

APÉNDICE A. ESTADO DEL ARTE

La evapotranspiración en zona de páramo ha sido evaluada principalmente en sitios localizados en Ecuador en alrededor 32 de 42 zonas de estudio y en 67 de 79 casos de aplicación consultados en este proyecto de investigación. Por su parte, en Colombia se han llevado a cabo estudios (registrados en revistas académicas) sobre evapotranspiración en zona de páramo en cuatro zonas a lo largo del país. En general, el número de publicaciones científicas que se han enfocado en el estudio de la evapotranspiración en zonas de páramo ha crecido en la última década. La mayoría de estas publicaciones han aplicado diferentes métodos de evaluación de la evapotranspiración y, también han aportado a la caracterización de los ecosistemas de páramo y sus complejas interacciones entre la atmósfera, la vegetación y el suelo.

i. Clima de páramo

La variación temporal de los fenómenos climáticos juega un papel fundamental en la evapotranspiración. El clima de los páramos es frío y generalmente húmedo con fluctuaciones diarias bruscas que se pueden comparar con tener “un verano cada día y un invierno cada noche”; además de fuertes vientos, baja presión atmosférica y fuertes heladas (IAvH, 2011). Por ejemplo, en Córdova et al. (2013) se determinó que existe una clara variación entre los patrones climáticos horarios, diarios y mensuales en zona de páramo andino que llevaron a una sobreestimación de la evapotranspiración de referencia calculada con promedios mensuales respecto a los cálculo con promedio horarios. Así mismo, en Cárdenas et al. (2017) ha sido demostrado que la niebla o la llovizna (precipitación horizontal), que no es detectada en los pluviómetros de balancín, alcanza a alimentar los niveles más superficiales del suelo en épocas de poca lluvia.

ii. Vegetación de páramo

En los páramos dominan gramíneas, hierbas, arbustos esclerófilos, rosetas caulescentes y rosetas acaulescentes y plantas formadoras de cojín (Carrillo-Rojas et al., 2016). De las familias anteriormente mencionadas, en Ecuador se ha encontrado vegetación de pajonales, frailejonales, chuscales, matorrales y formaciones discontinuas de bosque altoandino (Buytaert et al., 2006). Las especies vegetales de páramo están adaptadas a las bajas intensidades de la precipitación y conducen más del 50% del agua lluvia a través del tallo directamente hacia el suelo, especialmente en pastizales de gran altitud (Janeau et al., 2015). Por ejemplo, la vegetación tipo tussock facilita

la capacidad de infiltración homogénea hacia el suelo poco profundo y la zona de raíces (Mosquera et al., 2020). Además, conforme Iñiguez et al. (2016), características de los pajonales de páramo como las hojas escleromorfas con propiedades xerofíticas y plantas rodeadas de hojas muertas, permiten que estén adaptados a condiciones extremas y tienen una demanda de agua inferior a la del cultivo de referencia de hipotetizado por la FAO. En general, se ha identificado que las cuencas con mejor rendimiento de agua son aquellas con mayor vegetación característica de páramo (Buytaert & Beven, 2011; Mosquera et al., 2015). Ecosistemas similares por su vegetación y características hidrometeorológicas son los pastizales tussock de Nueva Zelanda (Ochoa-Sánchez et al., 2020).

iii. Suelos de páramo

La capacidad hidrológica de los páramos ha sido relacionada principalmente por las características de los suelos de este ecosistema. Estos suelos más superficiales se encuentran (principalmente) en el grupo de los Andosoles e Histosoles que tienen alto contenido de materia orgánica (Iñiguez et al., 2016) y son grandes almacenadores de agua indiferente a la estacionalidad de la lluvia (periodos de altas y baja precipitación) (Buytaert et al., 2005). En contraste, en Sarmiento (2000) se encontró una alta capacidad de infiltración de los suelos de páramo, los cuales alcanzaron contenidos de humedad inferiores al punto de marchitez permanente durante periodos secos, así como excesos de agua durante los periodos prolongados de lluvias. Por ejemplo, en Iñiguez et al. (2016) en un análisis de la recuperación a la sequía de suelos tipo Andosoles de páramos en Ecuador, la serie de tiempo de contenido de humedad de los suelos no llegó a estar cerca al punto de marchitez permanente. Según Lazo et al. (2019), la capacidad de regulación del agua en el páramo se debe a los suelos altamente orgánicos y porosos y las condiciones ambientales locales (alta humedad y precipitación de baja intensidad durante todo el año) que, a su vez, están asociadas a bajas tasas de evapotranspiración (Córdova et al., 2015). En Janeau et al. (2015), también fue identificado que el color oscuro del suelo tipo Andosol que favoreció la absorción de la radiación solar que ocurre en alta montaña, por lo tanto el proceso de secado de los suelos se acelera.

En Sarmiento (2000) se menciona que la diferencia de temperatura del suelo respecto a la temperatura del aire favorece los procesos de evaporación directa del suelo desde las capas más superficiales del suelo. Así mismo, en Sarmiento (2000) la humedad del suelo fue similar en las

parcelas cultivadas con papa por tres años consecutivos y luego dejada sin cultivar mientras, la otra parcela ha sido dejada sin cultivar por 15 años. Según este mismo autor, la humedad del suelo fue mayor en las parcelas en barbecho que en las parcelas cultivadas con la excepción de los primeros meses del período de estudio, cuando el contenido de agua del suelo fue más bajo en el joven barbecho. Esta tendencia puede explicarse por la escasa cobertura vegetal al comienzo del período de barbecho, que favoreció la evaporación directa del suelo.

iv. Métodos para la estimación de la evapotranspiración aplicados en páramos

Los métodos para la estimación de la evapotranspiración más usados en zona de páramo, por la disponibilidad de información y relativo bajo costo de aplicación, son el balance de agua y la ecuación de evapotranspiración de referencia de FAO Penman-Monteith (Ochoa-Sánchez et al., 2019). Entre ellos, un análisis comparativo de los métodos de evaluación de la evapotranspiración real en páramo ya ha sido realizado por Ochoa-Sánchez et al. (2019), dilucidando las ventajas y desventajas relativas de seis métodos estudiados en una cuenca de páramo húmedo de 7.36 Km² al sur de Ecuador. En este estudio se concluyó que: i) el método más preciso es el de covarianza de Eddy, aunque la aplicación es aún limitada debido al elevado costo de adquisición de los instrumentos; ii) las mediciones con lisímetros volumétricos demostraron ser efectivos solo cuando las escalas de tiempo mensuales son adoptadas porque a escala diaria encontraron valores negativos; iii) el método de balance de energía sobreestimó el flujo de calor sensible en comparación con las mediciones de covarianza de Eddy; iv) los resultados del balance hídrico mostraron que este método es útil cuando los valores de evapotranspiración real son relativamente grandes y las otras variables del balance son medidas correctamente o despreciables (por ejemplo el cambio de almacenamiento de humedad a escala anual); v) los modelos hidrológicos son robustos para estimar la evapotranspiración real durante periodos secos y húmedos y; vi) la ecuación calibrada de Penman-Monteith resultó ser una buena herramienta para la estimación de la evapotranspiración sobre todo en zonas donde no hay limitaciones de agua y la evapotranspiración potencial es similar a la real.

Por otro lado, el método de FAO Penman-Monteith (FAO-PM) (FAO, 2006) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ha sido aplicado en zona de páramo por diferentes autores (Carrillo-Rojas et al., 2019; Córdova et al., 2013, 2015; Guzmán et al., 2015; Maffei, 2012;

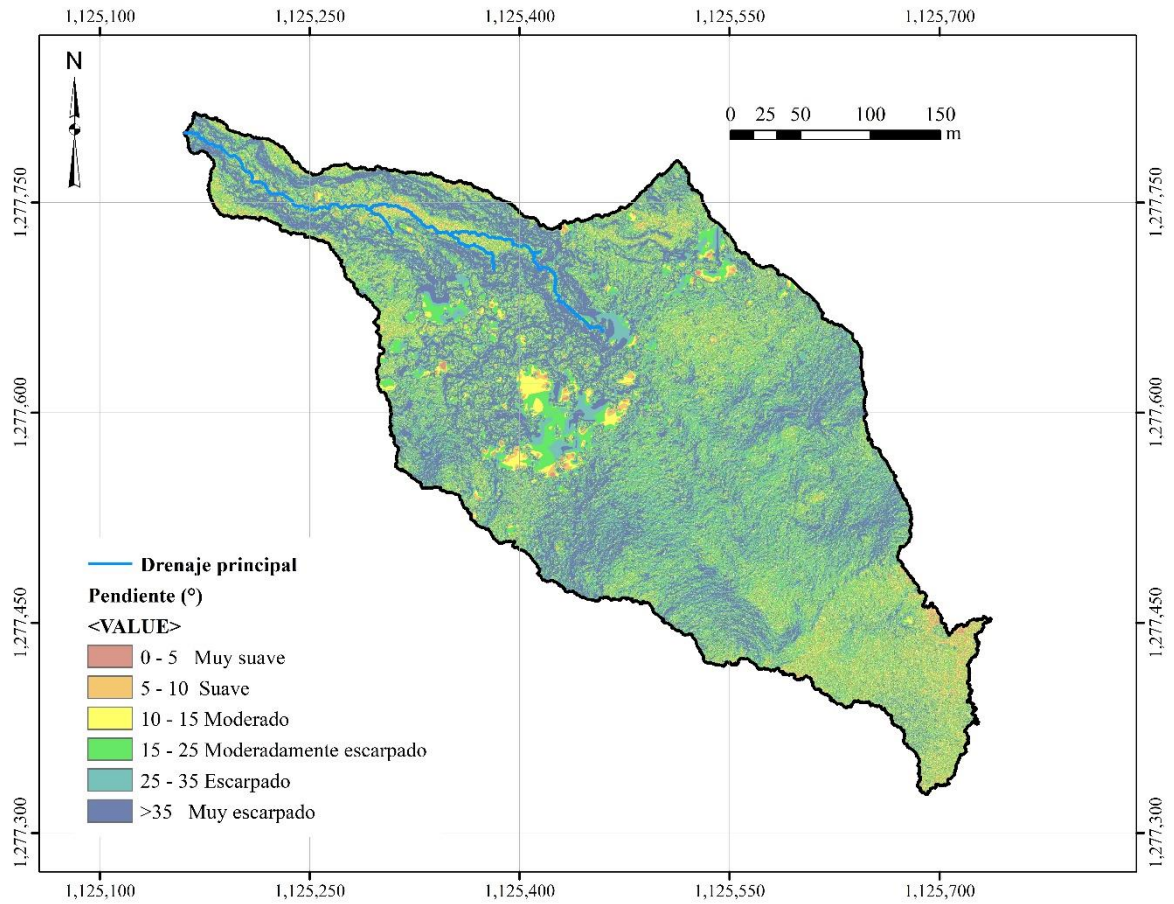
Pesántez et al., 2018; Ramón-Reinozo et al., 2019; Valencia Leguizamón & Tobón Marín, 2017), y tiene como ventaja que permite conocer la forma en la que diferentes regímenes climáticos influyen en el fenómeno de la evapotranspiración para una cobertura hipotética, uniforme y, bien regada. Por su parte, la evapotranspiración de referencia del método de ASCE-PM solo ha sido aplicado en zona de páramo en Carrillo-Rojas et al. (2019), aunque Ramón-Reinozo et al. (2019) mencionan la posible pertinencia del uso de la ecuación de ASCE-PM puesto que es basada en la alfalfa como cultivo de referencia, la cual se asemeja más a las características de la vegetación de páramo a diferencia del cultivo de referencia del método de FAO-PM. Sin embargo, esta conjetura difiere con los resultados presentados en Carrillo-Rojas et al. (2019) en el cual se muestra que los valores de evapotranspiración de referencia del método ASCE-PM sobreestiman el comportamiento de la variable. No obstante, estas consideraciones no pueden ser directamente confrontables puesto que los estadísticos de comparación son realizados con referencia a diferentes métodos y zonas de estudio: sobre el balance de agua para la cuenca de Quinoas (94.10 Km²) en Ramón-Reinozo et al. (2019) y sobre el método de covarianza de Eddy para la cuenca de Zhurucay (7.36 Km²) en Carrillo-Rojas et al. (2019).

Por su parte, el método de balance de agua, a pesar de las limitaciones para las cuencas de páramo, asociadas a la presencia de neblina, que implican que el volumen de precipitación medido por una estación tradicional puede ser hasta 15% inferior que el reportado en un disdrómetro (Lazo et al., 2019; Padrón et al., 2015), ha sido ampliamente usado como técnica de referencia en páramos (Buytaert et al., 2007; Carrillo-Rojas et al., 2016; Crespo et al., 2011; Guzmán et al., 2015; Mosquera et al., 2015; Ochoa-Sánchez et al., 2019; Ramón-Reinozo et al., 2019; Sarmiento, 2000) porque todas las variables pueden ser medidas físicamente o como referente para la calibración de otros métodos de estimación. En algunos estudios en páramo, este método ha tenido mejor desempeño a nivel anual que a escala diaria debido a una estimación “pobre” del cambio en la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Ochoa-Sánchez et al., 2019). En Sarmiento (2000) fue estimado, mediante el balance de agua, que un 61% corresponde a salida de agua del sistema mediante la evapotranspiración siendo la mayor pérdida de agua. En este mismo artículo fue relacionada la alta tasa de evapotranspiración respecto a los otros flujos de agua a la textura arenosa y color oscuro del suelo.

En Carrillo-Rojas et al. (2016) fueron realizados balances de energía con información de sensores remotos (Landsat 7 ETM & MODIS terra) usando la metodología METRIC que proporciona el flujo de calor latente instantáneo píxel por píxel como un residuo de la resta de los flujos de calor sensible y del suelo de la radiación neta disponible. La fracción de evapotranspiración derivada de las imágenes satelitales encontró valores de medianas entre: i) 1.06-1.14 mm/día para Pinos; ii) 0.89-1.02 mm/día para vegetación tipo *Polylepis* y; iii) 0.86-0.92 mm/día para Tussock grasses. Además, espacialmente fue encontrado que la evapotranspiración decreció consistentemente con los incrementos de altitud mientras que los valores más altos de evapotranspiración fueron obtenidos sobre cuerpos de agua y áreas con vegetación densa (como el bosque de montaña y la vegetación riverense). Además de las variaciones espaciales, la cantidad de radiación solar y la ocurrencia o no ocurrencia de eventos de lluvia, influenció la estimación de la evapotranspiración con el uso de imágenes satelitales. Así, durante los meses con un ángulo de incidencia del Sol alto, el impacto es significativo en las pendientes dirigidas al noreste. A pesar de que el uso de sensores remotos se hace con el fin de sobrellevar las dificultades que representa la estimación de la evapotranspiración mediante mediciones en campo, la escala espacial y la presencia de nubosidad son limitaciones de este método.

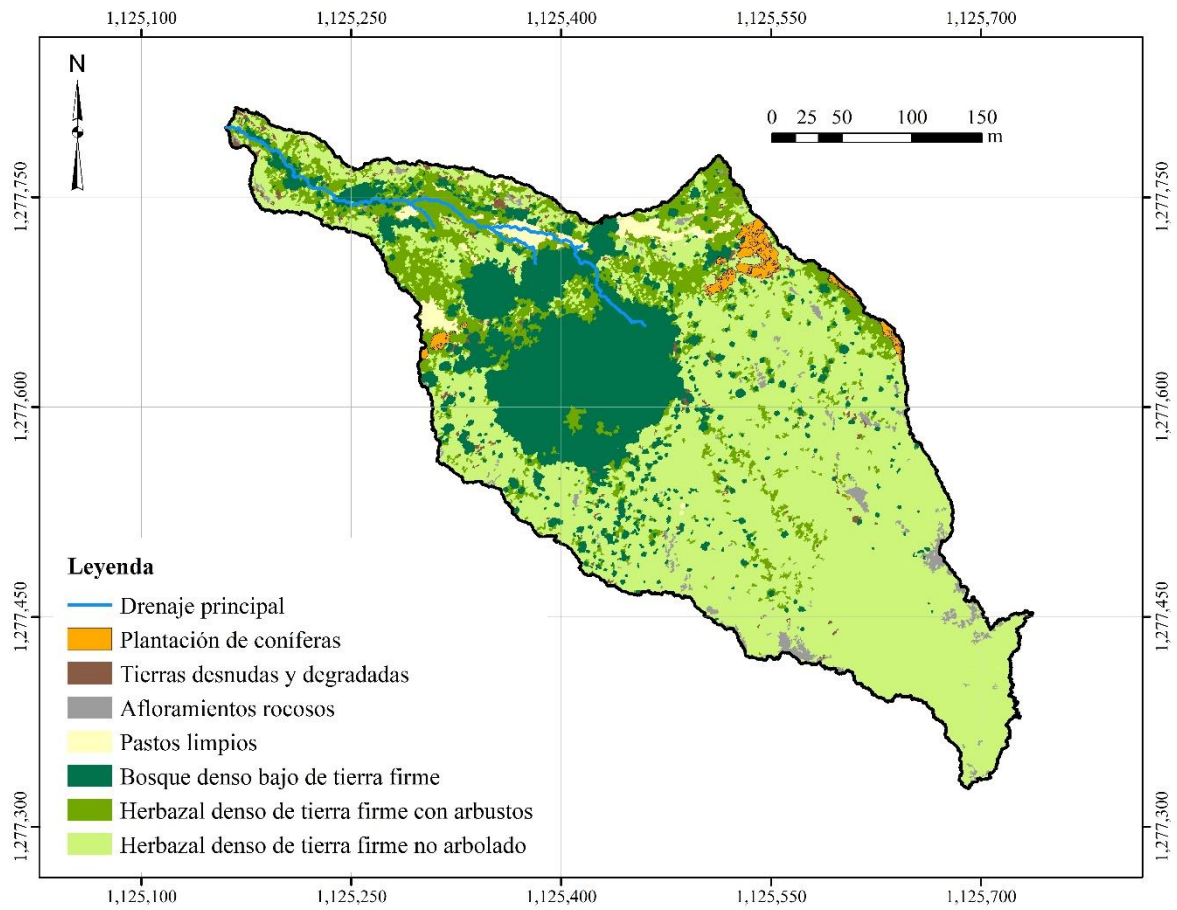
APÉNDICE B. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

i. Mapa de clasificación de pendientes



Clasificación de pendientes	Pendiente (°)	Área (ha)	Porcentaje del área total (%)
Muy suave	0-5	0.36	3.23
Suave	5-10	0.84	7.55
Moderado	10-15	1.18	10.60
Moderadamente escarpado	15-25	2.85	25.61
Escarpado	25-35	2.63	23.63
Muy escarpado	>35	3.27	29.38

ii. Mapa de clasificación de coberturas



Nota: adaptado de Celis Vargas, (2022)

Tipo de cobertura	Área (ha)	Porcentaje del área total (%)
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	6.54	58.76
Bosque denso bajo de tierra firme	2.33	20.93
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	1.56	14.02
Pastos limpios	0.23	2.07
Afloramientos rocosos	0.20	1.80
Plantación de coníferas	0.16	1.44
Tierras desnudas y degradadas	0.11	0.98

iii. Fotografías de las coberturas del suelo

Herbazal denso de tierra firme
con arbustos



Herbazal denso de tierra firme
no arbolado



Bosque denso bajo de tierra
firme



Afloramientos rocosos



Plantación de coníferas



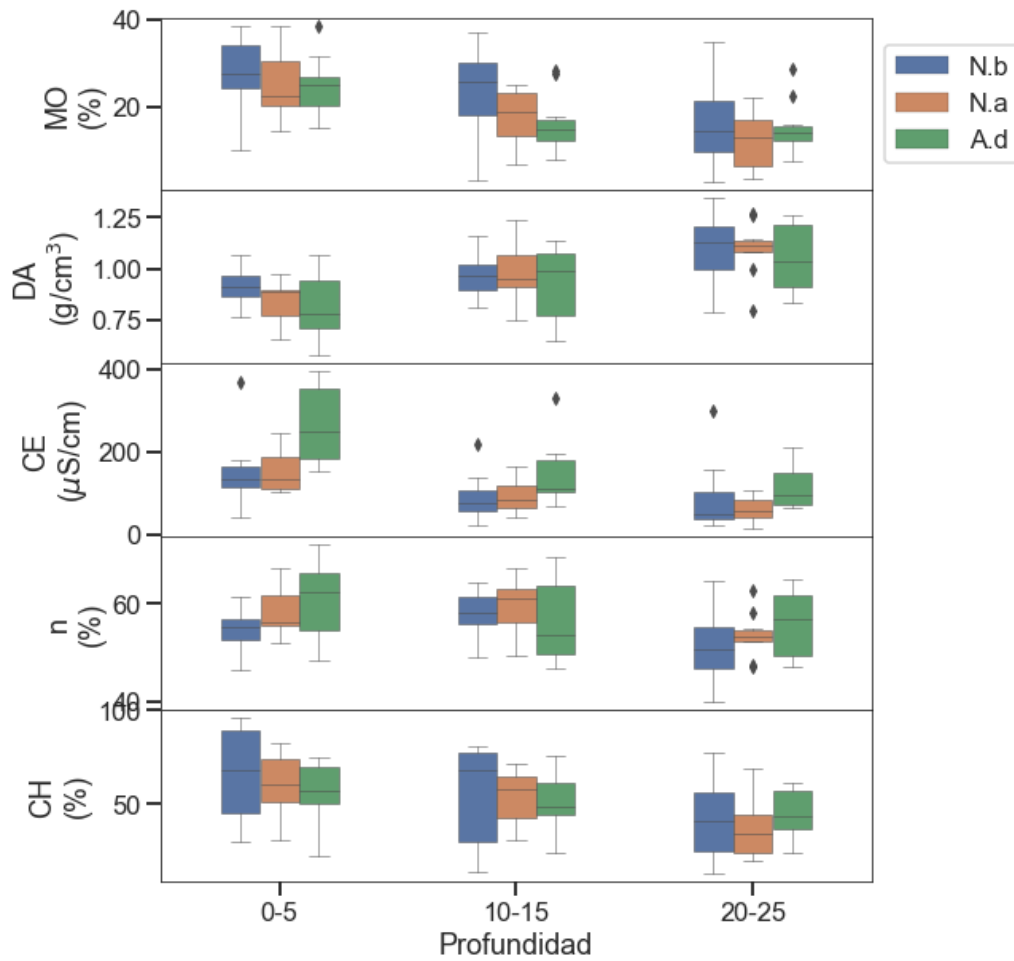
Pastos limpios



Tierras desnudas y degradadas



iv. Variación de las propiedades hidrofísicas del suelo



Adaptado de Patiño Gutiérrez (2020). Nota: Zona de natural de baja pendiente (N.b), Zona de natural de alta pendiente (N.a), Zona de arbustivo denso (A.d), Materia orgánica en el suelo (MO), Densidad aparente (DA), Conductividad eléctrica (CE), Porosidad total (n), Contenido gravimétrico de humedad (CH).

APÉNDICE C. ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS

i) **Resolución y precisión de las variables monitoreadas**

Equipo	Variable	Resolución	Precisión
U20L-04	Presión atmosférica	0.002 PSI	± 0.063 PSI
ONSET (TP)	Temperatura del agua	0.1 °C	± 0.44 °C
	Cantidad de lluvia	0.2 mm	± 2%
	Velocidad del viento	1 kph	± 3 kph
WatchDog 2900ET	Dirección del viento	1°	± 4°
Spectrum	Temperatura del aire	0.1 °C	± 0.6 °C
Technologies (M)	Humedad relativa	0.1%	± 3%
	Radiación solar	1 W/m ²	± 5%
	Punto de rocío	0.1 °C	± 2 °C

Adaptado de Celis Vargas (2019); (Spectrum Technologies, 2000)

ii) **Fotografías de las estaciones**

Transductores de presión y vertedero
(TP)



Meteorológica (M)



APÉNDICE D. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA COHERENCIA INTERNA DE DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

<i>Variable</i>	<i>Unidad</i>	<i>Coherencia interna</i>
Caudal (q)	lps	$q \geq 0$
Lluvia (Ll)	mm	$Ll \geq 0$
Radiación solar (Rs)	W/m ²	$Rs(t) \geq 0$
Humedad relativa (HR)	%	$0 \leq HR \leq 100$
Temperatura del aire (T)	°C	$-10 < T^* < 20$
Punto de rocío (Pr)	°C	$Pr(t) < T(t)$
Velocidad del viento (u)	m/s	$u \geq 0$
Dirección del viento (dv)	°	$0 \leq dv \leq 360$

*Nota: *criterios conforme los rangos extremos presentados en las series multianuales de la estación Berlín.*

**APÉNDICE E. CONSTANTES UTILIZADAS EN EL CÁLCULO DE LA
 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA**

Constante	Unidad	Valor
Albedo (α)	-	0.23
Constante de Stefan-Boltzmann (σ)	MJ/K ⁴ m ² h	2.043*10 ⁻¹⁰
	MJ/K ⁴ m ² d	4.903*10 ⁻⁹
Elevación de la estación sobre el nivel del mar en metros (z)	m	3471.72
Constante solar (G_{sc})	MJ/m ² min	0.082
Calor específico a presión constante (c_p)	MJ/Kg °C	0.001013
Presión atmosférica (P)	KPa	66.45
Cociente del peso molecular del vapor de agua/aire seco (ϵ)	-	0.622
Calor latente de vaporización (λ)	MJ/Kg	2.45
Constante psicrométrica (γ)	KPa/°C	0.0441

APÉNDICE F. ESTACIONES DE SEGUIMIENTO DE LA HUMEDAD DEL SUELO

i. Resolución y precisión de las variables monitoreadas

Equipo	Variable	Resolución	Precisión
SM150T Delta T Devices	Voltaje	1 mV	$\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (3%) entre 0% y 70% entre 0-60 °C
	Resistencia	1 Ω	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ entre 0-40 °C

Adaptado de Delta-T Devices (2016)

ii. Fotografías de las estaciones

Natural de baja pendiente
(H_bp)



Natural de alta pendiente
(H_ap)



Arbustivo denso (H_ad)



APÉNDICE G. CALIBRACIONES CONTENIDO DE HUMEDAD- ÍNDICE DE REFRACCIÓN

i. Fotografías antes y después del secado en calibraciones puntuales



ii. Fotografías durante la calibración continua

H_ad_p1, día 2



H_ad_p1, día 51



H_ad_p1, día 101



H_ad_p2, día 1



H_ad_p2, día 37



H_ad_p2, día 75



iii. Caracterización de las muestras para calibraciones en natural de baja pendiente (H_bp)

<i>Jornada</i>	<i>Muestra</i>	V_o (mV)	W_T (g)	W_s (g)	W_w (g)	V_w (mV)	ρ_b (g/ml)	W (%)	θ_w (g/ml)	$\sqrt{\epsilon_w}$	$\sqrt{\epsilon_o}$
C1	H_bp_p1	42.09	2,406.90	1,304.80	1,102.10	1,035.25	0.73	84.47	0.62	7.62	1.56
	H_bp_p2	16.52	2,104.40	1,269.30	835.10	656.70	0.72	65.79	0.48	5.40	1.23
C2	H_bp_p1	19.39	2,210.60	1,104.60	1,106.00	1,044.65	0.62	100.13	0.62	7.69	1.27
	H_bp_p2	26.00	2,155.60	1,280.20	875.40	612.22	0.73	68.38	0.50	5.17	1.36

Nota: Voltaje de salida muestra seca (V_o); peso de la muestra húmeda (W_T); peso de la muestra seca (W_s); peso del agua de la muestra (W_w); voltaje de salida muestra húmeda (V_w); densidad de bulbo (ρ_b); Contenido gravimétrico de humedad (W); contenido de agua (θ_w), índice de refracción de la muestra húmeda ($\sqrt{\epsilon_w}$); índice de refracción en de la muestra seca ($\sqrt{\epsilon_o}$). Volumen de la muestra de H_bp_p1 (V_T) = 1,778.66 cm³; Volumen de la muestra de H_bp_p2 (V_T) = 1,756.89 cm³

iv. Caracterización de las muestras para calibraciones en natural de alta pendiente (H_ap)

<i>Jornada</i>	<i>Muestra</i>	V_o (mV)	W_T (g)	W_s (g)	W_w (g)	V_w (mV)	ρ_b (g/ml)	W (%)	θ_w (g/ml)	$\sqrt{\epsilon_w}$	$\sqrt{\epsilon_o}$
C1	H_ap_p1	26.38	2385.90	1304.80	1081.10	1059.05	0.74	82.86	0.62	7.79	1.36
	H_ap_p2	33.38	2912.20	2193.10	719.10	432.24	1.23	32.79	0.40	4.25	1.45
C2	H_ap_p1	22.25	2295.20	1088.20	1207.00	1133.57	0.62	110.92	0.69	8.35	1.31
	H_ap_p2	25.27	2657.00	1902.00	755.00	476.94	1.07	39.70	0.42	4.47	1.35
C3	H_ap_p1	16.62	1,759.20	884.10	875.10	700.31	0.50	98.98	0.50	5.64	1.23
	H_ap_p2	68.92	2,131.30	1,081.60	1,049.70	888.49	0.61	97.05	0.59	6.71	1.86

Nota: Voltaje de salida muestra seca (V_o); peso de la muestra húmeda (W_T); peso de la muestra seca (W_s); peso del agua de la muestra (W_w); voltaje de salida muestra húmeda (V_w); densidad de bulbo (ρ_b); Contenido gravimétrico de humedad (W); contenido de agua (θ_w), índice de refracción de la muestra húmeda ($\sqrt{\epsilon_w}$); índice de refracción en de la muestra seca ($\sqrt{\epsilon_o}$); Volumen de la muestra de H_ap_p1 (V_T) = 1,754.17 cm³; Volumen de la muestra de H_ap_p2 (V_T) = 1,785.21 cm³

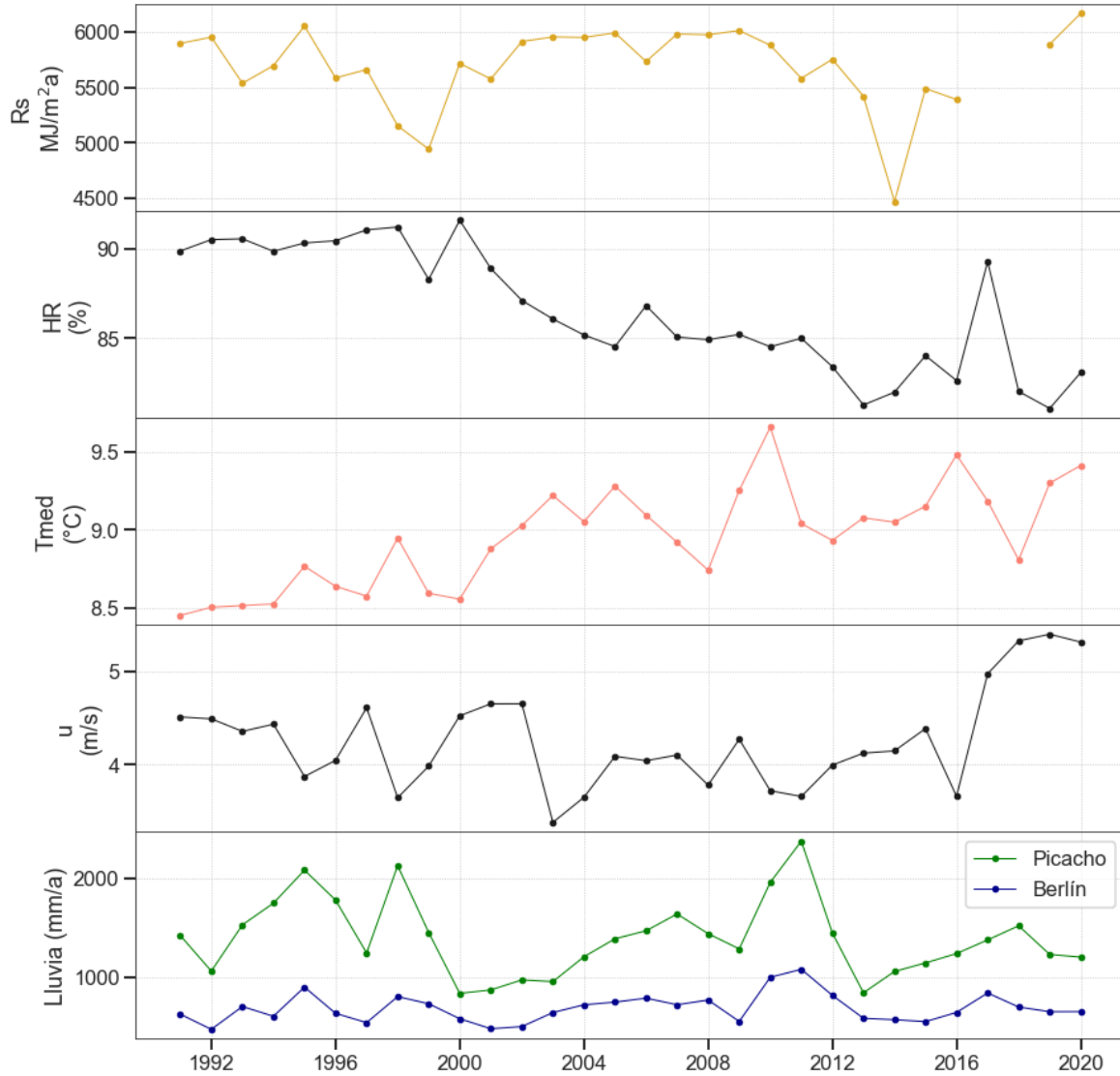
v. **Caracterización de las muestras para calibraciones en arbustivo denso (H_ad)**

<i>Jornada</i>	<i>Muestra</i>	V_o (mV)	W_T (g)	W_s (g)	W_w (g)	V_w (mV)	ρ_b (g/ml)	W (%)	θ_w (g/ml)	$\sqrt{\epsilon_w}$	$\sqrt{\epsilon_o}$
C1	H_ad_p1	26.92	2,488.00	1,876.50	611.50	430.67	1.10	32.59	0.36	4.24	1.37
	H_ad_p2	31.20	2,741.00	2,154.50	586.50	397.56	1.23	27.22	0.33	4.08	1.42
C2	H_ad_p1	29.04	2,146.20	1,479.60	666.60	507.49	0.86	45.05	0.39	4.63	1.39
	H_ad_p2	31.02	2,752.00	2,185.20	566.80	378.46	1.25	25.94	0.32	3.98	1.42
C3	H_ad_p1	21.06	1,674.10	1,295.80	378.30	118.57	0.76	29.19	0.22	2.35	1.29
	H_ad_p2	32.67	2,535.30	2,090.00	445.30	235.75	1.19	21.31	0.25	3.20	1.44
C4	H_ad_p1	44.38	3,794.00	1,366.10	1003.00	1,059.81	0.80	73.42	0.59	7.79	1.58
	H_ad_p2	40.44	3,900.40	2,016.00	825.30	518.96	1.18	40.94	0.48	4.68	1.54

Nota: Voltaje de salida muestra seca (V_o); peso de la muestra húmeda (W_T); peso de la muestra seca (W_s); peso del agua de la muestra (W_w); voltaje de salida muestra húmeda (V_w); densidad de bulbo (ρ_b); Contenido gravimétrico de humedad (W); contenido de agua (θ_w), índice de refracción de la muestra húmeda ($\sqrt{\epsilon_w}$); índice de refracción en de la muestra seca ($\sqrt{\epsilon_o}$); Volumen de la muestra de H_ad_p1 (V_T) = 1,711.86 cm³; Volumen de la muestra de H_ad_p2 (V_T) = 1,752.02 cm³

APÉNDICE H. CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMÁTICA A LARGO PLAZO

i. Promedios y/o totales anuales multianuales de variables meteorológicas

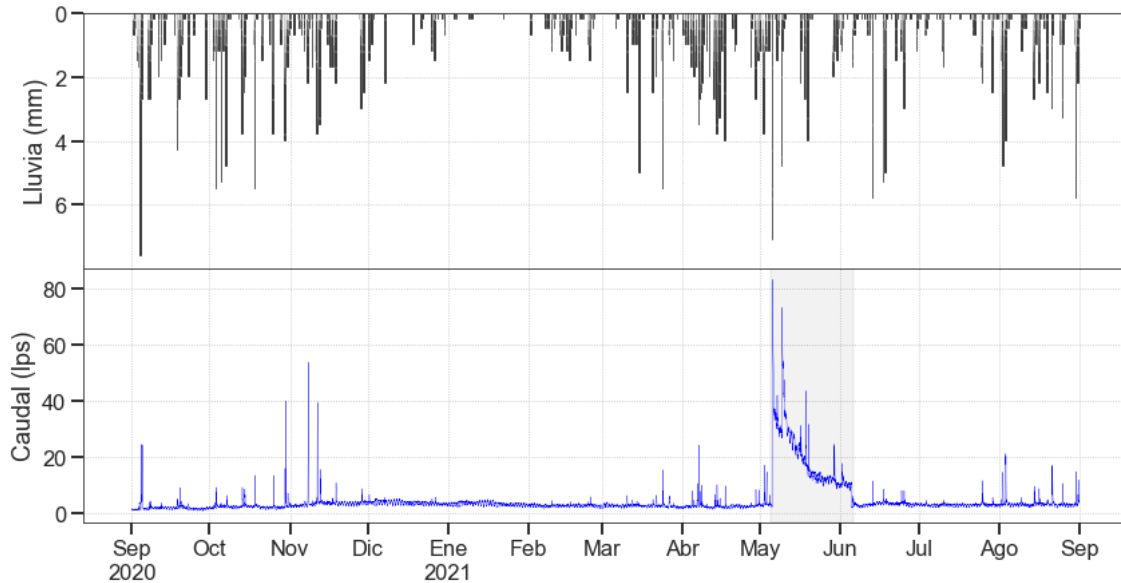


Nota: Radiación solar (R_s); Humedad relativa (HR); Temperatura media (T_{med}); Velocidad del viento (u); Lluvia total anual (L).

APÉNDICE I. VALIDEZ DE LOS DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Dado que todos los equipos de seguimiento hidrometeorológico almacenan datos de forma automática y, por lo tanto, no contienen errores de digitación, la prueba de formato fue realizada mediante filtros (revisión de observaciones repetidas o claves de formato imposible) a medida que nuevos datos fueron añadidos a la base de datos principal (aproximadamente una vez cada dos meses). Durante el periodo de análisis no fueron encontradas inconsistencias en los conjuntos de datos. A diferencia de todas las variables meteorológicas monitoreadas en la estación meteorológica (M) que superaron las pruebas de coherencia interna, en los registros de caudal, calculado con las observaciones de TP, fueron identificados datos con valores muy superiores a la media entre el 5 de mayo de 2021 (21:00 horas) y el 5 de junio de 2021 (8:45 horas) como se observa en la serie de tiempo de la Figura A 1. Los demás datos de caudal fueron considerados válidos para su aplicación en las estimaciones de evapotranspiración.

Figura A 1. Series de tiempo de lluvia y caudal con datos originales



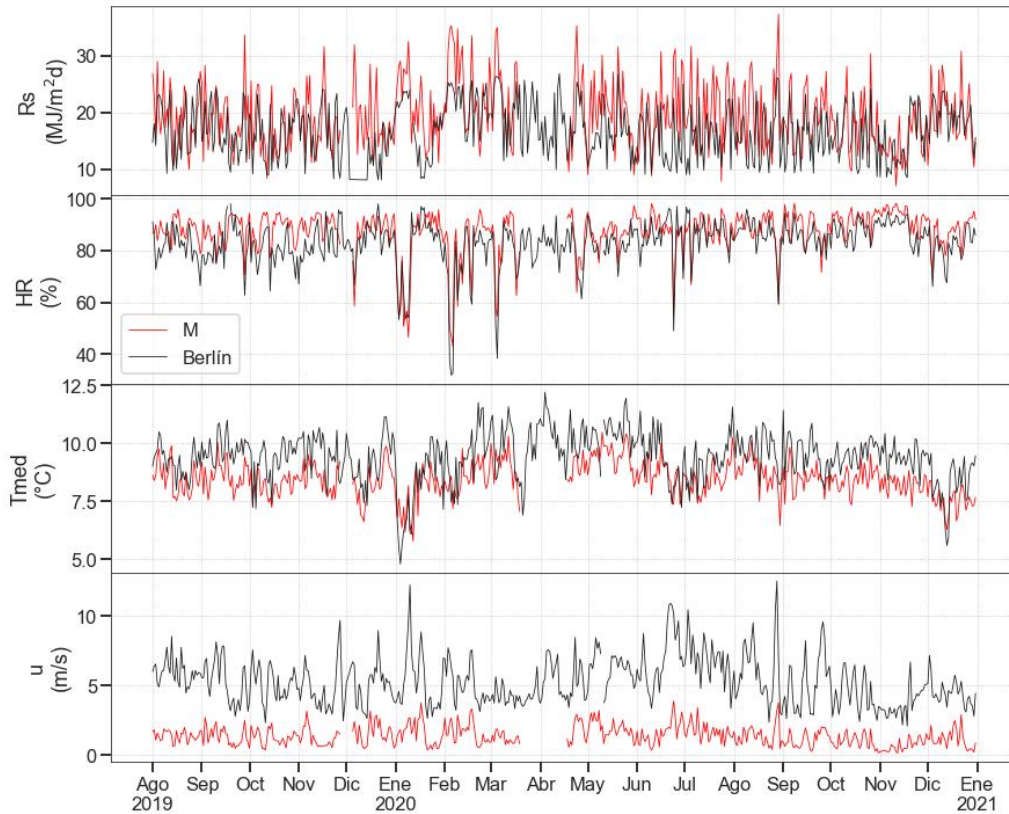
Los caudales en la fecha inicial indicada ascendieron rápidamente hasta un valor máximo de 93.35 lps tras un evento de lluvia de 13.10 mm de media hora. De acuerdo con lo inspeccionado en la visita de campo del 5 de junio de 2021, este evento de precipitación arrastró una alta cantidad de sedimentos que se acumularon en el vertedero y modificaron la ubicación del transductor de presión. Lo anterior, conllevó al alza en la presión registrada en los 30 días posteriores al evento

(hasta la fecha y hora en la que se logró hacer limpieza del canal y del equipo de monitoreo). Tras la imposibilidad de conocer la posición del transductor en este intervalo de tiempo, 2,928 datos anómalos (8.36%) fueron eliminados (FV_4). Aunque en dos oportunidades durante el periodo de monitoreo la magnitud de este evento de precipitación ha sido excedido sin consecuencias significativas en las mediciones, durante aproximadamente dos meses no se realizó limpieza al vertedero y descarga de datos debido a las medidas preventivas de movilización ante los bloqueos viales por el Paro Nacional entre abril y junio de 2021 que impidieron llegar a la zona de estudio.

Por otro lado, para la prueba de coherencia temporal y espacial fueron contrastados los datos monitoreados por la estación meteorológica (agregación temporal diaria) con los disponibles de las estaciones IDEAM. Esta comparación se realizó entre agosto de 2019 y diciembre de 2020 como se muestra las series de tiempo de la Figura A 2 y de la Figura A 3. Lo anterior se pudo realizar gracias a que la fisiografía de la región en donde se encuentran las estaciones es casi homogénea y por lo tanto no se esperan fuertes variaciones en el movimiento de las masas de aire (FAO, 2006). No obstante, algunas limitaciones fueron: i) que la estación Berlín se encuentra en una planicie mucho más urbanizada que aquella donde se encuentra M y existe entre ambas estaciones una diferencia altitudinal de 258 m y; ii) que la estación Picacho del IDEAM, aunque se encuentra a una distancia longitudinal y altitudinal más cerca de la estación M, está localizada en el costado opuesto de la montaña (drena a una cuenca hidrográfica adyacente).

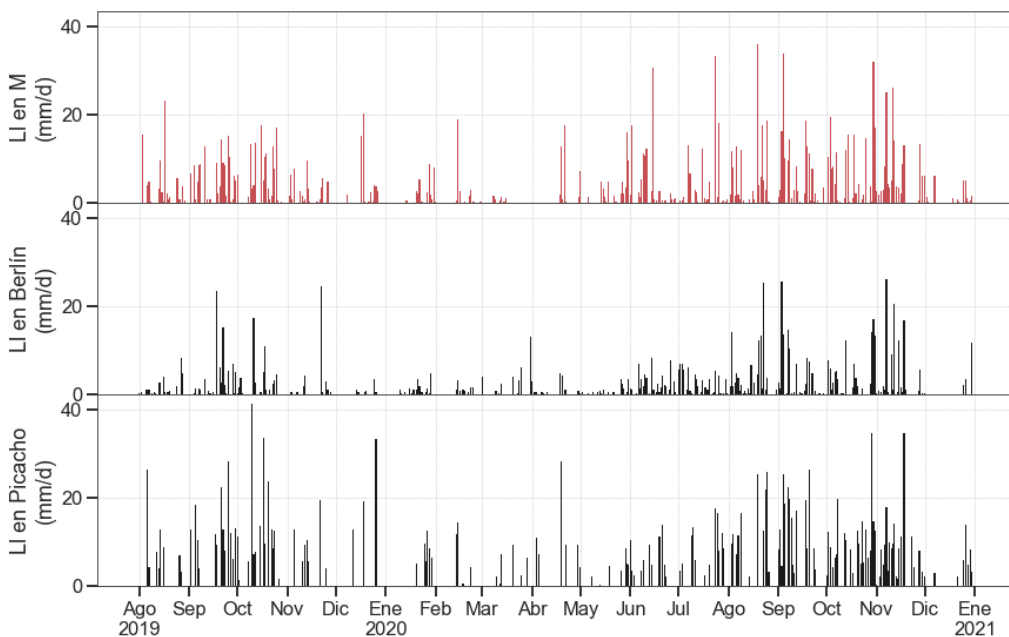
Para este periodo de análisis, la estación meteorológica no almacenó datos entre el 20 de marzo y el 18 de abril de 2020 debido a la imposibilidad de acceder a las estaciones de monitoreo por las restricciones de movilidad nacional por la contingencia al virus del COVID-19.

Figura A 2. Series de tiempo de variables meteorológicas en la zona de estudio y en Berlín



Nota: Radiación solar (Rs); Humedad relativa (HR); Temperatura media de aire (Tmed); Velocidad del viento (u); Estación meteorológica (M); Estación meteorológica del IDEAM (Berlín).

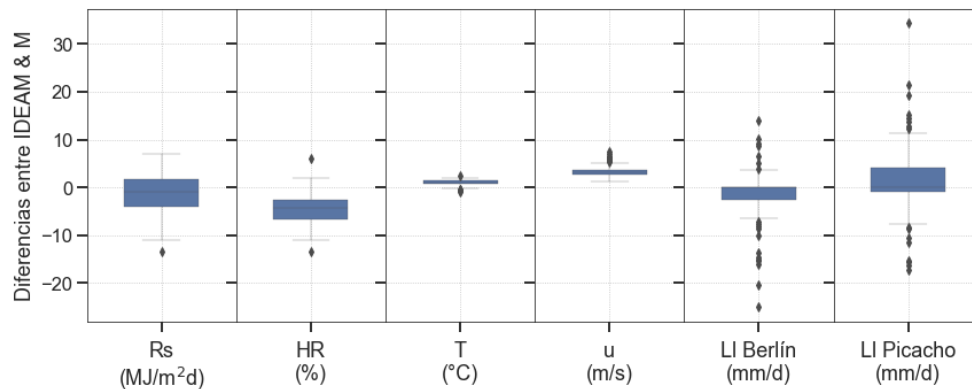
Figura A 3. Series de tiempo de lluvia en la zona de estudio, Berlín y Picacho



Nota: Lluvia (Ll); Estación meteorológica (M); Estación meteorológica del IDEAM (Berlín); Estación pluviométrica del IDEAM (Picacho).

En la Figura A 4 son mostrados los rangos intercuartiles entre los que se encuentran las diferencias entre los datos monitoreados por M respecto a sus valores referencia del IDEAM. La diferencia media entre las observaciones fue de: -1.32 MJ/m²d de radiación solar, -4.59% de humedad relativa, 1.02 °C de temperatura, 3.42 m/s de velocidad del viento, -1.59 mm/d lluvia en Berlín y 1.26 mm/d lluvia en Picacho.

Figura A 4. Diferencias entre los datos diarios de las estaciones del IDEAM y la estación meteorológica



Nota: Radiación solar (Rs), Humedad relativa (HR); Temperatura de aire (T); Velocidad del viento (u); Lluvia (LI)

En la Tabla A 1 fueron tabulados los banderines de control de calidad asignados por variable. Los datos sin banderín (o sin validar) son aquellos registrados en el curso del año 2021 o la totalidad de los datos para las variables que no tienen referentes (temperatura del punto de rocío y dirección del viento).

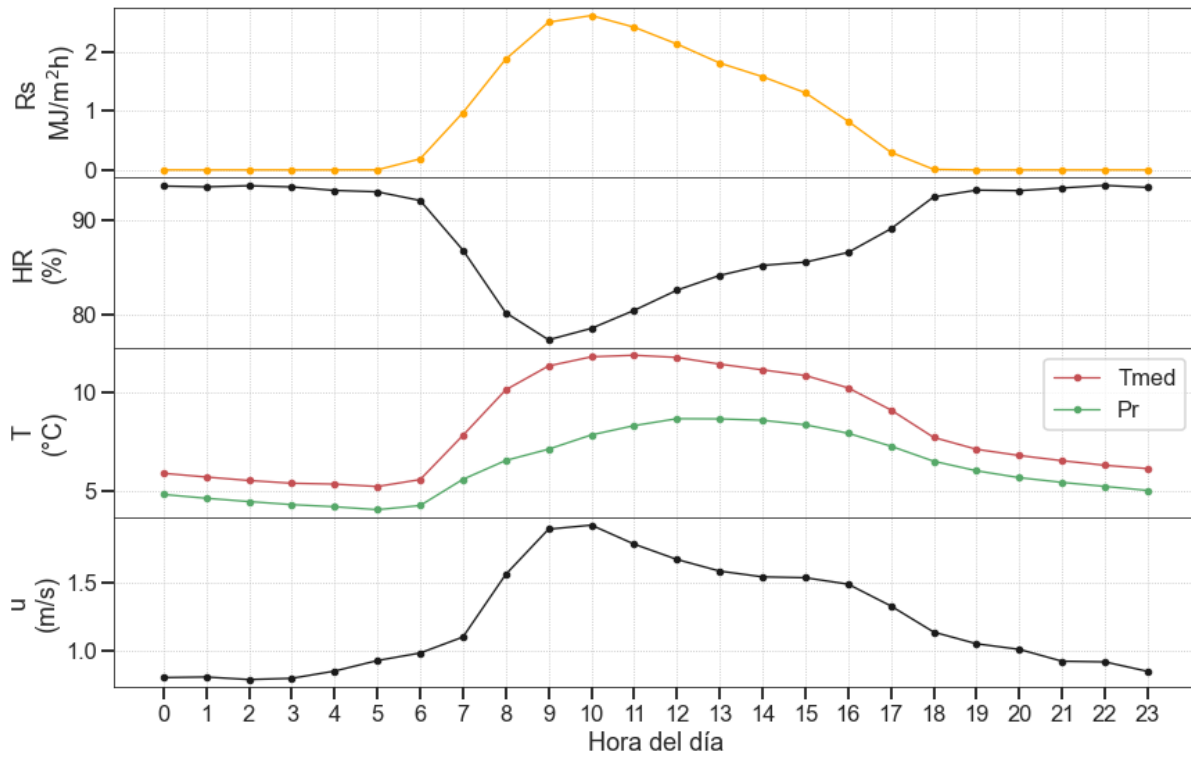
Tabla A 1. Número de datos por banderín de control de calidad

Estación		TP	Estación meteorológica (M)						
Banderín	Descripción	Q	Ll	Rs	HR	T	u	dv	Pr
TD_1	Originales	0	35,040	35,038	35,040	35,040	35,040	35,040	35,040
TD_2	Calculados	35,040	0	0	0	0	0	0	0
FV_1	Faltantes	74	0	2	0	0	0	0	0
FV_2	Dudosos	0	960	96	192	480	768	0	0
FV_3	Validados	32,038	10,752	11,616	11,520	11,232	10,944	0	0
FV_4	Eliminados	2,928	0	0	0	0	0	0	0
-	Sin validar	0	23,328	23,324	23,328	23,328	23,328	35,040	35,040

Nota: Transductores de presión (TP); Caudal (Q); Lluvia (Ll); Radiación solar (Rs); Humedad relativa (HR); Temperatura (T); Velocidad del viento (u); Dirección del viento (dv); Punto de rocío (Pr).

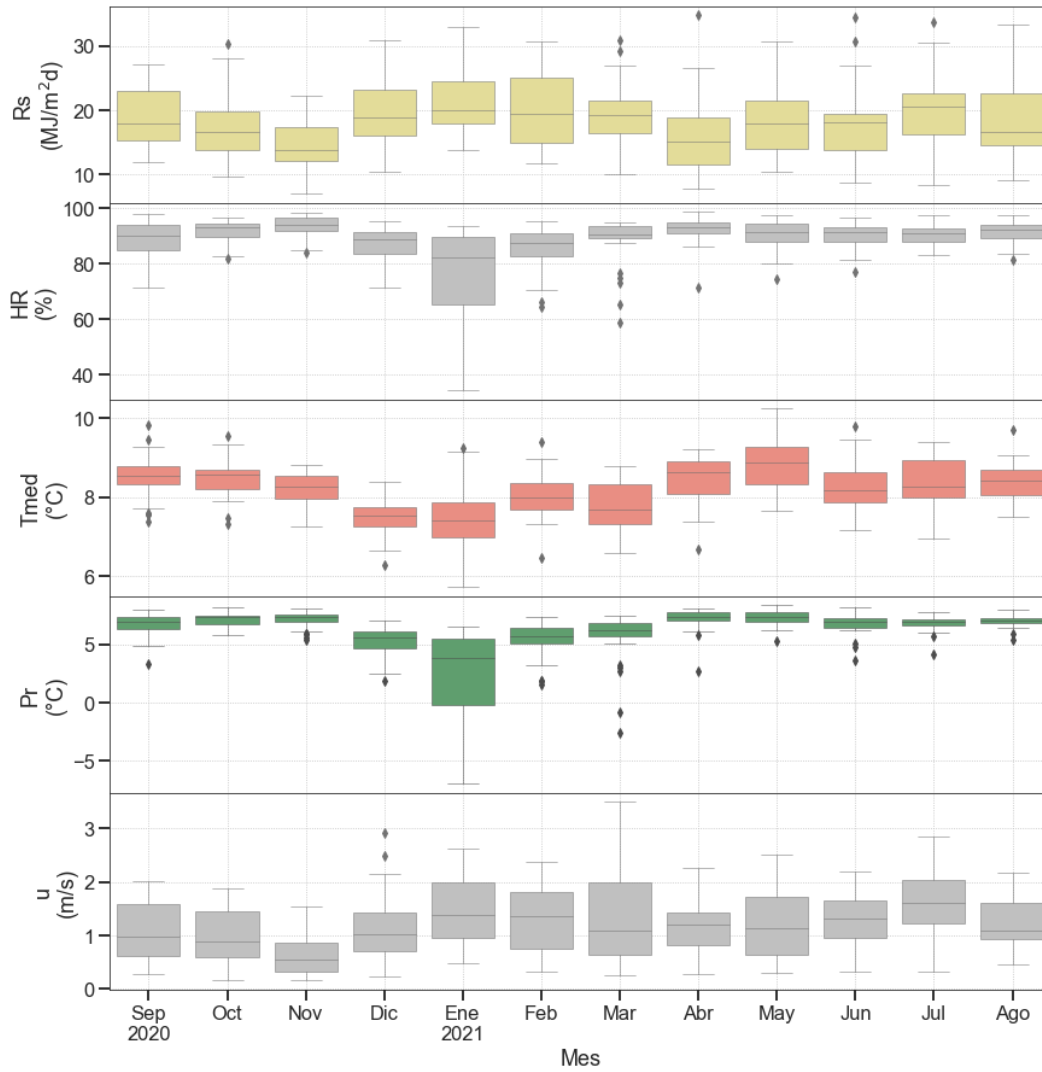
APÉNDICE J. CARACTERIZACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

i. Oscilaciones horarias promedio de las variables meteorológicas para el periodo de análisis



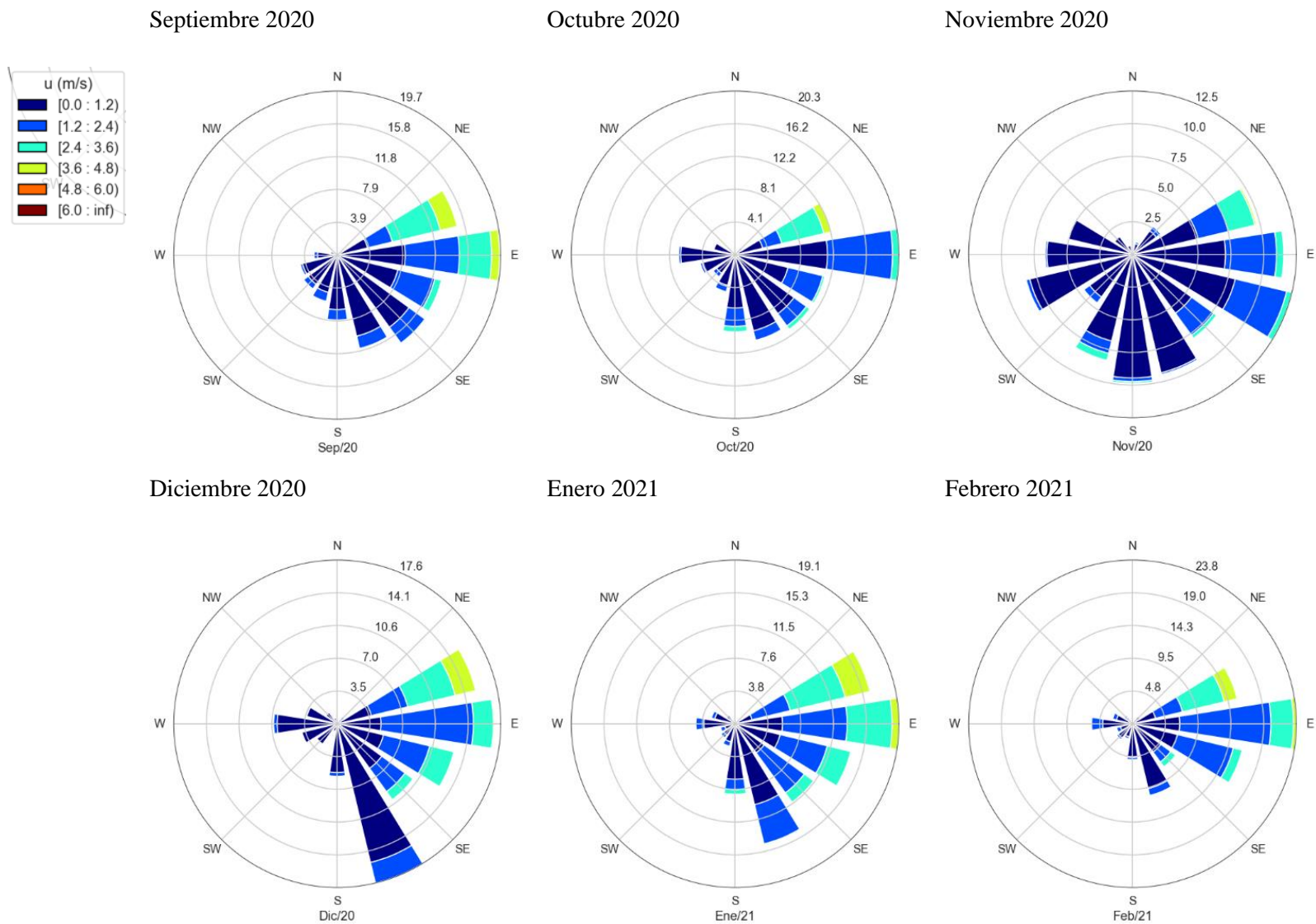
Nota: Radiación solar total horaria promedio por horas (Rs); Humedad relativa (HR); Temperatura media (Tmed); Temperatura del punto de rocío (PR); Velocidad del viento (u)

ii. Rangos intercuartiles de los promedios y/o totales diarios por mes de las variables meteorológicas

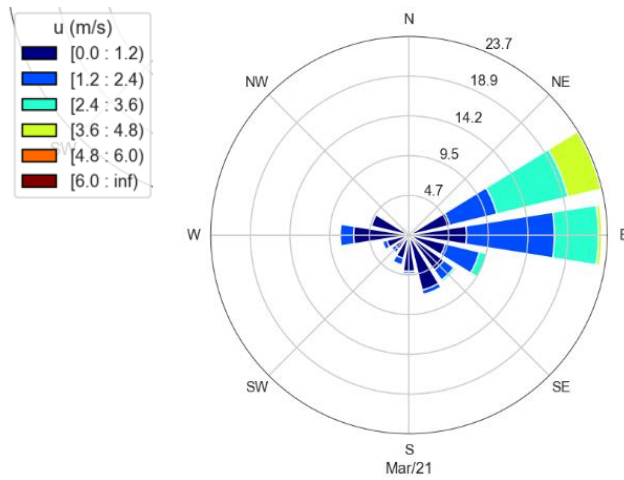


Nota: Radiación solar total diaria (Rs); Humedad relativa (HR); Temperatura media (Tmed); Punto de rocío (Pr); Velocidad del viento (u).

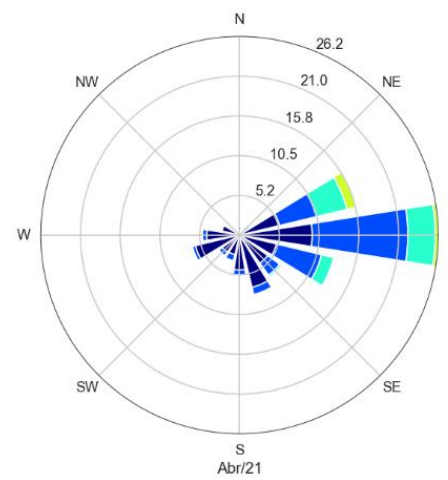
iii. Variaciones mes a mes del recorrido y la dirección del viento



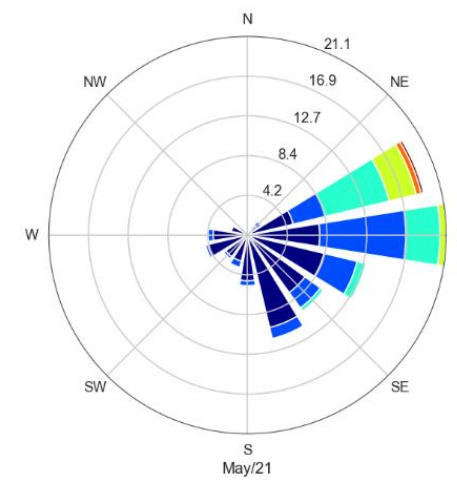
Marzo 2021



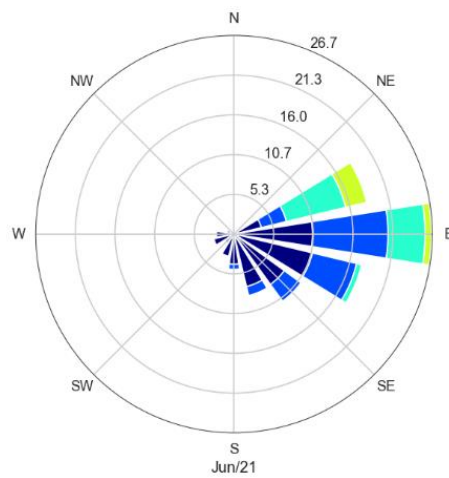
Abril 2021



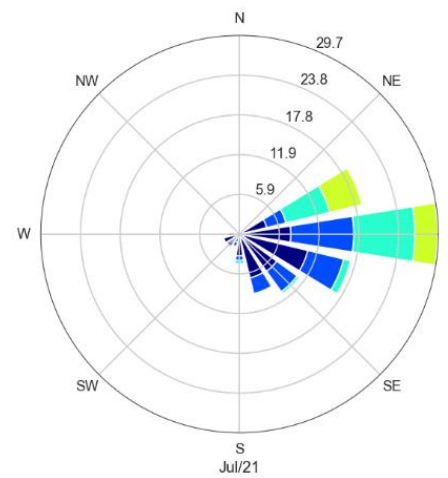
Mayo 2021



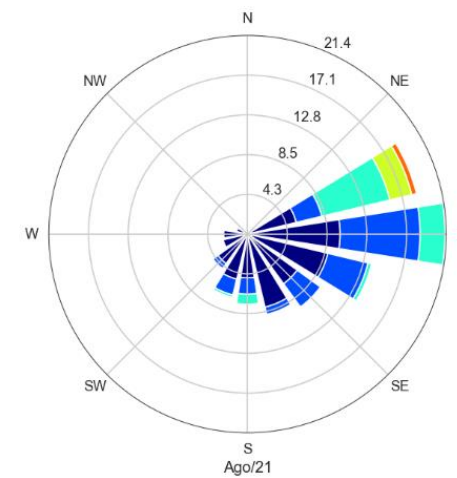
Junio 2021



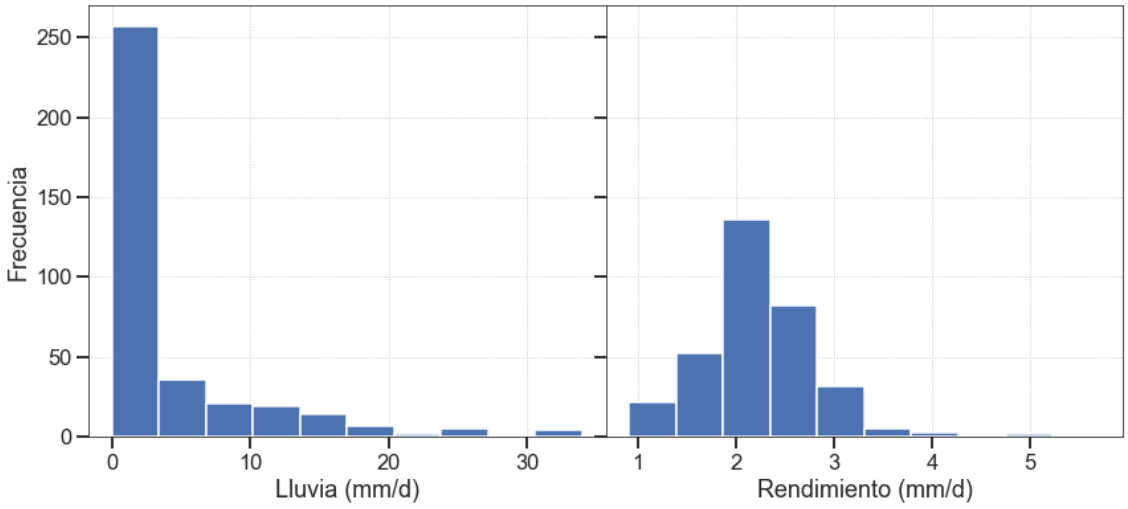
Julio 2021



Agosto 2021

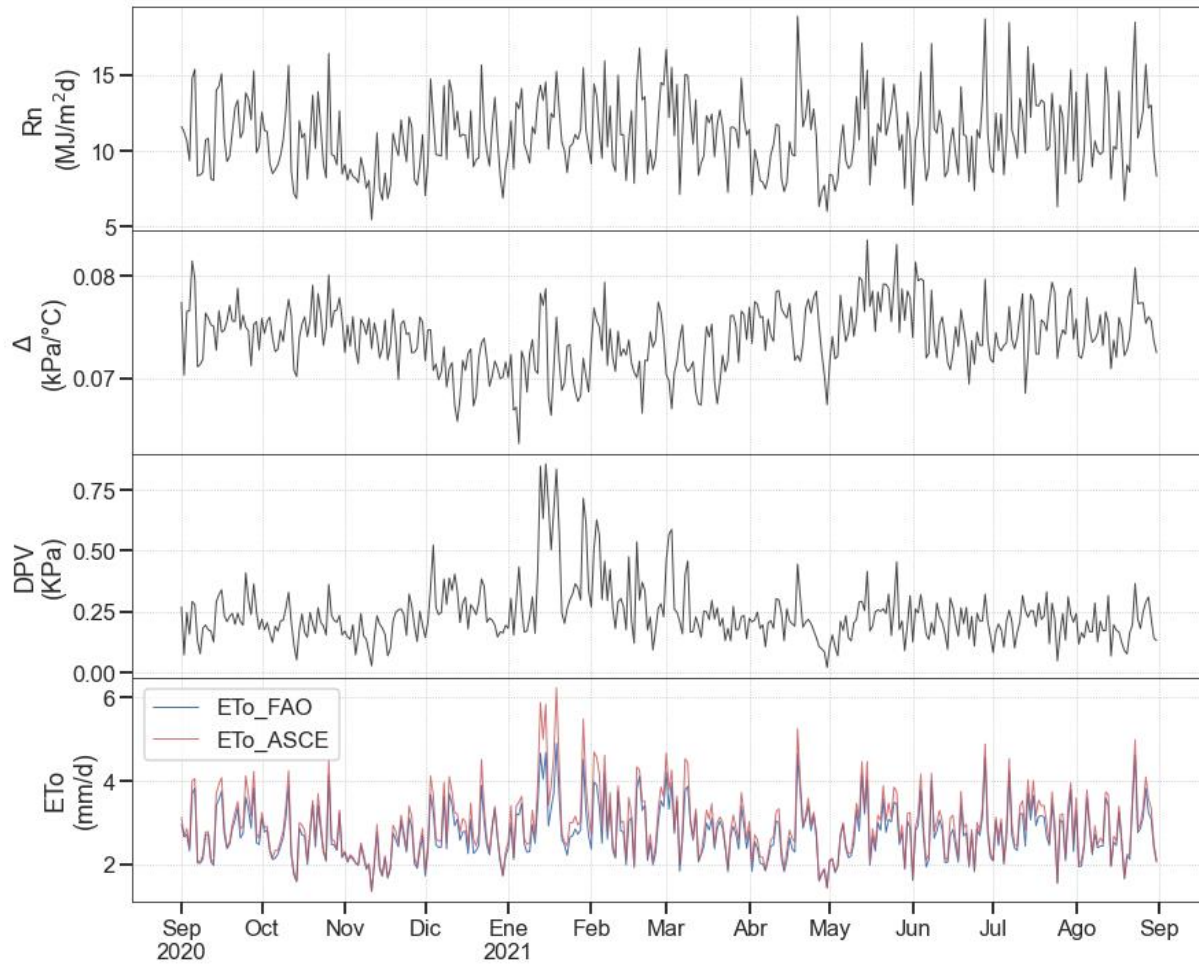


iv. Histogramas de lluvia total y rendimiento promedio a escala diaria



APÉNDICE K. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

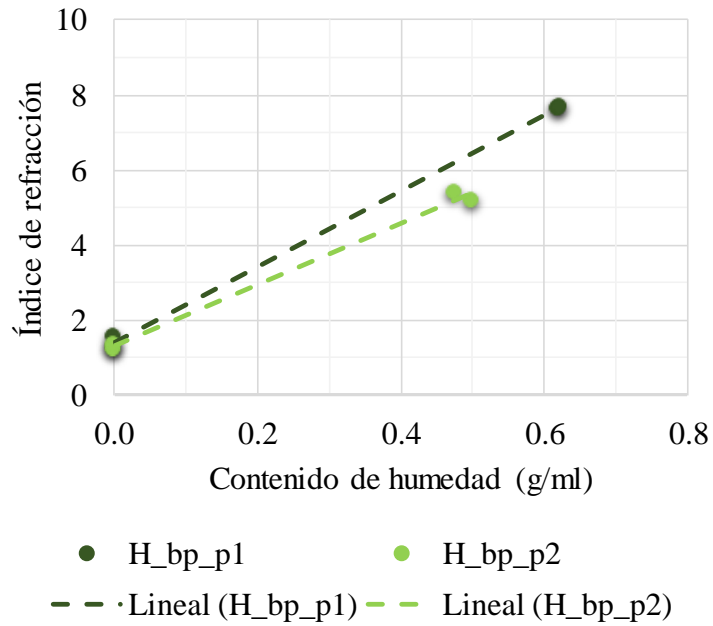
i. Serie de tiempo de evapotranspiración de referencia con promedios y totales diarios



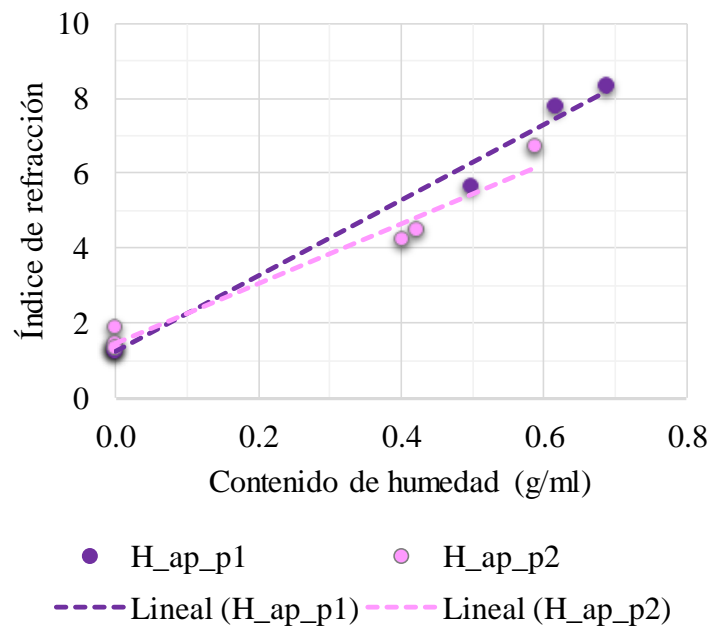
Nota: Radiación neta (R_n); Pendiente de la curva de presión de saturación (Δ); Déficit de presión de vapor (DPV); Evapotranspiración horaria para: la superficie de referencia de FAO (ET_o FAO) y para la superficie de referencia de ASCE (ET_o ASCE)

APÉNDICE L. REGRESIONES LINEALES DE CALIBRACIÓN DE LOS COEFICIENTES

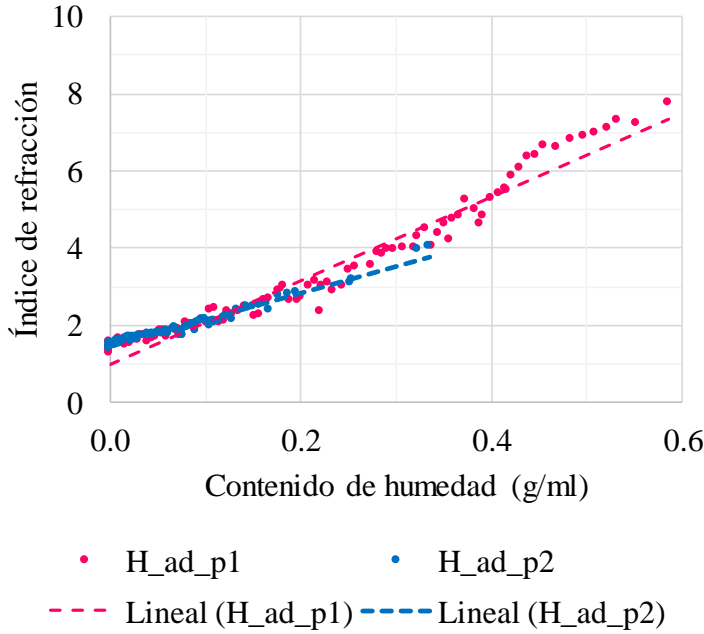
i. Regresión lineal en natural de baja pendiente (H_bp)



ii. Regresión lineal en natural de alta pendiente (H_ap)



iii. Regresión lineal en arbustivo denso (H_ad)

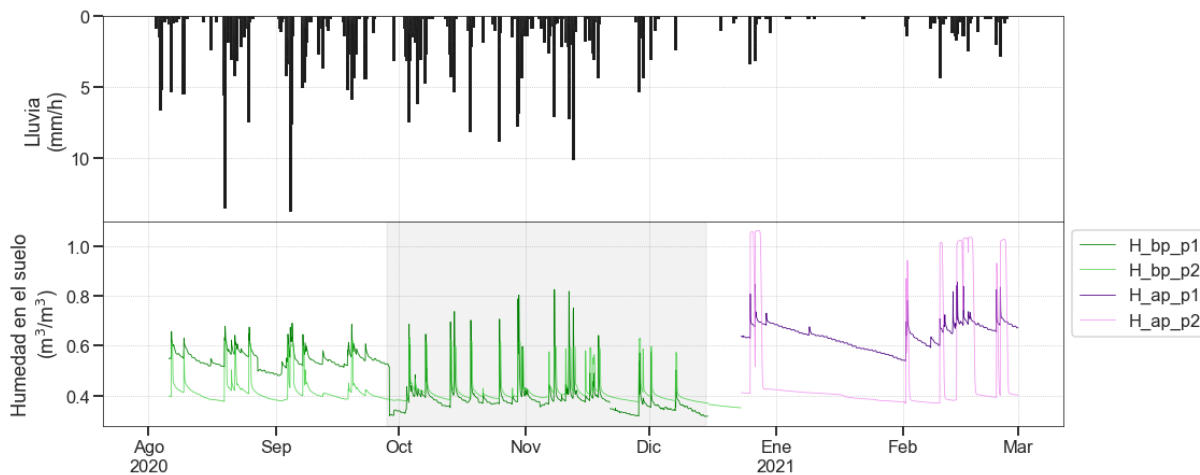


APÉNDICE M. REGISTROS DE HUMEDAD DEL SUELO

i. Anomalías en estaciones ubicadas sobre las coberturas de natural de baja y de alta pendiente

Entre el 6 de agosto de 2020 (fecha de instalación de los sensores) hasta el 27 de septiembre de 2020, el valor promedio de los contenidos de humedad monitoreados en la zona de natural de alta pendiente fue de $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en H_bp_p1 y de $0.42 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en H_bp_p2. Sin embargo, a partir de las 18 horas del 28 de septiembre de 2020, las observaciones de H_bp_p1 descendieron abruptamente y mantuvieron en un promedio de $0.38 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (región sombreada en la Figura A 5). En visita de campo del 15 de diciembre de 2020 fue identificado el daño en las agujas del sensor ubicado en H_bp_p1, y se decidió la desinstalación completa de la estación H_bp el 23 de diciembre de 2020. Así, las 1,839 observaciones de H_bp_p1 de la región sombreadas son consideradas anómalas y fueron eliminadas.

Figura A 5. Serie de tiempo de contenido de humedad en natural de baja y alta pendiente con datos originales



Nota: Estaciones en: Natural de baja pendiente (H_bp); Natural de alta pendiente (H_ap); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

Además, como se observa en la Figura A 5, la serie de tiempo de humedad para H_ap_p2 presenta valores sostenidos superiores a la unidad, lo cual equivale a no tener sólidos en el volumen de suelo monitoreado. Además, las variaciones de la humedad en el suelo en H_ap_p2 presentaron ascensos abruptos ante eventos de precipitación los cuales también fueron sostenidas en el tiempo (hasta por 32 horas consecutivas). Lo anterior indica una serie de datos anómalos. Frente a estos

inconvenientes, los valores anómalos en H_ap_p2 fueron igualados al contenido de humedad a saturación teórico. Algunas posibles causales de las anomalías en el seguimiento de esta variable son: i) la manipulación inadecuada del sensor, ii) problemas imperceptibles en la instalación y/o iii) defecto de fábrica del equipo. Ninguna de estas hipótesis pudo ser verificada dado que el sitio de monitoreo fue hurtado completamente.

En la Figura A 6 son mostradas las series de tiempo de contenido de humedad en el suelo registrados en cada una de las zonas homogéneas respecto a los contenidos teóricos de humedad a saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente respectivos.

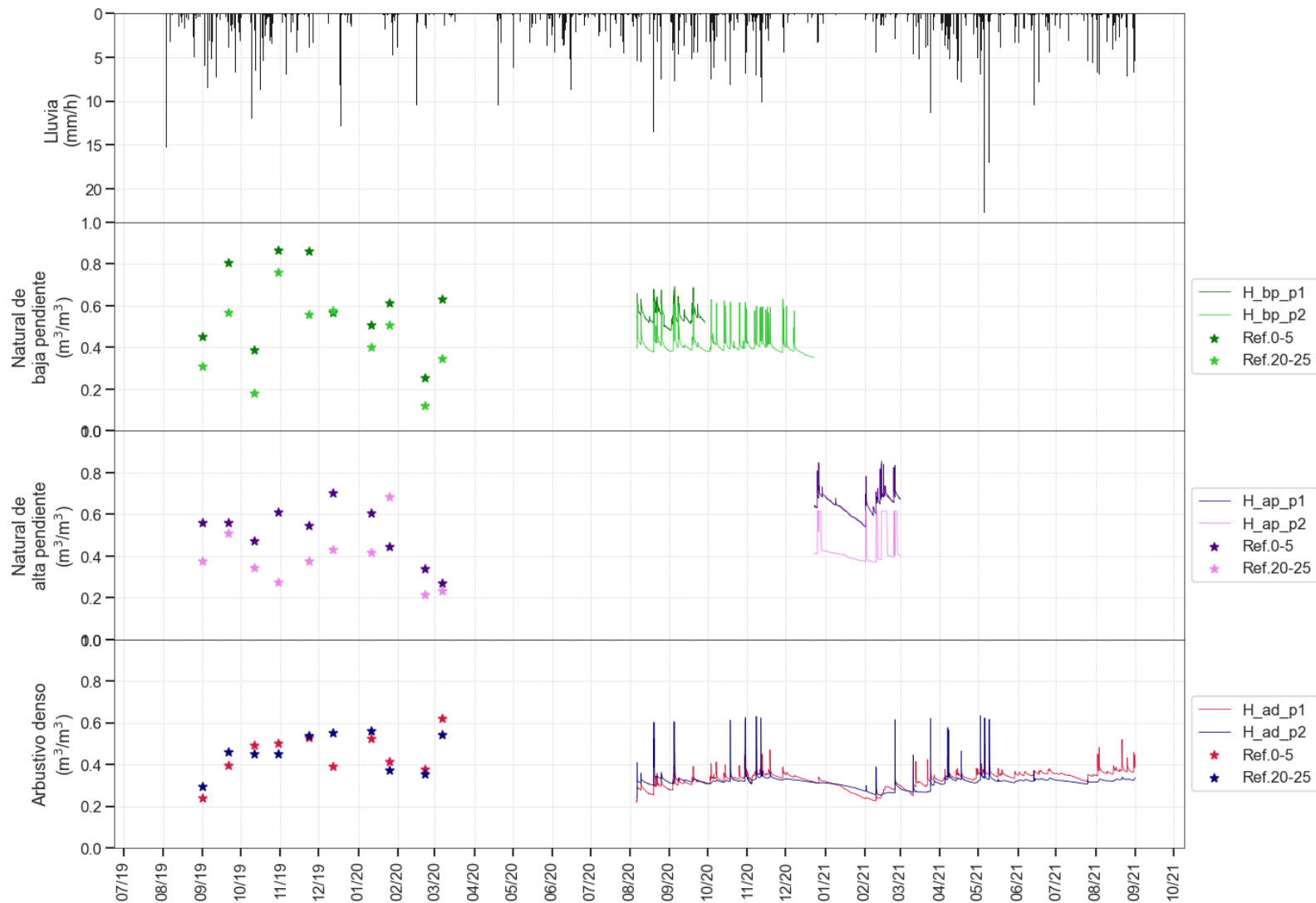
Figura A 6. Contenidos de humedad monitoreados respecto a los contenidos de humedad de la curva de retención de humedad



Nota: Contenido de humedad a: Saturación (S); Capacidad de campo (CC); Punto de Marchitez Permanente (PM); Estaciones en: Natural de baja pendiente (H_bp); Natural de alta pendiente (H_ap); Arbustivo denso (H_ad); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

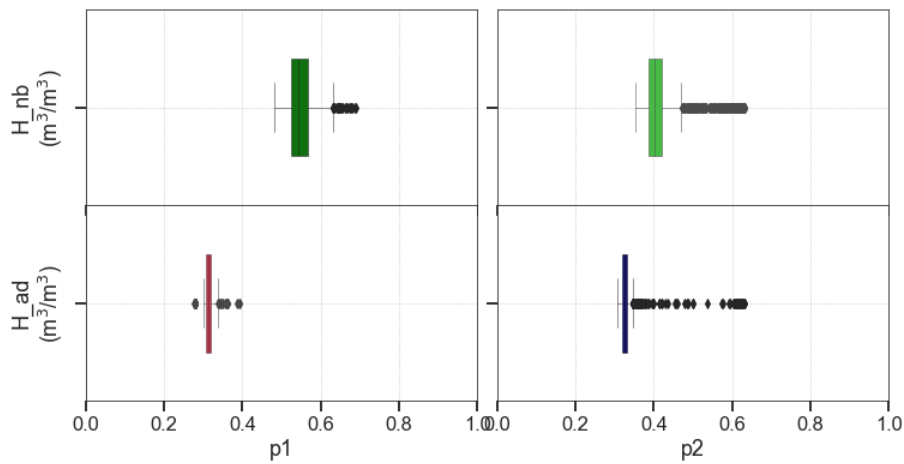
Como se observa en la Figura A 6, en el estrato más superficial de la zona de natural de alta pendiente fueron registrados valores superiores a la saturación entre diciembre de 2020 y febrero de 2021 (temporada seca). Dado que estos valores no son factibles, se cree que debe repetirse la curva de retención de humedad en el sitio de monitoreo en proyectos futuros.

ii. Valores referencia de los contenidos de humedad en el suelo



Valores de referencia tomados de Patiño Gutiérrez (2020). Nota: Estaciones en: Natural de baja pendiente (H_{bp}); Natural de alta pendiente (H_{ap}); Arbustivo denso (H_{ad}); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2).

iii. Contenidos de humedad en el suelo en natural de baja pendiente (H_bp) respecto a arbustivo denso (H_ad)



Entre el 1° y el 28 de septiembre de 2020

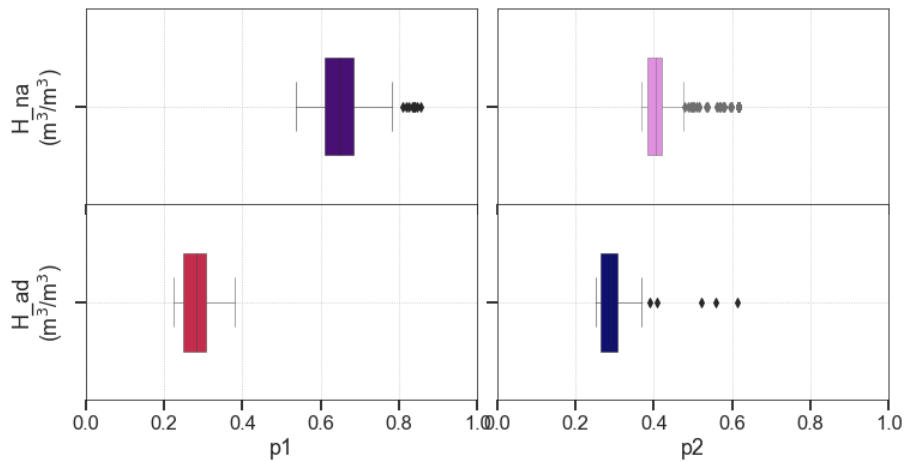
Entre el 1° y el 22 de diciembre de 2020

para p1

para p2

Nota: Estación en: Natural de baja pendiente (H_bp); Arbustivo denso (H_ad); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2).

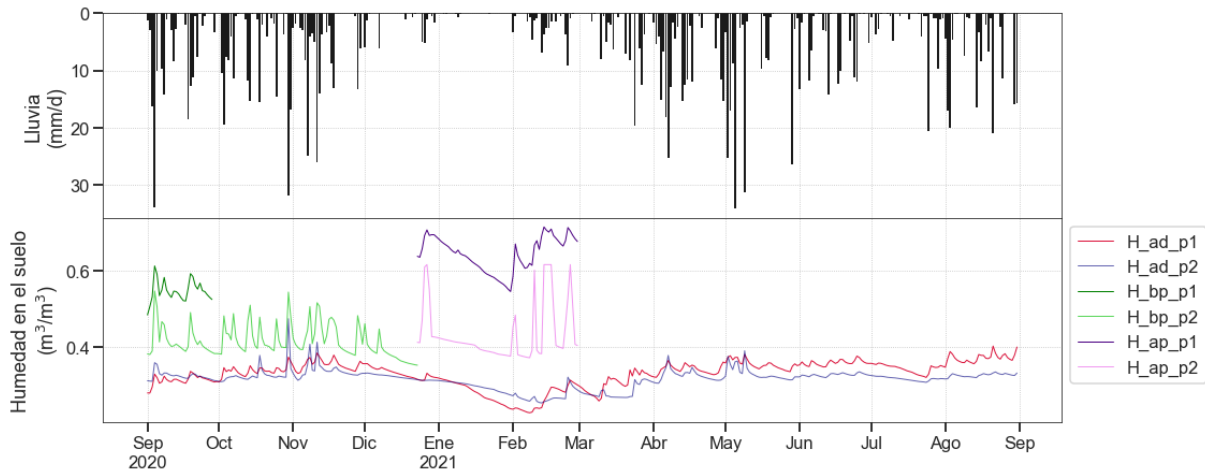
iv. Contenidos de humedad en el suelo en natural de alta pendiente (H_ap) respecto a arbustivo denso (H_ad)



Entre el 23 de diciembre de 2020 y el 28 de febrero de 2021 para ambos estratos

Nota: Estación en: Natural de alta pendiente (H_ap); Arbustivo denso (H_ad); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2).

v. **Serie de tiempo de contenido de humedad en el suelo a escala diaria**

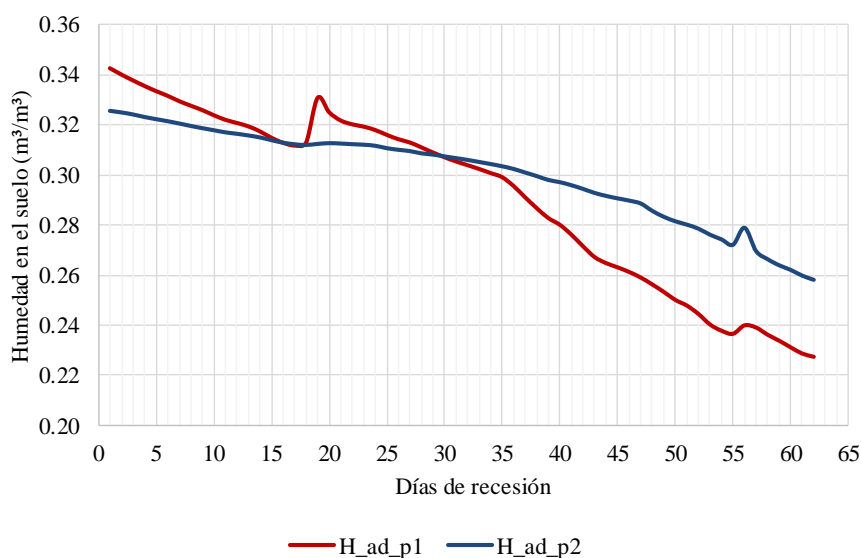


Nota: Estaciones en: Natural de baja pendiente (H_bp); Natural de alta pendiente (H_ap); Arbustivo denso (H_ad); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

vi. Periodos de estiaje en el contenido de humedad en el suelo

En la Figura A 7 se muestra un acercamiento de la serie de tiempo de humedad en el suelo entre el 9 de diciembre de 2020 (día 1) y el 8 de febrero de 2021 (día 62). En este periodo de estiaje se presentaron eventos de precipitación de baja intensidad, a excepción de los ocurridos el 26 de diciembre (día 18) con 5.1 mm/d y, el primer día de febrero (día 55) con 3.4 mm/d. Además, existe un punto de inflexión en el contenido volumétrico en el día 35 (12 de enero). Las pendientes de los subperiodos de estiaje son mostradas en la Tabla A 2.

Figura A 7. Periodos de estiaje en el suelo



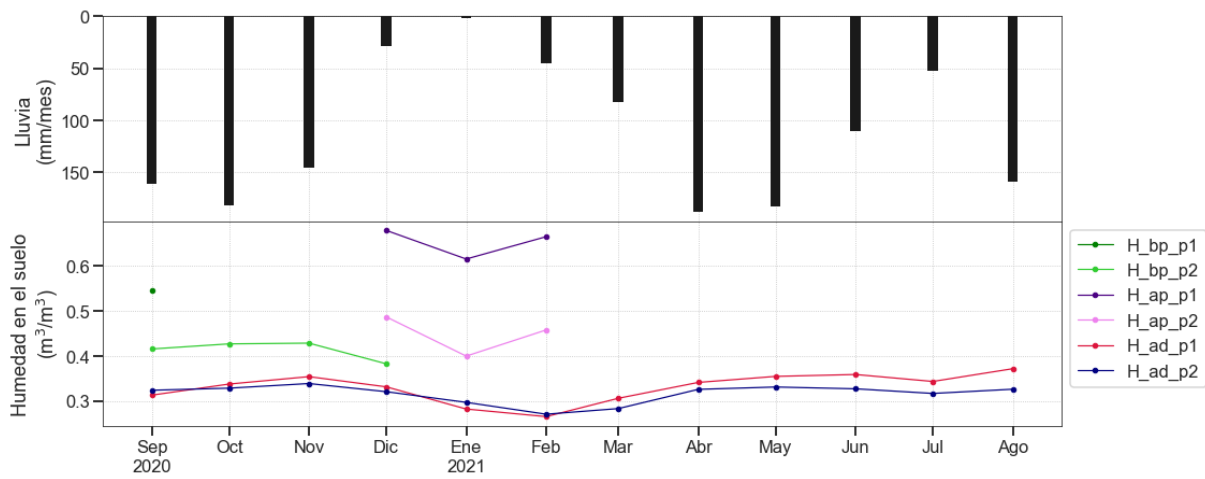
Nota: Arbustivo denso (H_{ad}); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

Tabla A 2. Subperiodos de estiaje

Subperiodo	Fecha inicial	Fecha final	Día inicial	Día final	Pendiente (%)	
					H_{ad_p1}	H_{ad_p2}
1	9 de diciembre	25 de diciembre	1	17	0.18	0.08
2	28 de diciembre	12 de enero	20	35	0.16	0.06
3	13 de enero	1 de febrero	36	55	0.29	0.15
4	3 de febrero	8 de febrero	57	62	0.19	0.19

Nota: Arbustivo denso (H_{ad}); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

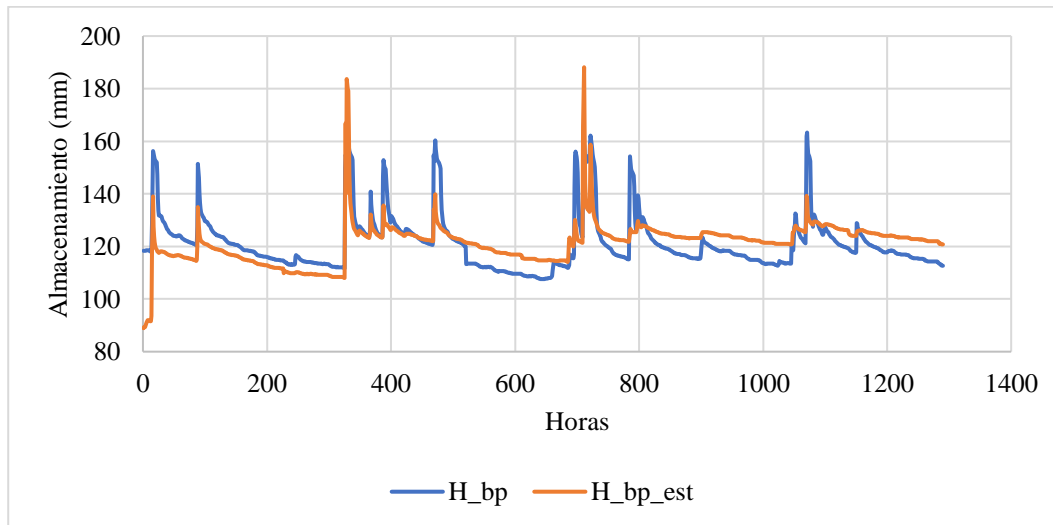
vii. Serie de tiempo de contenido de humedad en el suelo a escala mensual



Nota: Estaciones en: Natural de baja pendiente (H_bp); Natural de alta pendiente (H_ap); Arbustivo denso (H_ad); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

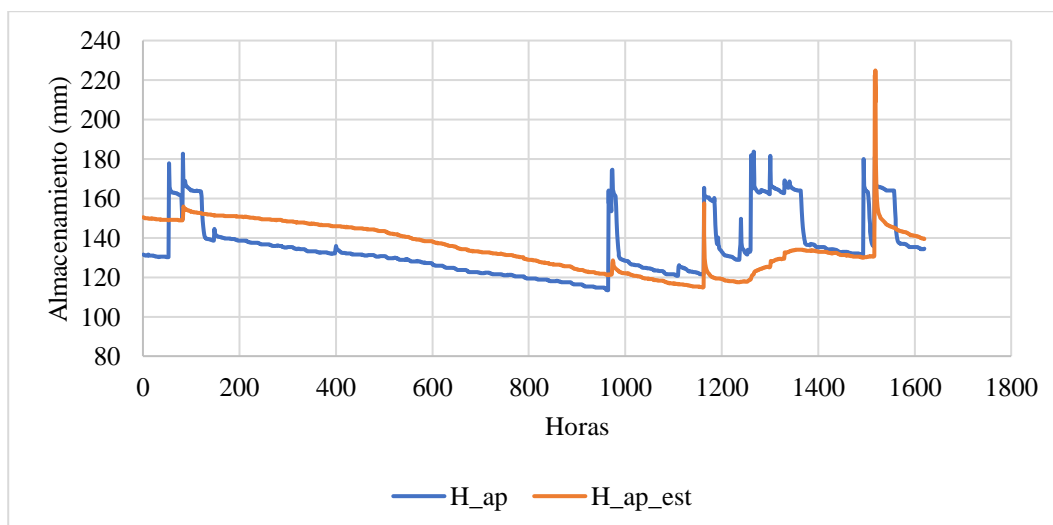
APÉNDICE N. ALMACENAMIENTO DE HUMEDAD EN EL SUELO

i. Comparación entre las observaciones y las estimaciones de humedad en el suelo para la cobertura de natural de baja pendiente



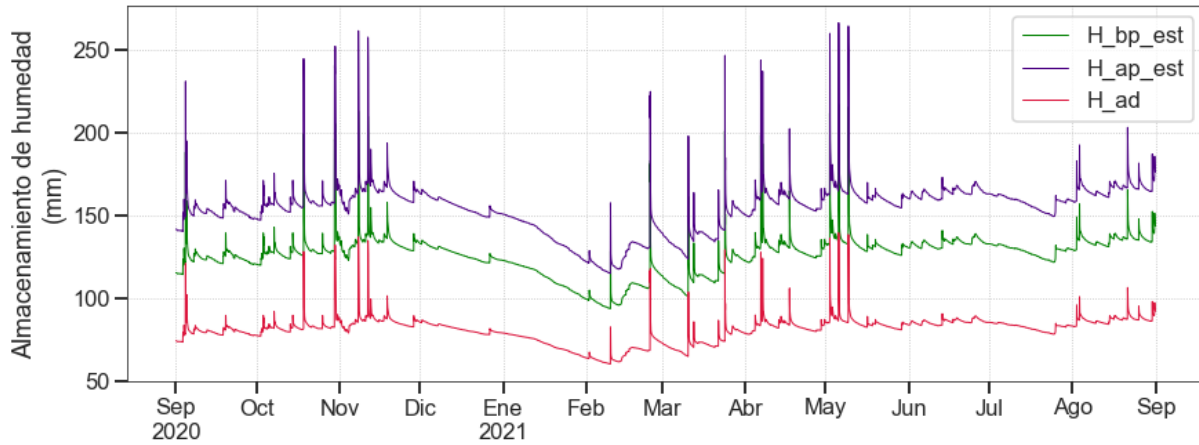
Nota: Estación en natural de baja pendiente monitoreado (H_bp); Estación en natural de baja pendiente estimado (H_bp_est)

ii. Comparación entre las observaciones y las estimaciones de humedad en el suelo para la cobertura de natural de alta pendiente



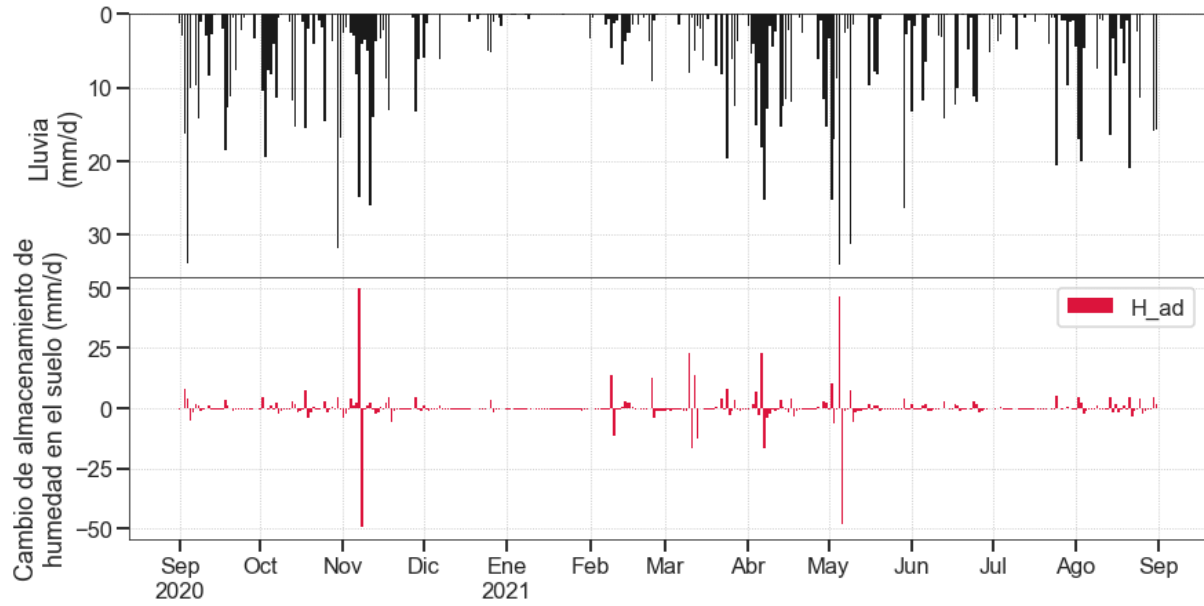
Nota: Estación en natural de alta pendiente monitoreado (H_ap); Estación en natural de alta pendiente estimado (H_ap_est)

iii. **Serie de tiempo con las estimaciones de almacenamiento de humedad en el suelo.**



Nota: Natural de baja pendiente estimada (H_{bp_est}); Natural de alta pendiente estimada (H_{ap_est}); Arbustivo denso (H_{ad})

APÉNDICE O. CAMBIO DE ALMACENAMIENTO DE HUMEDAD EN EL SUELO EN ARBUSTIVO DENSO

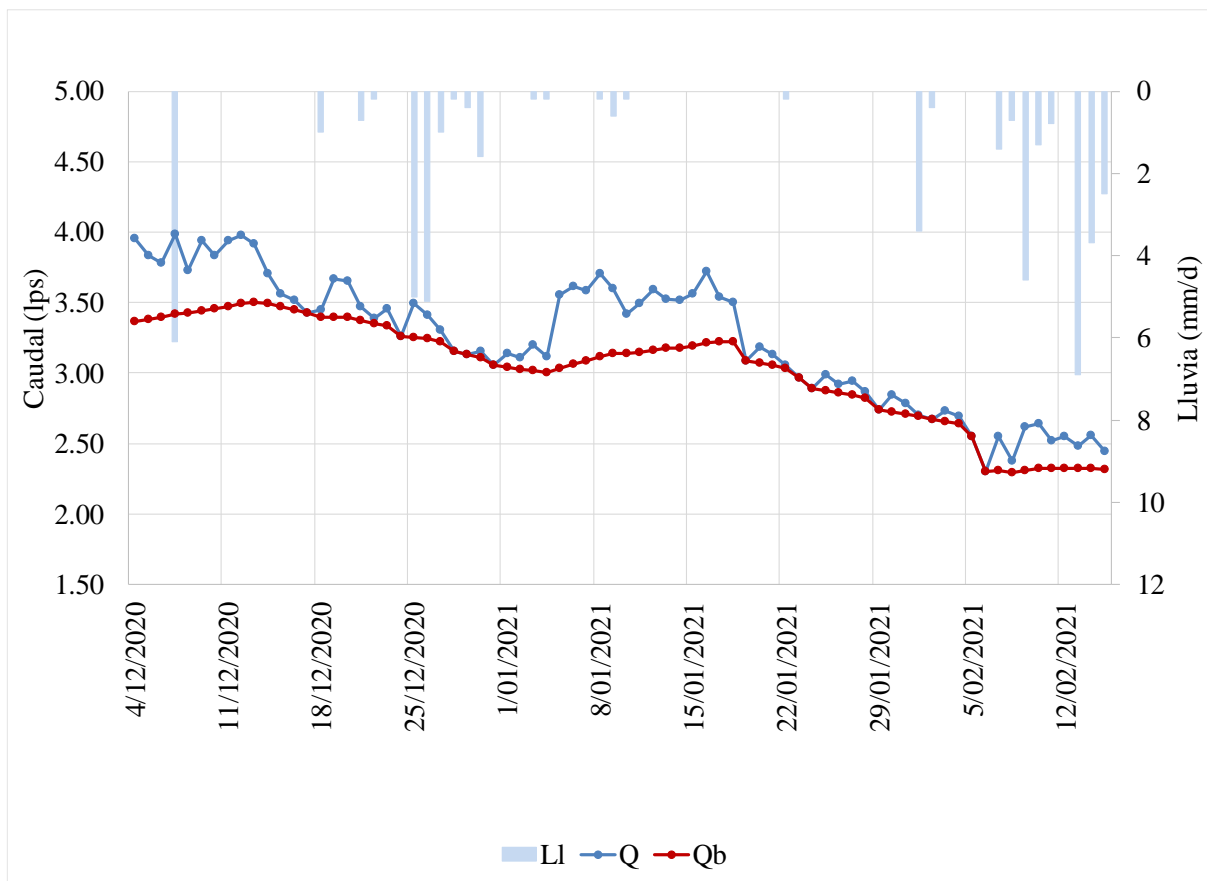


APÉNDICE P. SEPARACIÓN DE FLUJO BASE DEL FLUJO TOTAL

i. Temporadas de recesión del hidrograma

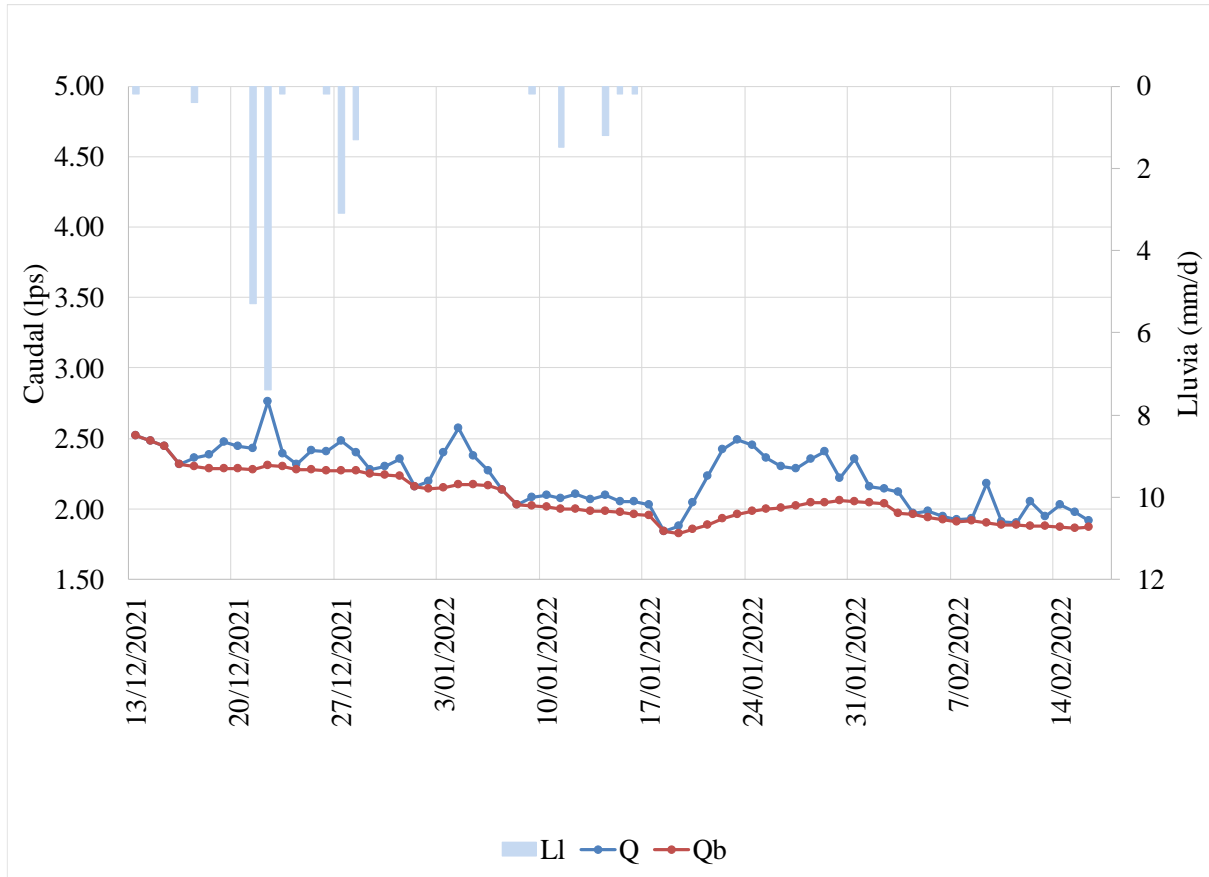
<i>Recesión</i>	<i>R1 (2020-2021)</i>		<i>R2 (2021-2022)</i>	
Subdivisión	R1a	R1b	R2a	R2b
Día inicial	4/12/2020	22/01/2021	13/12/2021	22/01/2022
Día final	31/12/2020	15/02/2021	18/01/2022	16/02/2022
Número de días	28	25	37	26

ii. Recesión R1: 2020-2021



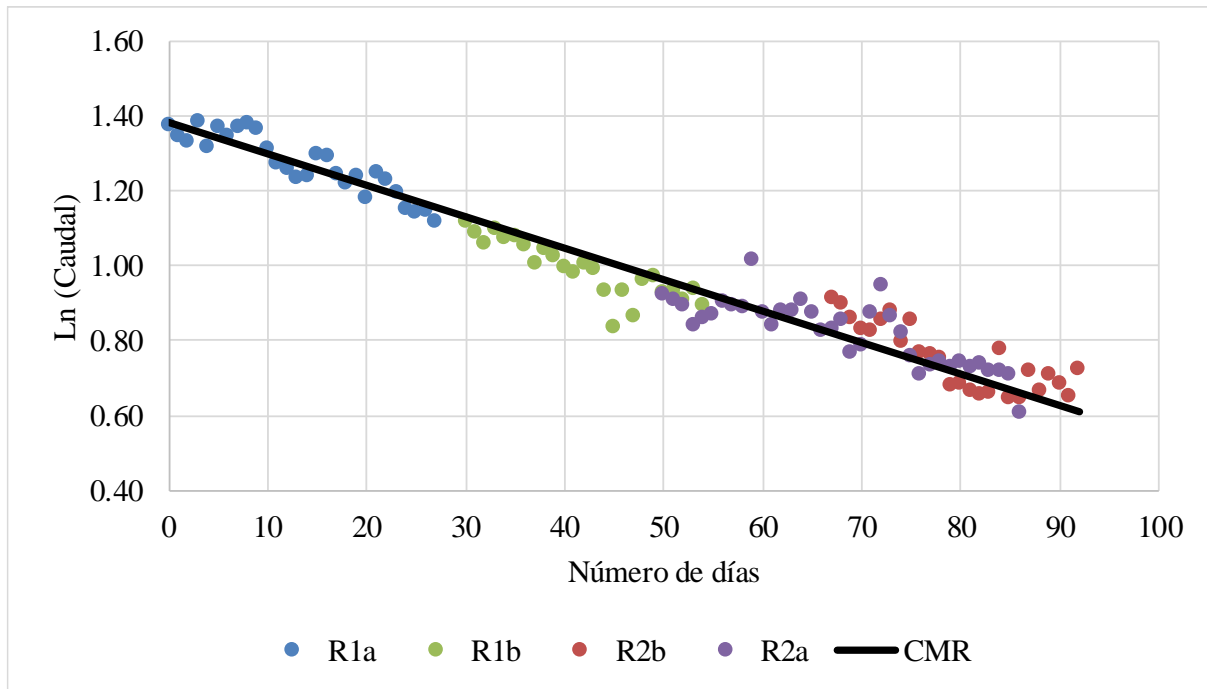
Nota: Lluvia (L); Caudal total (Q), Caudal base (Qb)

iii. Recesión R2: 2021-2022



*Nota: Lluvia (Ll); Caudal total (Q), Caudal base (Qb). *Datos faltantes de lluvia desde el 20 de enero de 2022.*

iv. Curva maestra de recesión

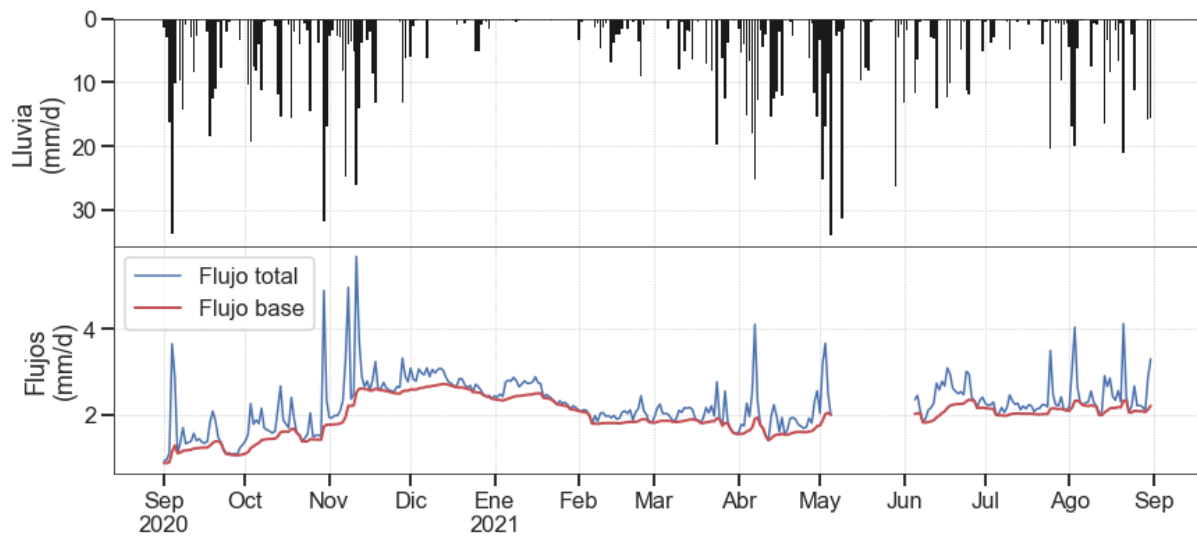


Nota: Curva Maestra de Recesión (CMR)

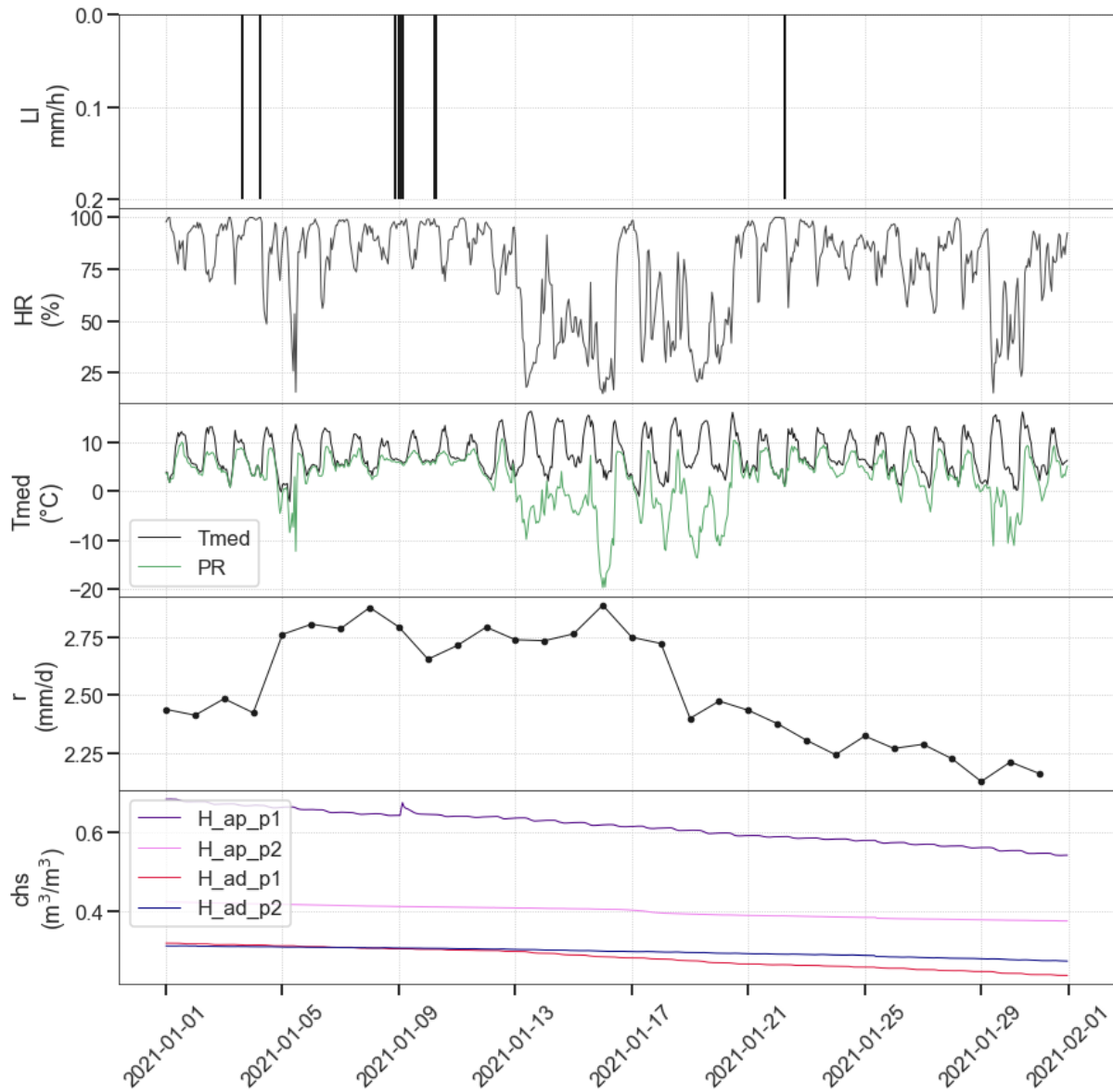
Ecuación que describe la Curva Maestra de Recesión:

$$Q_t = 3.97 e^{-0.0084t}$$

v. Serie de tiempo de flujo base y flujo total

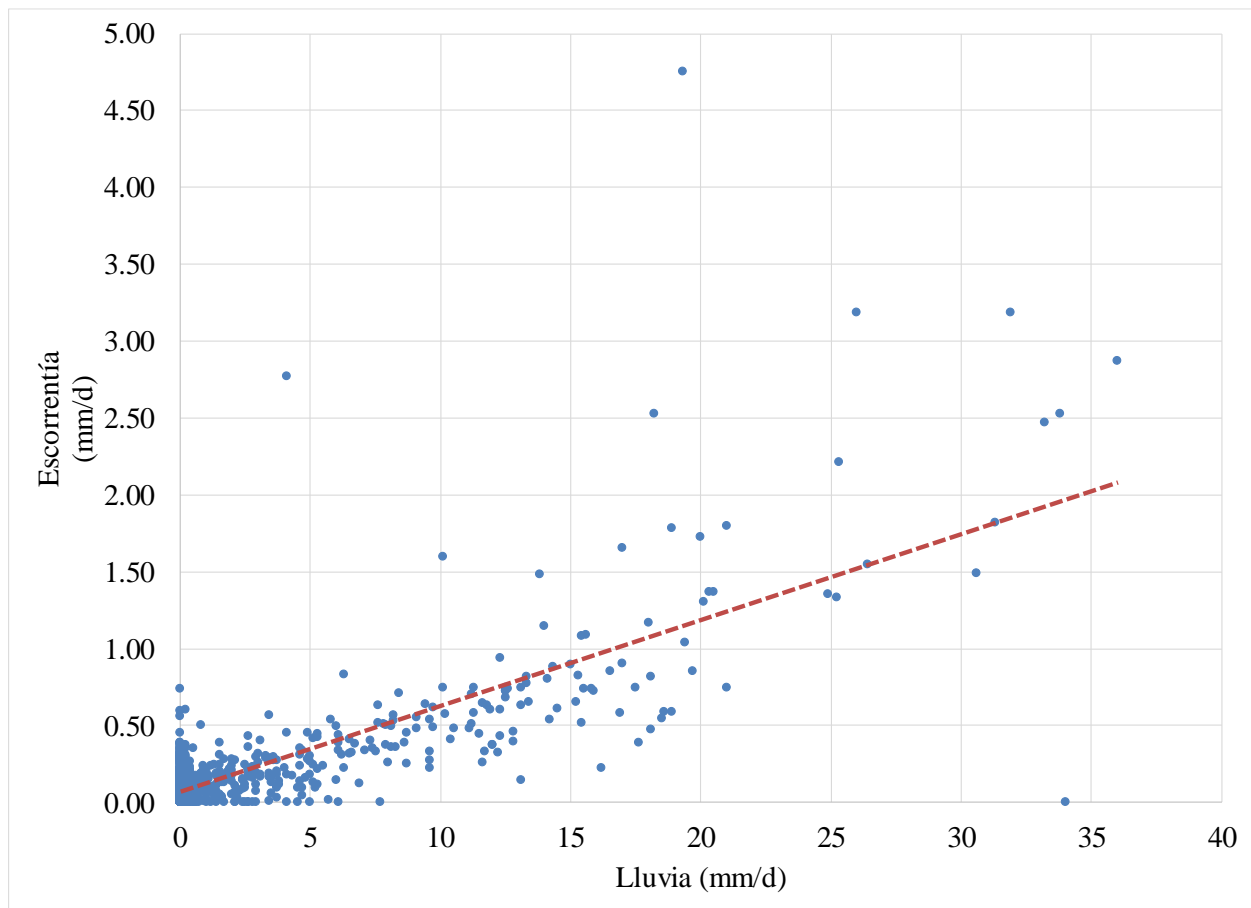


APÉNDICE Q. ASCENSOS EN EL HIDROGRAMA Y OTRAS SERIES DE TIEMPO



Nota: Lluvia (Ll); Humedad relativa (HR); Temperatura media (Tmed); Temperatura del punto de rocío (PR); Rendimiento (r); Contenido de humedad en el suelo (chs); Estación en natural de alta pendiente (H_ap); Estación en natural de arbustivo denso (H_ad); profundidad entre 5-10 cm (p1); profundidad entre 25-30 cm (p2)

APÉNDICE R. RELACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO



Ecuación que describe la relación lluvia-escorrentía:

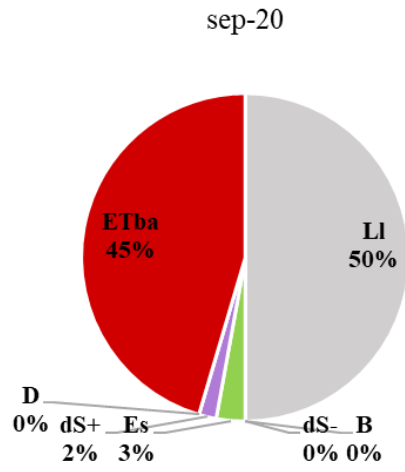
$$Esc = 0.0558 Ll + 0.0739$$

APÉNDICE S. BALANCE HÍDRICO

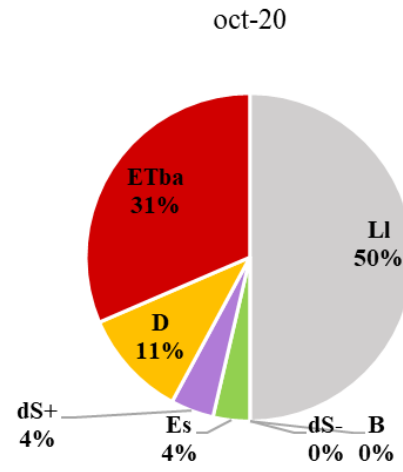
i. Porcentaje de flujos de entrada y salida por meses

Entradas:
 Lluvia (LI)
 Otras formas de precipitación (B)
 Cambio de humedad en el suelo:
 Negativo (dS-)

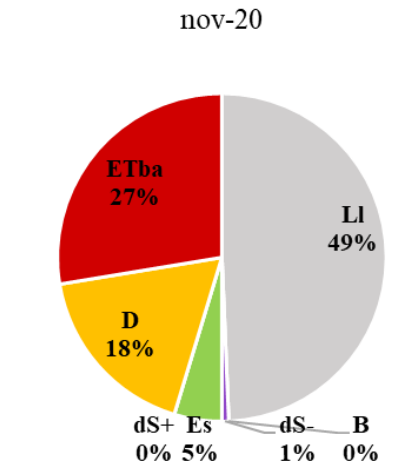
Salidas:
 Cambio de humedad en el suelo:
 Positivo (dS+)
 Escorrentía (Es)
 Infiltración (D)
 Evapotranspiración (ETba)



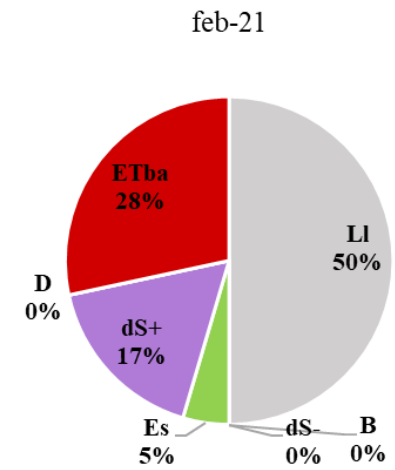
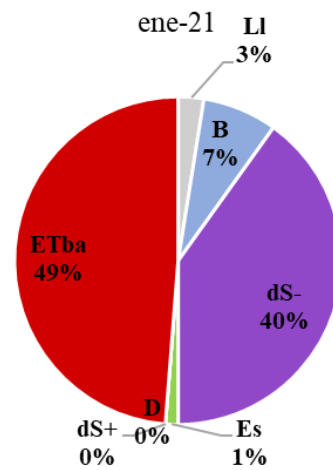
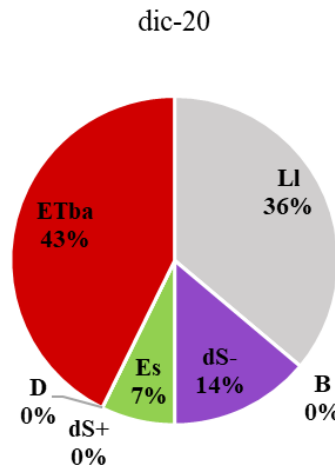
Entradas=Salidas=161.60 mm/mes



Entradas=Salidas=182.50 mm/mes



Entradas=Salidas=148.29 mm/mes



Entradas=Salidas=39.79 mm/mes

Entradas=Salidas=31.73 mm/mes

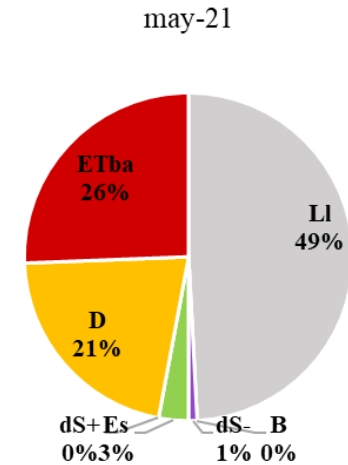
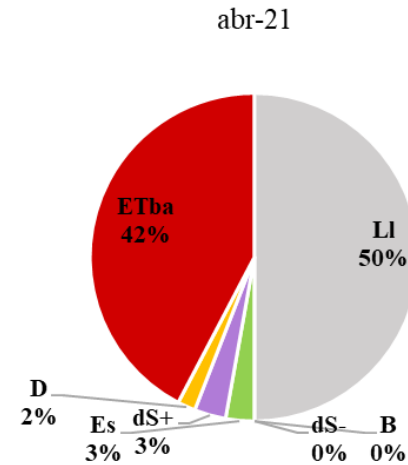
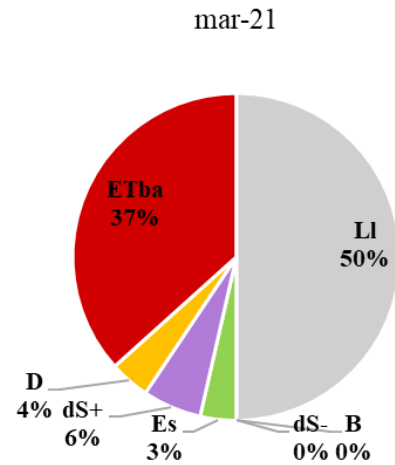
Entradas=Salidas=45.60 mm/mes

Entradas:

- Lluvia (LI)
- Otras formas de precipitación (B)
- Cambio de humedad en el suelo: Negativo (dS-)

Salidas:

- Cambio de humedad en el suelo: Positivo (dS+)
- Escorrentía (Es)
- Infiltración (D)
- Evapotranspiración (ETba)



Entradas=Salidas=83.10 mm/mes

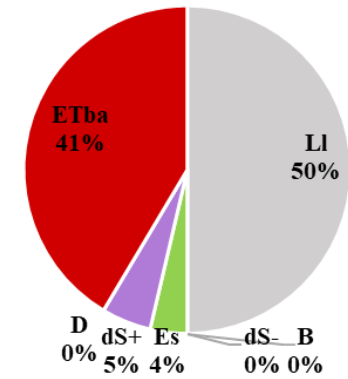
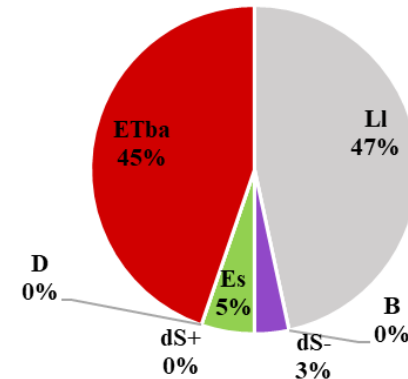
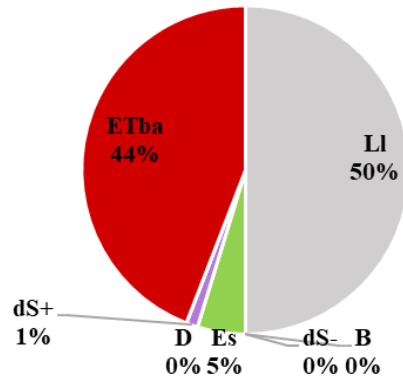
Entradas=Salidas=188.10 mm/mes

Entradas=Salidas=185.99 mm/mes

jun-21

jul-21

ago-21

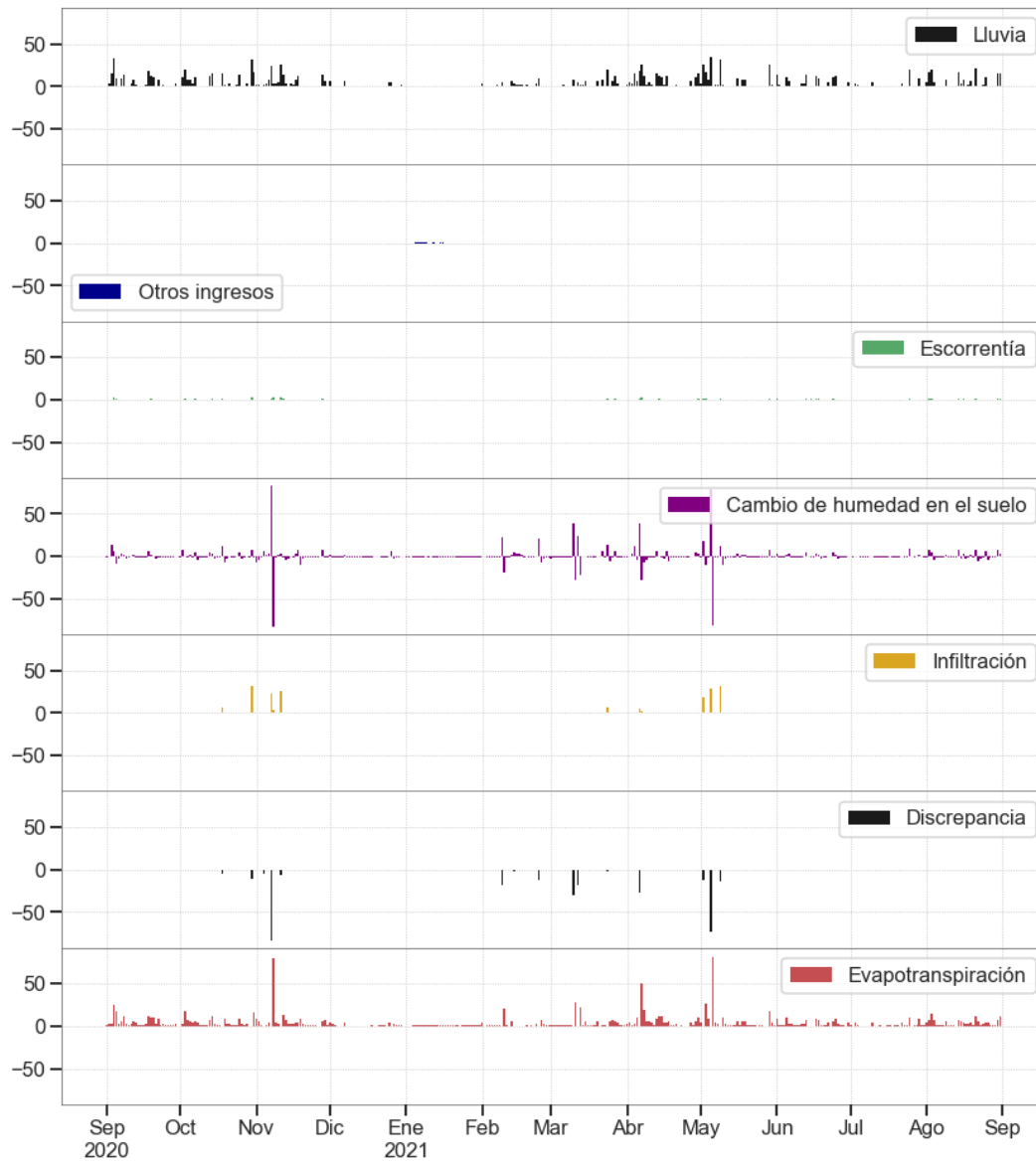


Entradas=Salidas=111.10 mm/mes

Entradas=Salidas=56.73 mm/mes

Entradas=Salidas=159.80 mm/mes

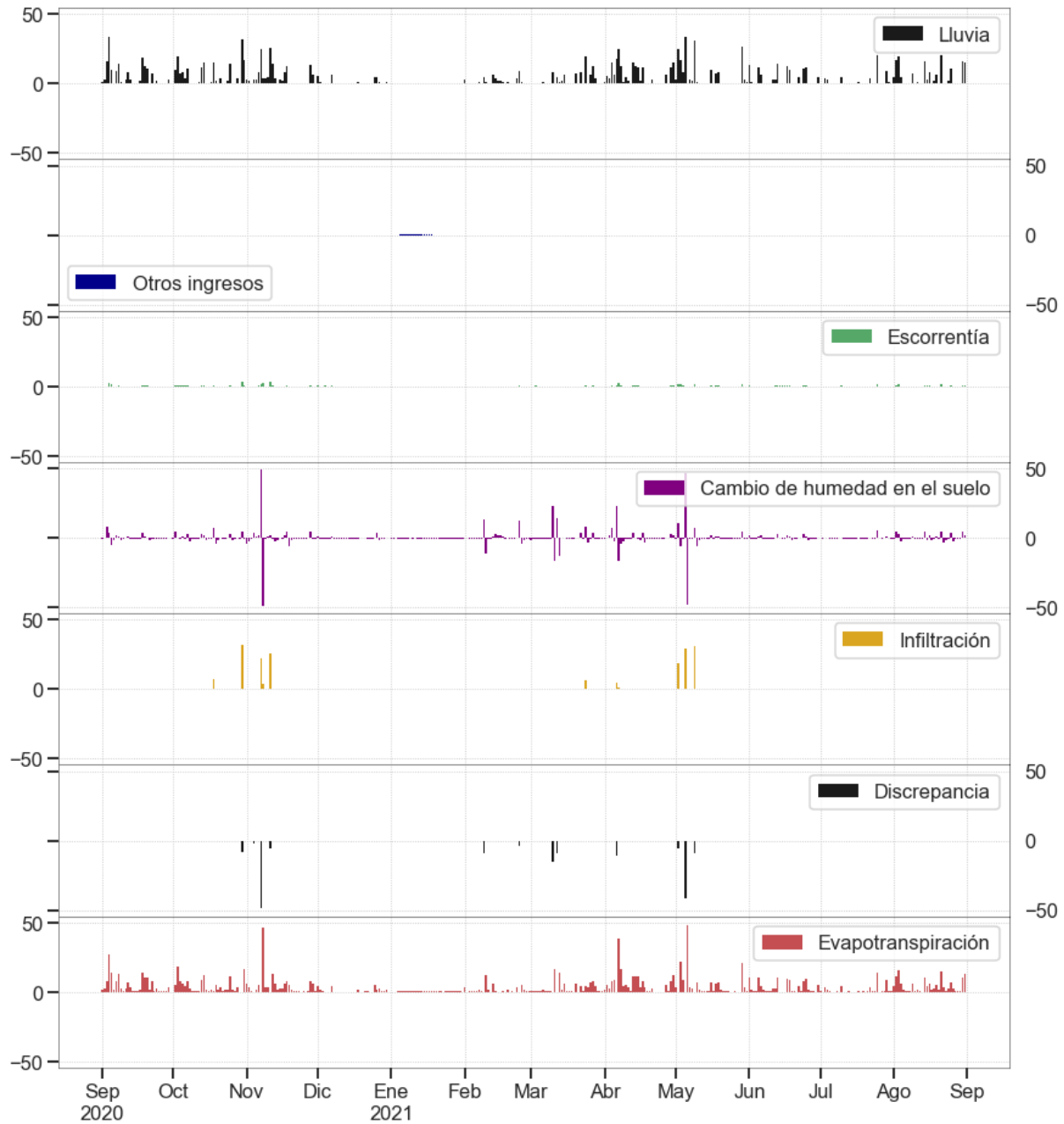
ii. Balance hídrico diario



Nota: Flujos de agua en milímetros por día (mm/d)

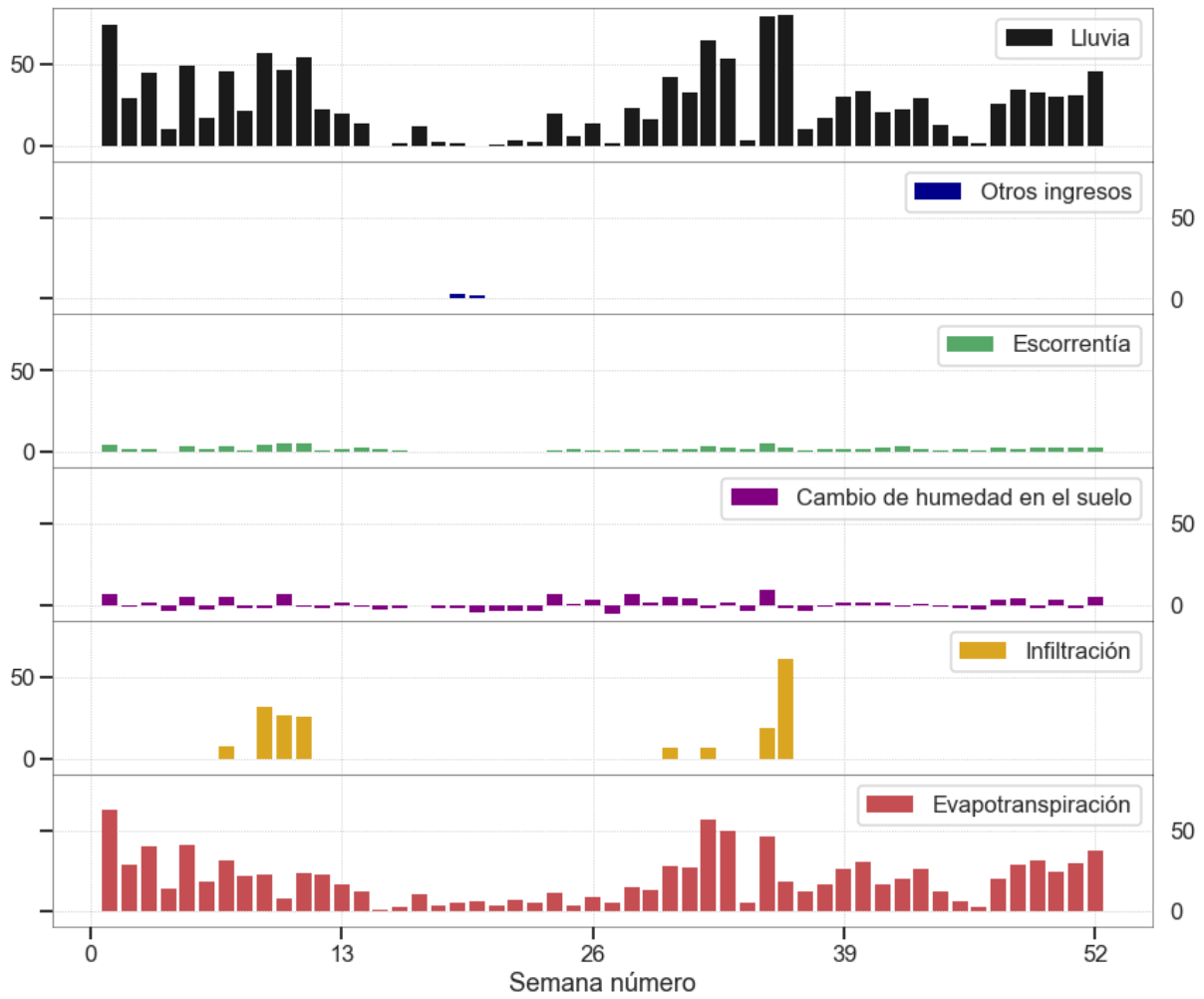
iii. Balance hídrico con el cambio de almacenamiento de humedad en el suelo en arbustivo denso

Figura A 8. Flujos de agua diarios con valores de cambio de almacenamiento de humedad en arbustivo denso



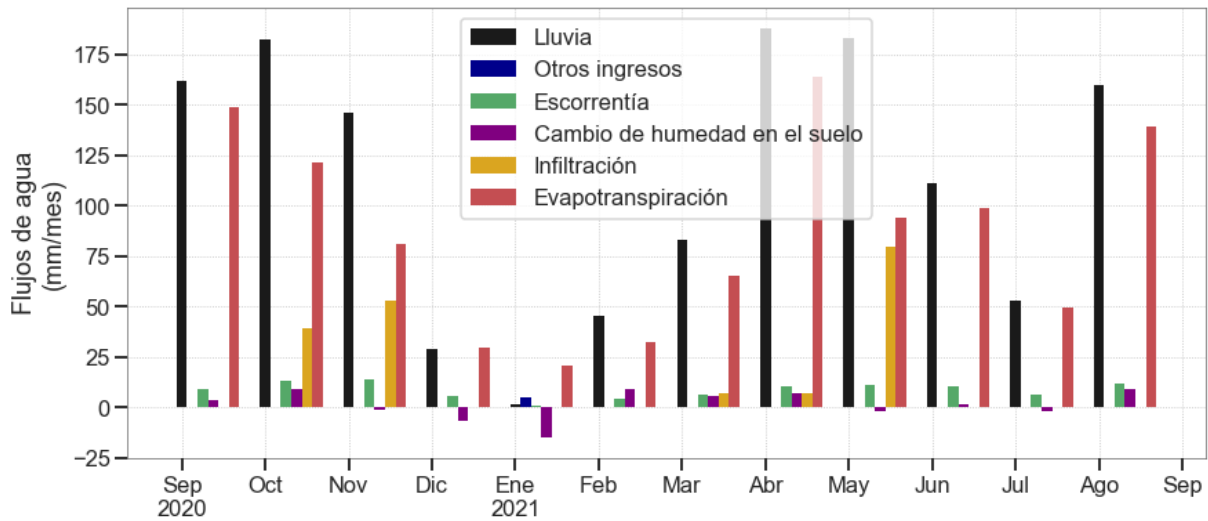
Nota: Flujos de agua en milímetros por día (mm/d)

Figura A 9. Flujos de agua semanales con valores de cambio de almacenamiento de humedad en arbustivo denso



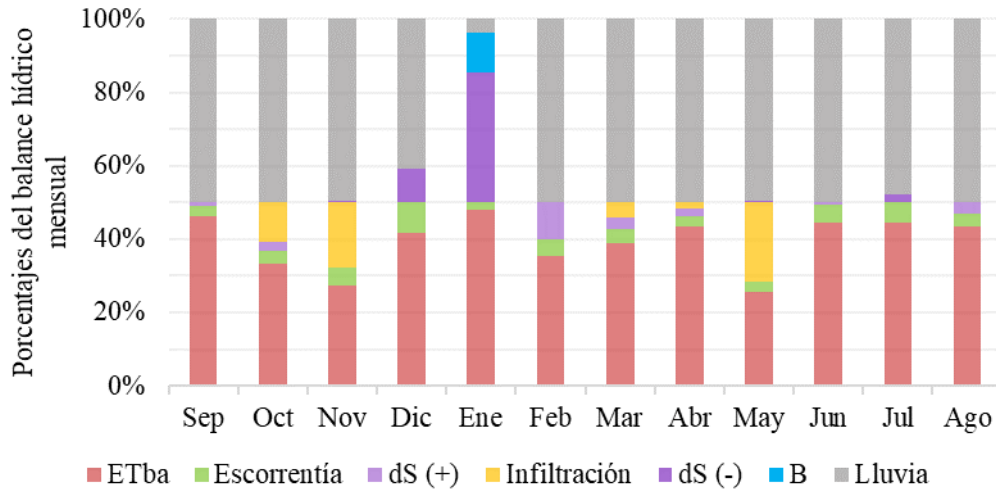
Nota: Flujos de agua en milímetros por semana (mm/sem)

Figura A 10. Flujos de agua mensuales con valores de cambio de almacenamiento de humedad en arbustivo denso



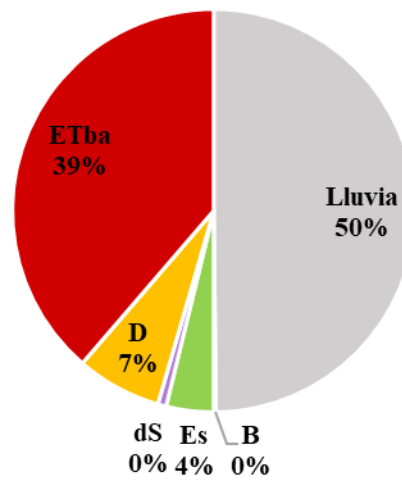
Nota: Flujos de agua en milímetros por mes (mm/mes)

Figura A 11. Porcentaje de flujos respecto a los totales mensuales con valores de cambio de almacenamiento de humedad en arbustivo denso



Nota: Cambio de almacenamiento de humedad positivo ($dS+$) y negativo ($dS-$); Otras formas de precipitación (B); Evapotranspiración derivada del balance hídrico (ETba)

Figura A 12. Balance hídrico anual con valores de cambio de almacenamiento de humedad en arbustivo denso



Nota: Otras formas de precipitación (B); Escorrentía (Es); Cambio de humedad en el suelo: Positivo (dS+) Negativo (dS-); Infiltración (D); Evapotranspiración (ETba)