidrológico en páramos, conocimientos de los tipos de suelos y su morfología, consumo de agua en el país, la problemática que acarrea el cambio climático, entre otros. Mediante la búsqueda bibliográfica presentada en la tabla anterior se obtuvieron los datos necesarios los cuales conjuntamente con las variables medidas por la torre Eddy Covariance sirvieron para la determinación del rango de valores de constantes y variables utilizadas en el balance hidrológico en el páramo. A continuación, se presentarán unos ejemplos de casos de estudio relacionados al tema de la tesis a nivel internacional y nacional:

2.1.1. INVESTIGACIONES INTERNACIONALES

En Chile, Echeverría y coautores (2007) realizaron el estudio comparativo entre un bosque nativo y una pradera. El objetivo del proyecto fue de analizar los componentes del balance hidrológico a tres metros de profundidad de los dos ecosistemas. La cantidad de agua involucrada se obtuvo de la ecuación: $ETP = P - PA - \Delta W - R - q$, donde: ETP= evapotranspiración potencial; P= precipitación; PA= pérdidas de agua debido al dosel; ΔW = variación de contenido de agua; R=

escorrentía; q = percolación; todos los datos medidos en milímetros. Obteniéndose el resultado que la pradera tiene menor percolación que el bosque, que tiene mayor consumo de agua por evapotranspiración potencial. El 13% de precipitación de la pradera y 33% del bosque se reintegran a la atmósfera.

En Costa Rica, Fernández y coautores, (2002) realizaron el balance hidrológico en siete calcatas del volcán Miravalles desde abril hasta junio 2011. Con el objetivo de analizar el balance hidrológico tomando en consideración variables climáticas y también edáficas. La metodología utilizada fue la combinación de la capacidad de reserva de agua en el suelo y variables climatológicas. Obteniendo resultados de regímenes de humedad permanentes y si no se hubiera considerado variables edáficas se llegaba a resultados de humedad no permanente. Denotando la influencia que tiene el suelo en cuanto a humedad se trata.

En Bélgica, Teuling y Troch (2005) realizaron un modelo simple, con el objetivo de investigar la variabilidad espacial de la transpiración en el campo. El modelo reproduce la variación de la humedad del suelo superficial para tres conjuntos de datos por el período de 60 días. La zona de estudio donde se realizó la investigación fue clasificada como agrícola con suelos franco-limosos. Se realizó el balance hidrológico siguiendo la dinámica de la humedad del suelo a escala puntual mediante la fórmula: $d\theta/dt=1/L(T-R-q-S)$, siendo la metodología usada en la presente tesis. El factor de discriminación fue el de notar si el suelo se seca o no, concluyendo que ésta depende de la textura del suelo como de la precipitación.

2.1.2. INVESTIGACIONES NACIONALES

Se realizó un balance hidrológico por Torres y Proaño (2018), cuyo objetivo fue de evaluar el comportamiento de los parámetros característicos del balance hidrológico en los páramos de Jatunsacha en el norte del Ecuador. La metodología utilizada para el balance fue la ecuación: $P=PA+ET_o+Q+d\theta/dt+q$. Donde: P =precipitación; PA =pérdidas de agua debido a la vegetación; ET_o =evapotranspiración de referencia; Q =caudal de la cuenca; q =percolación, todos los datos mencionados anteriormente se midieron en milímetros, y $d\theta/dt$ = variación de la humedad del suelo a un determinado tiempo, siendo un valor

adimensional. El estudio determinó que existen eventos de lluvia de baja intensidad, volumen y duración, pero muy frecuentes, evapotranspiración de referencia baja, escorrentía baja, e infiltración alta debido a la porosidad de la zona.

De la revisión de literatura y recopilación bibliográfica, se evidencia el gran interés en el tema de balances hidrológicos en distintas zonas del mundo. Sin embargo, los estudios a escala de pedón del suelo en el páramo del Ecuador son casi inexistentes. Por lo que resulta imprescindible el realizar investigaciones a esta escala y considerando condiciones específicas del páramo en el norte del Ecuador.

2.2. CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico. Representado en la Figura 1, hace referencia a la transferencia o movimiento continuo de masas de agua. La transferencia mencionada fundamentalmente se debe al sol que con su energía empleada hace que el agua cambie de estado (evaporación), debido a cambios en presión y temperatura se da la precipitación (Ordoñez, 2011). El ciclo trata de procesos interrelacionados simultáneos que asume empieza con la evaporación del agua de los océanos. La energía solar aportada hace que los enlaces de las moléculas de agua se rompan haciendo que pase el agua de estado líquido a gaseoso en un proceso llamado evaporación. La condensación, el vapor de agua pasa a estado líquido formando las nubes, empieza con el punto de saturación de la humedad relativa (100 %) y con las nubes y condiciones específicas se produce la precipitación en forma de agua o nieve que se acumula en los glaciares. El agua superficial y subterránea se da con el resto de precipitaciones, escorrentía, etc., (Lado et al., 2009).

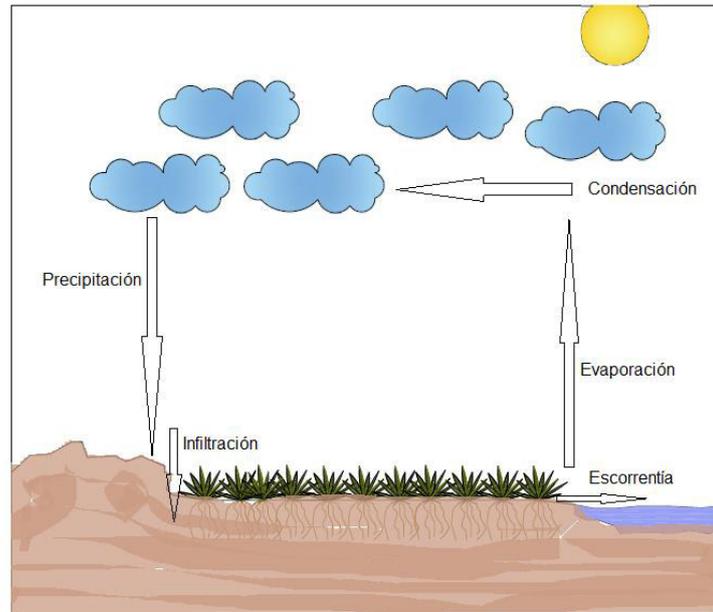


Figura 1. Ciclo hidrológico

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

2.3. SISTEMA HIDROLÓGICO

Los fenómenos hidrológicos no pueden ser conocidos en su totalidad debido a su complejidad, pero se lo puede representar por el concepto de sistema (Guevara & Cartaya, 1991). Es necesario conocer no solamente la parte cualitativa del ciclo hidrológico, sino se debe estudiar también la parte cuantitativa del agua que está involucrada en cada fase del ciclo. Hacemos referencia al sistema hidrológico (Figura 2), como el conjunto interdependiente de procesos o elementos físicos que interviene en variables de entrada y las convierte en salida. La complejidad de estos sistemas es vasta y no han sido desarrolladas leyes que permitan entender los fenómenos hidrológicos naturales de manera exacta (Aranda, 1998). Para predecir o tratar de determinar dichos fenómenos se utilizan los modelos matemáticos que ayudan a simular su funcionamiento.

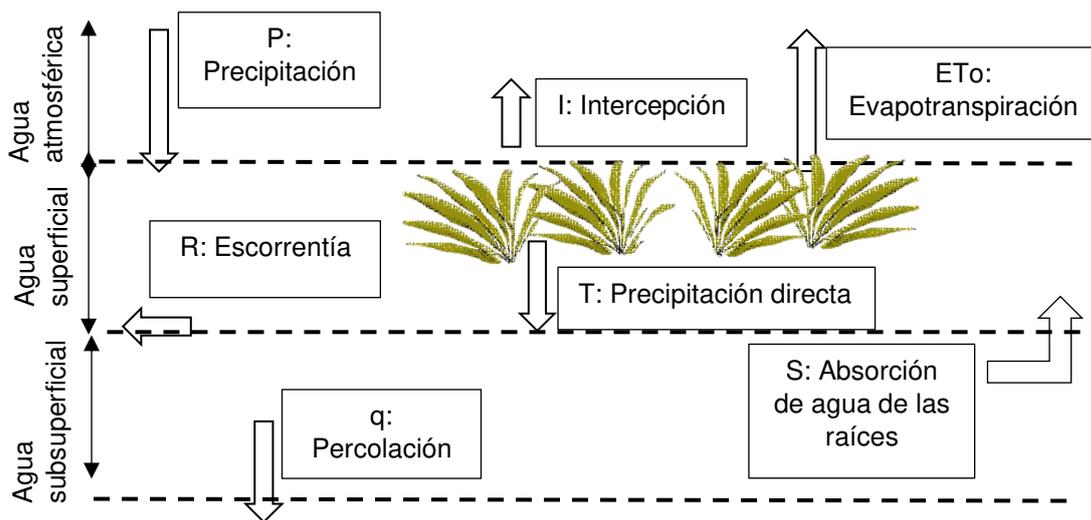


Figura 2. Sistema hidrológico

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

2.3.1. PRECIPITACIÓN

La precipitación es el agua meteórica que, debido a cambios de presión y temperatura, cae a la tierra en forma sólida como nieve, granizo, etc. y en forma líquida, como: lluvia, llovizna, etc. La precipitación sucede debido a un cambio en la atmósfera sea de presión o temperatura (Ordoñez, 2011). En la atmósfera se encuentra siempre humedad, inclusive cuando no hay nubes, y para que ocurra la precipitación de las gotas de agua es necesario de algo que enfríe el aire hasta llegar al punto de saturación (Segerer & Villodas, 2006).

2.3.2. PRECIPITACIÓN DIRECTA, NO INTERCEPTADA POR LA VEGETACIÓN

La precipitación directa es la cantidad de agua producto de la precipitación que atraviesa la vegetación del páramo o dosel, conocido como la sección frondosa donde se encuentra la mayoría de vegetación y vida animal de un ecosistema (Rhett, 2008), y que llega a la superficie del suelo. El volumen de agua de la precipitación que no atraviesa o se queda atrapada en la vegetación y no penetra el suelo es conocida como la intercepción.

2.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos que son: evaporación de la superficie con cobertura por las plantas y el suelo y la transpiración de las plantas. La evapotranspiración, hace referencia al retorno de agua a la atmósfera desde la superficie de la Tierra (Oki et al., 2004). Proporciona al mismo tiempo calor latente desde el suelo y es afectada por factores climatológicos (radiación solar, temperatura, etc.) factores vegetales (densidad foliar, tipo de plantación, etc.) y características del suelo (textura, densidad, etc.; SiAR, 1999). La evapotranspiración es un proceso vital para el ciclo hidrológico, ya que vincula el equilibrio hídrico y energético de la superficie terrestre (Zhao et al., 2013).

La Evapotranspiración Potencial (ETp) es conocida como la evapotranspiración producida en condiciones óptimas de humedad de suelo y cobertura vegetal (Thornthwaite, 1948). Por el contrario, la Evapotranspiración Real (ETr) es la que se produce realmente en las condiciones de cada caso. El concepto ETp es difuso, al considerar que cada tipo de vegetación evapotranspira diferentes cantidades, para lo que se establece el concepto de Evapotranspiración del cultivo de referencia o evapotranspiración de referencia (ETo; Sánchez, 2015). La ETo es la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético de pasto, con disponibilidad de agua, 12 cm de altura. La ETo es el flujo de agua que se determina para la presente tesis considerando las características presentadas anteriormente y se usará el método de Penman Monteith para su cálculo (FAO, 1990).

2.3.4. INFILTRACIÓN

La infiltración es un componente del ciclo hidrológico que es un detonante de todos los flujos que se dan a nivel subsuperficial. La infiltración consiste en el ingreso del agua al suelo por la superficie que se produce por fuerzas gravitacionales, tipo del suelo, textura, fuerzas capilares, etc (Mongil et al., 2015). Se conoce como la tasa de infiltración a la cantidad de agua que atraviesa la superficie del suelo en un tiempo determinado. La tasa de infiltración, a manera simplificada, se la puede asumir que es igual a la tasa de precipitación cuando ésta no excede la capacidad de infiltración que tiene el suelo (Betson, 1964).

2.3.5. ESCORRENTÍA

La escorrentía se da cuando el exceso de agua de la capacidad de infiltración tiende a almacenarse de manera temporal o comienza a escurrirse por el suelo (Betson, 1964). La escorrentía es la que regresa el agua a los mares siendo imprescindible para el equilibrio entre la salinidad y agua dulce de los océanos. Aunque, la cantidad de agua que transportan los ríos hacia el océano es mucho menor comparada a la transportada por la atmósfera, ésta no es despreciable (Oki et al., 2004).

2.3.6. PERCOLACIÓN

La percolación es el proceso por el cual el agua penetra en los diferentes horizontes de suelo a nivel subsuperficial. El agua es drenada debido a varios factores como son la porosidad del suelo, la acción capilar, la gravedad, facilidad de entrada, tasa de infiltración del suelo, capacidad de almacenaje, textura y estructura del suelo, etc (Úbeda & Delgado, 2018). La percolación elimina el agua en exceso deprimiendo los niveles freáticos en el interior del suelo, manteniendo condiciones de aireación y actividades biológicas del suelo (Ortega & Sagado, 2001).

2.3.7. ABSORCIÓN DE LAS RAÍCES

Las raíces son una parte de la planta generalmente subterránea con geotropismo positivo (crece hacia el interior del suelo). La raíz cumple funciones primordiales de la planta como es el sujetarse al suelo, la absorción de nutrientes y agua (Chuncho et al., 2019). Existe una relación entre la raíz y crecimiento de la planta y la estructura del suelo (Torres et al., 2012). Por lo que, se le considera a la habilidad de la raíz de absorber agua, dentro del sistema hidrológico ya que la cantidad de agua que estas absorben influyen en la humedad del suelo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1. UBICACIÓN

El Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA) cubre el área de aproximadamente 8487.03 ha, dicha área se ubica en las provincias de Pichincha y Napo. Napo tiene la mayor proporción de área con el 77,09 % y Pichincha cuenta con el 22.91 %. Los ecosistemas más característicos de la zona son: páramo (47.89 %), humedales (20.45 %) y el herbazal inundable del páramo (20.11 %) (FONAG, 2018). La zona de estudio en donde se realiza el presente análisis se encuentra ubicada en el páramo altoandino, en la provincia de Napo. El lugar está dominado por un páramo de pajonal (FONAG, 2018; Llambí et al., 2012). El pedón de suelo que se usará para el modelamiento de los flujos de agua se ubica junto a la torre Eddy Covariance presentada en la Figura 3, en las coordenadas: 0.478° S, 78.21° O (Figura 4), a una altitud de 4250 m.s.n.m. La zona de estudio se encuentra a aproximadamente 7 kilómetros de la laguna La Mica y 50 kilómetros de Quito.



Figura 3. Ubicación del pedón de suelo junto a la torre Eddy Covariance en la ACHA

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

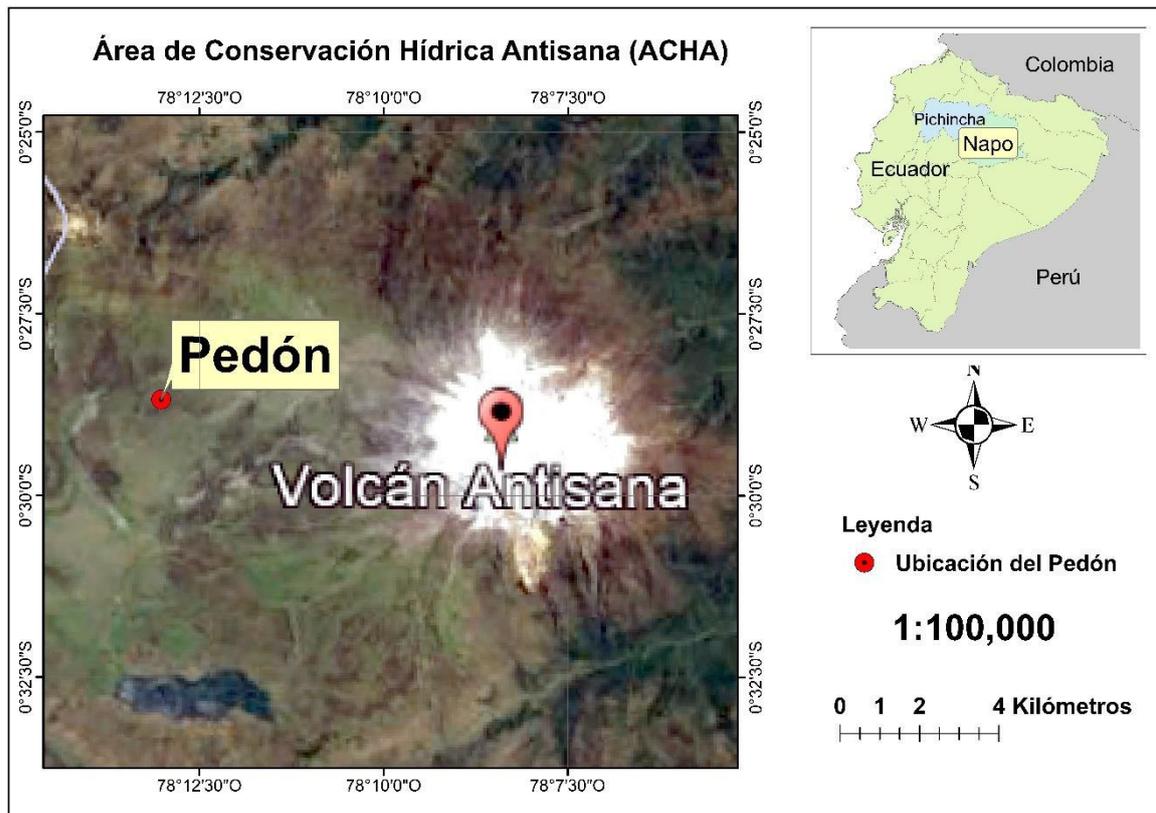


Figura 4. Ubicación del área de estudio y el pedón de suelo en el ACHA

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

3.1.2. CLIMA

Debido al relieve, morfología y ubicación geográfica el Antisana presenta un clima Ecuatorial de Alta Montaña, típica de elevaciones sobre los 3000 msnm con microclimas (FONAG, 2018). El ACHA, específicamente en la zona de estudio, tiene una temperatura diaria media que va desde los 4 °C a los 8 °C, con precipitaciones que son de larga duración y baja intensidad que oscilan entre los 800 y 2000 mm al año (FONAG, 2018; Llambí et al., 2012).

3.1.3. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Los suelos característicos en el ACHA son de dos tipos: histosoles y andisoles. Los histosoles son suelos con acumulación de materia orgánica (Borja et al., 2008). Mientras que los Andisoles se caracterizan por ser suelos jóvenes de origen volcánico con buena capacidad de retención de agua y baja densidad aparente.

(Cisneros et al., 2010). Ambos tipos de suelo tienen una buena capacidad de retención de agua, pero en especial en los Histosoles y lo que le proporciona características al suelo, tales como: el color característico, carbono almacenado en grandes cantidades, estabilidad estructural (FONAG, 2018).

3.2. MODELAMIENTO

El presente proyecto busca generar un modelo hidrológico para estimar los flujos de agua de un pedón de suelo aledaño a la torre Eddy Covariance de la EPN. El modelo se basa en el balance hidrológico donde se cuantifica los flujos de entrada y de salida dentro de un sistema hidrológico. Se aplica la ley de conservación de masas de agua o ecuación de la continuidad, que indica: “La masa no se crea ni se destruye, sólo se transforma”. Para efectuar el balance hidrológico se debe delimitar la zona o volumen de control del sistema (Deiana et al., 2018).

En este trabajo de titulación se define al pedón de suelo como un sistema hidrológico, por tanto, con un volumen de control donde se puede aplicar un balance hidrológico. El pedón de suelo, es el volumen o parte más pequeña del suelo que recoge sus propiedades para su descripción, muestreo y estudio, tiene una sección transversal de 1m^2 por 1 m de profundidad aproximadamente (Figura 5; Ortiz Silla, 2015). Existen ventajas y limitaciones para el análisis de la hidrología a escala de pedón, por ejemplo:

- Una limitante es que la mayoría de los pedones son demasiado pequeños para exhibir todas las características regionales del suelo (Johnson, 1963).
- Los estudios a escala de pedón tienen la ventaja de constituir un primer paso para entender la partición de flujos de agua a nivel del suelo y entender las interacciones entre la cobertura vegetal y la atmósfera (Mata, 2003).

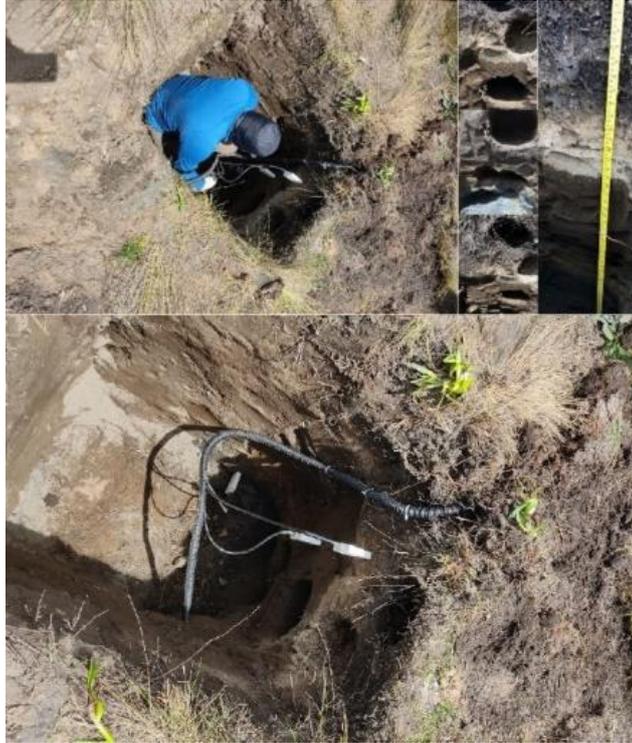


Figura 5. Pedón de suelo en el que se realizó el balance hidrológico en el
ACHA

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La variable de estado a ser estimada es la humedad del suelo, siendo el modelo capaz de reproducir la variabilidad de ésta sobre cinco profundidades específicas, las que fueron definidas debido a las características físicas de los diversos horizontes de suelo. La Figura 6 muestra la partición de los cinco horizontes de suelo a analizar y con la respectiva ubicación de los sensores de humedad y temperatura. Los 3 sensores que se muestran en la Figura 6 fueron instalados a distintas profundidades dentro de los horizontes 2, 3 y 5.

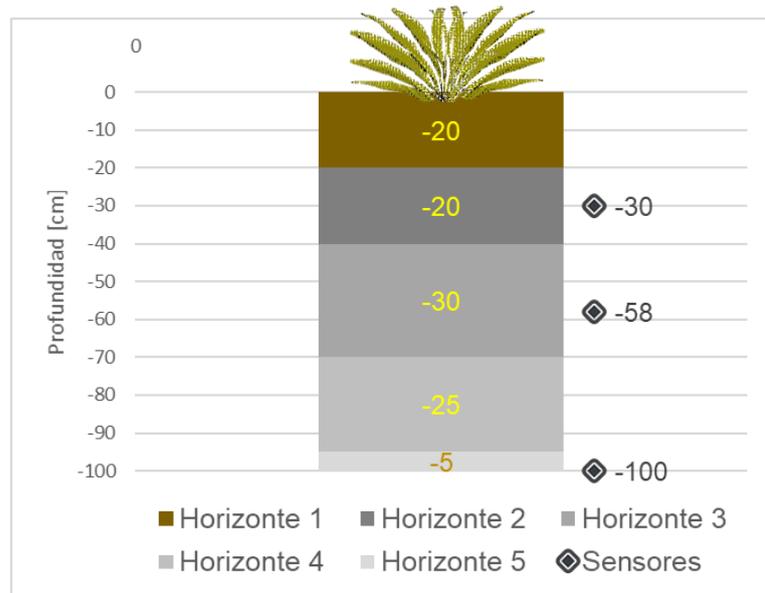


Figura 6. Representación de los horizontes del pedón de suelo con sus respectivas profundidades

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

El balance hidrológico será aplicado en los cinco horizontes de suelo: la superficial (Horizonte 1) y las subsuperficiales (Horizontes 2-5). La Figura 7 presenta, de manera esquemática, el balance hidrológico del horizonte superficial 1, mostrando la entrada de agua que es la precipitación directa (T) y las diferentes salidas de los flujos de agua toma de agua de raíces, escorrentía y percolación (S_1 , R , q_1). En cambio, en la Figura 8 representa el sistema del balance hidrológico del horizonte subsuperficial 2 con su entrada (q_1) y las salidas (S_2 y q_2). El ejemplo de la Figura 8 se aplica para los siguientes horizontes subsuperficiales 3, 4 y 5.

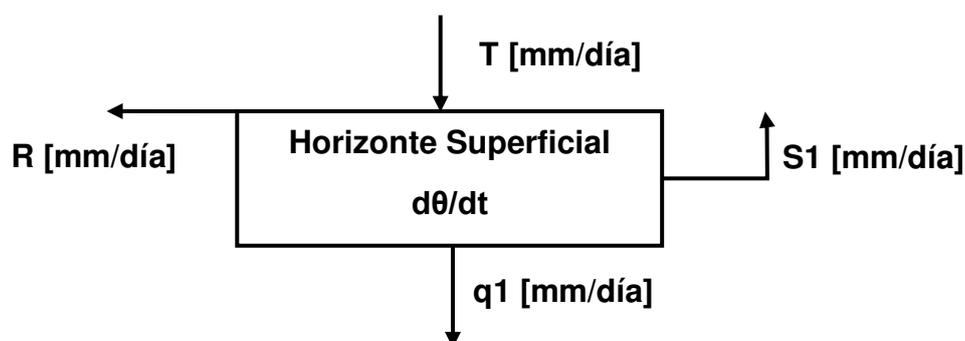


Figura 7. Sistema del horizonte superficial del pedón de suelo

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

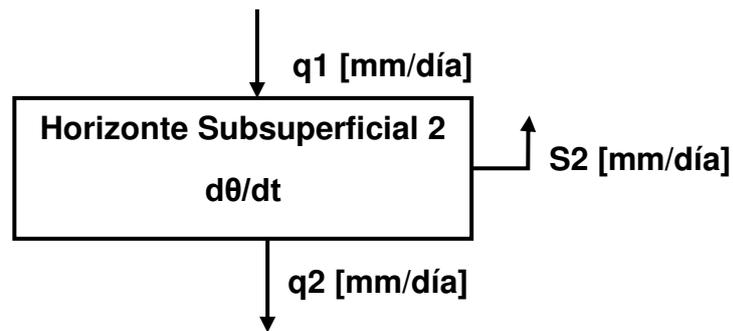


Figura 8. Sistema del horizonte subsuperficial 2 del pedón de suelo

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

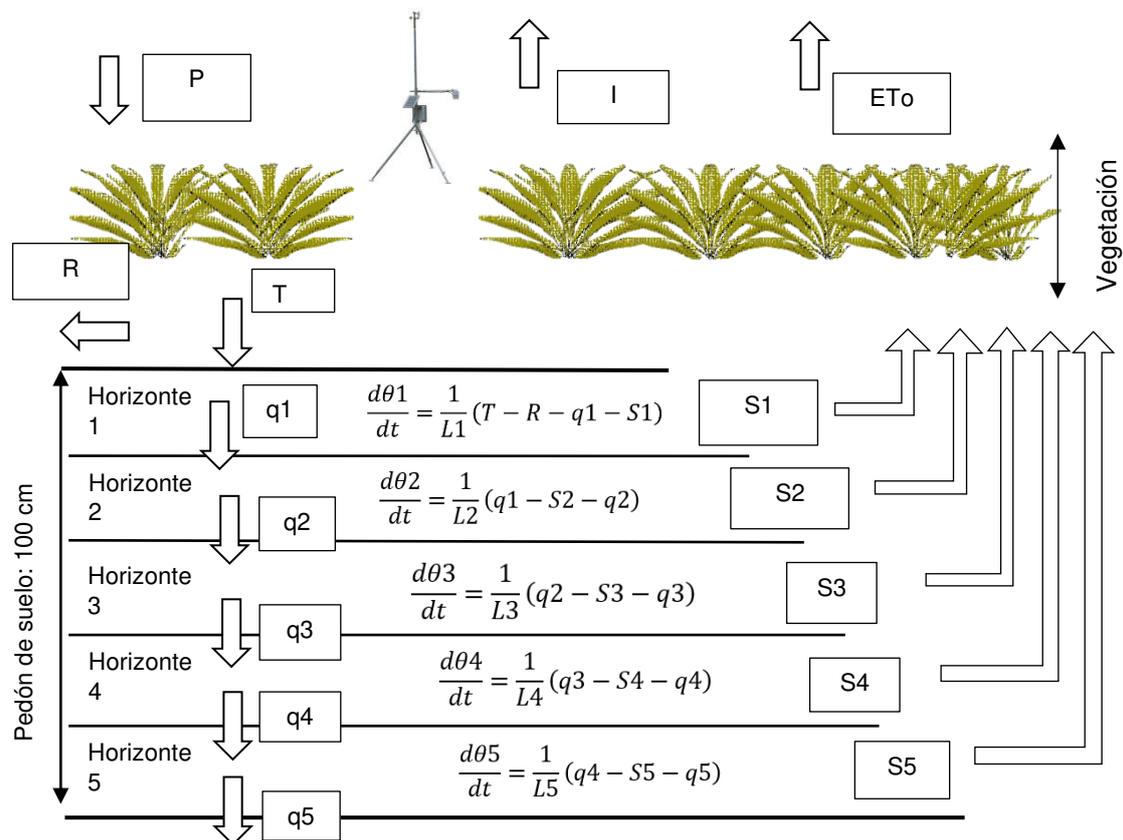


Figura 9. Estructura del modelo

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Los flujos superficiales y subsuperficiales, presentados en la Figura 9, fueron obtenidos mediante el uso de variables como: precipitación directa, escorrentía, percolación, absorción de agua de las raíces (Teuling & Troch, 2005). La Figura 9 muestra la estructura del modelo o el sistema del pedón de suelo, con las respectivas ecuaciones del balance hidrológico de cada horizonte, necesarias para

obtener la variable de estado, que es la humedad del suelo. A continuación, se mostrarán y se explicarán las ecuaciones y condiciones necesarias para realizar el balance hidrológico mediante los parámetros o flujos mencionados en la estructura del modelo.

3.3.1. HUMEDAD DEL SUELO

La humedad del suelo (θ) se obtiene mediante la ecuación (1), la cual se determina como la suma de la humedad del día anterior más la variación de la humedad del suelo por día ($d\theta/dt$). La $d\theta/dt$ se consigue mediante el balance hidrológico en los distintos horizontes realizando la contabilidad de flujos hidrológicos. El horizonte superficial utilizando la ecuación (2), que determina la variación de la humedad del suelo superficial a un determinado tiempo. La ecuación número (3) determina la humedad del suelo de los horizontes subsuperficiales (Horizontes 2 - 5). Los parámetros necesarios para la obtención de la humedad serán explicados en los siguientes puntos.

$$\theta_{\text{(día actual)}} = \theta_{\text{(día anterior)}} + d\theta/dt \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{1}{L_1} (T - R - q_1 - S_1) \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_n}{dt} = \frac{1}{L_n} (q(n-1) - S_n - q_n) \quad (3)$$

Donde:

T=Precipitación directa [mm/día]

R=Escorrentía [mm/día]

q=Percolación [mm/día]

S=Absorción de agua de las raíces [mm/día]

L=Profundidad del horizonte [mm]

n=número del horizonte subsuperficial

3.3.2. PRECIPITACIÓN DIRECTA, NO INTERCEPTADA POR LA VEGETACIÓN

Para obtener el volumen de agua que atraviesa la vegetación del páramo, conocido como throughfall y su sigla en inglés (T), se necesita de valores medidos o consultados como son: la intercepción (I) que es el agua que queda atrapada en la vegetación. Para el estudio se asumió un valor de intercepción de 2mm (Ochoa-Sánchez et al., 2018). El segundo dato necesario es la precipitación diaria en milímetros (P), que fue medida de manera continua por la torre Eddy Covariance. La (T) se obtiene de acuerdo con la siguiente condición:

$$\text{Si } P > 2 \text{ mm} \rightarrow T = P - I \quad (4)$$

$$\text{Si } P < 2 \text{ mm} \rightarrow T = 20\% P$$

Es decir, si la precipitación medida diaria es mayor a 2 mm la precipitación directa es el resultado de la diferencia de la precipitación y la intercepción. De lo contrario, si la precipitación diaria es menor a los 2 mm, la precipitación directa tiende a ser el 20 % de la precipitación diaria. El 20 % es un parámetro de calibración, lo que significa que dicho valor se fue modificando hasta lograr el mejor ajuste de la humedad del modelo versus la humedad observada.

3.3.3. ESCORRENTÍA

Para obtener la escorrentía, conocida en inglés como runoff (R), se necesita de valores como la precipitación directa (T) que se lo puede obtener del punto anterior (3.3.2.) y la porosidad (Φ) que se obtuvo del análisis de laboratorio una vez definida la textura de cada horizonte de suelo definido en el pedón. Así, la escorrentía se obtiene por la siguiente condición planteada por Teuling y Troch (2005):

$$R = T \text{ cuando } \theta = \Phi \quad (5)$$

$$R = 0 \text{ para } \theta < \Phi$$

Es decir que cuando la humedad alcanza el valor mayor de saturación indicado por la porosidad, toda la precipitación directa se convierte en escorrentía. Por el contrario, mientras la humedad del suelo no alcance el valor de saturación el

modelo no considera la generación de escorrentía $R=0$. Para el modelo asumimos que el agua que penetra la vegetación y no se convierte en escorrentía, se infiltra en su totalidad.

3.3.4. PERCOLACIÓN

La percolación (q), caudal que circula por m^2 de sección, es calculado por la ley de Darcy, refiere al movimiento del agua en un medio poroso (Sánchez, 2008), con el supuesto de gradiente unitario. La conductividad hidráulica saturada (K_s), alude a la velocidad del flujo del agua a nivel subsuperficial. La K_s interviene en todo proceso relacionado al movimiento de agua subsuperficial (Polo et al., 2003). La porosidad del suelo y el parámetro de distribución del tamaño de los poros hacen referencia a la porción o volumen no ocupado de suelo. Este parámetro se puede estimar utilizando la parametrización de Campbell (1974) indicada en la siguiente ecuación:

$$q = k_s \left(\frac{\theta}{\phi} \right)^{2b+3} \quad (6)$$

Donde:

K_s =Conductividad hidráulica saturada [mm/día]

b = Parámetro de distribución del tamaño de los poros

Φ = Porosidad

3.3.5. FUNCIÓN DE ESTRÉS DE HUMEDAD DEL SUELO

Para la obtención de la función de estrés de humedad del suelo (β) se necesita del contenido crítico de humedad del suelo. Esta variable se entiende como la transición entre la transpiración no estresada y estresada y el punto de marchitez. El punto de marchitez es el estado de la humedad del suelo por debajo del cual las plantas ya no pueden extraer agua de la matriz del suelo. La ecuación (6) mantiene dos condiciones que permiten la obtención de la β . Se toma el valor mínimo entre $(\theta - \theta_w) / (\theta_c - \theta_w) =$ agua disponible que puede absorber la planta/ agua que puede absorber la planta no estresada y 1. El valor resultante es condicionado

nuevamente tomándose el valor máximo entre 0 y el valor resultante anterior y siendo ésta la función de estrés de humedad del suelo (Teuling & Troch, 2005).

$$\beta = \max [0; \min (1; \frac{\theta - \theta_w}{\theta_c - \theta_w})] \quad (7)$$

Donde:

θ_c =Contenido crítico de humedad

θ_w =Punto de marchitez

3.3.6. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

Para obtener la evapotranspiración de referencia (ET_o) se empleó el método de Penman-Monteith, método usado comúnmente para obtener la cantidad necesaria de agua para el riego y que las plantas se desarrollen correctamente (FAO, 1990; Villegas & Torres, 1977). Se necesitaron de diversos parámetros para obtener la ET_o, partiendo de las ecuaciones (8 – 12), donde mediante el uso de la temperatura, presión atmosférica y humedad relativa se pudo llegar a tener las variables necesarias para la ecuación de Penman-Monteith (13).

$$ea = 0.6108 * \exp \left[\frac{17.27 * Temp}{Temp + 237.3} \right] \quad (8)$$

Donde:

ea = Presión de vapor de saturación [kPa]

Temp = Temperatura diaria del horizonte [°C]

$$ed = ea * \frac{HR}{100} \quad (9)$$

Donde:

ed = Presión de vapor actual [kPa]

ea = Presión de vapor de saturación [kPa]

HR = Humedad relativa [%]

$$D = \frac{4098 * ea * Temp}{(Temp + 237.3)^2} \quad (10)$$

Donde:

D = Pendiente de la Curva de Presión de Vapor [kPa/°C]

ea = Presión de vapor de saturación [kPa]

Temp = Temperatura diaria del horizonte [°C]

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) * Temp \quad (11)$$

Donde:

λ = Calor latente de vaporización [°C]

Temp = Temperatura diaria del horizonte [°C]

$$\gamma = 0.00163 * \frac{Pa}{\lambda} \quad (12)$$

Donde:

γ = Constante psicrométrica [kPa/°C]

Pa = Presión atmosférica [kPa]

λ = Calor latente de vaporización [°C]

$$ET_o = \frac{0.408D(Rn - G) + \gamma \frac{900}{Temp + 273} U^2 (ea - ed)}{D + \gamma(1 + 0.34U^2)} \quad (13)$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia [mm/día]

Rn = Radiación neta en la superficie de la planta [MJ/m²día]

G =Flujo térmico del suelo [$\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$]

Temp =Temperatura diaria del horizonte [$^{\circ}\text{C}$]

U_2 =Velocidad del viento medida a 2 m de altura [m/s]

$(e_a - e_d)$ =Déficit de la Presión de Vapor [kPa]

D =Pendiente de la Curva de Presión de Vapor [$\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$]

γ =Constante psicrométrica [$\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$]

3.3.7. ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS RAÍCES

Para la absorción de agua de las raíces (S), se necesitan de los parámetros de evapotranspiración de referencia (E_{To}), función de estrés de humedad del suelo (β) explicados en los puntos (3.3.5. y 3.3.6.), la fracción de la raíz se obtiene de dividir la profundidad del horizonte / la profundidad del pedón. Las raíces en la zona del pedón de suelo son de aproximadamente 1 m (Valor observado en el área de estudio) y el índice de área foliar. Su solución se muestra en la ecuación (14):

$$S = fr\beta(1 - e^{-(0.586 * LAI)})E_{To} \quad (14)$$

Donde:

fr = Fracción de raíz el horizonte de profundidad L [mm/mm]

β = Función de estrés de humedad del suelo

LAI =Índice de área foliar

E_{To} =Evapotranspiración de referencia [$\text{mm}/\text{día}$]

3.3. MÉTRICAS DE DESEMPEÑO

El desempeño o eficiencia se obtiene de forma cuantitativa con respecto a datos comparados de humedad del suelo medidos de la torre Eddy Covariance y los estimados en el modelo para cada horizonte del pedón. Para lo que se utilizarán 3 métricas o indicadores estadísticos de desempeño, conocidas por su uso en modelación hidrológicos, que son: Coeficiente de Correlación (CC; ecuación 15), Error Medio Absoluto o Mean Absolute Error (MAE; ecuación 16) y Error cuadrático medio o Root Mean Square Error (RMSE; ecuación 17; Apaydin et al., 2020). Los valores óptimos de las métricas son de CC = 1, MAE = 0 y RMSE = 0, siendo mientras más cercanos los valores a estos, mejor ajuste tendrá el modelo. La eficiencia del modelo solo se pudo medir en los horizontes subsuperficiales (Horizontes 2 - 5), debido a que ninguno de los tres sensores de medición se encuentra en el horizonte superficial 1, pudiéndose observar esto en la Figura 6, haciendo imposible hallar la medición de humedad en el horizonte superficial.

$$CC = \sqrt{\frac{[\sum_{n=1}^N (Xn - X)(Yn - Y)]^2}{\sum_{n=1}^N (Xn - X)^2 \sum_{n=1}^N (Yn - Y)^2}} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Yn - Xn| \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Xn - Yn)^2} \quad (17)$$

Donde:

Xn= Valor real de la humedad del suelo

X= Media del valor real de la humedad del suelo

Y_n = Predicción de la humedad del suelo

Y = Media de la predicción del valor real de la humedad del suelo

N = Cantidad de valores

3.4. RECOPIACIÓN DE DATOS

Los datos necesarios para obtener las ecuaciones del balance hidrológico en los cinco horizontes del pedón de suelo y la humedad diaria, fueron obtenidos de: datos observados en el campo, mediciones en el laboratorio específicamente relacionados con las características hidrofísicas del suelo, funciones de transferencia como Rosetta Lite que transforma parámetros físicos del suelo a parámetros hidrológicos y finalmente revisión de literatura para cubrir parámetros no medidos o valores de constantes. La Tabla 2 presenta los datos que se usaron para el modelo, con sus respectivas fuentes.

Tabla 2

Datos necesarios para el modelamiento con sus respectivas fuentes

Parámetro	Símbolo	Fuente
Profundidad	L	LEMSUR
Porosidad	Φ	
Fracción de raíz en el horizonte de profundidad L	fr	
Conductividad hidráulica	K_s	Rosetta, (Ochsner, 1992)
Distribución del tamaño de los poros	b	
Intercepción	l	(Ochoa-Sánchez et al., 2018)
Punto de marchitez	$\theta_w 1$	(Tecnología de riego, 2009)
Contenido crítico de humedad	$\theta_c 1$	
índice de área foliar	LAI	(Hofstede et al., 1995)

Precipitación	P	Torre Eddy Covariance
Humedad	θ	
Temperatura	Temp	
Radiación neta	Rn	
Flujo térmico	G	
Presión atmosférica	Pa	
Velocidad del viento a 2m de altura	U	
Humedad relativa	HR	

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE BALANCE HIDROLÓGICO

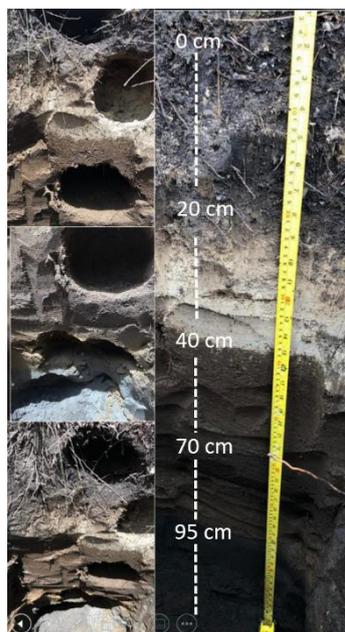
En el presente capítulo se muestran los resultados del modelamiento del balance hidrológico del pedón. Para lo cual, se analizarán los flujos de agua necesarios para la obtención del modelo en periodos de tiempo diario comprendido entre noviembre de 2020 hasta septiembre de 2021. A continuación, se exponen los valores resultantes superficiales y subsuperficiales de los cinco horizontes del pedón de suelo.

4.1.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO DE LOS HORIZONTES DEL SUELO DENTRO DEL PEDÓN

El análisis de las características físicas de los horizontes del pedón, se llevó a cabo por el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR). En la Tabla 3 se presenta los resultados definidos por LEMSUR donde se observa: la profundidad de cada horizonte; profundidades a las que se tomó las muestras de suelo fueron que son claramente identificables por su color y textura (Figura 10); la profundidad a la que los sensores fueron ubicados. Los horizontes del suelo tienen porosidades variables desde 49.99 % (Horizonte 3) a 63.3 % (Horizonte 1). La clasificación del suelo SUCS, con su respectivo significado, en las que presenta que el suelo de la zona tiene texturas predominantes de arena y limo. En el Anexo 1 se puede apreciar las hojas de resultados presentados por el LEMSUR de estos análisis.

Tabla 3*Tipos de suelos a diferentes profundidades del pedón de estudio*

N°	Profundidad [m]			Porosidad [%]	Clasificación SUCS	
	Horizonte	Horizonte	Muestra		Sensores	Clasificación de suelos
1	-0.2	-0.13	--	63.3	OH	Limo orgánico de alta plasticidad con arena
2	-0.2	-0.23	-0.3	48.61	OL	Limo orgánico de baja plasticidad con arena
3	-0.3	-0.58	-0.58	49.99	SM	Arena limosa
4	-0.25	-0.85	--	50.72	SM	Arena limosa
5	-0.05	-1.02	-1	60.31	SP-SM	Arena mal graduada con limo

**Figura 10.** Estructura del pedón marcado por sus profundidades en centímetros

Elaborado por: LEMSUR

4.1.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

La Figura 11 muestra la temperatura del aire mensual durante el período de estudio. La temperatura máxima registrada fue en el mes de febrero 2021 con un valor de

temperatura del aire en la zona del pedón promedio de 4.85 °C. El valor mínimo de la misma variable se observó en el mes de agosto 2021 con 3.37 °C. Para la temperatura del aire medido diario presentado en la Figura 12, se registra el promedio de 4.15 °C, con gran variabilidad diaria, siendo el valor máximo de 6.34 °C registrado en el mes de noviembre 2020 y el valor mínimo registrado de 2.14 °C en agosto 2021.

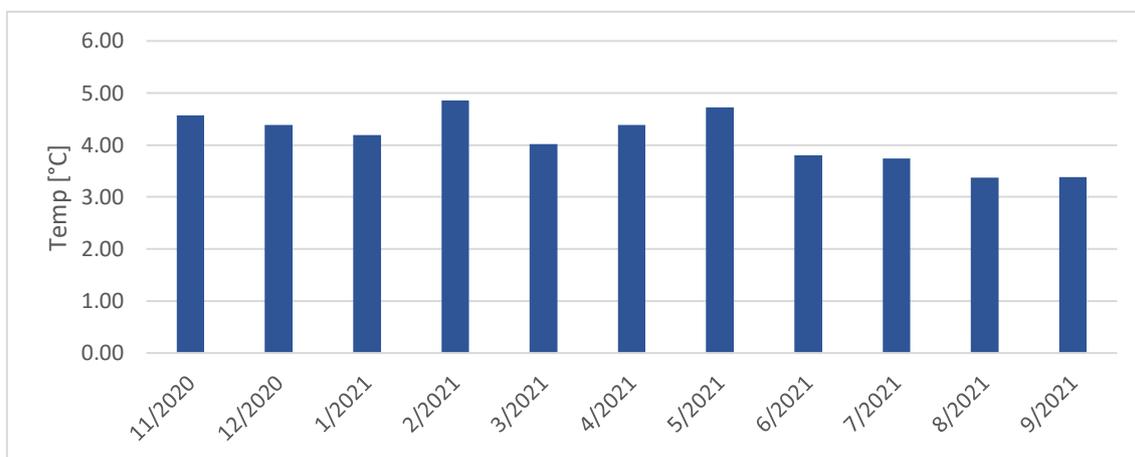


Figura 11. Temperatura del aire mensual [°C] en la zona de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

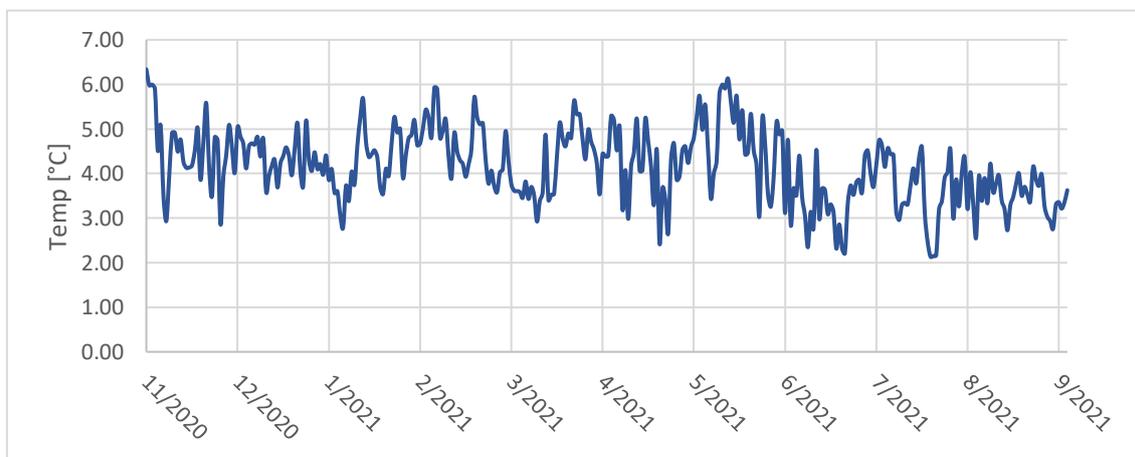


Figura 12. Temperatura diaria del aire [°C] en la zona de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La precipitación medida mensual y diaria en el área de estudio se presenta en las Figuras 13 y 14, respectivamente. Las gráficas muestran que existió una alta variabilidad de la precipitación diaria y mensual. Las mayores precipitaciones en el año de estudio registradas se encuentran en los meses de noviembre 2020, marzo, abril y junio de 2021, siendo sus valores de 105.1 mm, 144.2 mm, 110.3 mm, 105.1 mm, respectivamente (Figura 13). Para las precipitaciones diarias se registra un promedio de 2.51 mm de lluvia en el período de estudio y se observó el pico máximo de precipitación diaria de 23.50 mm en el mes de noviembre 2020 (Figura 14).

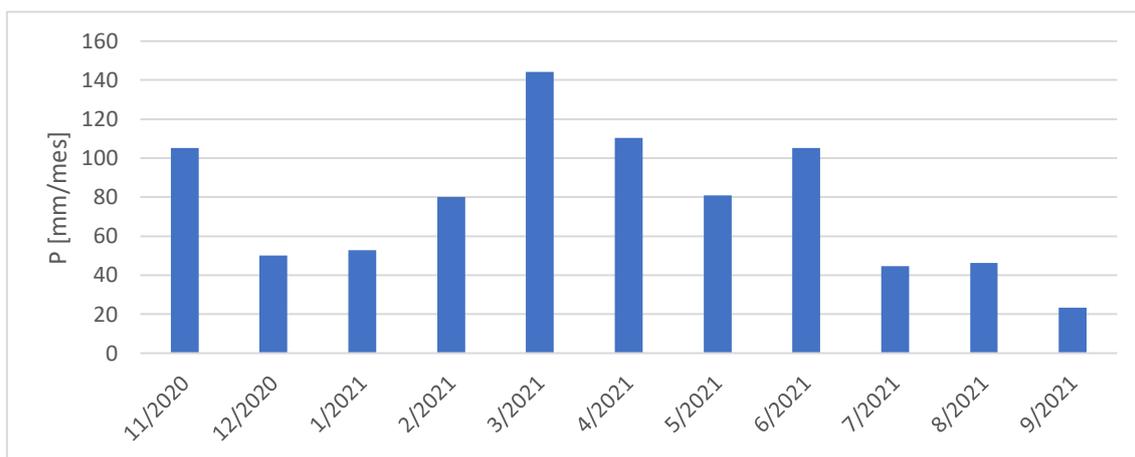


Figura 13. Precipitación mensual [mm] en el área de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

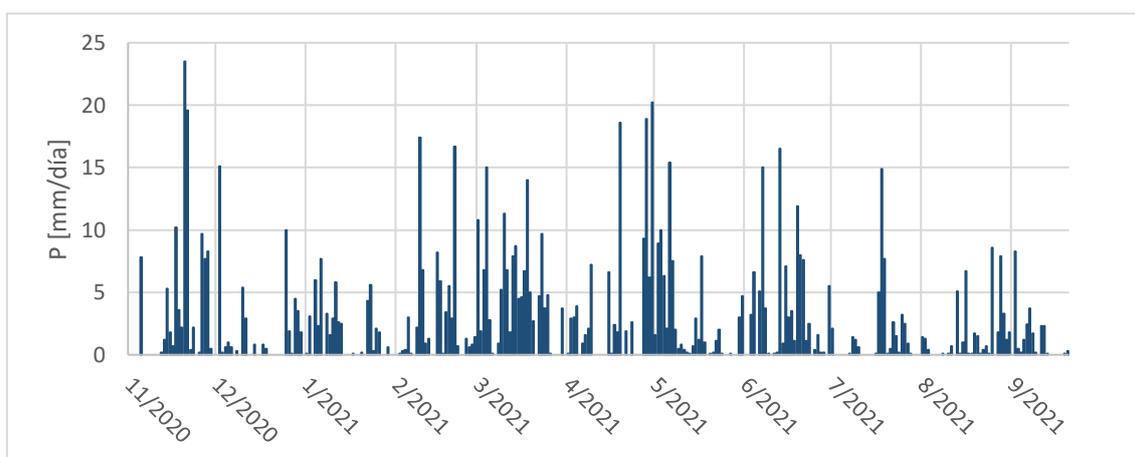


Figura 14. Precipitación diaria [mm/día] en la zona de estudio durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.1.3. FLUJOS SUPERFICIALES

Los flujos de agua superficiales fueron analizados en el horizonte 1, que tiene profundidad de 20 cm, con la ayuda de la ecuación (1). Las variables del balance hidrológico consideradas fueron: precipitación directa (T), percolación (q), absorción de agua de las raíces (S) y escorrentía (R). Las variables fueron analizadas a escala diario dentro del modelo y se obtuvo la variabilidad de la humedad del suelo. Los datos de humedad del suelo calculados por el modelo no fueron comparados con datos observados dentro del horizonte 1 debido que no existe sensor de medición dentro del horizonte.

Para el estudio del balance hidrológico, el parámetro de la escorrentía modelada dio resultados de cero a lo largo del período de estudio, lo que muestra que en el pedón de suelo predomina la infiltración y no se genera escorrentía. En la Figura 15 se muestra la precipitación directa una vez que se descontó la interceptación de la vegetación. Los valores de T obviamente muestran una similitud a la variabilidad de la precipitación total (Figura 14). El promedio diario fue de 2.47 mm con la precipitación máxima de 23.30 mm/día en el mes de noviembre 2020 teniendo otros picos en meses de febrero a abril 2021.

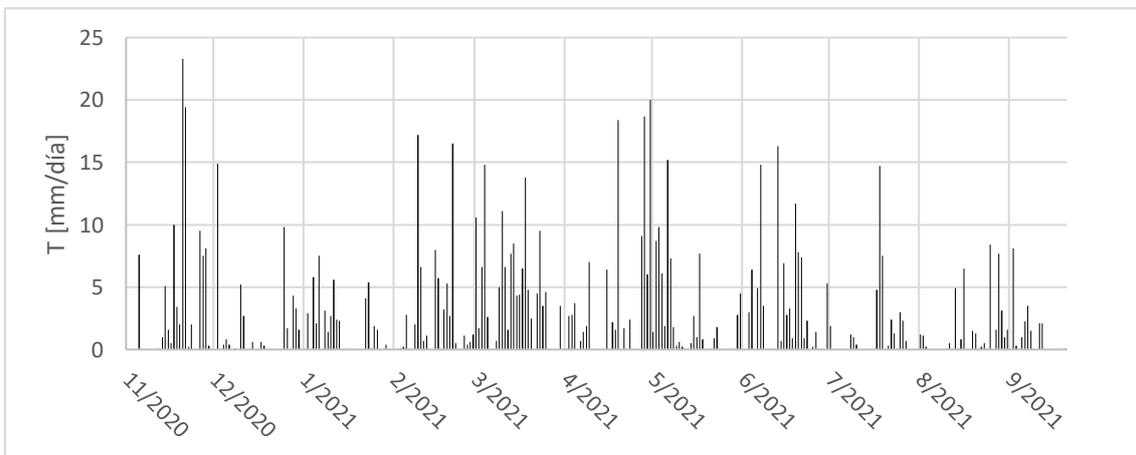


Figura 15. Precipitación directa no interceptada por la vegetación [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

En la Figura 16, se presenta la gráfica de la absorción de agua diaria de las raíces del horizonte superficial 1. La fracción de la raíz para este horizonte es de 0.20 metros, considerando que es igual a la profundidad de dicho horizonte 1. El promedio de los valores fue de 0.47 mm con su máxima absorción de 0.84 mm en el mes de abril 2021 y mínimo de 0.18 mm en el mes de diciembre 2020. La S es dependiente de la evapotranspiración de referencia a escala diaria, punto de marchitez y el contenido crítico de humedad con valores 0.1 y 0.29 respectivamente.

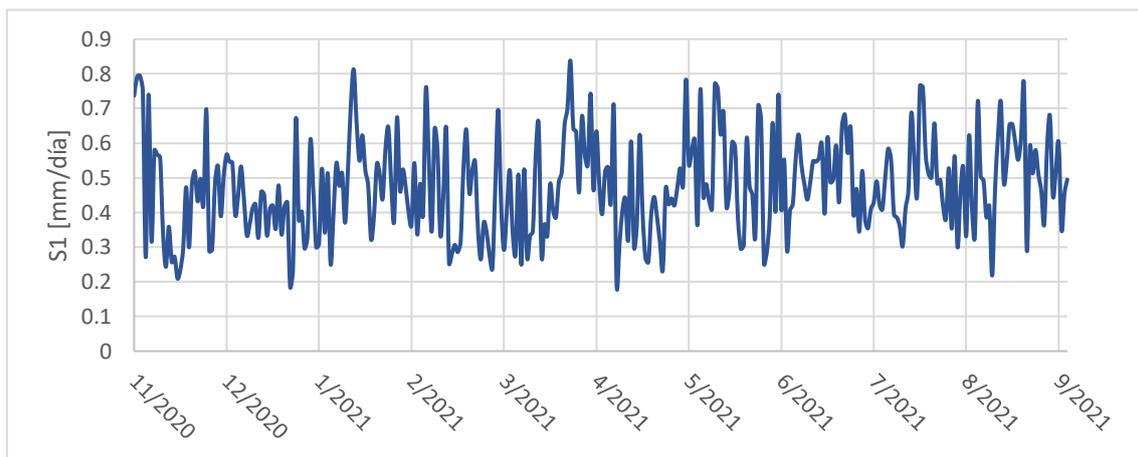


Figura 16. Absorción de agua de las raíces del horizonte 1 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Los datos modelados de la evapotranspiración de referencia diaria (ET_o), calculados con la ecuación de Penman Monteith, en el horizonte superficial 1 son mostrados en la Figura 17. La ET_o fue dependiente de valores como: temperatura, radiación neta, flujo térmico, presión atmosférica, humedad relativa y la velocidad del viento a los 2 m. Teniendo como rango de valores de 0.96 a 5.10 mm/día y con el promedio de 2.50 mm.

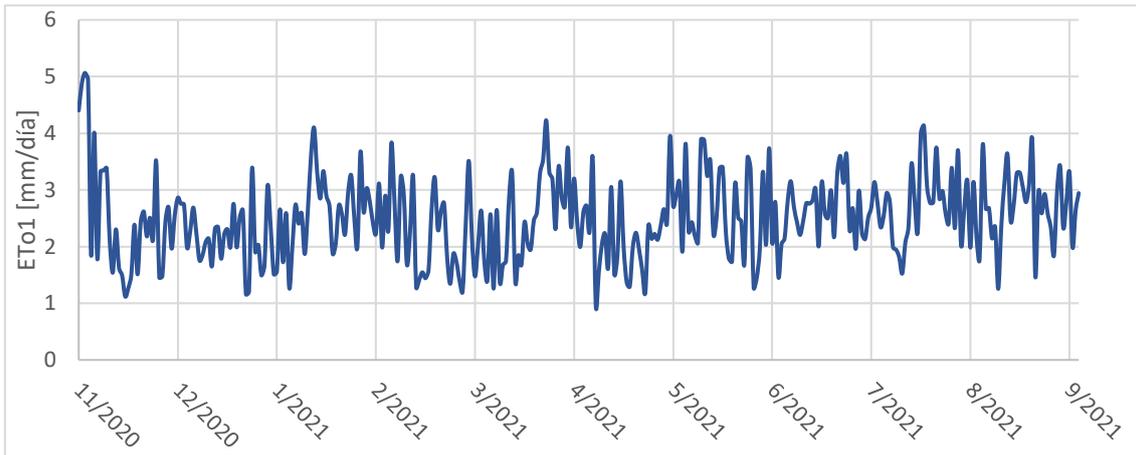


Figura 17. Evapotranspiración de referencia a escala diaria [mm/día] del horizonte 1 calculada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La percolación en el horizonte 1, calculada en periodos de tiempo diario se muestra en la Figura 18. Esta variable presentó un valor máximo de 29.62 mm en el mes de noviembre 2020 y otro pico en mayo 2021 con el valor de 25.58 mm. El promedio de la percolación en el horizonte 1 fue de 2.00 mm por día.

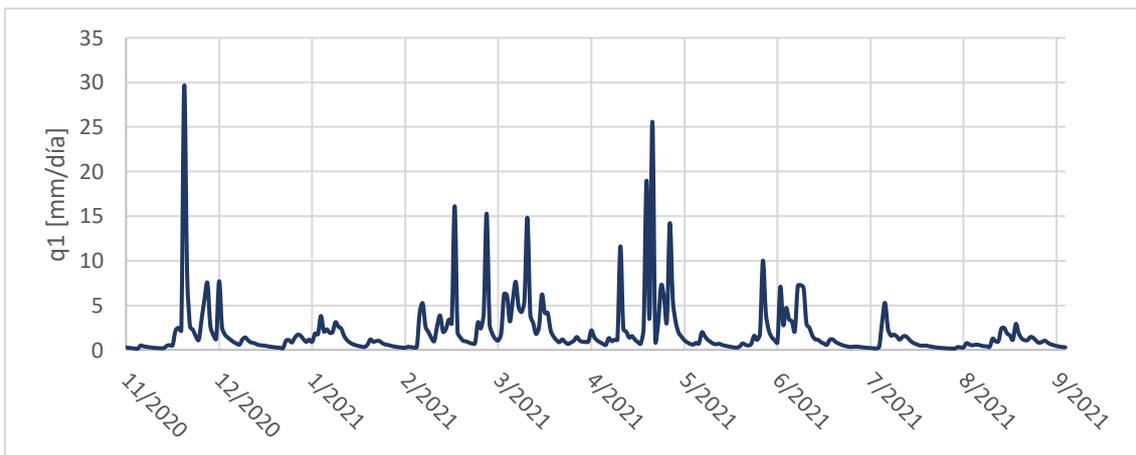


Figura 18. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 1 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La humedad del suelo calculada para el horizonte superficial está representada por círculos de color rojo en la Figura 19, siendo los resultados del balance hidrológico para el horizonte 1, expresados en los cambios de humedad del suelo diario. Dicha humedad del suelo es muy dinámica y muestra incrementos de humedad del suelo

correspondientes a los picos de precipitación y un decrecimiento de la humedad del suelo en períodos secos. Los valores de la humedad diaria del modelo varían de 24.10 % a 42.85 % siendo el promedio de humedad en el período de estudio el valor de 30.33 %.

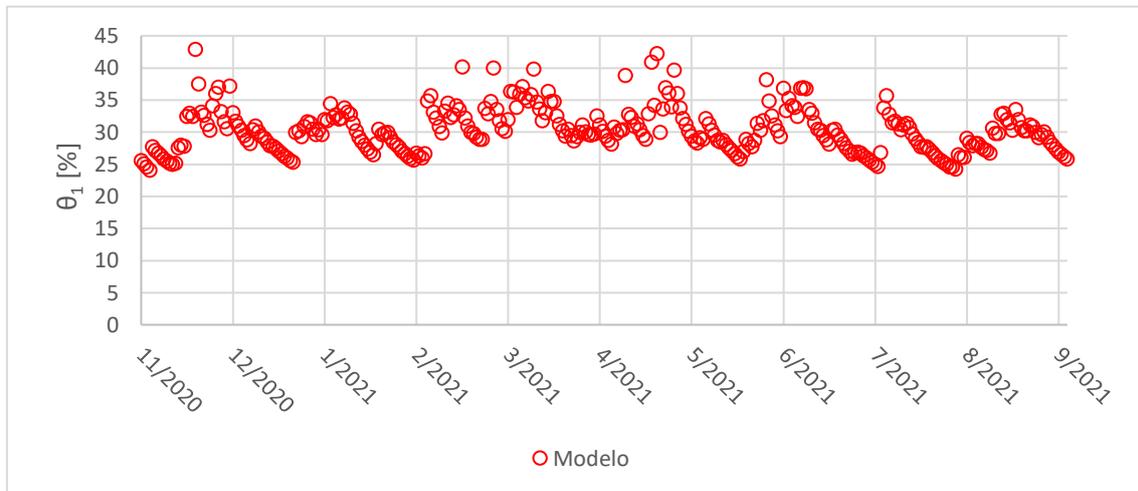


Figura 19. Humedad del suelo diaria [%] en el horizonte 1, modelada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.1.4. FLUJOS SUBSUPERFICIALES

4.1.2.1. Horizonte 2

La humedad del suelo dentro del horizonte 2 con una profundidad de 20 cm fue calculada mediante la ecuación 2. Las variables consideradas fueron: percolación desde el horizonte superior (Horizonte 1; $q_{(n-1)}$), absorción de agua de las raíces (S) y la percolación del horizonte de suelo analizado (q_n). A partir de este horizonte ya no se toma en cuenta variables superficiales, tales como la: precipitación directa (T) y escorrentía (R). La única variable de ingreso, considerada por el modelo, de agua es la percolación del horizonte 1.

La absorción de agua diaria de las raíces del horizonte subsuperficial 2 se presenta en la Figura 20. La máxima absorción de agua fue de 0.58 mm y mínimo de 0.09 mm. El promedio de los valores calculados fue de 0.31 mm. Esta variable fue dependiente de la evapotranspiración de referencia (resaltando que para este horizonte se optó a obtener la E_{To} mediante el promedio de los valores obtenidos

de la ETo entre el horizonte 1 y 3), punto de marchitez y el contenido crítico de humedad con valores 0.1 y 0.29 respectivamente.

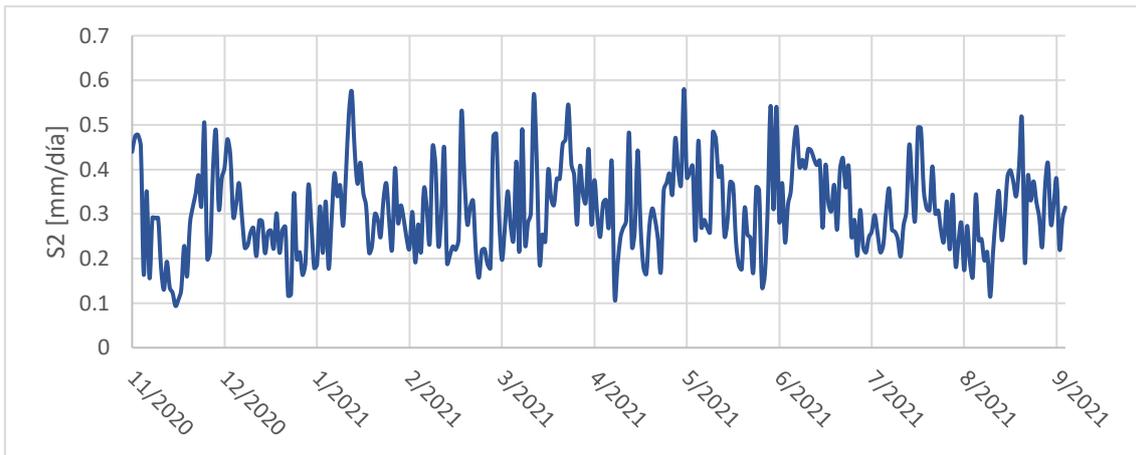


Figura 20. Absorción de agua de las raíces del horizonte 2 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La percolación del horizonte 2 puede observarse en la Figura 21. Dicha figura presenta picos diarios máximos en los meses de febrero, marzo y mayo 2021 con valores de 21.25, 17.34 y 17.84 mm respectivamente. El valor promedio de percolación del horizonte 2 fue de 1.48 mm/día. La percolación modelada 2 es la entrada de agua para el siguiente horizonte 3.

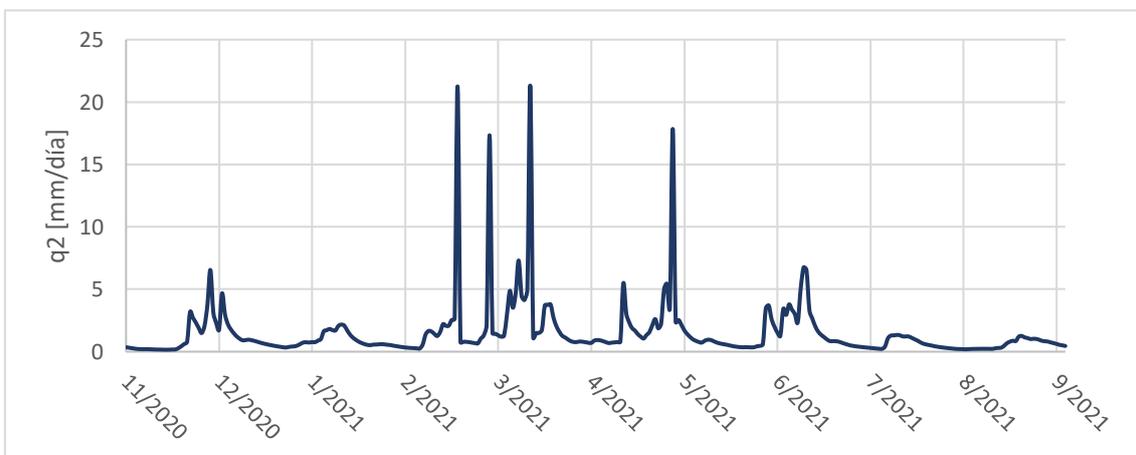


Figura 21. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 2 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La Figura 22 presenta los resultados del balance hidrológico para el horizonte de suelo 2 en conjunto con los valores medidos de humedad del suelo para el mismo horizonte. Los valores de la humedad diaria medida, presentado con círculos de color rojo abiertos, variaron de 31.35 % a 17.93 %, mostrando los picos mayores en noviembre 2020, febrero, marzo y mayo 2021 concordando con los meses de mayor pluviosidad. El promedio de la humedad modelada fue de 21.98 % y tiene cierta semejanza en la tendencia, rango de valores y promedio con la humedad medida de la torre Eddy Covariance, presentada con la línea de color azul continua, donde su rango de humedad medida fue de 26.55 a 18.12 % y promedio de 21.09 %.

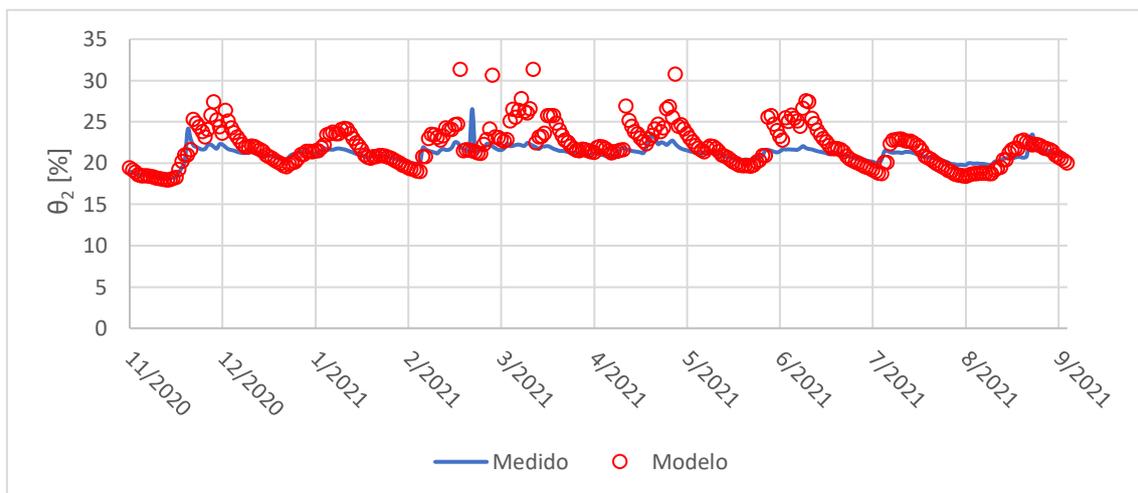


Figura 22. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 2, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.1.2.2. Horizonte 3

El presente numeral muestra los flujos subsuperficiales para obtener la variable de estado o humedad del horizonte subsuperficial número 3. El horizonte 3 presenta una profundidad de 30 cm y es el más ancho de todos los horizontes. La Figura 23 muestra la gráfica de la absorción de agua diaria de las raíces en el horizonte 3. El promedio de los valores es de 0.11 mm con su máxima absorción de las raíces de 0.61 mm siendo dependiente de la evapotranspiración de referencia con valores

diarios, punto de marchitez y el contenido crítico de humedad con valores 0.09 y 0.23 respectivamente.

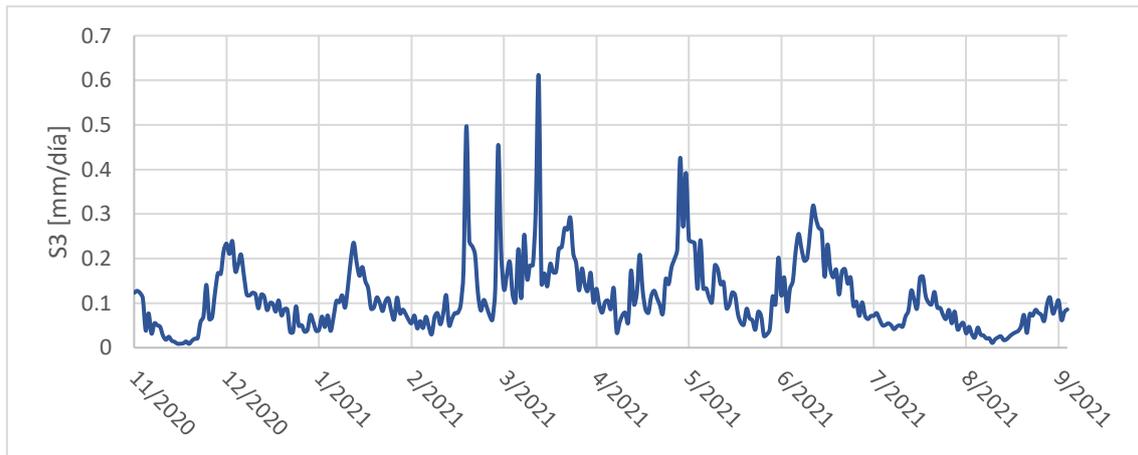


Figura 23. Absorción de agua de las raíces del horizonte 3 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Los datos modelados de la evapotranspiración de referencia (E_{To}) en el horizonte superficial 3 son mostrados en la Figura 24. El rango de valores de la E_{To} , obtenida por la ecuación de Penman Monteith, fue de 0.96 y su valor máximo de 4.94 y con el promedio de 2.48 mm.

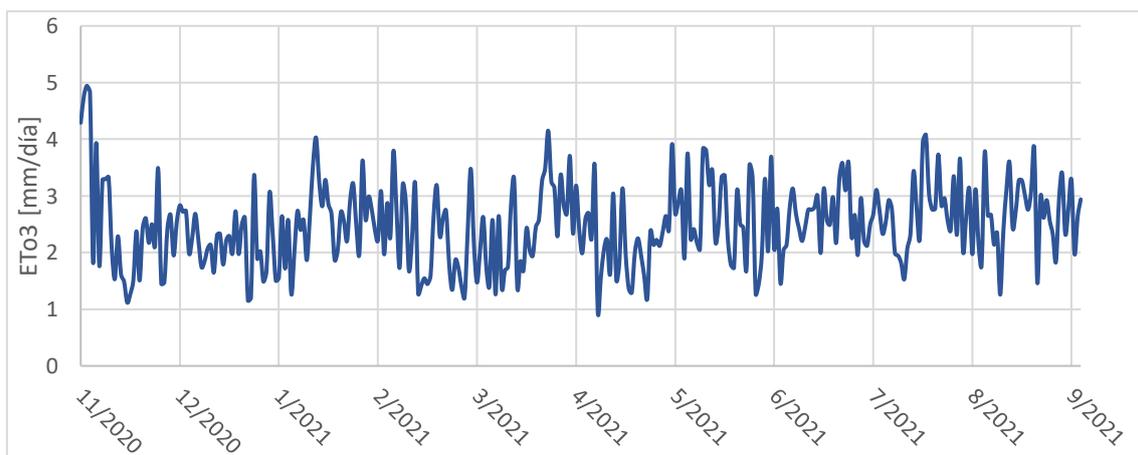


Figura 24. Evapotranspiración de referencia a escala diaria [mm/día] del horizonte 3 calculada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Los resultados diarios de la percolación del horizonte subsuperficial para el horizonte 3 se presenta en la Figura 25. Los resultados de la gráfica presentan sus picos diarios máximos en los meses de febrero, marzo y mayo 2021 con valores de 11.05, 17.86 mm y 12.03 mm, respectivamente. El valor mínimo de la percolación en el horizonte 3 fue de 0.29 mm. El promedio de la percolación tomado del período de estudio fue de 1.37 mm.

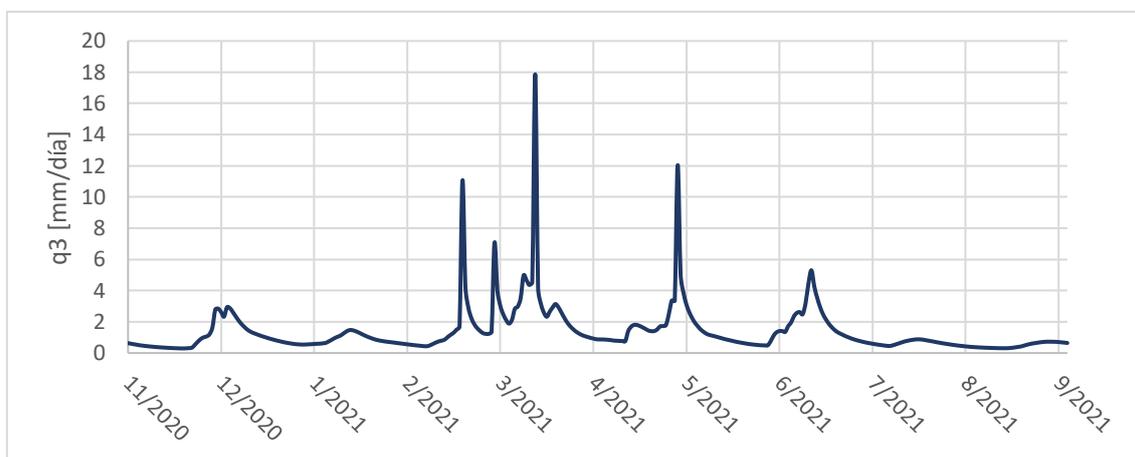


Figura 25. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 3 durante
Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La variabilidad de la humedad del suelo como resultado del balance hidrológico en el horizonte 3 fue obtenida con la ayuda de la ecuación (2) y los parámetros necesarios, como: percolación anterior al horizonte presente (q_2), absorción de agua de la raíz (S) y percolación del horizonte 3 (q_3). Los resultados diarios de humedad medida se evidencian en la Figura 26, donde se logra apreciar valores variables de las humedades diarias tanto en el modelo como en las mediciones. Los valores de la humedad diaria del modelo están representados por los círculos rojos abiertos y éstos varían de 22.12 a 9.41 %, evidenciándose sus períodos donde la humedad se acrecienta en los meses de febrero, marzo y mayo que corresponden con los picos de precipitación. El promedio de la humedad medida es 12.25 % y teniendo cierta semejanza en la tendencia con la humedad medida de la Torre Eddy Covariance (Línea continua azul), teniendo su rango de valores de 15.59 a 8.40 % y promedio de 11.78 %.

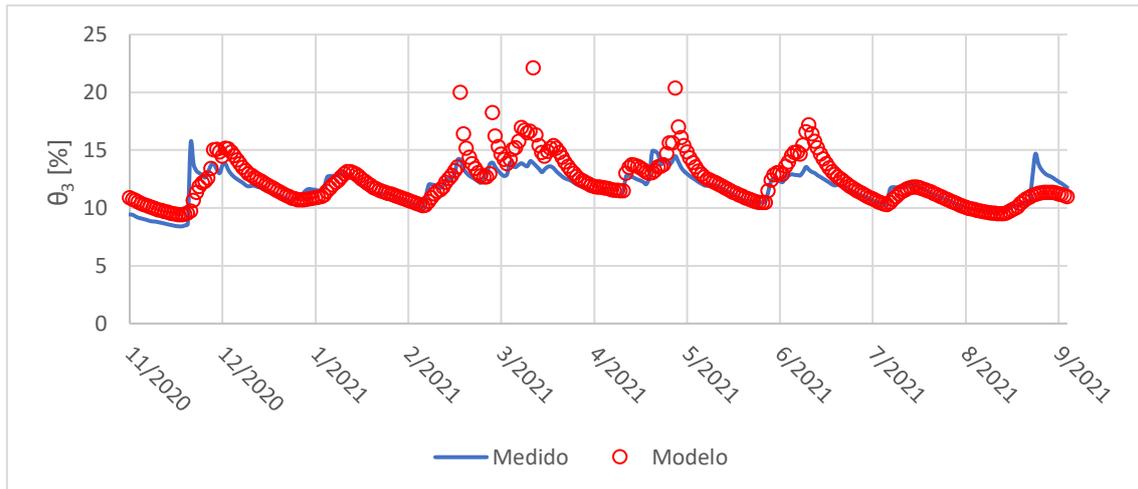


Figura 26. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 3, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.1.2.3. Horizonte 4

La humedad del suelo del horizonte subsuperficial número 4, que presenta una profundidad de 25 cm, fue obtenida con la ayuda de la ecuación (2) y los parámetros necesarios, como: percolación del horizonte anterior al horizonte presente ($q(n-1)$), absorción de agua de las raíces (S) y la percolación del presente horizonte (q_n). En el presente horizonte se detallarán los flujos necesarios para la obtención de la variable de estado.

La gráfica de la absorción de agua diaria de las raíces en el horizonte subsuperficial 4 se muestra en la Figura 27. El promedio de los valores fue de 0.09 mm con su máxima absorción de las raíces de 0.40 mm. El parámetro S es dependiente de la evapotranspiración de referencia con valores diarios (resaltando que para este horizonte no se tuvieron los suficientes datos para la resolución de la E_{To} , por lo que se optó a realizar el promedio entre el horizonte 3 y 5 y así tener los valores necesarios), punto de marchitez y el contenido crítico de humedad con valores 0.09 y 0.23 respectivamente.

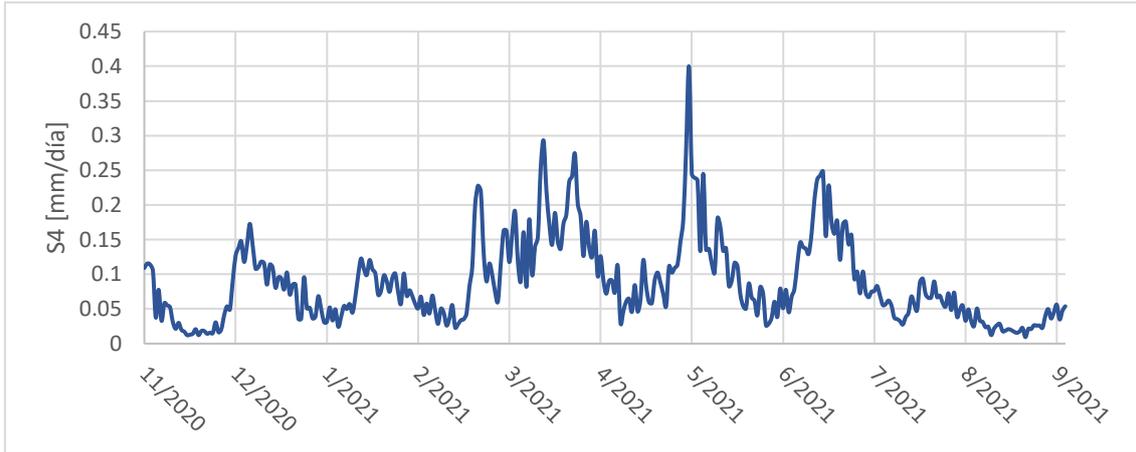


Figura 27. Absorción de agua de las raíces del horizonte 4 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La percolación modelada del horizonte subsuperficial 4 es representada en la gráfica de línea continua Figura 28. Los picos diarios máximos se muestran en los meses de marzo y mayo 2021 con valores de 16.41 y 7.54 mm respectivamente. El valor mínimo de la percolación en el horizonte es de 0.36 mm. El promedio de la percolación es de 1.30 mm.

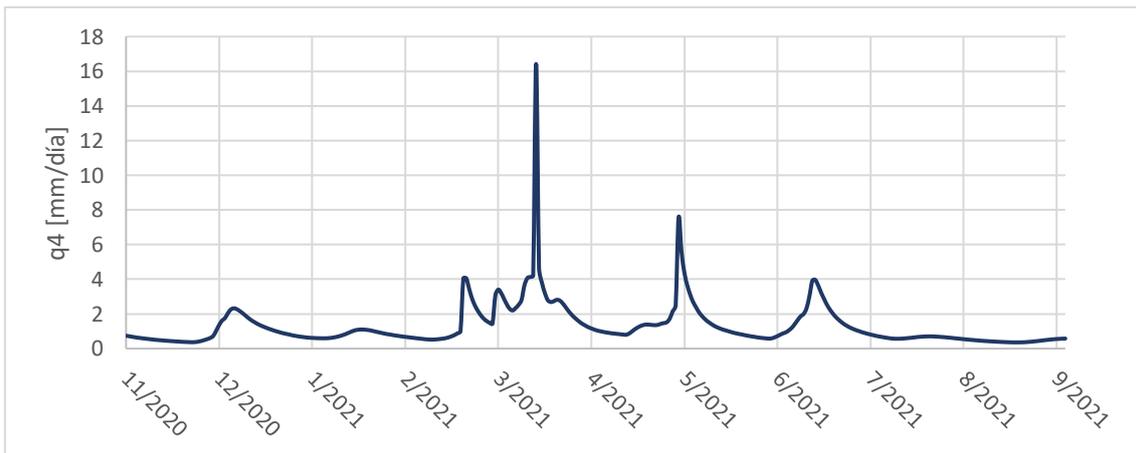


Figura 28. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 4 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La variable de estado representada por la humedad en el horizonte 4 se muestra en la Figura 29. La humedad medida en dicho horizonte evidencia una dinámica de valores de humedades diarias tanto en el modelo como en las mediciones. Los valores de la humedad diaria del modelo se presentan con círculos rojos abiertos, varía de 20.9 a 8.43 % siendo el promedio de 10.73 % y teniendo cierta semejanza en la tendencia con la humedad medida de la torre Eddy Covariance representada por la línea continua azul, teniendo su rango de valores de 14.20 a 7.47 % y promedio de 10.81 %. Los datos medidos de humedad para el horizonte 4 no fueron obtenidos de manera directa de la torre, debido a que para este horizonte no existen los sensores de medición de humedad y para lo cual se optó por obtener la humedad de manera indirecta con el promedio de los datos medidos de la torre de los horizontes aledaños que son los horizontes 3 y 5.

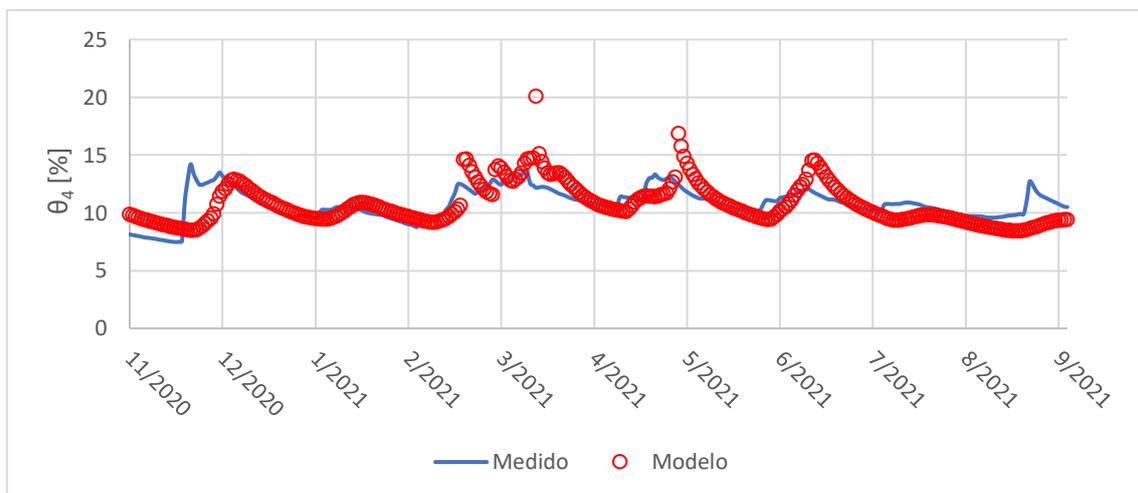


Figura 29. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 4, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.1.2.4. Horizonte 5

La humedad del horizonte subsuperficial número cinco, fue obtenida con la ayuda de la ecuación (2) y los parámetros necesarios, como: percolación anterior al horizonte presente (q_4), absorción de agua de las raíces (S) y la percolación del presente horizonte (q_5). En el punto se muestran las gráficas resultantes de los flujos necesarios para obtener la variable de estado. Las series de valores de

absorción de agua de la raíz en esta zona se puede ver en la Figura 30. El promedio de los valores fue de 0.18 mm con su máxima absorción de las raíces de 0.44 mm y mínimo de 0.03 mm siendo dependiente de la evapotranspiración de referencia con valores diarios, punto de marchitez y el contenido crítico de humedad con valores 0.04 y 0.14 respectivamente.

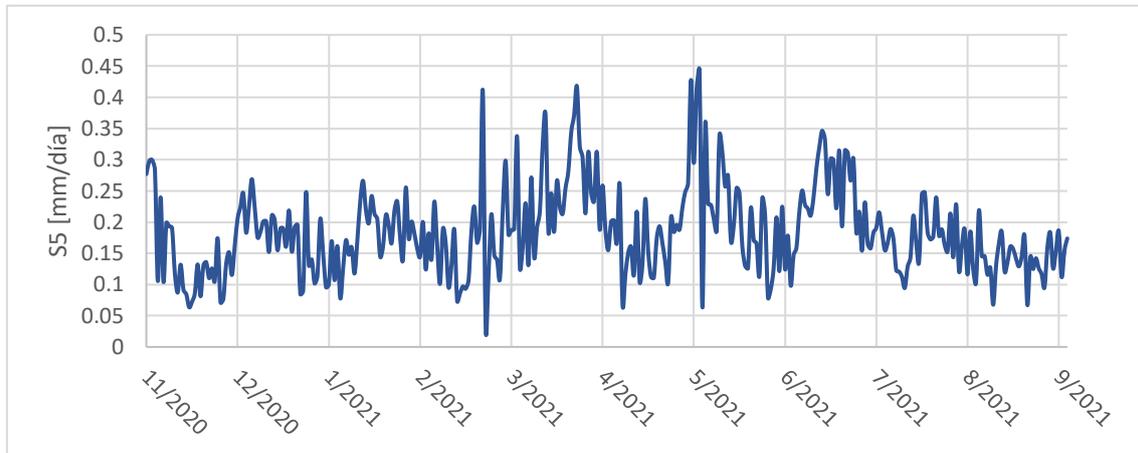


Figura 30. Absorción de agua de las raíces del horizonte 5 [mm/día] durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Se evidencia en la Figura 31 los datos modelados de la evapotranspiración de referencia (ET_o) de periodos diarios del horizonte subsuperficial 5. El valor máximo de evapotranspiración se evidencia en el mes de noviembre con el valor de 4.87 mm y el mínimo de 0.96. El promedio de la evapotranspiración de referencia es de 2.48 mm.

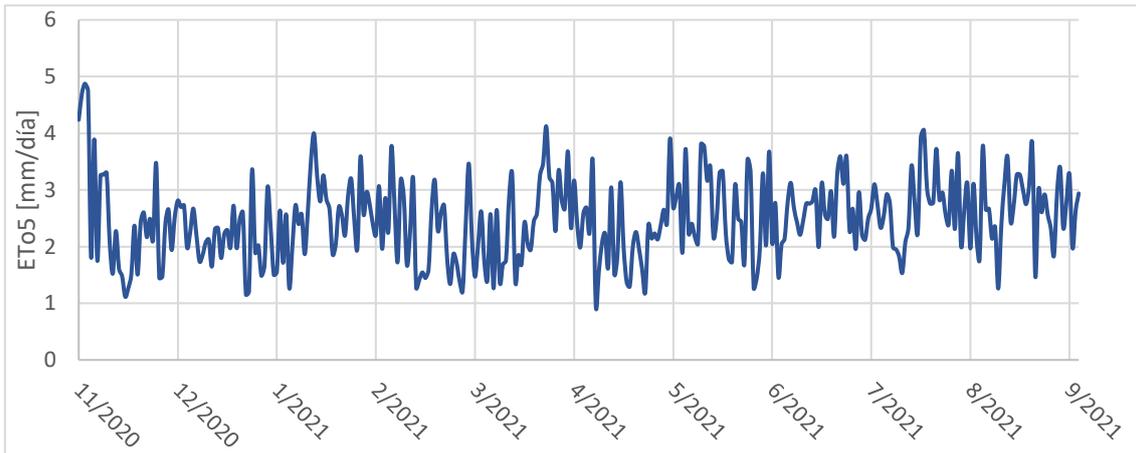


Figura 31. Evapotranspiración de referencia a escala diaria [mm/día] del horizonte 5 calculada durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La percolación modelada del horizonte subsuperficial 5 es representada en la gráfica de línea continua Figura 32. Los picos diarios máximos se muestran en los meses de febrero y mayo 2021 con valores de 8.44 y 7.11 mm respectivamente. El valor mínimo de la percolación en el horizonte 5 fue de 0.21 mm. Con el promedio de percolación de 1.04 mm.

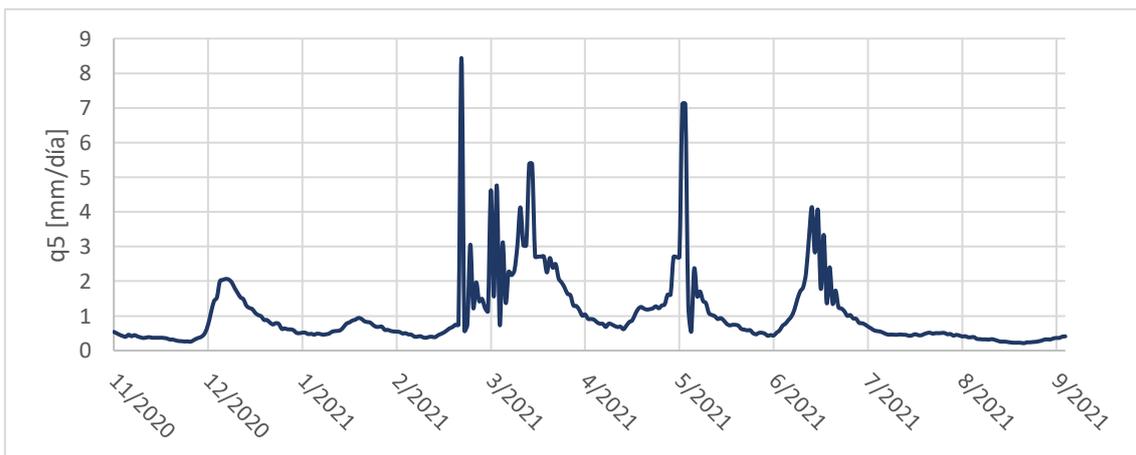


Figura 32. Percolación modelada diaria [mm/día] del horizonte 5 durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Los resultados del balance hidrológico para el horizonte 5 se muestran como valores diarios en la Figura 33. El cambio en la humedad del suelo se determinó como resultado de la ecuación 2 donde se integraron variables tales como: la

absorción de agua de las raíces (S) y la percolación tanto el anterior al horizonte y el actual (q4 y q5). Los valores son variables de las humedades diarias tanto en el modelo como en las mediciones. Los valores de la humedad diaria del modelo que se observa en la figura con círculos rojos abiertos varían de 16.15 a 5.33 % siendo sus períodos de aumento en la humedad en los meses de marzo y mayo 2021, siendo el promedio de 10.03 % y teniendo cierta semejanza en la tendencia y rango de valores de la humedad medida por los sensores de la torre Eddy Covariance, representada por una línea continua azul, teniendo su rango de valores de 15.19 a 6.42 % y promedio de 9.84 %.

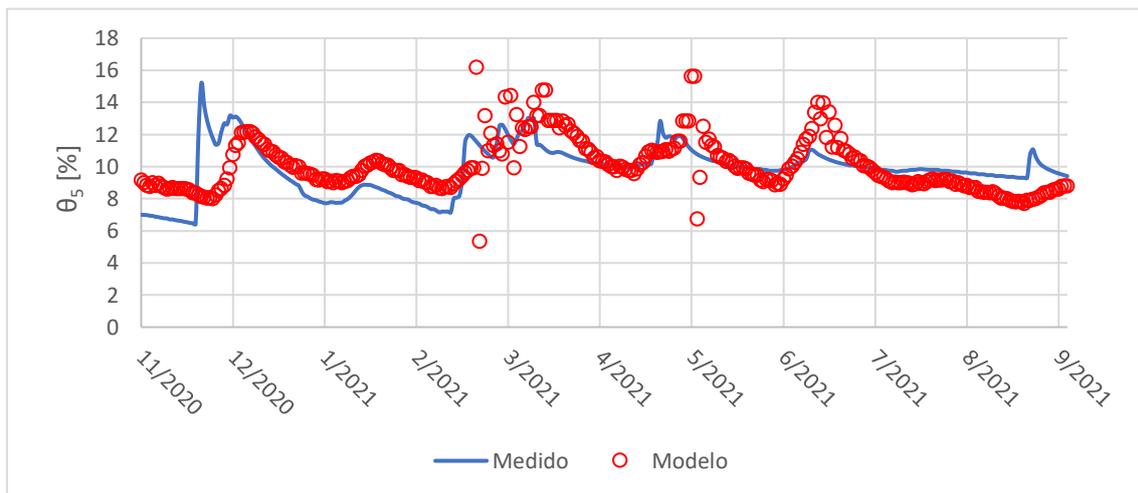


Figura 33. Humedad del suelo modelada [%] comparada con la humedad del suelo medida [%] dentro del horizonte 5, durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.2. RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DEL MODELO

4.2.1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (CC)

La métrica de desempeño denominada Coeficiente de correlación (CC; Tabla 4), muestra valores por encima de 0.5 la media de valores óptimos. El CC muestra que el desempeño va disminuyendo mientras más profundo es el horizonte. La mayor relación que poseen las variables de humedad medidas y modeladas son de los

primeros horizontes 2 y 3. Estos valores son aceptables a pesar de la simplicidad del modelo para reproducir los procesos hidrológicos del subsuelo.

Tabla 4

Valores de la métrica de CC

	Valor óptimo	Horizonte 2	Horizonte 3	Horizonte 4	Horizonte 5
CC	1	0.72	0.68	0.58	0.48

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.2.2. ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE)

Los resultados del RMSE de los horizontes muestran que no existe mucha magnitud de desviación respecto a los valores modelados de los medidos por la torre Eddy Covariance. Los valores obtenidos de desempeño en todos los horizontes se presentan en la Tabla 5, denotando resultados parecidos entre los horizontes. Los valores presentados son cercanos al óptimo denotando un buen rendimiento del modelo.

Tabla 5

Valores de la métrica de RMSE

	Valor óptimo	Horizonte 2	Horizonte 3	Horizonte 4	Horizonte 5
RMSE	0	0.02	0.01	0.01	0.02

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.2.3. ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE)

El Error Absoluto Medio para las variables analizadas, presenta los resultados de los cuatro horizontes de manera satisfactoria. Al ser, en pocas palabras, un promedio de los errores entre los datos de humedad modelados y medidos, se espera que no tengan valores altos ya que representaría errores mayores. Los cuatro horizontes presentan el mismo valor relativamente bajo cercano al óptimo (Tabla 6).

Tabla 6*Valores de la métrica de MAE*

	Valor óptimo	Horizonte 2	Horizonte 3	Horizonte 4	Horizonte 5
MAE	0	0.01	0.01	0.01	0.01

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En las cinco franjas de suelos encontradas en el pedón predomina el tipo de suelos con contenido de limo y arena, suelos que presentan características de granos intermedios y grandes de acuerdo con su estructura. La porosidad presentada en dichos suelos es cercana o mayor al 50%. A mayor porosidad del suelo se limita la escorrentía, pero aventaja la infiltración del horizonte superficial y la percolación en los horizontes subsuperficiales del pedón (Shaxson & Barber, 2005). El efecto de la porosidad del suelo se puede observar en los resultados obtenidos en los flujos del pedón que se detallarán más adelante.

La temperatura del aire promedio mensual muestra la variabilidad existente en la zona del pedón de suelo, denotando la temperatura promedio predominante de aproximadamente 4 °C mensuales, señalando que la zona del pedón posee un clima frío. La dispersión diaria de temperatura del aire muestra que la temperatura es inversamente proporcional a la humedad del suelo, pues cuando la temperatura se eleva, la humedad del día disminuye. Aunque no es el único factor que influye en el incremento o disminución de la humedad.

Los flujos de agua superficiales y subsuperficiales dependen de la precipitación, ya que asumimos que ésta es la fuente de entrada de agua al sistema del pedón. El agua de la precipitación recorre por todos horizontes por medio de la infiltración, percolación y parte de esta regresará a la atmósfera por medio de la capacidad de absorción de las raíces de la vegetación en la zona del pedón. Los mayores picos de los flujos de agua analizados en el balance hidrológico se dan en los meses que más precipitación existió en el período de estudio, que son los meses de noviembre 2020 y marzo 2021 o en periodos de tiempo aledaños a dichos meses.

La Escorrentía (R) fue dependiente de la humedad y la porosidad del suelo, denotando que en el horizonte superficial la humedad en ningún momento sobrepasó el tamaño de la porosidad. Consecuentemente, no se generó escorrentía durante el período de tiempo analizado. El valor nulo de la escorrentía en todo el año demuestra la capacidad de retención de agua que posee el suelo en la zona de estudio en el páramo al norte del Ecuador.

La precipitación directa no interceptada por la vegetación (T) se convirtió en el punto de entrada de agua al sistema superficial por medio de la infiltración y por la percolación recorre todos los horizontes subsuperficiales. La absorción de agua de las raíces (S) representa un flujo de salida de agua de todos los horizontes, debido a observaciones en el pedón de suelo, las raíces llegan hasta el metro de profundidad lo que hace que la extracción de agua por la vegetación suceda en toda la profundidad del pedón de suelo. Los valores de S son variables pero pequeños en consideración a los parámetros como la percolación, que oscilan en valores mayores a la unidad.

La Tabla 7 y Figura 34 muestran los valores y gráficos del diagrama de cajas y bigotes de la absorción de agua de las raíces para los diferentes horizontes del suelo, gráfico que nos permite comparar dicho flujo de agua de cada horizonte. El diagrama nos muestra que la absorción de las raíces se ve afectada con la profundidad, mientras más profundo sea el horizonte menor absorción de agua existe, a excepción del horizonte 5 que muestra un rango de valores mayor al del horizonte aledaño 4, pudiéndose deber a que el contenido crítico de humedad y el punto de marchitez son menores a los otros horizontes logrando tener mayor disponibilidad de agua que la raíz puede absorber en comparación al horizonte 4. La gráfica también nos muestra que en el horizonte 3 se tuvo mayor dispersión de datos que todos los horizontes.

Tabla 7

Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la absorción de agua de las raíces en los 5 horizontes

	S1	S2	S3	S4	S5
	mm/día				
Mínimo	0.18	0.09	0.01	0.01	0.03
Cuartil 1	0.37	0.24	0.06	0.04	0.13
Mediana	0.47	0.30	0.10	0.07	0.18
Cuartil 3	0.56	0.38	0.15	0.12	0.22
Máximo	0.84	0.58	0.61	0.40	0.44
Promedio	0.47	0.31	0.11	0.09	0.18

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

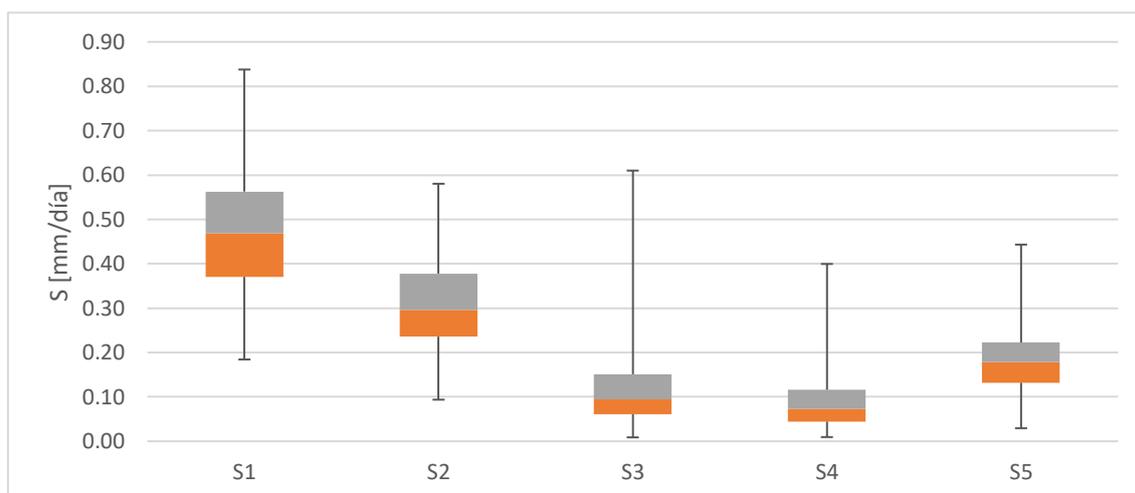


Figura 34. Comparativa de la absorción de agua de las raíces en los distintos horizontes mediante el diagrama de cajas y bigotes

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

La evapotranspiración de referencia (ET_o) presenta, al igual que todos los flujos de agua, dinámica de variables en el período de estudio. La ecuación de Penman Monteith solo se pudo obtener en los horizontes 1, 3 y 5 debido a la ausencia de datos en los horizontes 2 y 4, pero se optó por obtener la evapotranspiración de referencia mediante el promedio de los horizontes aledaños. La Tabla 8 y Figura 35 muestran los valores y gráficos del diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración de referencia para los horizontes mencionados anteriormente para compararlos. El diagrama nos muestra que la evapotranspiración disminuye mientras más profundo es el horizonte, pero no de manera considerable, ya que los

valores de las cinco profundidades son muy parecidos, pudiendo deberse a que a que los datos de medición para la ecuación de Penman Monteith no variaban de manera considerable en cada horizonte.

Los valores medidos de la ETo son consistentes con estudios realizados en páramos del Ecuador, como es el caso de Carrillo-Rojas y coautores que en 2019 realizaron el cálculo de la ETo mediante la ecuación de Penman Monteith en el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay. El estudio reveló comportamientos parecidos con la zona de estudio de la presente tesis, por ejemplo: La media diaria de ETr y ETo fueron de 1.74 ± 0.28 y $1.93 \pm 0,42$ mm/día. En cambio, la media diaria de ETr y ETo en la zona del pedón de suelo fueron de 1.4 y 2.50 mm/día, siendo valores cercanos a los realizados por Carrillo-Rojas y coautores, 2019.

La Figura 36 presenta la comparación entre Evapotranspiración real (ETr) y Evapotranspiración de referencia (ETo), denotando lo que la ETo sobreestima los valores de evapotranspiración, debido a que dicho flujo es la evapotranspiración en condiciones óptimas de humedad, lo que no refleja la realidad misma en un sistema hidrológico. Sin embargo, ambos flujos muestran una tendencia similar, demostrando que la ecuación de Penman Monteith funciona para el páramo altoandino del ACHA.

Tabla 8

Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración de referencia en 3 horizontes

	ETo 1	ETo 3	ETo 5
	mm/día		
Mínimo	0.96	0.96	0.96
Q1	1.99	1.98	1.98
Mediana	2.46	2.45	2.45
Q3	2.95	2.94	2.93
Máximo	5.07	4.94	4.88
Promedio	2.50	2.49	2.48

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

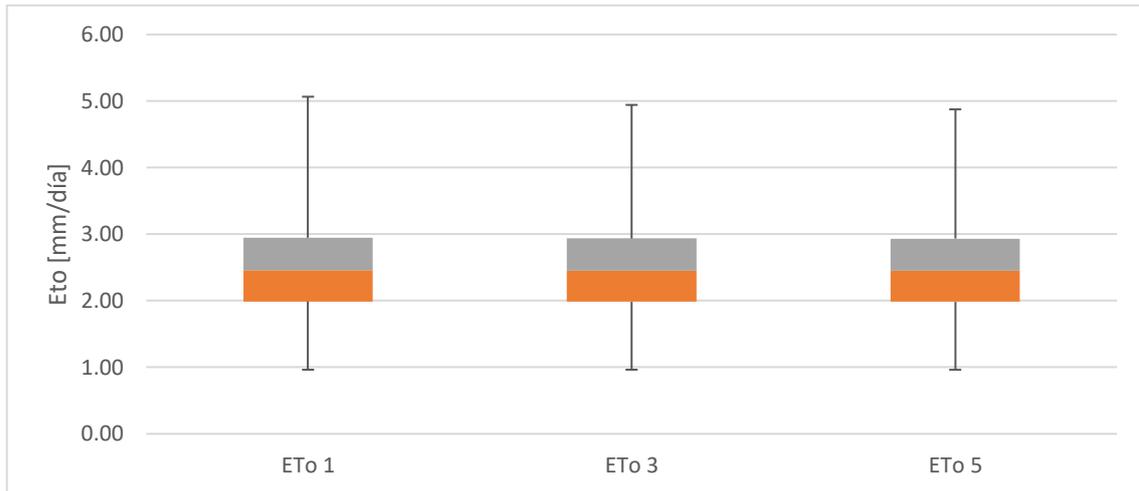


Figura 35. Comparativa de la evapotranspiración de referencia en los horizontes 1, 3 y 5 mediante el diagrama de cajas y bigotes

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

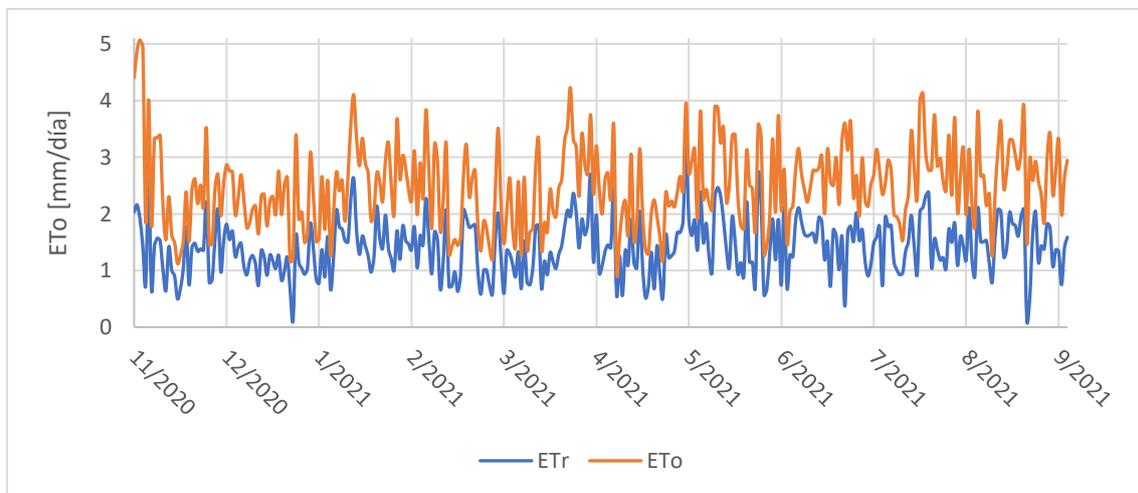


Figura 36. Evapotranspiración real (ETr) vs Evapotranspiración de referencia (ETo), durante Noviembre 2020 a Septiembre 2021

La percolación (q) en todos los horizontes resultó ser un punto determinante de la resolución del balance hidrológico, siendo este el que toma gran importancia en los horizontes subsuperficiales como parámetro de entrada y salida de agua en los horizontes 2 a 5. La percolación representa valores variables dependientes de la humedad del día anterior, conductividad hidráulica saturada, parámetro de distribución del tamaño de los poros y la porosidad.

La Tabla 9 y Figura 37 muestran los valores y gráficos del diagrama de cajas y bigotes de la percolación para los diferentes horizontes del suelo. El diagrama nos muestra que la percolación en todos los horizontes posee mucha dispersión de los datos del 25% entre el cuartil 3 (Q3) y el máximo valor, denotando la dinámica de valores diarios que posee la percolación. De acuerdo con el diagrama y al promedio de que se muestra en la Tabla 8, la percolación disminuye mientras más profundo es el horizonte. La mediana se encuentra por debajo del promedio teniendo asimetría positiva, es decir los datos tienden a concentrarse hacia la parte inferior de la distribución.

Tabla 9

Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la percolación en los 5 horizontes

	q1	q2	q3	q4	q5
	mm/día				
Mínimo	0.13	0.16	0.29	0.36	0.21
Q1	0.51	0.46	0.58	0.60	0.45
Mediana	1.05	0.84	0.86	0.85	0.68
Q3	2.13	1.61	1.56	1.53	1.22
Máximo	29.62	21.31	17.86	16.42	8.44
Promedio	2.00	1.48	1.37	1.29	1.04

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

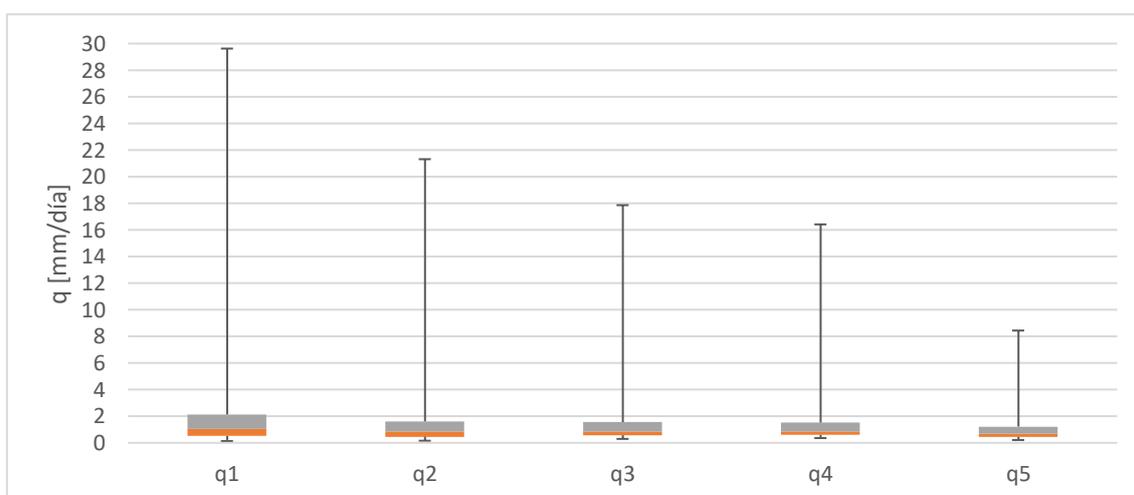


Figura 37. Comparativa de la percolación en los distintos horizontes mediante el diagrama de cajas y bigotes

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Los resultados presentados en el numeral 4, muestran que los valores de los flujos de agua tanto superficial (Horizonte 1) y subsuperficiales (Horizontes 2-5) presentan gran variedad y dispersión de datos de acuerdo con el día. Al comparar el promedio de la humedad modelada con los valores medidos por la torre, se puede tener una primera noción de la efectividad del modelo. En la Tabla 10 se aprecian los valores promedio de humedad de los distintos horizontes a excepción de la superficial por la ausencia de la humedad medida en este horizonte, denotando cierto parecido entre promedios de cada horizonte.

Tabla 10

Promedios de la humedad modelada y medida

Promedio	Modelado	Medido
Horizonte 1	30.33	-----
Horizonte 2	21.98	21.10
Horizonte 3	12.25	11.78
Horizonte 4	10.73	10.81
Horizonte 5	10.03	9.84

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

Las temporadas de mayor humedad se presentan en los meses de noviembre 2020, marzo, junio 2021, siendo periodos de mayor precipitación en la zona del pedón. La Tabla 11 y Figura 38 muestran los valores y gráficos del diagrama de cajas y bigotes de la humedad del suelo [%] para los diferentes horizontes del pedón. El diagrama nos muestra que la humedad se ve afectada por la profundidad, ya que se observa que a mayor profundidad de los horizontes menor humedad existe, demostrando la capacidad de retención de agua que tiene la zona del pedón en especial en los primeros horizontes, viéndose influenciado por las características físicas, como: porosidad, textura, etc., de cada tipo de suelo limitado por los horizontes. De acuerdo con el diagrama y al promedio de que se muestra en la Tabla 11, la mediana se encuentra por debajo del promedio, lo que conlleva a decir que la variable de estado presenta asimetría positiva, es decir los datos tienden a concentrarse hacia la parte inferior de la distribución.

Tabla 11

Valores de construcción del diagrama de cajas y bigotes de la humedad en los 5 horizontes

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
	%				
Mínimo	24.09	17.93	9.41	8.43	5.33
Cuartil 1	27.82	20.24	10.81	9.45	8.93
Mediana	30.04	21.71	11.75	10.25	9.72
Cuartil 3	32.39	23.39	13.30	11.71	10.94
Máximo	42.85	31.35	22.12	20.09	16.15
Promedio	30.33	21.98	12.25	10.73	10.03

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

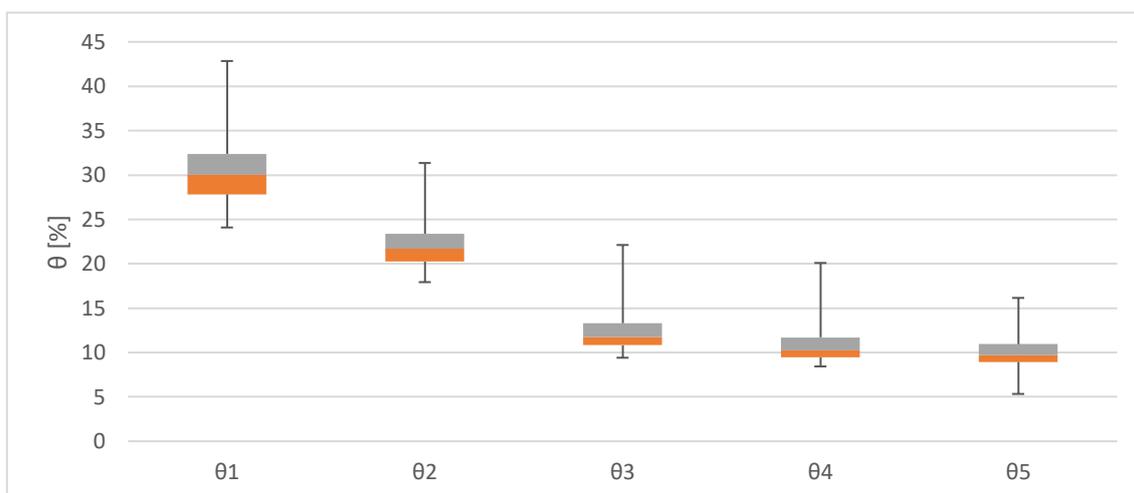


Figura 38. Comparativa de la humedad en los distintos horizontes mediante el diagrama de cajas y bigotes

Elaborado por: Tibanquiza Jonatan

En todos los horizontes subsuperficiales, se muestra similitud en las dinámicas de la humedad del suelo entre el modelo y lo medido por la torre Eddy Covariance. Lo que después se llega a cuantificar con las métricas de desempeño con valores de RMSE y MAE cercanos a el óptimo que es el valor de cero y el CC que presenta valores aceptables mayores a la media. El horizonte 5 presenta la menor efectividad del modelado, pero los demás horizontes tienen niveles buenos que demuestran que el modelo es aceptable a pesar de su estructura simplificada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El balance hidrológico, representado por las ecuaciones 1 y 2 permite determinar los flujos superficiales y subsuperficiales del pedón de suelo. El modelamiento hidrológico permitió la obtención de los flujos de agua superficiales, como son la precipitación directa no interceptada por la vegetación del páramo, la escorrentía, la absorción de agua de las raíces y la percolación. La modelización para los horizontes subsuperficiales también permitió obtener todos los flujos de percolación y absorción de agua de las raíces en cada uno de los cuatro horizontes y la variable de estado del sistema que es representada por los cambios en la humedad del suelo.
- El modelo resulta ser aplicable para el balance hidrológico de los cinco horizontes mediante herramientas como, por ejemplo: hojas de cálculo y herramientas de programación. El modelo es útil y sencillo para cuantificar la variabilidad del sistema hidrológico a escala de pedón de suelo. Este ayuda a entender la partición de agua superficial y subsuperficial del sistema y cuantificar los principales flujos hidrológicos.
- La precipitación (P) es un parámetro importante para el modelo debido a que constituye la única fuente de entrada de agua al sistema. El modelo no considera otros factores de entrada de agua al suelo, como por ejemplo la captura de agua por la vegetación. La percolación fue el parámetro que más protagonismo tuvo en los horizontes subsuperficiales, fue el más usado en dichos horizontes ya que fue el flujo de agua de entrada y salida en cada horizonte.

- A pesar de su simplicidad, el modelo resulta ser relativamente efectivo en la región analizada como es el páramo altoandino, siendo las métricas de desempeño los factores determinantes de esta conclusión. Tanto como el RMSE y MAE presentaron valores muy favorables denotando al modelo como efectivo y el CC muestra que el modelo es bueno en los horizontes subsuperficiales con excepción del 5.

5.2. RECOMENDACIONES

- Es de gran importancia el estudio de los páramos en el Ecuador por el servicio ecosistémico de provisión de agua que beneficia a las ciudades por lo que se recomienda reforzar y continuar con el estudio de balances hidrológicos inclusive en otros ecosistemas del Ecuador partiendo desde escalas pequeñas.
- Como investigación futura se debe considerar el robustecer esta metodología de balance hídrico posiblemente incluyendo otros parámetros o mejorando las ecuaciones presentadas y así comparar con los resultados obtenidos en el presente estudio y poder cuantificar el error de estimaciones de los flujos de agua. Se recomienda hacer un modelamiento con HYDRUS, herramienta que permite resolver la ecuación de Richard que gobierna el flujo de agua subsuperficial.
- Si se pretende realizar un estudio parecido analizando la eficiencia en otras zonas pudiendo ser páramos o inclusive otros ecosistemas se debe tratar de obtener la mayor cantidad de datos necesarios para el modelo como son los parámetros de entrada. Así se toman valores de los parámetros medidos en campo sobre valores de parámetros consultados en la literatura que no siempre se ajustan a las características de las áreas de estudio analizadas como en la región andina evitando cometer errores o tener posibles fallas con el desarrollo del modelo dificultando su desarrollo.

- Se podría utilizar otras fuentes tecnológicas para realizar el modelo, como herramientas de programación que procesen los datos de manera automatizada y faciliten el manejo de grandes cantidades de datos, tales como Matlab, R, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Kaisi, M., Brun, L., & Enz, W. (1989). Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48(1–2), 111–116. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90010-5)
- Apaydin, H., Feizi, H., Sattari, M. T., Colak, M. S., Shamshirband, S., & Chau, K.-W. (2020). Comparative Analysis of Recurrent Neural Network Architectures for Reservoir Inflow Forecasting. *Water*, 12(5), 1500. <https://doi.org/10.3390/w12051500>
- Aranda, D. (1998). Capítulo 1: Generalidades. In *Procesos del ciclo hidrológico* (Potosina, pp. 1–31).
- Betson, R. P. (1964). What is watershed runoff? *Journal of Geophysical Research*, 69(8), 1541–1552. <https://doi.org/10.1029/JZ069i008p01541>
- Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Cisneros, P., & Cisneros, F. (2008). Características físico-químicas de histosoles y andosoles de los páramos de Quimsacocha, Ecuador. XI Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2003). Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad. *Revista Colombia Tiene Páramos*, 2.
- Camacho, M. (2013). Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible. *ANALES de La Universidad Central Del Ecuador* 372, 76–92.
- Campbell, G. S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117(6), 311–314. <https://doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>

- Carchi, E. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la Cuenca del Río Machángara* [Tesis de ingeniería, Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23005>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265(March 2018), 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>
- Carvajal, A. (9 de enero de 2019). Quito se convirtió en la ciudad más poblada del Ecuador con más de 2,7 millones de habitantes en el 2018. *El Comercio*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/orden-movilidad-desafios-candidatos-alcaldia.html>
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71–83.
- Chuncho, G., Chuncho, C., & Aguirre, Z. (2019). Anatomía y morfología vegetal (EDILOJA Ci, Vol. 1). EDILOJA Cia. Ltda. www.ediloja.com.ec
- Cisneros, P., Cajamarca, J., & Pacheco, E. (2010). Estudios para establecer la línea base de suelos inalterados en el páramo de Quimsacocha. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo.
- Coral, A., García, J., & Leal, A. (2015). Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. *Formação*, 1(22), 119–137. <https://doi.org/10.33081/formacao.v1i22.3165>
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. In J. Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L., De Bièvre, B., Posner (Ed.), *Avances en investigación para la conservación de los páramos Andinos*, CONDESAN (pp. 287–304). <https://www.researchgate.net/publication/264416399>

- Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L. ., De Bièvre, B., & Posner, J. (2014). El páramo como proveedor de servicio ambiental primordial, el agua. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos*, 195–204.
- Deiana, A. C., Granados, D., & Sardella, M. (2018). *Introducción a la ingeniería. Capítulo VI-Balance de masa. Departamento de Ingeniería Química- Universidad Nacional San Juan. Argentina.*
- Echeverría, C., Huber, A., & Taberlet, F. (2007). Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 28(3), 271–280. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002007000300013>
- Encalada, M. (22 de julio de 2019). El consumo de agua en Quito crece en un 20% durante el verano. *El Comercio*. <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/consumo-agua-verano-crecimiento-barrios.html>
- EPMAPS. (2020). Más de 25 millones de metros cúbicos abastecen al sur de Quito - Bienvenido a EPMAPS. Agua de Quito. <https://www.aguaquito.gob.ec/mas-de-25-millones-de-metros-cubicos-abastecen-al-sur-de-quito/>
- Ewen, J., & Parkin, G. (2004). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. *Journal of Hydrology*, 287(1–4), 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.021>
- Fernández, J., Algeet, N., Salazar, C., Salazar, S., Vargas, O., Chinchilla, M., & Mata, R. (2002). Balance hídrico de suelos para determinación del régimen de humedad en clasificación de suelos. *Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelo*, 44(1), 1–10.
- Fondo para la Protección del Agua (2018). *Actualización del plan de manejo del Área de Conservación Hídrica Antisana. EPMAPS.*

- Gómez, A., Castillo, V., & Albadalejo, J. (1998). Estudio de procesos hidrológicos a diferentes escalas (marco teórico y propuesta metodológica). *Norba. Revista de Geografía*, 81–93.
- Guevara, E., & Cartaya, H. (1991). *HIDROLOGIA. Una introducción a la Ciencia Hidrológica Aplicada*. (Z. Novoa (ed.); GUECA EDIC).
- Hofstede, R. (2008). Los Servicios Del Ecosistema Páramo: Una visión desde la evaluación de ecosistemas del milenio. *Páramo y Servicios Ambientales. Unión Internacional Para La Conservación de La Naturaleza (UICN)*, 5–18.
- Hofstede, R. G. M., Chilito, E. J. P., & Sandovals, E. M. (1995). Vegetative structure, microclimate, and leaf growth of a páramo tussock grass species, in undisturbed, burned and grazed conditions. *Vegetatio* 1995 119:1, 119(1), 53–65. <https://doi.org/10.1007/BF00047370>
- Johnson, W. M. (1963). The Pedon and the Polypedon. *Soil Science Society of America Journal*, 27(2), 212–215. <https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700020034x>
- Lado, J., Martínez, V., Leal, M., & García, R. (2009). El ciclo hidrológico: experiencias prácticas para su comprensión. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(1), 78-85–85.
- LI-COR. (2021). Eddy Covariance. LI-COR Environmental. https://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/?gclid=Cj0KCCQiAs5eCBhCBARIsAEhk4r6OeqP5WfZ9dMEOps6XDn4JbEGi0ob05_p9AoUU2OaeELxYL3PLUPQaAuVSEALw_wcB
- Llambí, L. D., Soto-w, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Páramos Andinos Ecología, hidrología y suelos de páramos* (Monsalve (ed.); El Antebra).
- Mata, R. (2003). Principios generales sobre pedología y taxonomía de suelos. Coopensilencio, Aguirre, Puntarenas. Curso de certificadores de uso conforme, ley 7779.

- Mongil, J., Navarro, J., Díaz, V., & Cruz, V. (2015). Nuevo infiltrómetro inundador para test de infiltración económico en terrenos agroforestales y espacios verdes. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 290, 281–290.
https://pdfs.semanticscholar.org/5fe8/c49c54c84030ebc8a86314c2600af627b08f.pdf?_ga=2.1819250.2125073879.1592522611-1472127544.1589863065
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., & Célleri, R. (2018). Quantification of rainfall interception in the high Andean tussock grasslands. *Ecohydrology*, 11(3), e1946. <https://doi.org/10.1002/eco.1946>
- Ochsner, T. (1992). Rain or Shine. An Introduction to Soil Physical Properties and Processes. In *The Hudson Review* (Creative C, Vol. 44, Issue 4). <https://doi.org/10.2307/3852028>
- Oki, T., Entekhabi, D., & Harrold, T. I. (2004). The global water cycle. *Geophysical Monograph Series*, 150(January 2004), 225–237. <https://doi.org/10.1029/150GM18>
- Ordoñez, J. J. (2011). Balance Hídrico Superficial, Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. *Sociedad Geográfica de Lima*, 44. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1990). Cálculo de ETo: Método de Penman-Monteith. Sistema de información agroclimática para el regadío.
- Ortega, L., & Sagado, L. (2001). Drenaje en suelos Agrícolas. Comisión Nacional de Riego. Corporación de fomento de la producción. Ministerio de agricultura. Gobierno de Chile.
- Ortiz Silla, R. (2015). Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología. *Eubacteria*, 34, 51–64.

- Rhett, A. (2008). ¿QUE ES EL DOSEL? School of Life Sciences. <https://world.mongabay.com/espanol-spanish/004.html>
- Ruiz Ivarez, O., Arteaga Ramírez, R., Vásquez Peña, M., Ontiveros Caputara, R., & López López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 28(1), 1–14.
- Sánchez, J. (2008). Experiencia de Darcy. Universidad de Salamanca. Dpto. Geología. España. <http://web.usal.es/javisan/hidro> Pág.1
- Sánchez, J. (2015). Evapotranspiración. Universidad de Salamanca. Dpto. Geología. España. <https://www.jstor.org/stable/210739?origin=crossref>
- Sandoval, F. (24 de enero de 2016). El Telégrafo - El 36% de los habitantes de Quito vive en el Sur. *Eltelégrafo*. <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/quito/1/el-36-de-los-habitantes-de-quito-vive-en-el-sur>
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. In T. Schoolmeester & K. Verbist (Eds.), Ediciones UNESCO (Strategic).
- Segeer, C., & Villodas, R. (2006). Unidad 5: Las precipitaciones. In *Hidrología I* (pp. 1–21). https://www.academia.edu/28273006/HIDROLOGIA_I_UNIDAD_5_LAS_PRECIPITACIONES
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). Optimización De La Humedad Del Suelo Para La Producción Vegetal. *Boletín de suelos de la FAO*. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=K-JwJZw1hMwC&oi=fnd&pg=PR8&dq=porosidad+suelo&ots=gitOcgys4l&sig=qnZMJ9o3nKf-0_INQtBC1CQF0B0&redir_esc=y#v=onepage&q=porosidad&f=false

- SiAR. (1999). Evapotranspiración. Sistema de Información Agroclimática Para El Regadío, 22–24. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/Evapotranspiración_tcm30-82951.pdf
- Tecnología de riego. (2009). Humedad en suelos según texturas - Velocidad de infiltración. TRAXCO. <https://www.traxco.es/blog/tecnologia-del-riego/humedad-en-suelos-de-diferente-textura>
- Teuling, A. J., & Troch, P. A. (2005). Improved understanding of soil moisture variability dynamics. *Geophysical Research Letters*, 32(5), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2004GL021935>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Thornthwaite, C., & Mather, R. (1955). The water balance. Publications in climatology, laboratory of climatology. Centerton, NJ. 104 pp.
- Torres, C., Etchevers, J., Fuentes, M., Gonzáles, F., & Herrera, J. (2012). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31, 71–84.
- Torres, M. (2015). Modelos matemáticos en las ciencias. Departamento de Ciencias Naturales y Antropológicas (M Torres (ed.); 1st ed.). <https://www.fundacionazara.org.ar/img/libros/modelos-matematicos.pdf>
- Torres, S., & Proaño, C. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *La Granja*, 28(2), 52–66. <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>

- Villegas, J. A., & Torres, B. E. (1977). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Zhao, L., Xia, J., Xu, C. yu, Wang, Z., Sobkowiak, L., & Long, C. (2013). Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 23(2), 359–369. <https://doi.org/10.1007/s11442-013-1015-9>