

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Biología – Microbiología

**Variación del flujo de savia de *Polylepis rugulosa* influenciado por
factores climáticos en la provincia de Candarave, Tacna**

TESIS

Presentada por:

Bach. Syntia Noemi Huisa Maquera

Para optar el Título Profesional de:

BIÓLOGO MICROBIÓLOGO

TACNA-PERÚ

2025

ACTA DE SUSTENTACIÓN



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS Nro. 443

En la ciudad de Tacna, en el auditorium de la Facultad de Ciencias, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; siendo las 10.00 horas del día Jueves, 08 de Mayo del 2025, estando presente el jurado calificador nominado con Resolución de Facultad Nro. 11268-2025 FACI/UNJBG, conformado por los siguientes docentes:

Mgt. Giovanni Ademir Aragón Alvarado (Presidente)
MSc. Victor Hugo Carbajal Zegarra (Secretario)
Dr. Pablo Juan Franco León (Vocal)

Acto seguido, se dio lectura a la Resolución correspondiente, y del mismo modo se informa a la (al) Bachiller que el acto de sustentación constará de dos partes: (I) exposición y sustentación de la tesis, (II) absolución de preguntas del jurado. Todo ello en un tiempo no mayor a 60 minutos ni menor a 30 minutos. A continuación, el presidente del Jurado instó a la (al) Bachiller:

Synthia Noemi Huisa Maguera

a exponer la Tesis titulada:

Variación del glibo de savia de *Polylepis rugulosa* influenciado por Factores climáticos en la Provincia de Condesave, Tacna.

para optar el Título Profesional de Biologo - Microbiologo.

Siendo las 10.50 am horas, la (el) tesista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de las preguntas por parte de los miembros del jurado calificador, terminado este proceso, se invitó al público presente a abandonar la sala de sustentación para que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dio el siguiente resultado:

Aprobado por unanimidad, con nota de 17.00, de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Siendo las 11.25 horas, se dio por concluido el acto de sustentación de la tesis, firmando los miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.

[Signature]
Presidente

[Signature]
Secretario

[Signature]
Vocal

CONSTANCIA DE SIMILITUD

CONSTANCIA DE SIMILITUD

Yo Pablo Juan Franco León, en mi condición de asesor acreditado, **CERTIFICO** que, la tesis titulada “**Variación del flujo de savia de *Polylepis rugulosa* influenciado por factores climáticos en la provincia de Candarave, Tacna**”, desarrollado por el Bach. Syntia Noemi Huisa Maquera, para optar el Título Profesional de **Biólogo - Microbiólogo**.

Después de realizado el análisis correspondiente en el software de similitud textual TURNITIN con fecha 10/10/2025; con la siguiente configuración:

- Excluir material bibliográfico
- Excluir material citado
- Excluir coincidencia baja (menos de 15 palabras)

Dicho documento presenta un porcentaje de **similitud de 6 %**

En tal sentido, **CERTIFICO QUE LA SIMILITUD** de la tesis está de acuerdo con el nivel **PERMITIDO**, para continuar con los tramites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite la presente constancia para los fines correspondientes.

Tacna, 13 de octubre de 2025



Bach. Syntia Noemi Huisa Maquera

AUTOR



Dr. Pablo Juan Franco León

ASESOR



AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi familia por brindarme el apoyo necesario, en especial, a mi madre, por su respaldo para seguir adelante.

Extiendo mi agradecimiento al Dr. Eduardo Oyague, por su valioso asesoramiento, por enseñarme en campo la instalación y el monitoreo de los equipos, por su enorme paciencia y la confianza depositada en mí durante todo este proceso.

A mi equipo de campo, quienes hicieron posible este trabajo bajo condiciones exigentes. Al Blgo. Javier Ignacio y Josué Pumasupa, por su compañerismo, las deliciosas comidas compartidas y el buen ánimo que nunca faltó. Al chofer Fortunato Barboza “Raulito”, por guiarnos con seguridad en cada salida de campo y acompañarnos en cada pernoctación bajo condiciones adversas.

También agradezco al Sr. José Luis, quien generosamente nos permitió acampar en parte de su territorio bajo las noches estrelladas de Cotapampa, así como a su familia por su hospitalidad y sus comidas reconfortantes. (Si algún día pueden visitar Cotapampa, háganlo, sus rutas turísticas son realmente hermosas). Su apoyo fue fundamental para el cuidado y resguardo de los equipos.

Al Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social del Perú – (MIDIS) de Tacna y Moquegua, que nos permitió hacer uso de sus instalaciones para la pernoctación en el Tambo de Kallapuma.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, a través del proyecto “Ecología, distribución espacial, estado de conservación y balance hídrico de los bosques de *Polylepis* en los Andes semiáridos de la región Tacna” (Resolución R.R. N.º 7424-2020-UN/JBG) a cargo del Dr. Pablo Franco por brindarme la oportunidad de desarrollar la presente tesis.

Contenido

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Formulación del problema.....	10
1.3. Hipótesis	10
1.4. Objetivos.....	10
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	10
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	10
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	11
2.1. Relación planta-agua.....	12
2.1.1. <i>Potencial hídrico</i>	12
2.1.2. <i>Movimiento del agua a través de las plantas</i>	15
2.1.3. <i>Mecanismo de transporte a través del xilema</i>	17
2.1.4. <i>Teoría de la Cohesión-Adhesión y la Tensión</i>	18
2.1.5. <i>Cavitación y embolia</i>	20
2.1.6. <i>Movimiento del agua de las hojas a la atmósfera</i>	23
2.1.7. <i>Transpiración</i>	24
2.2. Factores que afectan a la tasa de transpiración	27
2.2.1. <i>Humedad</i>	28
2.2.2. <i>Temperatura</i>	28
2.2.3. <i>Velocidad del viento</i>	30

2.2.4. Factores internos	30
2.3. Adaptaciones ecológicas para reducir la transpiración	32
2.4. Método relación de calor (HRM) para la medición del flujo de savia	35
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	38
3.1. Área de estudio.....	38
3.1.1. Población	38
3.1.2. Muestra	39
3.2. Materiales y equipos	40
3.3. Métodos.....	40
3.3.1. Medidores de Flujo de savia.....	40
3.3.2. Propiedad de la madera: Difusividad térmica.....	43
3.3.3. Estación meteorológica.....	46
3.3.4. Análisis de flujo de savia.....	46
3.3.5. Análisis de las variables climáticas	50
3.3.6. Análisis de la influencia climatológica en el flujo de savia.....	52
CAPITULO IV: RESULTADOS.....	53
4.1. Caracterización del árbol para la cuantificación del flujo de savia....	53
4.2. Cuantificación del Flujo de savia.....	56
4.2. Cuantificación de las variaciones del flujo de savia debido a los factores climáticos	63
4.3. Análisis de la relación de las variables climáticas con la variabilidad del flujo de savia para determinar las variables influyentes.....	70
V. DISUCIÓN.....	72

5.1. Cuantificación del flujo de savia.....	72
5.2. Cuantificación de los datos climatológicos.....	74
5.3. Análisis de relación de las variaciones del flujo y los factores climáticos	76
VI. CONCLUSIONES	80
6.1. Cuantificación del flujo de savia.....	80
6.2. Cuantificación de los factores climáticos.....	81
6.3. Relación de las variables climáticas con la variabilidad del flujo de savia.....	82
VI. RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS.....	93

Índice de Figura

Figura 1. Representación de las vías de transporte de agua a lo largo del continuo suelo-plana-atmósfera	14
Figura 2. Demostración de tracción por transpiración	19
Figura 3. El proceso de cavitación en el xilema	22
Figura 4. Evaporación del agua de la superficie de la hoja.....	24
Figura 5. Factores que influyen en la transpiración	27
Figura 6. Relación humedad relativa y potencia hídrico	29
Figura 7. Modelo conceptual de las relaciones en una planta.....	31
Figura 8. Relación de la temperatura-presión de vapor y transpiración – apertura estomática.....	32
Figura 9. Efectos del DPV en la regulación del transporte de agua a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera	33
Figura 10. Modelo esquemático para moderar los efectos de una baja VPD	34
Figura 11. Diagrama esquemático del sensor Sapflow	36
Figura 12. Distribución de los bosques de <i>Polylepis</i>	38
Figura 13. Mapa de ubicación de los individuos muestreados	39
Figura 14. Esquema de Instalación de medidores de flujo de savia	41
Figura 15. Preparación del indicador naranja de metilo al 0.1% para la determinación del coeficiente de difusividad térmica de la madera	43

Figura 16. Procedimiento para determinar el área funcional	44
Figura 17. Medición del peso fresco	44
Figura 18. Determinación del volumen fresco	45
Figura 19. Medición del peso seco.....	45
Figura 20. Distribución del coeficiente de difusividad térmica de la madera de <i>P. rugulosa</i>	54
Figura 21. Tendencia diaria del flujo de savia durante la época húmeda y seca	57
Figura 22. Ciclo horario del flujo de savia en la época húmeda	58
Figura 23. Ciclo horario del flujo de savia en la época seca	59
Figura 24. Resultados horarios de variables climatológicas durante la época húmeda y seca hasta setiembre del 2023.....	63
Figura 25. Tendencia histórica del déficit de presión de vapor y la evapotranspiración.....	70

Índice de Tabla

Tabla 1. Caracterización del árbol para la cuantificación del flujo de savia	53
Tabla 2. Resumen del flujo de savia por temporada en Litros.....	60
Tabla 3. Uso del agua de los árboles y parámetros de los árboles, incluido el método utilizado para diferentes especies	72

RESUMEN

Este estudio analiza el flujo de savia en los bosques de *Polylepis rugulosa* en la Provincia de Candarave, Región Tacna, Perú, durante la épocas húmeda y seca del 2023. Se usaron sensores de flujo de savia en 15 árboles estratificados de acuerdo a la posición topográfica Sureste (SE), Noroeste (NO) y llanura aluvial (LL). Los resultados mostraron que el flujo de savia (L/h) es mayor en la época seca (79643.71 L/temporada) que en la húmeda (15261.17 L/temporada), lo que sugiere una mayor presión hídrica en el periodo de época seca.

Los factores climáticos, como la radiación solar, la temperatura y el déficit de presión de vapor, se correlacionaron significativamente con el flujo de savia, mostrando una mayor actividad fotosintética y transpiración durante la época seca debido a las condiciones ambientales más extremas. Por el contrario, durante la época húmeda, debido a la ocurrencia de lluvias, el flujo de savia disminuye en relación directa con la más alta humedad relativa.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar las interacciones entre factores climáticos y respuestas ecofisiológicas para el manejo y conservación de los bosques de *Polylepis*, particularmente en regiones semiáridas como Tacna, que enfrentan desafíos significativos debido al cambio climático.

Palabras clave: Flujo de savia, Andes, Puna seca, eco-fisiología, *Polylepis*

INTRODUCCIÓN

En los Andes semiáridos de la Región Tacna, las especies *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana* habitan altitudes que van desde los 3515 hasta los 5175 metros. Estos ecosistemas son altamente vulnerables debido a factores antropogénicos, como la tala excesiva, y a los efectos del cambio climático, como el calentamiento global (Franco et al., 2021; Morales Aranibar et al., 2019). Las condiciones ambientales adversas, que incluyen temperaturas extremas, sequías prolongadas, precipitaciones escasas y alta radiación solar, limitan el crecimiento y distribución de estos bosques.

El estudio del flujo de savia es fundamental para comprender los mecanismos ecofisiológicos de adaptación de *Polylepis* frente a estas condiciones climáticas. La transpiración, evaluada a través del flujo de savia, está influenciada por factores externos como la temperatura, la radiación, la humedad relativa y el déficit de presión de vapor (DPV) (Tong et al., 2023; Yang et al., 2022). Una cuantificación precisa de la transpiración es esencial para el manejo sostenible de estos bosques, contribuyendo a la conservación del equilibrio hídrico regional y al desarrollo de estrategias de reforestación y mitigación frente al cambio climático.

A pesar de su importancia, en los Andes semiáridos de Tacna no existen estudios que evalúen directamente el flujo de savia como un mecanismo de adaptación ecofisiológica en *Polylepis*. Esta investigación busca llenar ese vacío, analizando la variación estacional del flujo de savia en relación con los factores

climáticos para entender mejor los patrones de consumo de agua en estos ecosistemas únicos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Los bosques de *Polylepis* tienen un rol importante en el rendimiento hídrico como la captación de precipitaciones en regiones semiáridas y áridas (Mosquera et al., 2016). En los Andes semiáridos de la Región Tacna existen dos especies del género *Polylepis*; *P. rugulosa* que se encuentra desde los 3515 a los 4300 metros de altitud y *P. tarapacana* que va desde los 4225 hasta los 5175 metros de altitud.

Estos relictos boscosos presenta una alta vulnerabilidad por factores antropogénicos (e.g. tala excesiva) y climáticos (e.g. calentamiento global) (Franco et al., 2021; Morales Aranibar et al., 2019). Se encuentran expuestos a temperaturas extremadamente bajas, sequías prolongadas, escasas precipitaciones y alta radiación solar, condicionando el crecimiento y distribución del bosque. Por tanto, su evaluación y comprensión de los mecanismos de adaptación ecofisiológica como el consumo de agua y transpiración son cruciales para entender su relación con los factores climáticos.

La estimación precisa de la transpiración del árbol es importante para la cuantificación del equilibrio hídrico en el ecosistema. Además, puede proporcionar una base para planes de manejo estratégicos y sostenibles para mantener el

equilibrio hidrológico regional y beneficiando a las comunidades usuarias de los Bosques de *Polylepis*. Lo que permitirá desarrollar planes efectivos para la reforestación. Por otra parte, ayudará a determinar cómo los bosques pueden responder a cambios climáticos a futuro (Bodo & Arain, 2021), considerando que Tacna es la región más árida del país y con menor cantidad de lluvias.

La evaluación del flujo de savia es un método para estimar la transpiración del árbol y esta se ve afectada por factores externos (climáticos no controlables) e internos (fisiológicos propios del árbol). Los principales factores climáticos que afectan los valores del flujo de savia son: temperatura, radiación, humedad relativa, déficit de presión de vapor de agua, velocidad del viento y precipitación (Tong et al., 2023; Yang et al., 2022).

Es una herramienta básica para calcular el balance hídrico y estimar la disponibilidad y requerimiento de agua en plantas (Pereira et al., 1999). Usando esta técnica, se determinó que el flujo de savia de *Zea mays* se encuentra influenciada por la climatología como la radiación, déficit de presión de vapor y el contenido de agua del suelo (Liu et al., 2012). Otro factor importante son los patrones temporales de lluvia que resultan influyentes en la productividad y supervivencia del bosque en un ambiente semiárido compuesto por *Pinus halepensis*, ya que al evaluar el flujo de savia de los árboles y la evaporación del suelo pudieron mostrar tendencias de calentamiento y sequías (Raz-Yaseef et al., 2012).

En estudios de *Pinus sp.*, se ha observado que el flujo de savia se correlaciona positivamente con la temperatura del aire, la radiación solar y el déficit de presión de vapor (DPV), mientras que con la humedad relativa muestra una correlación inversa (Tong et al., 2023) Estas correlaciones positivas se deben a que el aumento en la temperatura, la radiación y el DPV incrementan la demanda de transpiración, lo que a su vez eleva el flujo de savia. Por el contrario, una mayor humedad relativa disminuye la necesidad de transpiración, reduciendo el flujo de savia. Este equilibrio permite a los árboles regular su consumo de agua y adaptarse a diversas condiciones climáticas.

Se demostró que durante los distintas etapas de crecimiento de los árboles *Schima superba*, *Eucalyptus citriodora* y *Acacia auriculiformis* hay una variación en el flujo de savia influenciado por los factores meteorológicos, como la temperatura del aire, la radiación, la humedad relativa, el déficit de presión de vapor de agua y la velocidad del viento (Chen et al., 2019), semejante a lo determinado por Hayat et al. (2021), en *Salix psammophila*.

Estudios en árboles de *Picea abies*, mostraron que el flujo de savia durante la estación de verano es mayor que en la época de invierno, influenciado principalmente por la el déficit de presión de vapor (DPV), temperatura y precipitación, siendo este último una relación negativa, ante eventos de lluvia existe una disminución de transpiración (Clausnitzer et al., 2011). En *Fagus sylvatica* presentó una relación directa con la radiación solar siendo modulada por la

disponibilidad de agua en el suelo (Dalsgaard et al., 2011). Un mecanismo similar reportado por (Chang et al., 2014; Guo y Zhang, 2015; Jung et al., 2014) con *Picea crassifolia*, *Abies georgei* var. *smithii*, *Quercus mongolica*, *Alnus sibirica*, *Betula davurica*, *Tilia mandshurica*. Sin embargo, en epifitas y hemiepifitas en bosques nublados con *Cavendishia capitulata*, *Neomirandea croatii*, *Schefflera rodrigueziana*, la precipitación influye en su incremento de flujo de savia instantáneamente, a diferencia de las plantas leñosas que ante el cierre estomático el flujo de savia se reduce a valores mínimos.

Los estudios en *Cordia africana* y *Albizia coriaria* muestran que la precipitación influye en el flujo de savia de manera distinta en cada especie. En *A. coriaria*, la correlación positiva indica que un aumento en las precipitaciones mejora la transpiración al reducir la demanda evaporativa y aumentar la humedad del suelo. En cambio, en *C. africana*, la correlación negativa sugiere un retraso en la recuperación del uso de agua tras la estación seca. El flujo máximo diario registrado fue de 87.6 L/día en *A. coriaria* y 52.3 L/día en *C. africana*. En promedio, *A. coriaria* utilizó entre 20-32 L/día, mientras que *C. africana* consumió 12-15 L/día (Buyinza et al., 2019).

En un terreno montañoso en el sur de China, donde las condiciones atmosféricas como la humedad, la temperatura y la luz cambian rápidamente, el uso máximo diario de agua de los árboles estuvo modulada por dos variables principalmente, DPV y radiación fotosintéticamente activa (PAR), los árboles

Castanopsis chinensis, *Machilus chinensis* y *Schima superba* Gardner & Champ, el flujo de savia osciló entre 2 ± 4 a 36 ± 12 kg d⁻¹ y 4 ± 3 a 42 ± 11 kg d⁻¹ (Otieno et al., 2017).

Para *Polylepis*, solo se ha registrado un estudio en el páramo de Ecuador, específicamente en *P. reticulata*. Carabajo-Hidalgo et al. (2023) reportó que los árboles ubicados en el borde del bosque presentan un 46% mayor flujo de savia en comparación con aquellos situados en el interior. El promedio diario de flujo de savia fue de 27.4 L/día en un año seco, mientras que en un año con condiciones normales fue de 21.1 L/día. Los valores más altos de flujo de savia se registraron cuando el déficit de presión de vapor (DPV) superó los 0.15 kPa, destacando su papel como principal factor de control en la dinámica de la savia en *Polylepis*. En contraste, una mayor humedad relativa redujo la radiación disponible, limitando así la energía para la transpiración. Además, la humedad del dosel se mantuvo en un 80% de manera constante. El estudio de Carabajo-Hidalgo et al. (2023), recomienda ampliar las investigaciones para evaluar las estrategias de adaptación de *Polylepis* frente a condiciones climáticas cambiantes.

Uno de los factores determinantes para la transpiración de los bosques es la precipitación, controla la dinámica de los bosques y la humedad del suelo. Los periodos secos aumentan el estrés de los árboles al incrementar la magnitud y la duración del déficit de potencial hídrico (Restaino et al., 2016). Las plantas necesitan satisfacer la demanda de evaporación atmosférica, parte del proceso de la

transpiración, por medio de la absorción del agua, cuando es insuficiente, se desarrolla un déficit hídrico en la planta (Van der Molen et al., 2011).

Cuando la zona de evaluación presenta características climáticas adversas (alto déficit de presión de vapor durante la noche, viento), la transpiración impulsada por la actividad del flujo de savia puede suscitarse durante la noche, alterando el equilibrio de los potenciales hídricos entre la planta y el suelo. El incremento del estrés hídrico en la planta disipa menos calor a través de la evaporación del agua, y en consecuencia aumenta la temperatura de la planta (Giménez et al., 2013). Ocasionalmente una reducción en la fijación de CO₂, manifestándose como daños oxidativos en la planta (Shahenshah & Isoda, 2010).

En los Andes semiáridos de la Región Tacna no existen estudios que cuantifiquen con métodos directos la evaluación del flujo de savia relacionado con las condiciones climáticas adversas como un mecanismo de adaptación ecofisiológica de *Polylepis* ssp. Por lo tanto, existe la necesidad de determinar la variación estacional del flujo de savia frente a los factores climáticos, con el fin de obtener una determinación precisa de los patrones de consumo y reintegración del agua en el ecosistema. Por lo tanto, es importante calcular y predecir el flujo de savia para analizar la cantidad de transpiración de los árboles y evaluar el consumo de agua.

1.2. Formulación del problema

¿Qué factores climáticos ocasionan la variación del flujo de savia?

1.3. Hipótesis

Se encuentra determinada por Radiación, Temperatura, Déficit de presión de Vapor (DVP), Precipitación, Velocidad de viento.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la variación del flujo de savia debido a los factores climáticos (Radiación, Temperatura, Déficit de presión de Vapor (DVP), Precipitación, Velocidad de viento) en *Polylepis rugulosa*.

1.4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar el flujo de savia de *Polylepis rugulosa*.
- Cuantificar las variaciones de flujo de savia debido a los factores climáticos (Temperatura, Humedad Relativa, Radiación solar, Precipitación, Velocidad del viento, Déficit de presión de vapor)
- Analizar la relación de las variables climáticas con la variabilidad del flujo de savia para determinar las variables que son influyentes.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

La región de Tacna presenta una grave escasez hídrica por el clima hiperárido, agudizándose en la zona altoandina, la mayor parte de la provincia de Candarave presenta un clima semiárido con invierno y primavera seca (50 – 120mm de precipitación anual) y un clima semirrígido con invierno seco (entre 500 – 700 mm de precipitación anual), la temperatura desciende desde mayo a setiembre cercano a puntos de congelación (Cruz-Baltuano et al., 2025), esto hace que sea desafiante para la subsistencia de *Polylepis rugulosa* y *Polylepis tarapacana*, encontrándose casi amenazados según la UICN (2024).

En estos ecosistemas altoandinos, donde existe una escasa precipitación y alta radiación, provocan una creciente demanda de transpiración en la vegetación, llegando a ocasionar un estrés significativo. Sin embargo, son escasos los estudios que analizan y explican las tendencias de flujo de savia ocasionando la transpiración, a pesar de que estos factores son fundamentales para entender los mecanismos de resiliencia de las plantas frente a sequías prolongadas.

Para comprender cómo funciona la fisiología de una planta leñosa como lo es *Polylepis* y su interacción con la climatología se desarrolla la siguiente descripción de la relación planta-agua.

2.1. Relación planta-agua

El flujo de savia es un componente fundamental para la hidráulica de las plantas, la conexión entre el suelo y la atmosfera. El flujo de savia puede estimarse como transpiración debido a que menos del 1% del agua absorbida por las plantas se retiene en la biomasa (Lambers et al., 2008). La transpiración es una consecuencia inevitable de la fotosíntesis, por tanto, impulsa a mayores flujos de savia para compensar la pérdida de agua. Sin embargo, este proceso es importante para el balance energético de las hojas, la regulación de la temperatura de las hojas por el factor ambiental de temperatura.

En ausencia de transpiración, la temperatura de las hojas puede aumentar rápidamente a niveles letales. Otro punto importante está en la corriente de transpiración, ya que permite el transporte de nutrientes desde el suelo a la raíz (aminoácidos, fitohormonas) y de la raíz hasta los órganos que permiten la transpiración. Se ha preguntado *¿Cómo el agua desde el suelo, transformada en savia, puede ascender hasta la hoja y ser liberada a la atmosfera?* este proceso de transporte y como se da en las distintas estructuras de la planta se detalla en el **Potencial Hídrico** (Lambers & Oliveira, 2008.).

2.1.1. Potencial hídrico

Debemos comprender que la energía libre de cualquier molécula en la planta determina su capacidad para realizar un trabajo. El potencial hídrico del agua es la

energía libre del agua, es también una medida de la energía libre del agua por unidad de volumen (Jm^{-3}). En términos de unidades de presión, el potencial hídrico se expresa como MPa. Cuanto menor sea el potencial hídrico de la planta, mayor será su capacidad para absorber agua y viceversa. También ayuda a medir el déficit hídrico y el estrés en las plantas. El potencial hídrico no es un valor absoluto y está simbolizado por la letra griega Ψ_w (psi). El potencial hídrico del agua pura es máximo y su valor es cero a la presión atmosférica. En una célula viva, el potencial hídrico se refiere a la suma de los siguientes componentes

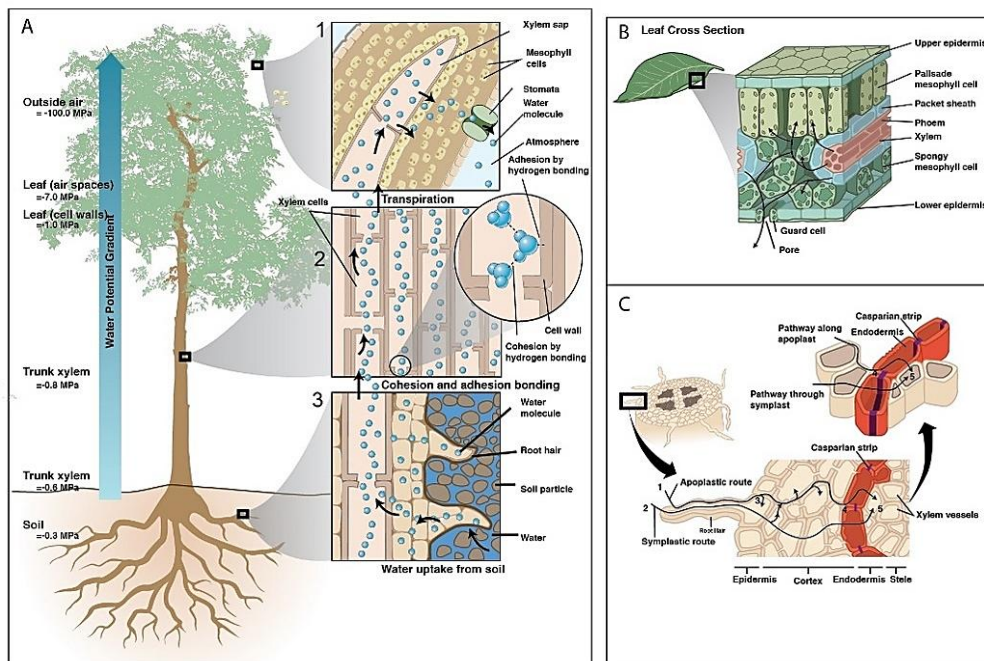
$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g$$

donde Ψ_w es el potencial de agua, Ψ_s el potencial de soluto/osmótico, Ψ_p el potencial de presión, Ψ_g el potencial gravitacional y Ψ_m el potencial mátrico.

Ψ_s (potencial de soluto u osmótico), que mide la reducción del potencial hídrico debido a la presencia de solutos y siempre es negativo; Ψ_p (potencial de presión), generado por la presión hidrostática o turgencia en las células vegetales, pudiendo ser positivo o negativo; Ψ_g (potencial gravitacional), que representa la influencia de la gravedad sobre el movimiento del agua y es más relevante en sistemas abiertos; y Ψ_m (potencial mátrico), que surge de la adhesión del agua a superficies sólidas como partículas del suelo o paredes celulares, generando fuerzas de retención y siendo siempre negativo. La suma de estos componentes determina el movimiento del agua en plantas y suelos.

Figura 1

Representación de las vías de transporte de agua a lo largo del continuo suelo-plana-atmósfera



Nota. (A) El agua se desplaza desde áreas de alto potencial hídrico (es decir, cerca de cero en el suelo) hacia áreas de bajo potencial hídrico (es decir, aire fuera de las hojas). Los detalles del mecanismo de cohesión-tensión se ilustran con los paneles insertados (A), donde la tensión se genera por la evaporación de las moléculas de agua durante la transpiración de las hojas (1) y se transmite a través de las columnas de agua continuas y cohesivas (2) a través del xilema y de las raíces hasta el suelo (3). Las vías para el movimiento del agua fuera de las venas de las hojas y a través de los estomas (B) y a través de las raíces finas (C) se detallan e ilustran las vías simplásticas y apoplásticas. Extraído de McElrone et al. (2013).

2.1.2. Movimiento del agua a través de las plantas

El transporte de agua desde el suelo, a través de la planta, hasta la atmósfera, tiene lugar en un continuo suelo-planta-aire que está interconectado por un flujo continuo de agua líquida.

El agua se mueve a través de la planta a lo largo de un gradiente, de alto a bajo potencial hídrico (si el transporte se produce a través de una membrana selectivamente permeable). De manera alternativa, el flujo puede moverse de una zona de alta a baja presión hidrostática, siempre que no haya una membrana que lo restrinja. Este es el caso del transporte en el floema, donde los azúcares viajan desde las partes de la planta que los producen (fuentes, como las hojas maduras) hasta las áreas que los necesitan para crecer o almacenarse (destinos, como las raíces, frutos o brotes en desarrollo). La baja concentración de vapor de agua en el aire, en comparación con la del interior de las hojas, es la principal fuerza impulsora de la pérdida de agua de las hojas.

Esto, a su vez, impulsa el transporte de agua a lo largo del gradiente de presión hidrostática entre el xilema en las raíces y las hojas, y hacia abajo por un gradiente en el potencial hídrico entre el suelo y las células en las raíces. A medida que los suelos se secan, hay disminuciones paralelas en el potencial hídrico del suelo y las plantas potencial hídrico, tanto inmediatamente antes del amanecer (cuando el estrés hídrico es mínimo y se piensa que los potenciales hídricos del

suelo y las plantas están en equilibrio) como al mediodía (cuando el estrés hídrico es máximo).

El movimiento pasivo del agua a lo largo de un gradiente difiere notablemente de la adquisición de carbono y nutrientes por parte de las plantas, que se produce a través del gasto de energía metabólica. El gradiente más pronunciado en el continuo atmósfera-planta ocurre en la superficie de la hoja, lo que indica que los estomas son el principal punto de control para las relaciones hídricas de la planta. Sin embargo, existen resistencias sustanciales al movimiento del agua en el suelo, las raíces y los tallos, por lo que los controles estomáticos a corto plazo están limitados por el suministro del suelo y las resistencias a transferirse a través de la planta.

Una apreciación de estos controles que operan a diferentes escalas de tiempo son esenciales para una comprensión sólida de las relaciones hídricas de las plantas. El flujo de agua, J ($\text{mm}^3 \text{s}^{-1}$) (es decir, la tasa de movimiento del agua) entre dos puntos en el sistema atmosférico suelo-planta, está determinado tanto por el gradiente entre dos puntos como por la resistencia al flujo entre estos puntos.

La conductancia, L_p ($\text{mm}^3 \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$) (es decir, la inversa de la resistencia), es a menudo una propiedad más conveniente para medir. Como se señaló anteriormente, el gradiente a lo largo del cual se mueve el agua no es invariablemente un gradiente en el potencial hídrico ($\Delta\psi_w$, MPa). También puede

ser un gradiente en la presión hidrostática ($\Delta\psi_p$, MPa), o en la concentración de vapor de agua (Δw , la diferencia en mol o fracción de volumen de vapor de agua en el aire en los espacios intercelulares y en el aire).

2.1.3. Mecanismo de transporte a través del xilema

La Presión de la raíz de acuerdo a Bhatla & Lal, n.d.), es una presión hidrostática positiva (1–2 bares) que se desarrolla debido a la diferencia en el potencial de soluto entre la solución del suelo y la savia del xilema. A menudo se genera durante la noche, cuando la tasa de transpiración es baja o inexistente y la humedad es alta. En las raíces, el desarrollo de esta presión ocurre debido a la alta concentración de sales y a la presencia de las bandas de Caspary en la endodermis.

La acumulación de iones disminuye el potencial de soluto en las raíces y, a pesar de la ausencia de transpiración, el agua ingresa a la raíz y al xilema. La presión radicular es insignificante en árboles altos, pero desempeña un papel importante en plantas jóvenes. Durante la germinación de semillas y el crecimiento de las yemas, antes del desarrollo de las hojas y del flujo transpiratorio, la absorción de agua se debe a la presión radicular.

El ascenso capilar es otro proceso importante en las raíces y se puede ejemplificar con los líquidos en tubos pequeños donde muestran un aumento en el nivel de menisco debido a la adhesión del líquido con la pared del tubo. Este aumento de menisco o líquido en el tubo se conoce como capilaridad o aumento

capilar. El agua tiene una alta resistencia a la tracción debido a la cohesión de sus moléculas. Además, el agua también tiene adhesión entre las moléculas de agua y los elementos del xilema, y existe tensión superficial entre las moléculas de agua. Estos factores son responsables del aumento capilar del agua en las plantas. La tasa de aumento capilar es indirectamente proporcional a los radios de los elementos del xilema. Para alcanzar una altura de 100 m en árboles altos por ascenso capilar, debe haber células con un diámetro de $0,15 \mu\text{m}$ (que es mucho más pequeño que el diámetro de las traqueidas más pequeñas). Además, el aumento capilar en los tubos capilares pequeños se debe al espacio abierto en el tubo, mientras que el agua en el xilema no tiene meniscos abiertos (el xilema está lleno de agua).

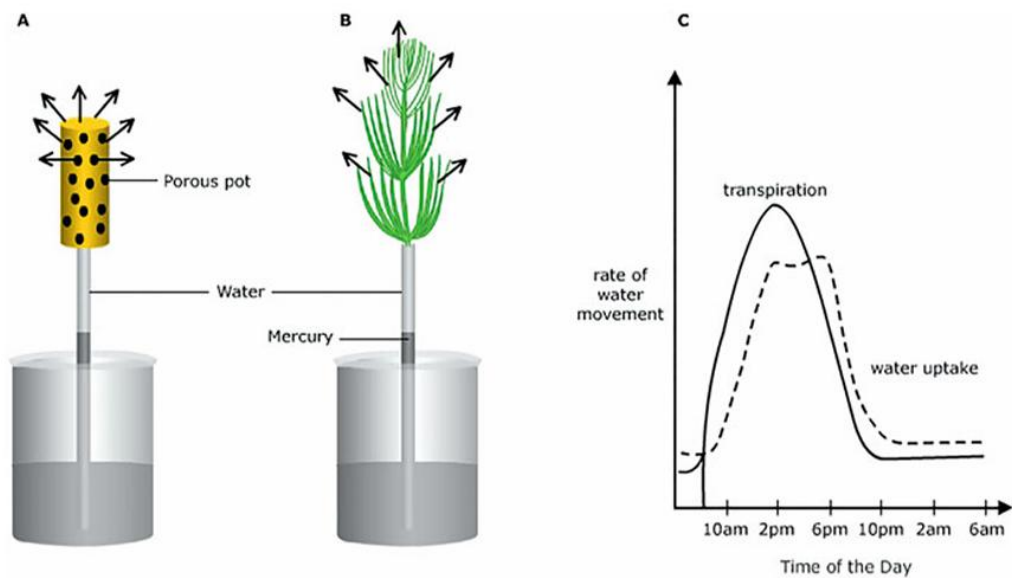
2.1.4. Teoría de la Cohesión-Adhesión y la Tensión

El agua en el xilema está bajo tensión constante debido a la atracción transpiracional. Muchos experimentos dieron evidencia de que el xilema está constantemente bajo tres tipos de presiones, a saber, la fuerza impulsora o la atracción transpiracional, la fuerza de cohesión debida a la cohesión de las moléculas de agua y la fuerza de adhesión entre las moléculas de agua y la pared de los elementos del xilema. Estas tres fuerzas conducen a la formación de una columna continua de agua, que se extrae de las raíces a las hojas. Una de las fuerzas impulsoras para el ascenso de la savia es la tracción transpiracional (Fig. 2). La

transpiración es la evaporación del agua en forma de vapor de agua en las partes aéreas de la planta.

Figura 2

Demostración de tracción por transpiración



Nota. a) Las moléculas de agua evaporadas de la olla porosa crean una presión de succión que provoca un aumento del nivel de mercurio. (b) La maceta se reemplaza por una ramita sana. Debido a la tracción de la transpiración, se crea succión en los vasos del xilema y el nivel de mercurio aumenta. La presión de succión debido a la transpiración es muy alta, por lo que puede arrastrar metales pesados como el mercurio. (c) El patrón de absorción de agua en la planta comienza después de un aumento en la tasa de transpiración. La tasa de transpiración es máxima al mediodía, y la absorción de agua también es máxima durante ese período. Extraído de Lambers et al. (2008).

Durante el período de transpiración rápida, el agua se mueve en el xilema a una velocidad promedio de 4 mm.s^{-1} , lo que provoca el desarrollo de una presión de más de 5 MPa. La tensión en el xilema se puede medir utilizando diferentes métodos. El agua puede soportar una tensión de 21 MPa, que es suficiente para superar la fuerza gravitacional en árboles grandes. Estas tensiones y la diferencia de potencial hídrico en el xilema se transfieren a la raíz y finalmente al suelo, lo que conduce a un continuo suelo-planta-atmósfera. Esta columna continua solo se puede mantener debido a la cohesión de las moléculas de agua por enlaces de hidrógeno. A veces, los huecos en ciertos elementos traqueales no pueden soportar grandes tensiones, y la continuación de la columna no se mantiene, lo que provoca interrupciones en el transporte.

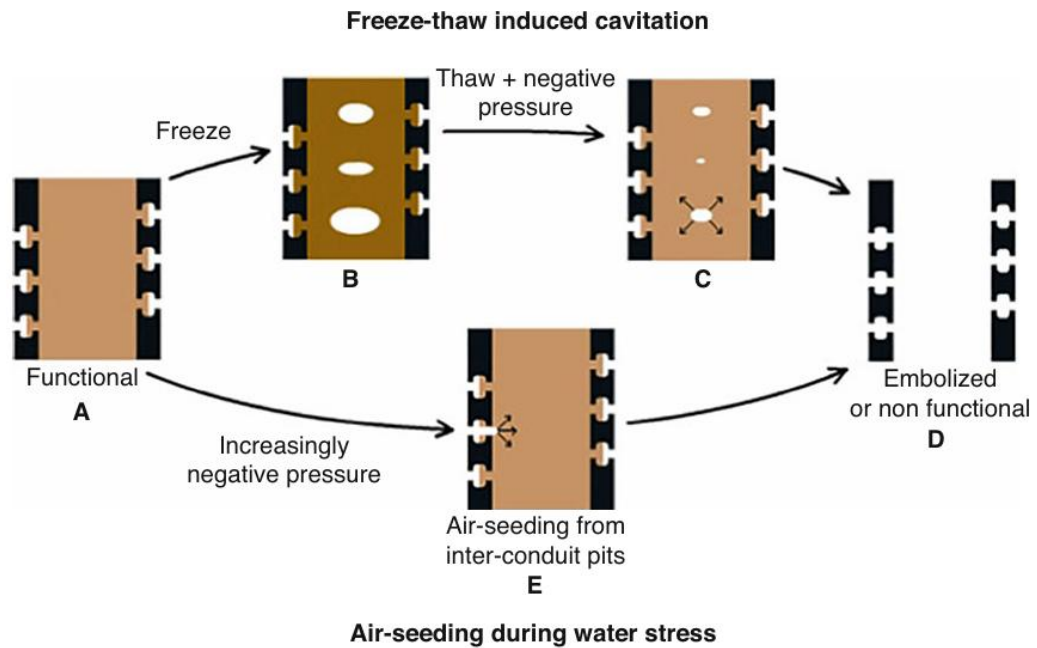
2.1.5. Cavitación y embolia

La continuidad del agua en las hebras del xilema se rompe a pesar de la filtración proporcionada por las raíces. La razón de la rotura de la columna de agua en el xilema es la alta tensión en las células del xilema. Esta tensión en el xilema hace que el agua cambie al estado de vapor. La rotura de la columna puede deberse a que el aire queda atrapado o al agua que se convierte en vapores en el xilema. Esta inversión repentina de agua líquida en vapores de agua, lo que lleva a la ruptura de la columna de agua, se conoce como cavitación. La presencia de una gran cantidad de poros en las hebras de xilema rompe la tensión superficial del agua y dibuja

burbujas diminutas en la columna del xilema. La cavitación debida a la captura de aire se denomina "siembra de aire". La siembra aérea es un fenómeno muy común en las plantas. En este proceso, el aire entra en las traqueidas a través de las membranas de las fosas. La tensión en las traqueidas daña la membrana de la fosa y aumenta el tamaño de sus poros, y el aire se llena de aire en ella. El proceso de aflojado del vaso o de las traqueidas con aire se denomina embolia (Fig. 3). Las principales causas de la cavitación son el estrés hídrico durante la alta transpiración, la congelación de la savia del xilema en invierno y el ataque de patógenos. Cada vez que hay una rotura de la columna de agua en las traqueidas, se crea un sonido similar a un clic que se puede grabar utilizando métodos acústicos. A medida que la planta experimenta estrés hídrico debido a la alta tasa de transpiración durante el día, la frecuencia de la cavitación aumenta.

Figura 3

El proceso de cavitación en el xilema



Nota. (a) Un xilema funcional. (b) y (c) Durante el proceso de descongelación, después de la temperatura de congelación, las moléculas de agua experimentan una presión negativa muy alta, lo que resulta en la ruptura de la columna de agua. El aire queda atrapado y se propaga, lo que da lugar a la siembra de aire desde las fosas entre conductos (d), seguida de una embolización completa de la célula. (e) El aire es aspirado a través de la membrana de la fosa desde la celda embolizada adyacente o en condiciones de estrés hídrico. El proceso de atrapamiento de aire se denomina siembra de aire, lo que da como resultado una célula embolizada. Extraído de Lambers et al. (2008).

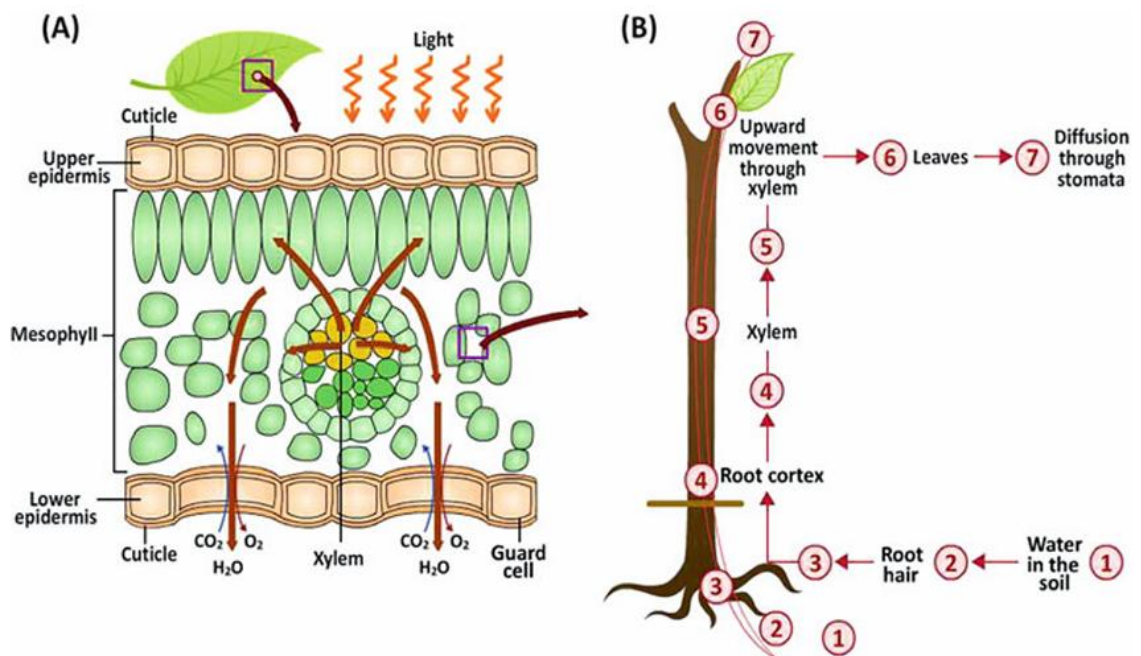
Las células del xilema embolizado se reparan por la noche cuando la transpiración se detiene o se ralentiza. El agua se mueve desde las traqueidas adyacentes y mantiene la absorción de agua. A nivel de la raíz, los solutos se bombean al xilema, lo que reduce su potencial hídrico en comparación con el suelo. El agua se mueve desde el suelo y desarrolla una presión positiva en las raíces. Esta presión obliga al agua a moverse hasta 10 m y llena las células del xilema embolizadas. En las plantas herbáceas, el relleno de los elementos traqueales se produce durante la noche debido a la presión de las raíces. Las acuaporinas en las células asociadas al xilema también están involucradas en el relleno de las traqueidas embolizadas.

2.1.6. Movimiento del agua de las hojas a la atmósfera

La fuerza impulsora del movimiento del agua del suelo a las hojas y de las hojas a la atmósfera es la transpiración. El ascenso de agua en el xilema desde las raíces hasta las hojas se combina con la presión de transpiración y se denomina corriente transpiracional (Fig. 4). Durante el proceso de evapotranspiración rápida, la tasa de transporte de agua en el xilema es de aproximadamente $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. El agua perdida por transpiración debe reponerse mediante la absorción de una cantidad equivalente de agua del suelo. Una planta de girasol "absorbe" y "transpira" 17 veces más agua que un humano cada 24 h. Una sola planta de maíz transpira aproximadamente 150 L de agua en su vida útil promedio.

Figura 4

(a) Evaporación del agua de la superficie de la hoja, (b) La transpiración corriente continua de agua del suelo hasta la atmosfera



Nota. El agua del xilema entra en los espacios aéreos del parénquima esponjoso y se difunde a través de los estomas presentes en la epidermis inferior. El intercambio de gases tiene lugar cuando los estomas se abren. Se absorbe dióxido de carbono y se libera oxígeno. Extraído de Lambers et al. (2008).

2.1.7. Transpiración

La absorción de CO_2 para la fotosíntesis requiere una superficie húmeda, pero cuando el agua está expuesta, se evapora. Las plantas se enfrentan a este reto de absorber más dióxido de carbono y, al mismo tiempo, perder agua. Las plantas

pierden entre 400 y 600 moléculas de agua y ganan 1 molécula de dióxido de carbono. Así, tanto la fotosíntesis como la pérdida de agua por transpiración son procesos inseparables en la vida de las plantas verdes. El agua tiene un alto calor latente de vaporización. A 30 °C, 1000 g (1 kg) de agua absorbe 580 Kcal de calor de su entorno. Se evapora una gran cantidad de agua de las plantas y el calor necesario para la vaporización se extrae de las hojas. Ayuda a las plantas a mantener la temperatura y tolerar las duras presiones ambientales.

La principal ventaja de la transpiración es la creación de presión de succión para la absorción de agua y minerales del suelo. Una vez que las plantas acumulan suficiente atracción transpiracional durante las primeras horas del día, comienza la absorción de agua por parte de las plantas. La transpiración es definitivamente un mal necesario. Hay tres modos de transpiración en las plantas, a saber, transpiración cuticular, transpiración estomática y transpiración lenticular.

La transpiración cuticular es la pérdida de agua de la superficie de la planta. Este tipo de transpiración tiene lugar cuando la cutícula es muy fina y no hay escasez de agua. Representa solo el 2% de la pérdida de agua. La transpiración estomática tiene lugar a través de los estomas, y más del 95% de la pérdida de agua tiene lugar a través de las aberturas estomáticas presentes en la epidermis de la hoja. El tercer modo de transpiración es a través de las lenticelas presentes en la corteza y en la cáscara de algunas frutas (por ejemplo, la manzana). La pérdida de agua a

través de las lenticelas es mínima. Las fuerzas impulsoras de la transpiración son la presión de vapor y la densidad de vapor en el área subestomática.

La concentración de moléculas de agua en fase de vapor se expresa como masa de vapor por unidad de volumen (g.m³) y se denomina densidad de vapor. Los vapores causan presión sobre las paredes de la cámara estomática.

El espacio aéreo subestomático está saturado de vapores de agua, mientras que el aire inmediato alrededor de las hojas no está saturado. Este gradiente alrededor del área subestomática y el aire alrededor de las hojas conducen a la pérdida de vapor a través de la transpiración. La tasa de transpiración (T) está gobernada por el gradiente de presión de vapor entre la hoja y el entorno.

$$T = \frac{e_{hoja} - e_{entorno}}{r_{hoja} + r_{entorno}}$$

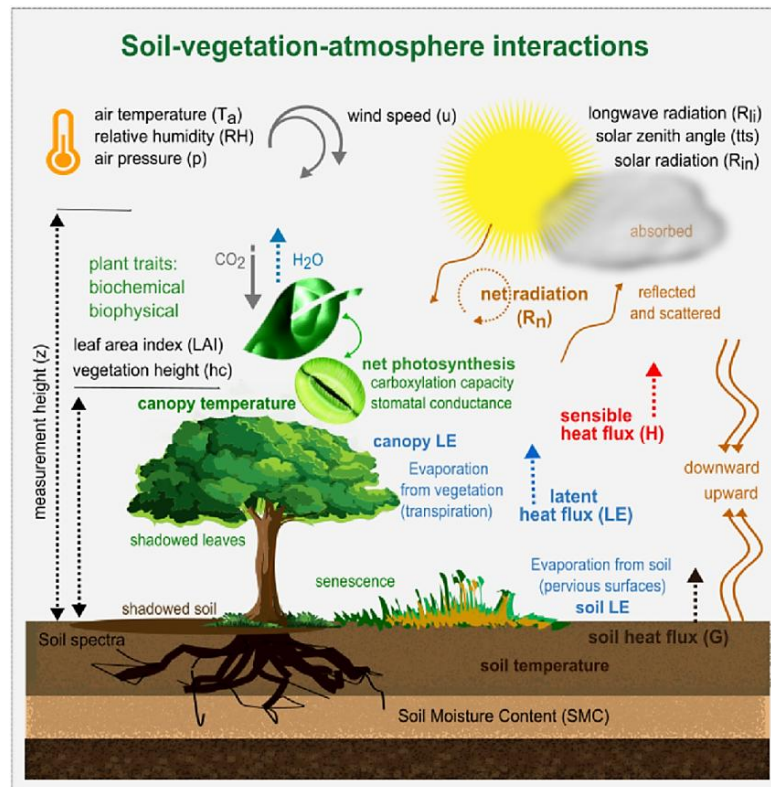
En otras palabras, la tasa de transpiración es directamente proporcional a la diferencia de presión de vapor entre las hojas y la atmósfera, dividida por la suma de la resistencia encontrada por el aire y las hojas. El número y el tamaño de los estomas contribuyen a la resistencia de los estomas de las hojas y al grado de diferencia de la presión de vapor entre la hoja y el aire y la resistencia de la capa límite.

2.2. Factores que afectan a la tasa de transpiración

La tasa de transpiración se ve afectada por el estado hídrico de la planta, su anatomía y los factores ambientales. Los factores ambientales más importantes son la humedad, la luz, la temperatura, la velocidad del viento y la disponibilidad de agua del suelo. Estos factores se analizan aquí individualmente, pero en el hábitat natural se influyen mutuamente y afectan a la tasa de transpiración.

Figura 5

Factores que influyen en la transpiración



Nota: Extraído de Rocha et al. (2022)

2.2.1. Humedad

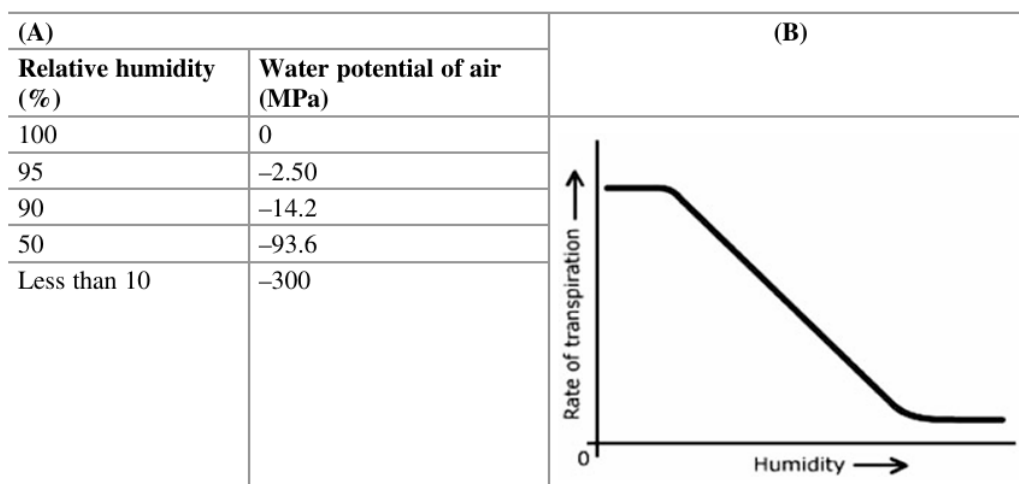
La humedad atmosférica cambia con el cambio de temperatura o la presión de vapor. El aumento o la disminución de la temperatura sin cambios en la presión del vapor disminuirán o aumentarán la humedad relativa, respectivamente. Del mismo modo, sin cambios en la temperatura, el aumento o la disminución de la presión de vapor provocarán un aumento y una disminución de la humedad relativa, respectivamente. Siempre que hay un aumento en la humedad relativa, la tasa de transpiración disminuye (Fig. 6). Un gradiente de presión de vapor en las proximidades de las hojas y en la cámara subestomática determina la tasa de transpiración. Cuando este gradiente es pronunciado, la tasa de transpiración aumenta.

2.2.2. Temperatura

El aumento de la temperatura, con todos los demás factores casi constantes, aumenta la tasa de transpiración. El aumento de la temperatura también aumenta la diferencia entre la presión de vapor de la hoja y del exterior de la atmósfera. Por lo tanto, la tasa de transpiración aumenta. Sin embargo, los estomas se cierran a una temperatura superior a 35 °C.

Figura 6

Relación humedad relativa y potencia hídrico



Nota. (a) La humedad relativa y el potencial hídrico del aire. Con una humedad relativa del 100%, el potencial hídrico es cero, lo que reduce mucho la transpiración. (b) La tasa de transpiración se reduce con el aumento de la humedad relativa. Extraído de Lambers et al. (2008).

Por lo tanto, la tasa de transpiración cae más allá de esa temperatura. Con la temperatura y los estomas mostrando variaciones diurnas, la tasa de transpiración también exhibe un ritmo diurno claro, es decir, la tasa de transpiración es alta durante el día, alcanza el máximo al mediodía y desciende durante la noche cuando los signos están cerrados y la temperatura es baja. La temperatura y la humedad relativa modifican la magnitud del gradiente de presión de vapor que, a su vez, influye en la tasa de transpiración (Fig. 6a).

2.2.3. Velocidad del viento

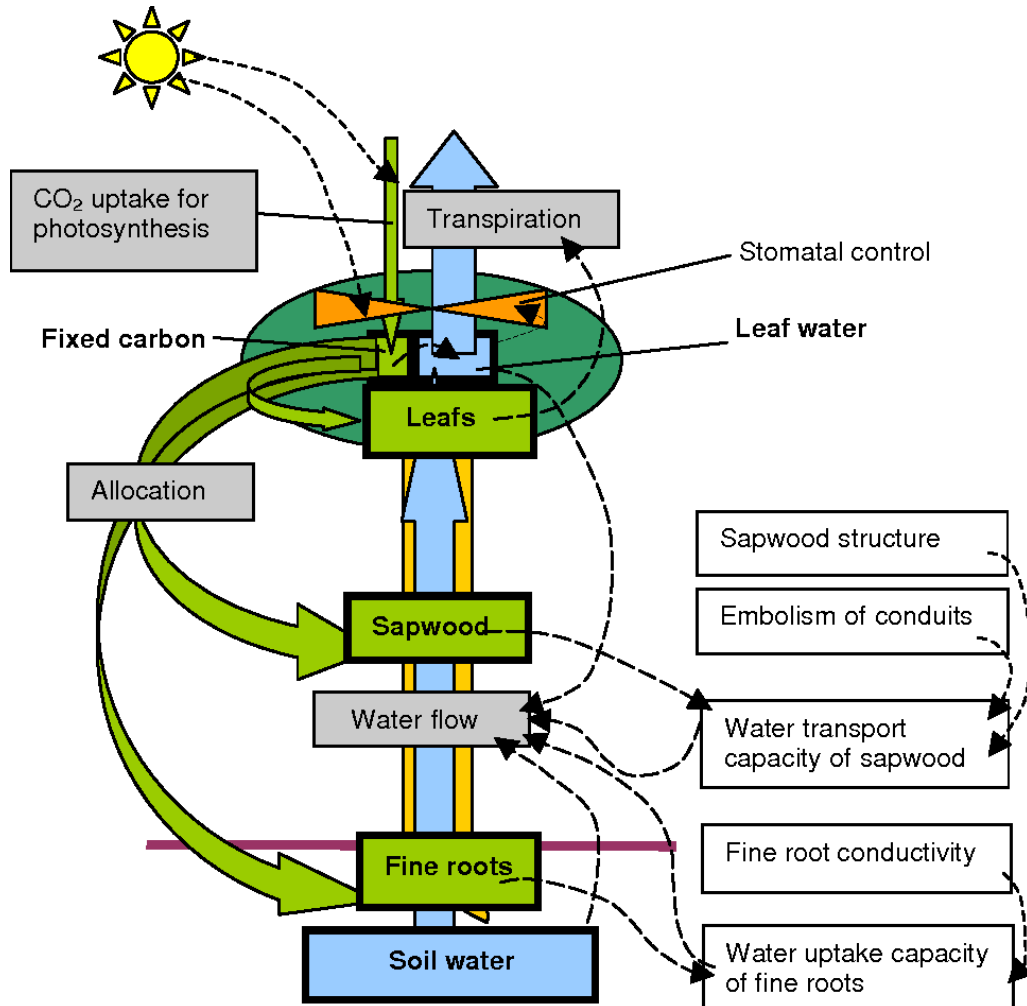
Un aumento en la tasa de transpiración no es directamente proporcional a la velocidad del viento. Durante la alta velocidad del viento, los estomas se cierran. Por lo tanto, la tasa de transpiración también disminuye. Pero el viento a baja velocidad aumenta la tasa de transpiración. A medida que el viento dispersa el aire alrededor de la hoja y reduce la presión de vapor en las inmediaciones de los estomas, aumenta la tasa de transpiración (Fig. 6b).

2.2.4. Factores internos

Uno de los factores más importantes que afectan la tasa de transpiración es la relación hoja-brote. La magnitud de la transpiración será mayor en las hojas con mayor área foliar. Sin embargo, la tasa de transpiración no tiene correlación con el tamaño de la hoja cuando se considera por unidad de área foliar. La estructura de la hoja es muy importante en la regulación de la tasa de transpiración. La hoja adapta muchas estrategias para reducir la transpiración. La frecuencia de los estomas (número de estomas presentes por unidad de área de hoja), el tamaño de los poros y la distribución muestran una enorme variación en las plantas que crecen en diferentes hábitats.

Figura 7

Modelo conceptual de las relaciones en una planta



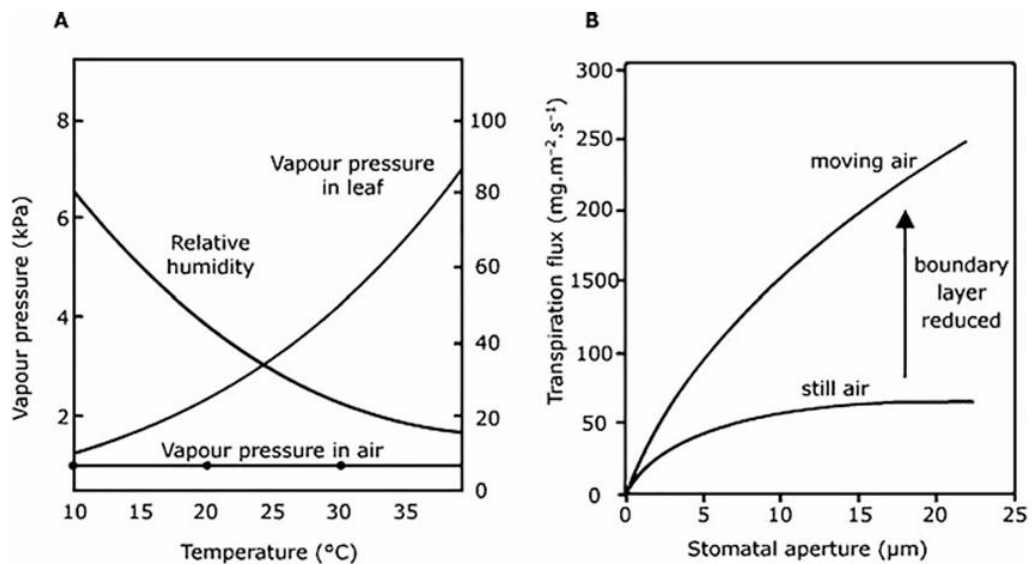
Nota. Las variables de estado (cantidad de hojas, albura, raíces finas) se presentan con cuadros de texto de líneas gruesas. Los flujos de material se presentan como flechas en bloque con cuadros de texto grises. Las líneas curvas discontinuas con puntas de flecha sólidas representan las influencias. Extraído de Perämäki, M. (2005).

2.3. Adaptaciones ecológicas para reducir la transpiración

Las plantas desarrollan muchas adaptaciones para evitar la pérdida de agua debido a la transpiración. La presencia de cutícula gruesa, estomas hundidos y estomas solo en la parte inferior de las hojas son algunos de los mecanismos adaptativos desarrollados por las plantas. Las plantas que crecen en el desierto experimentan más crisis de agua. Necesitan restringir la tasa de transpiración.

Figura 8

Relación de la temperatura-presión de vapor y transpiración – apertura estomática

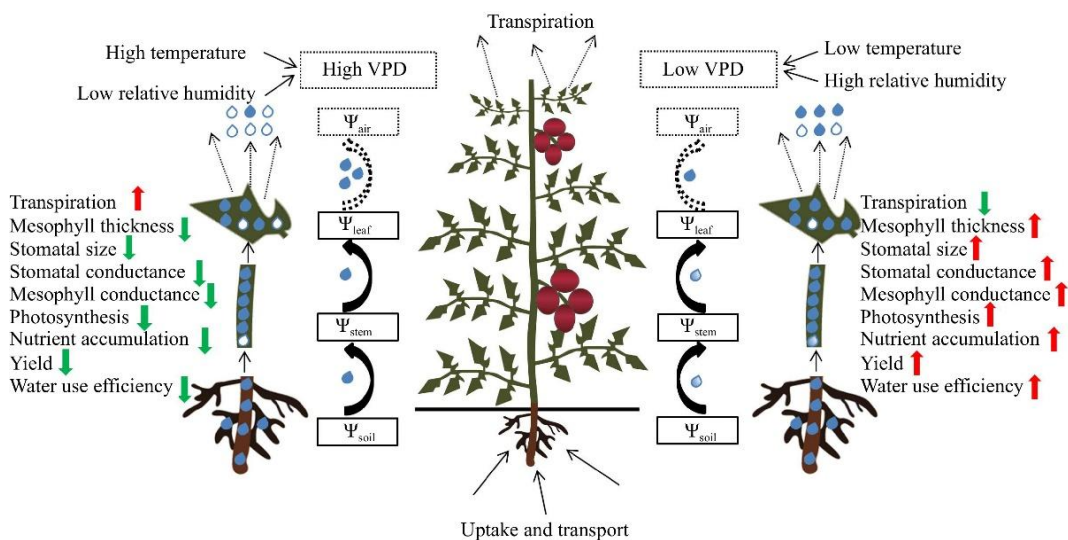


Nota. (a) Con el aumento de la temperatura, la humedad relativa disminuye, lo que resulta en un alto gradiente de presión de vapor en la hoja y en el aire exterior, lo que conduce a la apertura de los estomas y al aumento de la tasa de transpiración. b) Efecto de la velocidad del viento sobre la tasa de transpiración. A medida que

aumenta la velocidad del viento, reduce la resistencia de la capa límite alrededor de los estomas, lo que conduce a la apertura de los estomas y, por lo tanto, a una mayor transpiración. En aire quieto, la resistencia de la capa límite es alta. Por lo tanto, la tasa de transpiración es la misma. Extraído de Lambers et al. (2008).

Figura 9

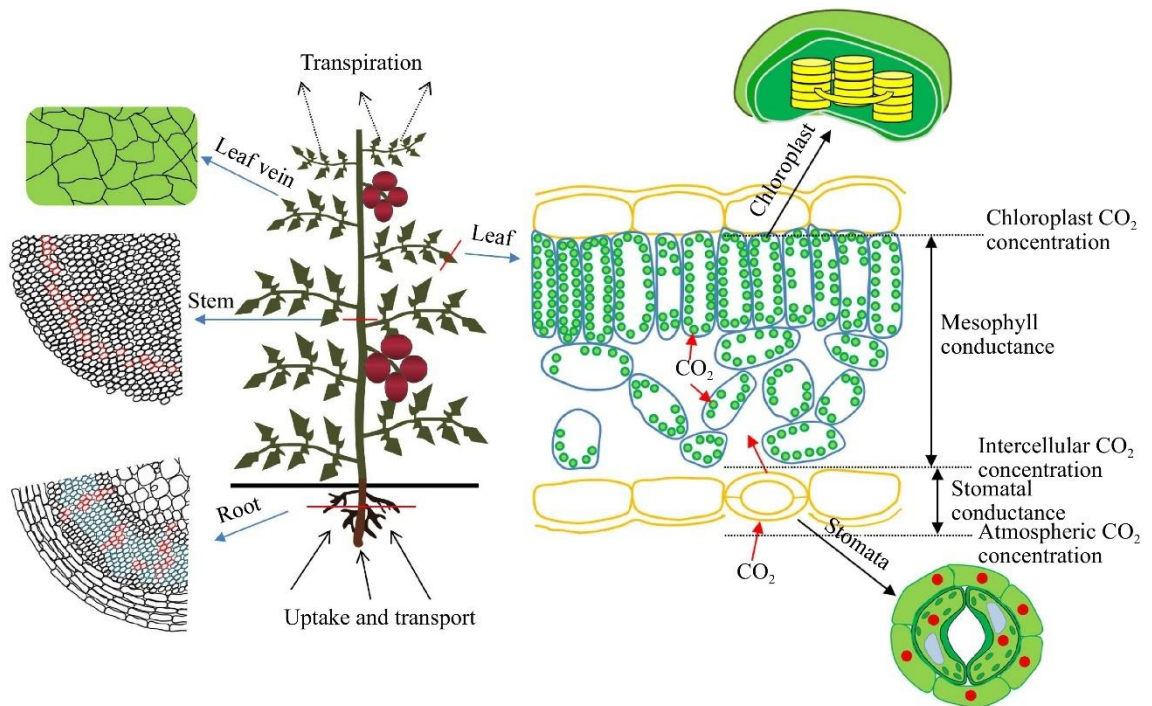
Efectos del déficit de presión de vapor (VPD) en la regulación del transporte de agua a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera



Nota. El ejemplo es para cultivos de hortalizas, donde se esquematiza sus efectos en la transpiración de las hojas y el comportamiento de las plantas. Las flechas negras sólidas representan el transporte de agua líquida entre el suelo, los tallos y las hojas, y las flechas negras punteadas representan el transporte de agua gaseosa entre las hojas y el aire. Ψ aire, Ψ hoja, Ψ tallo y Ψ suelo, representan el potencial hídrico en el aire, la hoja, el tallo y el suelo, respectivamente. Extraído de Yu X. et al. (2023)

Figura 10

Modelo esquemático para moderar los efectos de una baja VPD en el transporte de agua al incrementar el área de los vasos del xilema y la densidad de las venas de las hojas y en la limitación fotosintética al disminuir la resistencia a la difusión de CO₂



Nota. Hay tres procesos principales. (I) La reducción de la VPD aumenta la densidad de las venas de las hojas y el área de la sección transversal de los vasos del xilema en las raíces y los tallos mediante la optimización a largo plazo de la estructura de la planta. (II) La reducción de la VPD reduce la resistencia estomática y mantiene la apertura estomática al reducir la transpiración excesiva y moderar el estrés hídrico de la planta. (III) La reducción de la VPD reduce la resistencia del mesófilo al reducir la distancia promedio desde la membrana celular hasta la

membrana externa del cloroplasto y al aumentar el número de cloroplastos en una sola célula del mesófilo. Extraído de Yu X. et al. (2023)

2.4. Método relación de calor (HRM) para la medición del flujo de savia

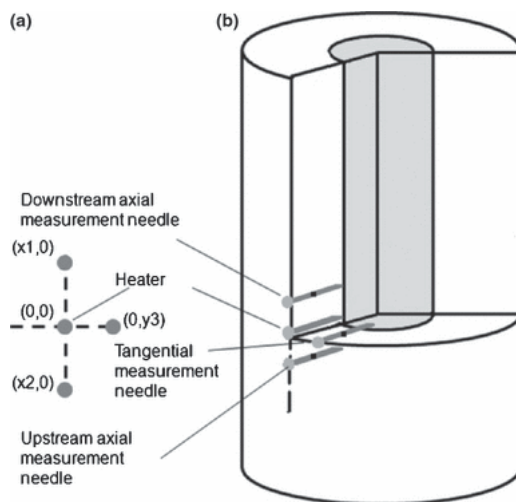
Mide la relación entre el aumento de la temperatura, tras la liberación de un pulso de calor, en puntos equidistantes aguas abajo y aguas arriba de un calentador de línea. La velocidad del pulso de calor se calcula de la siguiente manera (Marshall 1958):

$$Vh = \frac{k}{x} \ln\left(\frac{v1}{v2}\right) 3600$$

- k es la difusividad térmica de la madera fresca
- x es la distancia (cm) entre el calentador y cualquiera de las sondas de temperatura
- v1 y v2 son aumentos de temperatura (desde las temperaturas iniciales) en puntos equidistantes zona abajo y arriba
- x cm es la distancia entre ambos termisores (0.5 cm)

Figura 11

Diagrama esquemático del sensor Sapflow instalado en la albura (SW) de un tallo



Nota. Diagrama esquemático de una sección tangencial del xilema del tallo con disposiciones de los termopares alrededor del calentador del sensor Sapflow.

La medición del flujo de savia, basado en la técnica de relación de calor, puede indicar la transpiración instantánea de las plantas, ya que el flujo de savia en el xilema está estrechamente relacionado con la pérdida de agua por transpiración (alrededor del 99 % del agua absorbida se pierde por transpiración) (Zhang et al., 2011). Muchos estudios han concluido que la técnica pulso de calor es una herramienta útil para medir la transpiración de las plantas (Bethenod et al., 2000).

Los patrones de flujo de savia y la actividad adaptativa en las zonas de mayor elevación presentan respuestas dependientes a la precipitación (Filipović, 2020). Los cambios significativos en los periodos de precipitación afectan al flujo de savia y la transpiración, siendo este un componente importante para el equilibrio

hídrico. Además, son sensibles a otros factores ambientales como la radiación solar, temperatura, humedad, fluctuaciones climáticas.

Existe poca investigación referida a los bosques altoandinos *Polylepis*, resulta fundamental determinar la demanda hídrica y de la situación actual de este ecosistema. Teniendo en cuenta que en la región de Tacna los eventos de sequía son más intensos, esto pueden causar una disminución generalizada de los bosques, una estimación correcta de la demanda del bosque es crucial para predecir con precisión los cambios climáticos futuros.

Presenta importancia académica al proveer información que se utilizará en estrategias para evaluar el balance hídrico del Bosque, además de caracterizar los factores climáticos que influyen al desarrollo de los Bosques de *Polylepis*, también presenta importancia social ya que esto favorecerá la utilización sostenible del bosque por partes de los pobladores cercanos.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

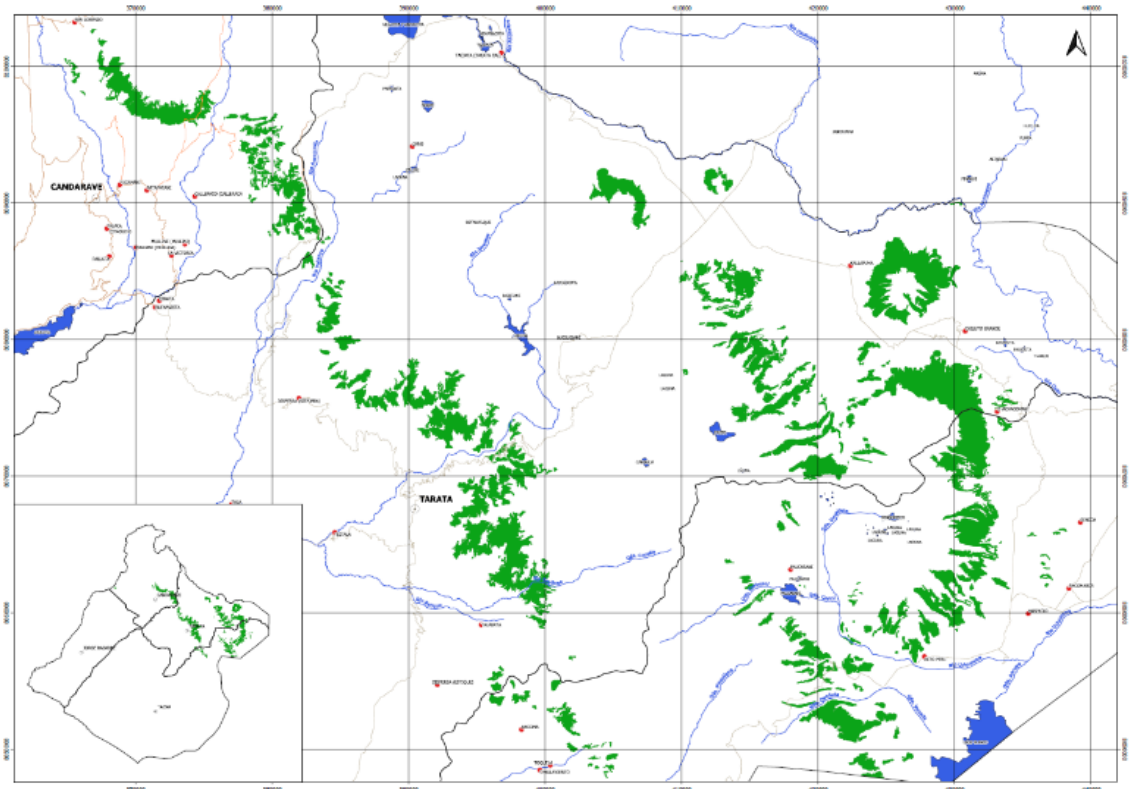
3.1. Área de estudio

3.1.1. Población

La población estará comprendida por los bosques de *Polylepis rugulosa* en la provincia de Candarave

Figura 12

Distribución de los bosques de Polylepis

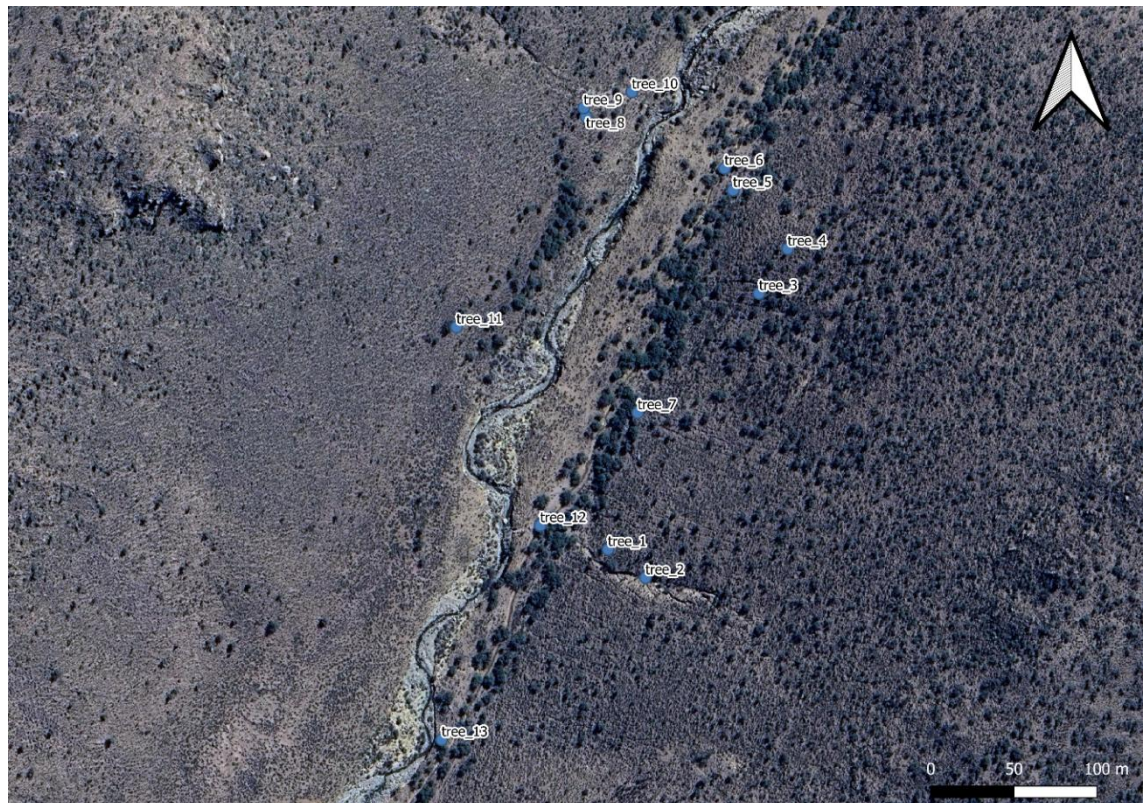


3.1.2. Muestra

El criterio de la selección de los individuos fue de acuerdo a accesibilidad y alcance de vigilancia de los equipos en la zona. Posteriormente, se estratificó en tres grupos de acuerdo a las orientaciones topográfica de la zona, siendo en total 13 individuos.

Figura 13

Mapa de ubicación de los individuos muestreados



La distribución de los sensores medidores de flujo de savia de ubican de acuerdo a su posición topográfica y orientación, los cuales son:

- Nor-Oeste: P1, P2, P3, P4

- Sur-Oeste : P8, P9, P10, P11
- Llanura Aluvial: P5, P6, P7, P12, P13

3.2. Materiales y equipos

- 13 medidores de Flujo de savia
- 2 estaciones meteorológicas compactas
- 13 paneles solares
- Dremel
- Precintos
- Cintas flaggins
- Vaselina
- Cinta métrica
- Libreta de campo

3.3. Métodos

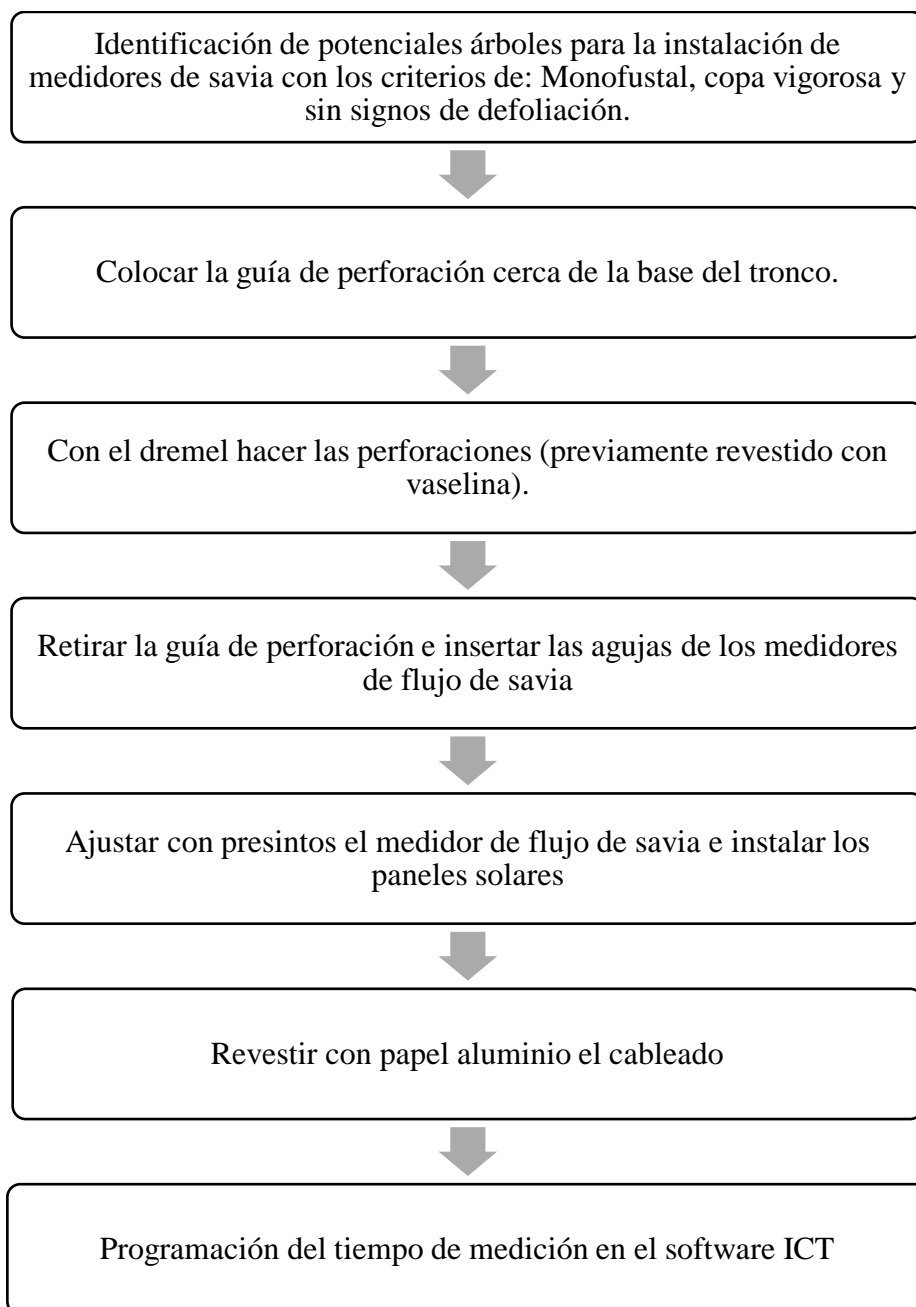
La clasificación de la presente investigación es experimental básica.

3.3.1. Medidores de Flujo de savia

Se instalaron los 13 medidores de flujo de savia con una medición continua, conectadas cada una a un panel solar para obtener medidas continuas durante periodos diurnos y nocturnos.

Figura 14

Esquema de Instalación de medidores de flujo de savia



Para la evaluación de la distribución de los datos de flujo de savia, se realizó una prueba estadística de Anderson-Darling para.

$$A = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [2i - 1] [\ln(p_{(i)}) + \ln(1 - p_{(n-i+1)})]$$

Donde:

$$p_{(i)} = \Phi([x_{(i)} - \bar{x}/s])$$

- Φ función de distribución acumulativa de la distribución normal estándar
- \bar{x}, s son la media y la desviación estándar de los valores de los datos
- El p-valor se calcula a partir del estadístico modificado $Z = A(1 + 0.75/n + 2.25/n^2)$, Stephens (1986).

Se evaluó la diferencia de las estratificaciones realizadas de acuerdo a la posición topográfica de los medidores de flujo de savia en *P. rugulosa* usando la prueba de Kruskal-Wallis no paramétrica que compara las medianas de grupos para evaluar sus diferencias significativas.

$$n^2[H] = \frac{H - k + 1}{n - k}$$

- H: El valor obtenido de la prueba
- k: número de grupos
- n: número total de observaciones

3.3.2. Propiedad de la madera: Difusividad térmica

Para realizar las mediciones de la difusividad térmica de la madera de *Polylepis* se realizaron los siguientes procedimientos.

Figura 15

Preparación del indicador naranja de metilo al 0.1% para la determinación del coeficiente de difusividad térmica de la madera

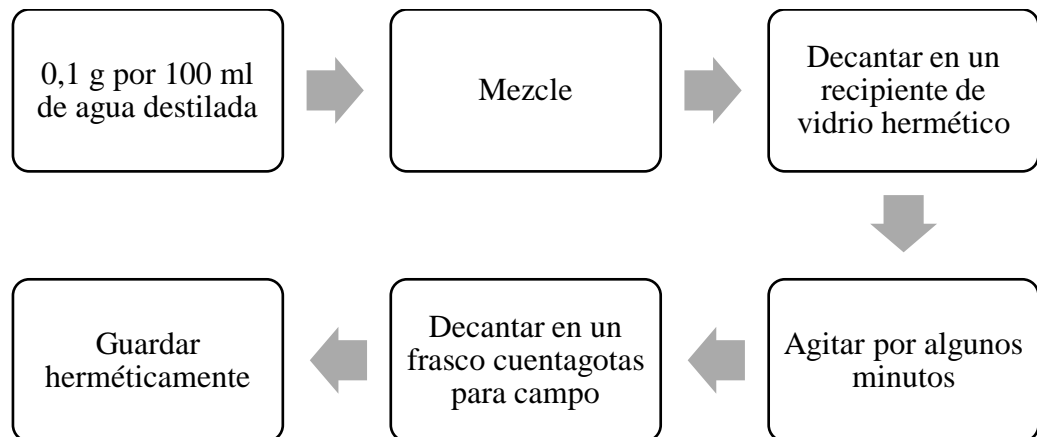


Figura 16

Procedimiento para determinar el área funcional

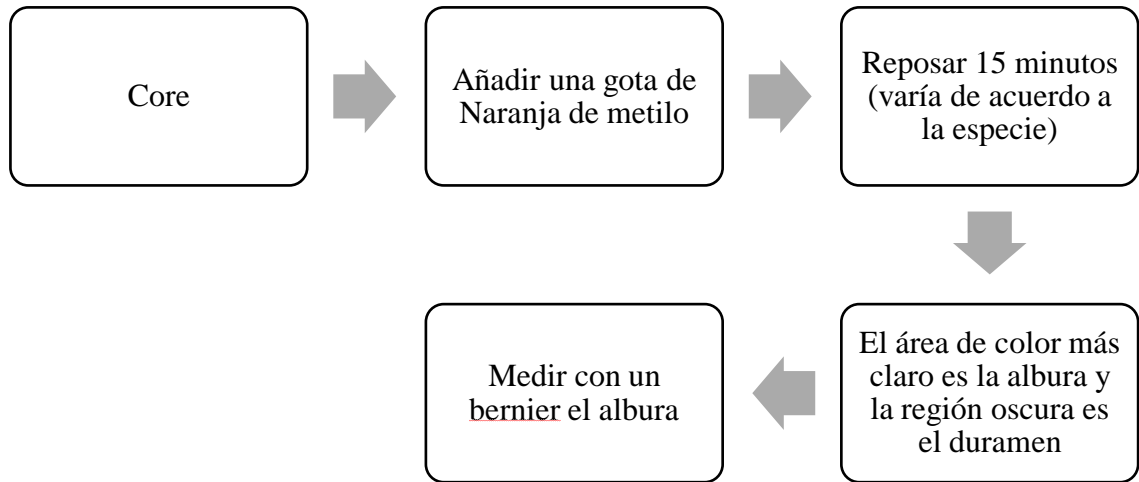


Figura 17

Medición del peso fresco

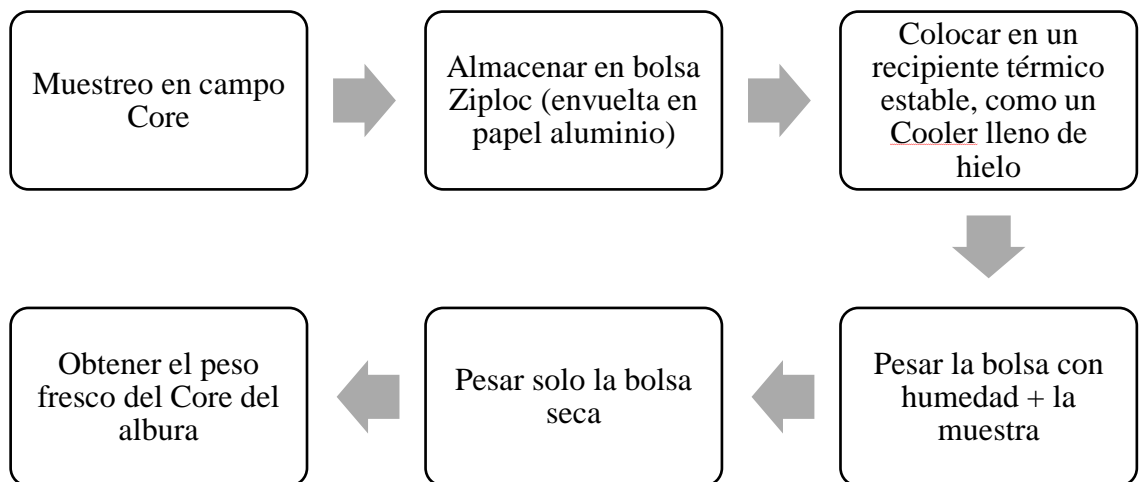


Figura 18

Determinación del volumen fresco

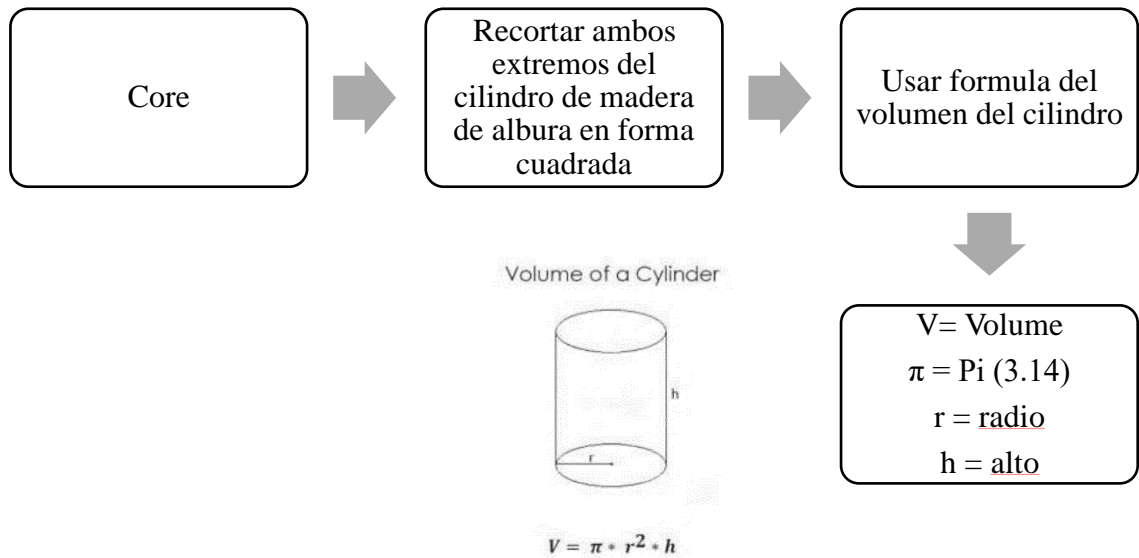
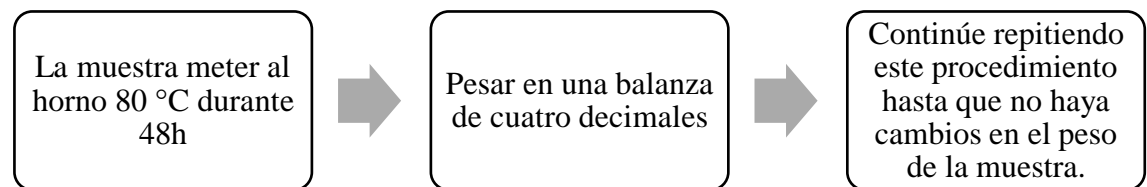


Figura 19

Medición del peso seco



3.3.3. Estación meteorológica

En la zona de monitoreo de medición de flujo de savia se instaló una estación meteorológica ATMOS. Se fijó al suelo a una profundidad de 1 metro. Con una programación de registro de datos cada 10 minutos sincronizada con los medidores de flujo de savia. Los datos climáticos medidos son: Temperatura, Humedad relativa, Radiación solar, Precipitación y Velocidad del viento.

3.3.4. Análisis de flujo de savia

Para la medición del flujo de savia en *Polylepis* se utilizó el método de relación de calor (HRM) mediante la ecuación de (Marshall, 1958; Burgess et al. 2001). Para la corrección de los datos de flujo de savia se determinó la difusividad térmica de la madera mediante las ecuaciones de (Marshall, 1958; Swanson, 1983 y Burgess et al. 2001) las cuales se desarrollan a continuación.

Determinación de la Velocidad de la relación de calor (Marshall, 1958; Burgess et al. 2001)

$$Vh = \frac{k}{x} \ln\left(\frac{v1}{v2}\right) 3600$$

- k es la difusividad térmica de la madera fresca
- x es la distancia (cm) entre el calentador y cualquiera de las sondas de temperatura
- v1 y v2 son aumentos de temperatura (desde las temperaturas iniciales) en puntos equidistantes zona abajo y arriba

- x cm es la distancia entre ambos termisores (0.5 cm)

Determinación Velocidad del pulso de calor corregida (Vc)

La instalación de sensores en el tejido del xilema causa daños mecánicos sustanciales. Además de la interrupción de las vías de flujo por la inserción de las sondas, los vasos intactos pueden ocluirse a medida que la planta responde a las heridas formando pequeños picos de medición (Barrett et al. 1995). Swanson, 1983 creó un modelo numérico para producir una ecuación algebraica simple para la corrección de heridas e ICT modificó para obtener los valores con mayor exactitud. El modelo calcula tres coeficientes (b, c y d, para diferentes anchos de herida) para calcular la velocidad del pulso de calor corregida (Vc).

$$Vc = bVh + cV^2 + dV^3$$

Determinación Velocidad de la savia corregida (Vs)

$$V_s = \frac{v_c p_b (c_w + m_c c_s)}{p_s c_s}$$

- p_b es la densidad básica de la madera (peso seco/volumen verde)
- c_w y c_s son la capacidad calorífica específica de la matriz de la madera (1200J kg⁻¹ °C⁻¹ a 20°C (Becker y Edwards 1999)) y la savia (agua, 4182J kg⁻¹ °C⁻¹ a 20°C (Lide 1992)).
- m_c es el contenido de agua de la albura y p_s es la densidad del agua.

Conversión de la velocidad del flujo de savia en flujo de savia (volumen)

El flujo volumétrico se puede derivar fácilmente como el producto de la velocidad de la savia (V_s) y el área de la sección transversal de la albura conductora. El área funcional de la sección transversal de la madera se calcula a partir de su radio debajo de la corteza. El área del albura (xilema funcional) se determina usualmente coloreando con una tinción por ejemplo naranja de metilo u observando la diferencia de color natural con el duramen. Se determina el flujo de savia a nivel de árbol multiplicando el área de la xilema funcional por la velocidad del flujo de savia. De esta manera, las estimaciones puntuales de la velocidad de la savia (V_s) se ponderan de acuerdo con la cantidad de albura conductora.

Determinación del coeficiente de difusividad térmica

$$k = \frac{k_{gw}}{pc} 10000$$

Donde:

- k_{gw} es la conductividad térmica
- p es la densidad (kg m^3)
- densidad de la madera fresca (kg m^{-3})
- c es la capacidad calorífica específica de la madera fresca

$$K_{gw} = K_s m_c \frac{p_b}{p_s} + K_w (1 - m_c \frac{p_b}{p_s})$$

Donde:

- K_s es la conductividad térmica del agua ($5,984 \times 10^{-1} \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$)
- m_c es el contenido de agua de la albura
- p_b es la densidad básica de la madera (seco peso/volumen fresco)
- p_s es la densidad del agua
- K_w es la conductividad térmica de la matriz de madera seca
- K_{gw} conductividad térmica

$$K_w = 0.04182(21.0 - 20.0 F_v)$$

Donde:

- F_v es la fracción vacía de la madera definida como (cf. Swanson 1983):

$$F_v = 1 - \left(\frac{p_b 0.6536 + m_c}{1000} \right)$$

Donde:

- p_b es la densidad básica de la madera (seco peso/volumen verde).
- m_c es el contenido de agua de la albura

$$c = \left(\frac{w_d c_w + c_s (w_f - w_d)}{w_f} \right)$$

Donde:

- w_f es el peso fresco
- w_d es el peso secado al horno de la muestra (kg)
- c_w = Capacidad calorífica específica de la matriz de madera (1200J kg-1 °C-1 @ 20°C)
- c_s = Capacidad calorífica específica de la savia = Capacidad calorífica específica del agua (4182J kg-1 °C-1 @ 20°C)

3.3.5. Análisis de las variables climáticas

La estación meteorológica ATMOS proporcionó datos cada 10 minutos de Temperatura (°C), Humedad Relativa (%), Radiación solar (W/m²), Precipitación (mm), Velocidad del viento (m/s).

Otras variables calculadas a partir de las variables climáticas iniciales son:

Déficit de presión de vapor (DPV). De acuerdo a la FAO, el DPV es la diferencia entre la presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a) durante un determinado período.

Presión de saturación de vapor

$$e^o(T) = 0,6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237,3}\right)$$

Donde:

- $e^o(T)$ es presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, T [kPa]
- T es la temperatura del aire (°C)

Presión real de vapor derivada de la humedad relativa

$$e_a = \frac{HR}{100} e^o(T)$$

Donde:

- HR es la humedad relativa [%]
- e^o es presión de saturación de vapor [kPa] a la temperatura del aire

Evapotranspiración potencial horaria (FAO)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e^o(T) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

- ET_o es la evapotranspiración de referencia [mm hora-1]
- R_n radiación neta en la superficie de referencia [MJ m-2 hora-1]
- G densidad del flujo del calor del suelo [MJ m-2 hora-1]
- T temperatura media del aire cada hora [°C]

- Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor en T [kPa °C-1]
- γ constante psicrométrica [kPa °C-1]
- $e^\circ(T)$ presión de saturación de vapor a temperatura del aire T [kPa]
- e_a promedio horario de la presión real de vapor [kPa]
- u_2 promedio horario de la velocidad del viento [m s-1]

3.3.6. Análisis de la influencia climatológica en el flujo de savia

El análisis de datos se llevó a cabo utilizando el software RStudio, empleando diversos paquetes estadísticos especializados, como stats, y otros relevantes para el análisis de correlación y series temporales. Se evaluó la relación entre las variables climáticas mediante el coeficiente de correlación de Spearman, utilizando la función cor(). Este coeficiente mide la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de series temporales para identificar patrones y tendencias en los datos climáticos a lo largo del tiempo.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Caracterización del árbol para la cuantificación del flujo de savia

Tabla 1

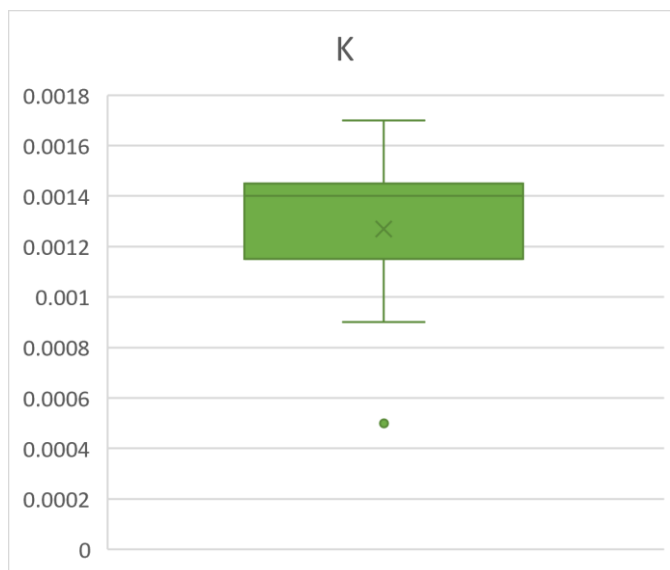
Características de los árboles a partir de la extracción del core

Punto	Coefficiente de difusividad térmica de la madera (K)	Diámetro del tronco (cm)	Ancho del xilema funcional/albura (cm)	Contenido de humedad (a partir del core) del xilema funcional (kg)
P1	0.0017	21.26		0.001470
			11.9	1
P2	0.0014	20.02		0.000419
			4.05	2
P3	0.0014	27.37		0.000000
			1.4	0
P4	0.0012	22.54		0.000152
			2.75	6
P5	0.0015	33.58		0.000328
			5.85	0
P6	0.0014	22.25		0.000637
			6.5	9
P7	0.0012	47.17		0.000767
			1.85	0

P8	0.0005	22.73		0.000239
			1.6	3
P9	0.0012	35.94		0.000614
			2.3	6
P10	0.0014	15.06		0.000255
			4.5	2
P11	0.0011	44.5		0.000520
			4.15	6
P12	0.0016	27.12		0.000546
			5.5	3
P13	0.0009	22.54		0.000537
			2.7	3

Figura 20

Distribución del coeficiente de difusividad térmica de la madera de P. rugulosa



La difusividad térmica (k) de la albura explica la compleja relación entre la difusión de calor a través de una matriz leñosa de agua y los tubos lignificados

rectos y paralelos (vasos o traqueidas) que componen la albura. Determinar las propiedades de la albura nos ayudó para calcular la velocidad de la savia corregida (Vs).

Según la literatura, la difusividad térmica corregida (k) para la muestra específica se sitúa entre 0.001 (agua pura) y 0.004 (madera seca) (Marshall, 1958). Los resultados se encuentran dentro de estos parámetros, excepto para la muestra P8, que presenta un valor de 0.0005, significativamente inferior al rango esperado. Este desvío podría atribuirse a errores manuales; sin embargo, es importante destacar que la naturaleza no se rige por parámetros rígidos, y muchas especies vegetales están sujetas a la modificación de sus propiedades intrínsecas de su funcionamiento de acuerdo al entorno.

La media de los datos indica que existe una baja difusividad térmica de la madera de *P. rugulosa*, con un valor de $k = 0.0014$, lo que indica una conducción lenta del calor. Esta característica podría representar una adaptación a las condiciones de bajas temperaturas y eventos de congelación a las que está expuesta *P. rugulosa*. La baja difusividad térmica permitiría mantener el flujo de savia en movimiento durante estos eventos, minimizando el riesgo de cavitación (formación de burbujas debido al proceso de congelación y descongelación) en el tejido xilemático. Esto contribuiría a mantener una temperatura interna estable, favoreciendo así su funcionalidad hidráulica y adaptabilidad en ambientes fríos.

4.2. Cuantificación del Flujo de savia

Evaluación de la distribución de los datos

Los resultados de la prueba estadística Anderson-Darling para mostraron que la estratificación NO presenta el valor de $A=600.46$, SE con $A = 635.41$, LL con $A = 674.53$ siendo p-valor de $< 2.2e-16$. La amplitud de A sugiere que los datos no presentan una distribución normal siendo significativo el p-valor.

Comparación de estratificación

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis no paramétrica mostraron que H presenta un valor de 193.54 muestra que existe una diferencia entre las medias de los estratos (NO, SE, LL), con un p-valor $2.2e-16$, siendo una diferencia significativa.

Figura 21

Tendencia diaria del flujo de savia durante la época húmeda y seca

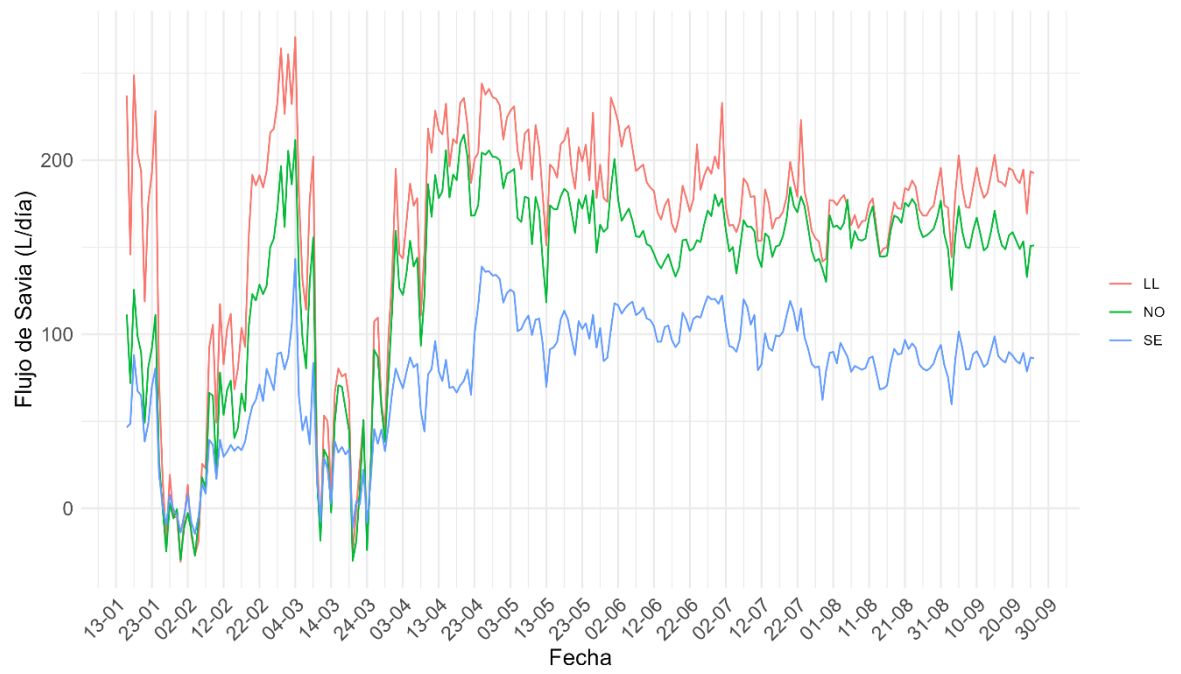


Figura 22

Ciclo horario del flujo de savia en la época húmeda (02/02/23)

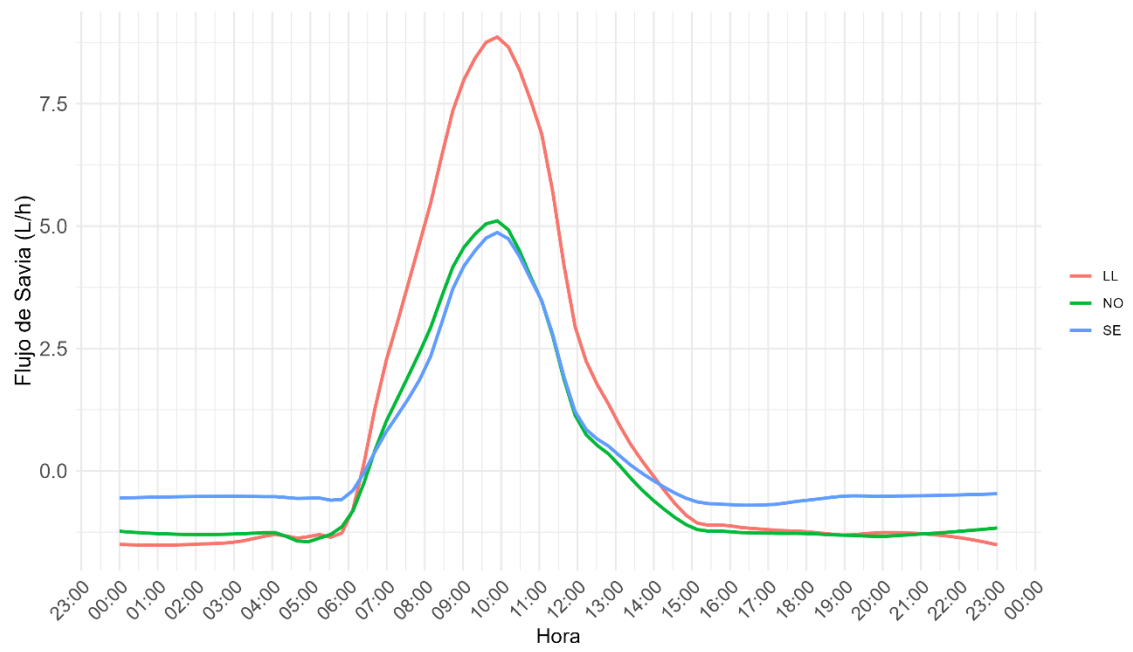
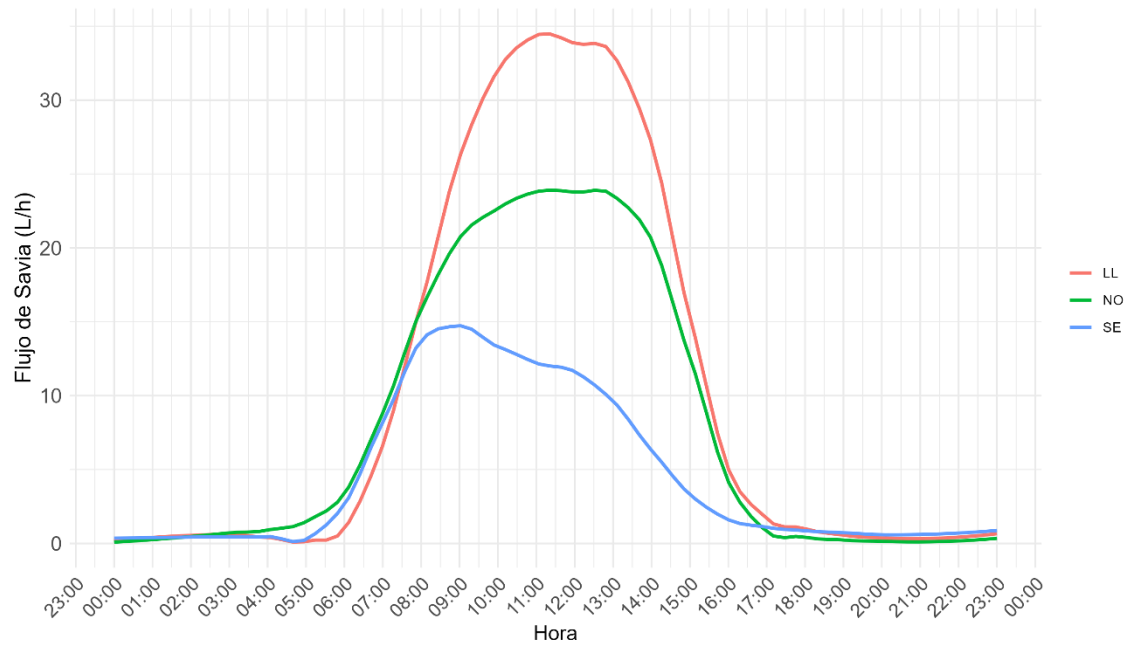


Figura 23

Ciclo horario del flujo de savia en la época seca (31/05/23)



Los ciclos de flujo de savia durante la época húmeda fueron menores a comparación de Los ciclos de flujo de savia durante la época húmeda fueron menores en comparación con la época seca. El pico máximo de flujo en la época húmeda se registra entre las 10:30 a.m. y la 1:00 p.m., coincidiendo con el período de mayor exposición a la luz solar. Durante este horario, las plantas abren sus estomas para facilitar la transpiración y regular su temperatura, lo que resulta en una mayor liberación de agua.

En contraste, durante la época seca, el ciclo de flujo de savia se adelanta debido al movimiento del sol, afectando especialmente a la ladera sureste (SE). En esta zona, el pico máximo se observa entre las 8:00 a.m. y las 10:00 a.m. Esto podría explicar la menor densidad de los parches de *Polylepis rugulosa* en esta orientación de la quebrada, ya que la exposición al sol durante menores horas limita la productividad de *Polylepis* en una región con recursos hídricos más limitados.

A lo largo de ambas épocas, el flujo de savia sigue un patrón creciente en el siguiente orden: SE < NO < LL. Los valores específicos de este comportamiento se presentan en la siguiente tabla 2.

Tabla 2

Resumen del flujo de savia por temporada en Litros

Temporada	SE (L)	NO (L)	LL (L)
-----------	--------	--------	--------

Húmeda	2794.31	4879.74	7587.12
Seca	17002.74	29089.33	33551.64

Época Húmeda

Durante la época húmeda, los valores de flujo de savia son significativamente menores en comparación con la época seca. En la zona sureste (SE), se registran 2794.31 litros de flujo de savia, mientras que en la zona noroeste (NO) se observa un flujo de 4879.74 litros y en la Llanura Aluvial (LL), el flujo alcanza los 7587.12 litros. Esto indica que, durante la temporada de lluvias, la disponibilidad de agua en el ambiente es mayor, lo que permite una menor demanda de transpiración por parte de las plantas. En este periodo, el flujo de savia sigue un patrón creciente en función de la disponibilidad de agua, siendo la Llanura Aluvial la que presenta el mayor flujo, lo que podría estar relacionado con un mejor acceso a recursos hídricos en esa área.

Época Seca

En la época seca, se observa una marcada mayor demanda de agua por parte de las plantas, lo cual se refleja en los valores de flujo de savia. En la zona sureste (SE), el flujo se incrementa a 17,002.74 litros, en la zona noroeste (NO) alcanza los 29089.33 litros, y en la Llanura Aluvial (LL), se observa el mayor flujo con 33551.64 litros. Este aumento considerable en la demanda de agua en la época seca

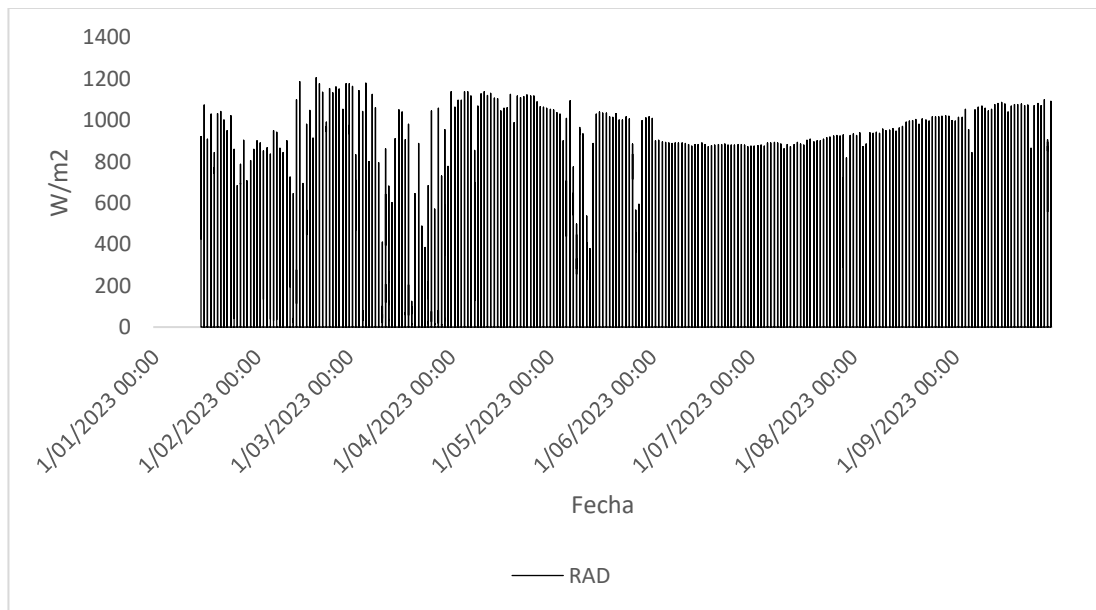
puede estar asociado con las altas temperaturas y la menor disponibilidad de agua en el ambiente, lo que lleva a las plantas a transpirar más para regular su temperatura y continuar sus procesos fisiológicos. Además, la Llanura Aluvial, al contar con mayores recursos hídricos disponibles, muestra un flujo de savia superior, sugiriendo que las áreas con mayor acceso al agua tienden a presentar una mayor transpiración. Esto destaca la importancia de los recursos hídricos locales y su influencia en la capacidad de los árboles para mantener su actividad fisiológica en condiciones de sequía.

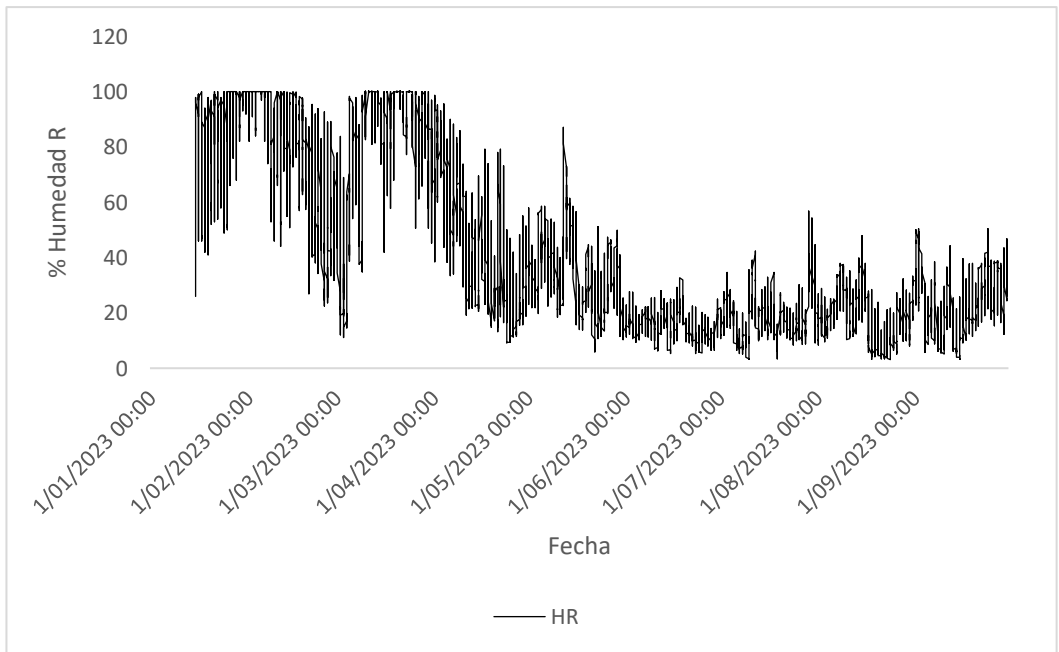
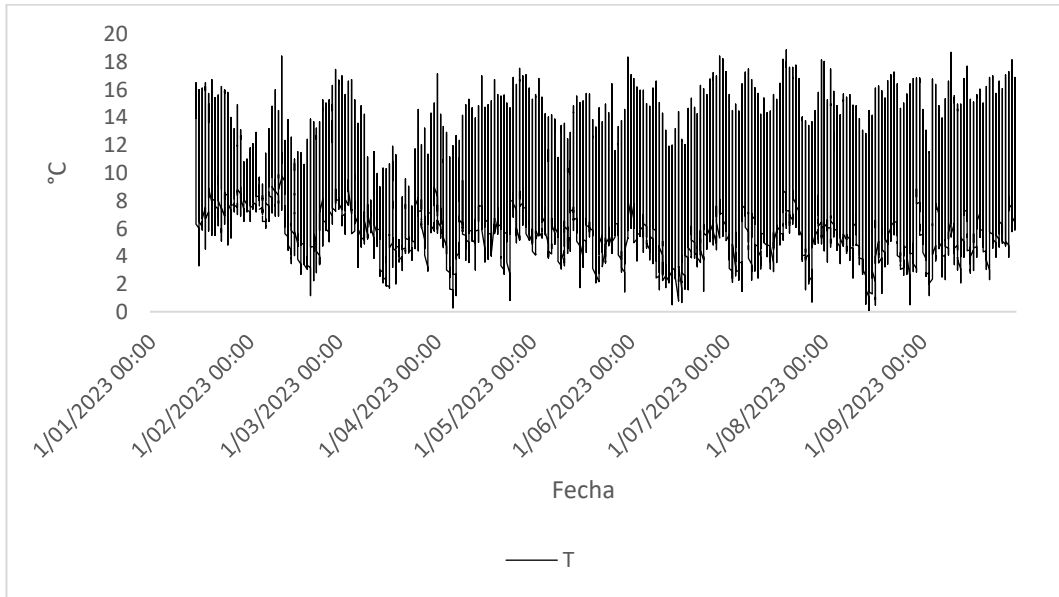
Esta tabla muestra que el flujo de savia es notablemente mayor durante la época seca, cuando las plantas enfrentan una mayor demanda de agua debido a las condiciones climáticas extremas. La Llanura Aluvial, que muestra el flujo de savia más alto, refleja un área con mayor disponibilidad de agua. En la época húmeda, el flujo de savia disminuye, ya que la mayor disponibilidad de agua en el ambiente reduce la necesidad de transpiración, lo que se refleja en los menores valores de flujo en comparación con la temporada seca.

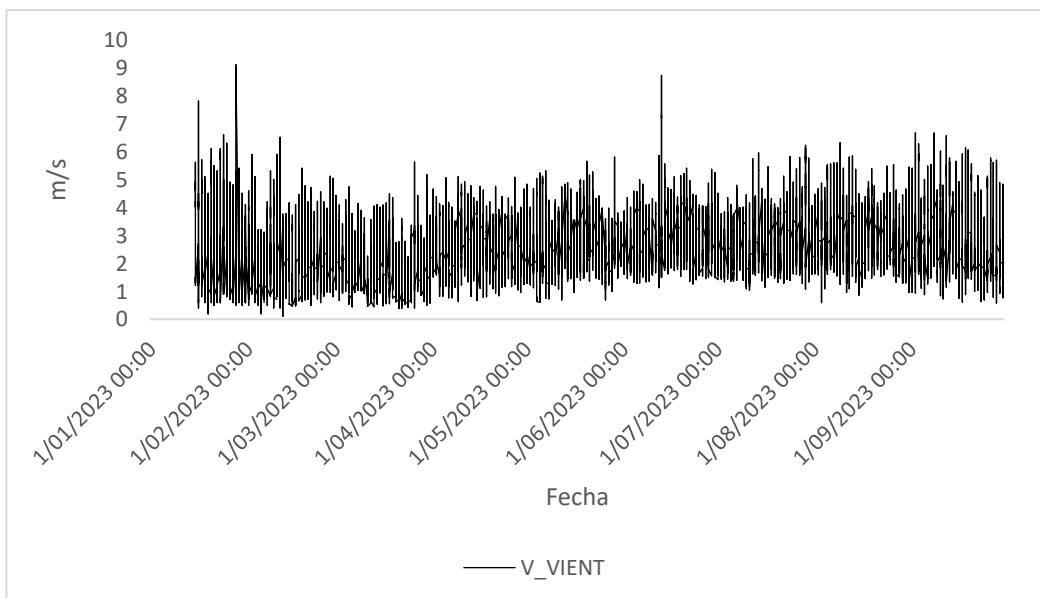
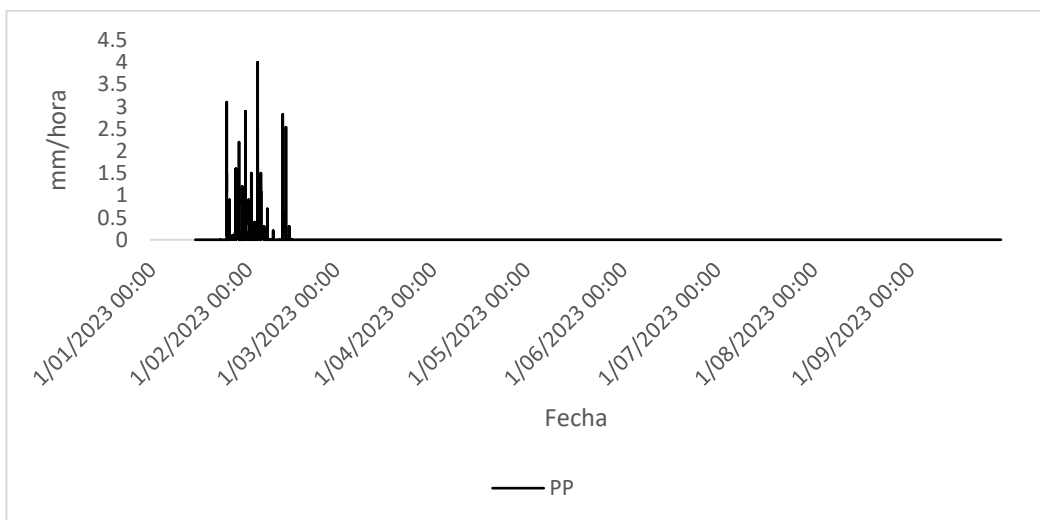
4.2. Cuantificación de las variaciones del flujo de savia y los factores climáticos

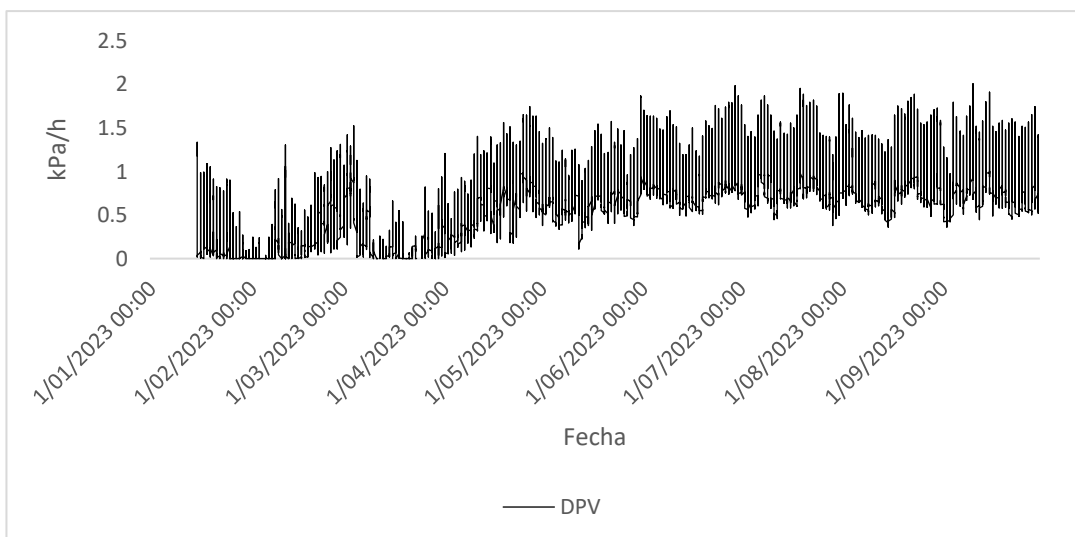
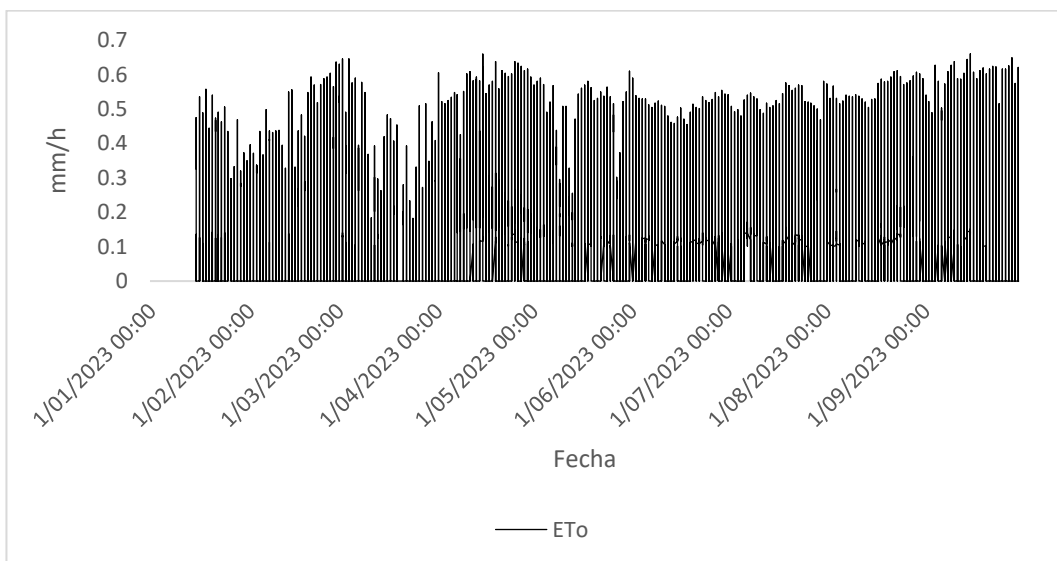
Figura 24

Resultados horarios de variables climatológicas durante la época húmeda y seca hasta setiembre del 2023









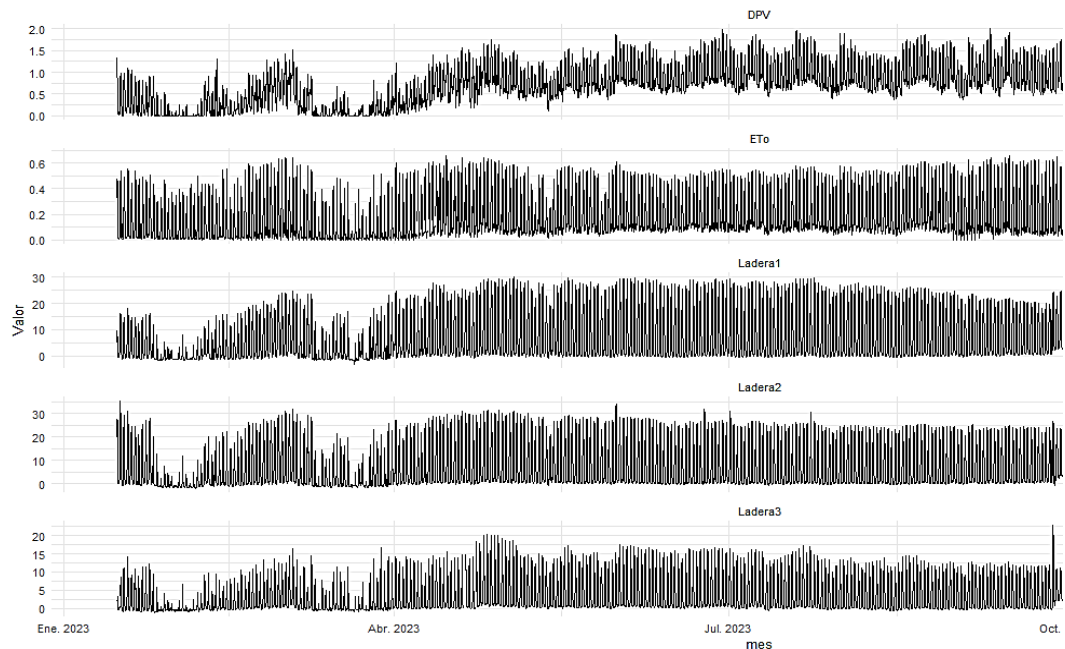
La medición horaria de nuestra estación meteorológica durante la época húmeda (enero-abril) mostró los siguientes resultados, radiación (W/m^2), con valores máximos de 1204.7 con un promedio de 246.5, la temperatura ($^{\circ}C$) tuvo valores máximos de 18.4, mínimos de 0.2 y con un promedio de 8.5, la humedad relativa (%) presentó valores mínimos de 9.1, máximos 100, promedio de 68.7, la precipitación (mm/temporada) acumulada durante el periodo de la época húmeda

fue de 99.3, velocidad de viento con un valor mínimo de 0.1m/s, máximo de 9.1, promedio 2.3, el déficit de presión de vapor (DPV; kPa) presentó máximos de 1.7 y promedio de 0.85 y la evapotranspiración acumulada (mm/temporada) fue de 363.3.

Durante la época seca comprendido el periodo máximo de medición del presente proyecto fue de (mayo-setiembre) mostró los siguientes resultados, radiación (W/m²), con valores máximos de 1097.8 con un promedio de 260.7, la temperatura (°C) tuvo valores máximos de 18.9, mínimos de 0.1 y con un promedio de 8.5, la humedad relativa (%) presentó valores mínimos de 3.1, máximos 87, promedio de 20.9, la precipitación (mm/temporada) acumulada durante el periodo de la época húmeda fue nula, (esto se ve reflejado en la humedad relativa que no llega a picos de 100 para poder generar lluvia), velocidad de viento con un valor mínimo de 0.6 m/s, máximo de 8.7, promedio 3, el déficit de presión de vapor (DPV; kPa) presentó máximos de 2 y promedio de 0.9 y la evapotranspiración acumulada (mm/temporada) fue de 751.6.

Figura 25

Tendencia histórica del déficit de presión de vapor y la evapotranspiración durante la época húmeda y seca, junto con la demanda del flujo de savia según la orientación topográfica.



Estas condiciones climáticas favorecen una alta demanda atmosférica de agua, reflejando una combinación de alta radiación solar y temperaturas elevadas. Un déficit de presión de vapor (DPV) de 1.7 (húmeda) y 2 (seca) kPa/h, sugiere que hay una alta demanda evaporativa de la atmósfera, lo cual puede llevar a un incremento en la transpiración de *Polylepis rugulosa*.

Cabe resaltar que estas variables presentan tendencias similares al flujo de savia, lo que indica que la evapotranspiración y el DPV son factores clave que influyen en la dinámica del flujo de savia en los tres estratos estudiados. Esto sugiere una fuerte interrelación entre las condiciones atmosféricas y la respuesta fisiológica de la vegetación, destacando la importancia de estas variables en la regulación del intercambio de agua entre el suelo, las plantas, y la atmósfera.

Un alto Déficit de Presión de Vapor indica que la atmósfera tiene una mayor capacidad para absorber vapor de agua, lo que generalmente conduce a una mayor tasa de transpiración. Esto es debido a que el gradiente de presión de vapor entre las hojas de las plantas y la atmósfera es mayor, promoviendo una mayor pérdida de agua. Si el suelo tiene suficiente agua, las plantas pueden aumentar su transpiración para satisfacer la demanda evaporativa impuesta por un DPV alto, lo que se refleja en un mayor flujo de savia. Sin embargo, si el suelo está seco, las plantas pueden cerrar sus estomas para conservar agua, reduciendo la transpiración y moderando la transpiración, aunque el DPV sea alto.

4.3. Análisis de la relación de las variables climáticas con la variabilidad del flujo de savia para determinar las variables influyentes

Figura 26

Tendencia de los factores climáticos y el flujo de savia durante las épocas húmeda y seca.



Los factores climáticos significativamente correlacionados con el flujo de savia fueron la radiación solar (RAD), temperatura (T) y déficit de presión de vapor (DPV). Durante la época seca las plantas presentan una mayor actividad fotosintética a causa de la alta radiación diurna ($r = 0.96$, $p < 0.001$) junto con una

mayor transpiración generada por la alta temperatura ($r = 0.90$, $p < 0.001$) y el elevado déficit de presión de vapor ($r = 0.83$, $p < 0.001$). Por el contrario, durante la época húmeda, debido a la ocurrencia de lluvias, el flujo de savia disminuye en relación directa con la más alta humedad relativa ($r = -0.63$, $p < 0.001$). En conclusión, *Polylepis rugulosa* muestra una tendencia a consumir más agua durante la época seca que en época húmeda.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Cuantificación del flujo de savia

Otro aspecto contrastable es el volumen de consumo de agua en función del flujo de savia. Hidalgo et al. (2023) determinaron que, en *P. reticulata*, los árboles con diámetros mayores a 48.3 cm presentan flujos de savia superiores a 10 L/h por árbol, alcanzando valores de hasta 28 L/h. En nuestro estudio, se observó que, en un ecosistema semiárido, *P. rugulosa* consume un promedio de 7.5 L/h durante la época húmeda y hasta 30 L/h en la época seca. Estos resultados sugieren que el rango de consumo de agua podría ser una característica general del género *Polylepis*.

Finalmente, se presenta en la siguiente tabla una comparación del uso de agua en árboles de otros géneros, según estudios previos (Buyinza et al., 2019). Estos datos permiten contextualizar los valores de flujo de savia obtenidos para *Polylepis* en relación con otras especies arbóreas.

Tabla 3

Uso del agua de los árboles y parámetros de los árboles, incluido el método utilizado para diferentes especies

Especie de arboles	Método	DBH (cm)	Uso de agua	Fuente
--------------------	--------	----------	-------------	--------

<i>Acacia aneura</i>	CHPM	12	14 kg día-1	(O'Gradyetal.2009)
<i>Acacia tortilis</i>	TTD	17	48 L día-1	(Doetal.2008)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	CHPM	18	87 kg day-1	(O'Gradyetal.2009)
<i>E. grandis</i>	CHPM	30	141 kg día-1	(Dye1996)
<i>E. pilularis</i>	CHPM	11-14	18 L día-1	(Adrienne et al.2013)
<i>Grevillea robusta</i>	CHPM	n/a	12 kg día-1	(Lott et al.1996)
<i>Cordia alliodora</i>	CHPM	34	42 kg día-1	(Meinzer et al.2004)
<i>Anacardium excelsum</i>	CHPM	98	785 kg día-1	(Meinzer et al.2004)
<i>Vitellaria paradoxa</i>	HRM	55.5	151 L día-1	(Bazié et al.2017)
<i>Senna spectabilis</i>	CHPM	7.9	4.8 kg día-1	(Namirembe et al.2008)

Nota: *Los métodos utilizados están indicados por el método de compensación de pulso de calor (CHPM), el método de relación de calor (HRM), la disipación térmica transitoria (TTD), diámetro a la altura del pecho (DBH). Datos extraídos de Buyinza et al. (2019).

5.2. Cuantificación de los datos climatológicos

El análisis de los factores climáticos en la región de Candarave, Tacna, evidencia diferencias marcadas entre la época húmeda (enero-abril) y la época seca (mayo-septiembre). Estos resultados concuerdan con estudios previos sobre la variabilidad climática en la sierra sur del Perú (Cruz-Baltuano et al., 2025).

Durante la época húmeda, la radiación solar alcanzó un máximo de 1204.7 W/m², con un promedio de 246.5 W/m², valores similares a los reportados en otras zonas altoandinas del sur del Perú (Espinoza et al., 2019). La temperatura promedio fue de 8.5 °C, con un máximo de 18.4 °C y un mínimo de 0.2 °C, lo que evidencia la alta amplitud térmica diaria característica de estas regiones (Vuille et al., 2018). La humedad relativa osciló entre 9.1 % y 100 %, con un promedio de 68.7 %, reflejando la influencia de la estacionalidad en la disponibilidad de agua atmosférica.

En la época seca, se observó un ligero descenso en la radiación máxima (1097.8 W/m²) con un incremento en el promedio (260.7 W/m²), lo que puede estar relacionado con la menor cobertura nubosa en esta estación, esto se encuentra relacionado al clima de los andes (Garreaud, 2009). La temperatura promedio se mantuvo en 8.5 °C, con valores máximos de 18.9 °C y mínimos de 0.1 °C, indicando la estabilidad térmica anual de la región. Sin embargo, la humedad relativa disminuyó drásticamente, con un mínimo de 3.1 %, un promedio de solo 20.9 %, y

un máximo de 87%, lo que resalta la aridez extrema de esta época y su impacto en la disponibilidad hídrica.

La precipitación acumulada en la época húmeda fue de 99.3 mm, mientras que en la época seca fue nula, lo que confirma la marcada estacionalidad en la precipitación andina (SENAMHI, 2021). Esta ausencia de lluvia en la época seca se ve reflejada en la baja humedad relativa, que no alcanza valores de saturación necesarios para la formación de precipitaciones.

En cuanto a la dinámica del viento, se observó una velocidad promedio de 2.3 m/s en la época húmeda, con un máximo de 9.1 m/s, mientras que en la época seca la velocidad promedio aumentó a 3 m/s, con un máximo de 8.7 m/s. Este comportamiento es consistente con estudios que indican un aumento de la velocidad del viento en periodos secos debido a la mayor estabilidad atmosférica y la menor humedad (Quispe & Flores, 2020).

El déficit de presión de vapor (DPV) presentó valores máximos de 1.7 kPa en la época húmeda y 2 kPa en la época seca, con promedios de 0.85 kPa y 0.9 kPa respectivamente. Estos valores reflejan un ambiente más seco en la época seca, lo que promueve una mayor evaporación y transpiración (Allen et al., 1998).

Finalmente, la evapotranspiración acumulada fue significativamente mayor en la época seca (751.6 mm) en comparación con la época húmeda (363.3 mm). Este incremento en la demanda evaporativa se debe a la menor humedad relativa y

al mayor DPV durante la época seca, lo que concuerda con estudios sobre el balance hídrico en regiones andinas (Zapata et al., 2022).

5.3. Análisis de relación de las variaciones del flujo de savia debido a los factores climáticos

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una relación significativa entre la radiación solar y el flujo de savia en *Polylepis rugulosa*, así como una correlación inversamente proporcional con la humedad relativa y la precipitación. Estas variables se presentan como factores limitantes para la transpiración de *P. rugulosa* en la región semiárida de Tacna. Esta respuesta sugiere un mecanismo adaptativo de la especie a la variabilidad estacional en la disponibilidad de agua. Durante la temporada húmeda, *P. rugulosa* parece reducir su transpiración, ya que no enfrenta presiones ambientales que favorezcan un alto índice de evaporación, como ocurre con la radiación solar. Además, el déficit de presión de vapor (DPV) es elevado, lo que lleva a un cierre parcial o completo de las estomas, minimizando la pérdida de agua. En este contexto, la alta humedad relativa durante la temporada húmeda también podría estar relacionada con una mayor cobertura nubosa, lo que reduce la intensidad de la radiación solar y, por ende, limita los períodos de fotosíntesis activa y transpiración.

En contraste, durante la temporada seca, la elevada radiación solar y la baja humedad relativa inducen un aumento en la transpiración de *P. rugulosa*, ya que los estomas se abren para facilitar el intercambio de gases, promoviendo tanto la

captación de CO₂ para la fotosíntesis como la pérdida de agua por transpiración. La baja humedad relativa, asociada con una mayor evaporación atmosférica, obliga a la planta a incrementar el flujo de savia para mantener la turgencia celular y regular la presión interna del sistema vascular. Este fenómeno resalta la plasticidad fisiológica de *P. rugulosa*, que ajusta su tasa de transpiración en función de las condiciones climáticas para optimizar la captación de recursos y minimizar la pérdida excesiva de agua.

Los resultados obtenidos en este estudio son comparables con los de Hidalgo et al. (2023), quienes reportaron que en *P. reticulata* en el Páramo de Ecuador, el principal factor limitante para el flujo de savia durante periodos breves es el déficit de presión de vapor (DPV). Sin embargo, observaron que, a medida que el DPV se incrementaba, el flujo de savia no disminuía significativamente. En contraste, nuestros hallazgos en *P. rugulosa* indican una alta regulación estomática en respuesta a las variables ambientales incluyendo el DPV.

Este comportamiento destaca diferencias entre especies del género *Polylepis*, aunque es necesario profundizar en el análisis de otras variables, como el contenido volumétrico de agua en el suelo, para una interpretación más completa.

Estos hallazgos contrastados con otro tipo de vegetación arbórea tienen importantes implicaciones para la conservación de *Polylepis rugulosa*, especialmente en un contexto de cambio climático, ya que sugieren que las especies

adaptadas a climas áridos podrían ser más vulnerables a cambios en los patrones de Radiación Solar, DPV y precipitación.

Es importante resaltar que, para comprender mejor el funcionamiento de *Polylepis* en términos de flujo de savia, consumo de agua, transpiración y balance hidrológico del bosque, es fundamental considerar la variabilidad en la edad de los árboles y su influencia en estos procesos, especialmente en el contexto de una región semiárida.

Es importante resaltar que estudios previos han demostrado que los árboles jóvenes pueden reducir el caudal de los arroyos en mayor medida que los árboles adultos, evidenciando que la regulación hídrica se acentúa en individuos maduros. Este fenómeno ha sido observado en bosques de abetos y plantaciones de coníferas, (Crampe et al., 2021; Perry & Jones, 2017; Segura et al., 2020; Farinacci et al., 2024).

En contraste, investigaciones en otras zonas de plantaciones de coníferas han determinado que los bosques jóvenes presentan una evapotranspiración más conservadora, lo que mejora la eficiencia en el uso del agua a lo largo del tiempo, especialmente durante eventos de sequía. En contraste, los bosques más antiguos tienden a ser menos restrictivos en su consumo hídrico bajo condiciones de sequía, lo que resulta en una menor eficiencia en el uso del agua en comparación con los bosques jóvenes (Skubel et al., 2015).

Además, el uso y almacenamiento de agua por parte de los árboles es dinámico en el espacio y el tiempo. Comprender cómo los árboles almacenan y utilizan el agua es fundamental para modelar los balances hídricos y los flujos hidrológicos en los ecosistemas (Minick et al., 2021). Ignorar estas variables podría llevar a interpretaciones inexactas sobre modelaciones de dinámicas hídricas.

Preguntas para futuras investigaciones:

- ¿Cómo varía la eficiencia en el uso del agua de *Polylepis rugulosa* a lo largo de su ciclo de vida y en diferentes condiciones climáticas? Teniendo en cuenta que su distribución es amplia desde Arequipa hasta el norte de Chile.
- ¿Cómo influye la edad del bosque en la regulación de los caudales de los arroyos en ecosistemas de montaña semiáridos?
- ¿*Polylepis rugulosa* tiene capacidad de almacenamiento hídrico? ¿Cómo influye esto en su transpiración y balance hídrico en ecosistemas semiáridos?
- ¿Cómo pueden incorporarse las variaciones en el consumo de agua según la edad del bosque en modelos hidrológicos para mejorar las predicciones sobre la disponibilidad de agua en ecosistemas andinos?

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6.1. Cuantificación del flujo de savia

El patrón del flujo de savia en 15 árboles durante la época seca mostró un aumento considerable en la demanda de agua, reflejada en los valores elevados de flujo de savia (79643.71 L/temporada), que fueron mucho mayores en comparación con la época húmeda (15261.17 L/temporada). Este fenómeno es más notorio en las zonas de mayor exposición al sol y disponibilidad de agua, como la Llanura Aluvial (LL), que mostró los valores más altos de flujo de savia en ambas temporadas. Esto indica que *Polylepis rugulosa*, enfrenta una mayor transpiración y demanda hídrica durante la temporada de sequía, cuando las condiciones climáticas extremas incrementan la necesidad de mantener procesos fisiológicos.

Cabe resaltar que el comportamiento de los ciclos de flujo de savia en la época húmeda, bajo condiciones de incremento en la precipitación y alta humedad relativa el flujo de savia tuvo valores más bajos, y el pico máximo de flujo ocurrió entre las 10:30 a.m. y la 1:00 p.m., coincidiendo con el período de mayor irradiación solar. Sin embargo, en la época seca, este ciclo, especialmente en la ladera sureste (SE), el pico máximo de flujo ocurrió entre las 8:00 a.m. y las 10:00 a.m. Este cambio está relacionado con las características climáticas de cada temporada, afectando directamente al consumo de agua y transpiración.

6.2. Cuantificación de los factores climáticos

La medición horaria de nuestra estación meteorológica durante la época húmeda (enero-abril) mostró los siguientes resultados, radiación (W/m^2), con valores máximos de 1204.7 con un promedio de 246.5, la temperatura ($^{\circ}C$) tuvo valores máximos de 18.4, mínimos de 0.2 y con un promedio de 8.5, la humedad relativa (%) presentó valores mínimos de 9.1, máximos 100, promedio de 68.7, la precipitación (mm/temporada) acumulada durante el periodo de la época húmeda fue de 99.3, velocidad de viento con un valor mínimo de 0.1m/s, máximo de 9.1, promedio 2.3, el déficit de presión de vapor (DPV; kPa) presentó máximos de 1.7 y promedio de 0.85 y la evapotranspiración acumulada (mm/temporada) fue de 363.3.

Durante la época seca comprendido el periodo máximo de medición del presente proyecto fue de (mayo-setiembre) mostró los siguientes resultados, radiación (W/m^2), con valores máximos de 1097.8 con un promedio de 260.7, la temperatura ($^{\circ}C$) tuvo valores máximos de 18.9, mínimos de 0.1 y con un promedio de 8.5, la humedad relativa (%) presentó valores mínimos de 3.1, máximos 87, promedio de 20.9, la precipitación (mm/temporada) acumulada durante el periodo de la época húmeda fue nula, (esto se ve reflejado en la humedad relativa que no llega a picos de 100 para poder generar lluvia), velocidad de viento con un valor mínimo de 0.6 m/s, máximo de 8.7, promedio 3, el déficit de presión de vapor

(DPV; kPa) presentó máximos de 2 y promedio de 0.9 y la evapotranspiración acumulada (mm/temporada) fue de 751.6.

6.3. Relación de las variables climáticas con la variabilidad del flujo de savia

La correlación positiva con los factores climáticos y el flujo de savia mostraron que la radiación solar, la temperatura y el déficit de presión de vapor fueron factores influyentes promoviendo un aumento en la actividad fotosintética y transpiración, lo que resultó en un mayor flujo de savia, esto se evidencia mejor en la época seca. En contraste en la época húmeda se evidenció con una tendencia muy marcada donde la humedad relativa y la precipitación influye de manera inversa el flujo de savia, indicando que las plantas redujeron su transpiración debido a la alta disponibilidad de agua en el ambiente.

La tendencia observada en la correlación entre los factores climáticos y el flujo de savia resalta la importancia de la climatología en la regulación de la transpiración y el intercambio de agua entre el suelo, las plantas y la atmósfera. Un alto déficit de presión de vapor y una mayor evapotranspiración incrementan la capacidad de la atmósfera para absorber vapor de agua, lo que favorece un mayor flujo de savia, siempre que las plantas tengan acceso adecuado al agua superficial o subterránea.

RECOMENDACIONES

Es fundamental continuar con el monitoreo a largo plazo del flujo de savia de *Polylepis rugulosa* para comprender su adaptación a las variaciones estacionales y climáticas. Este seguimiento continuo permitirá identificar patrones de comportamiento específicos en diferentes épocas del año y durante varios ciclos anuales. Además, esta información es crucial para ajustar estrategias de manejo hídrico y conservación de manera más precisa y efectiva. El monitoreo prolongado también brindará la oportunidad de llevar a cabo estudios más profundos sobre el ecosistema, como el modelado del balance hídrico del bosque, lo que proporcionará una visión integral de la disponibilidad y dinámica de los recursos hídricos dentro del bosque. Este enfoque permitirá no solo optimizar las intervenciones de conservación, sino también adaptar las prácticas de manejo forestal a las condiciones climáticas de las zonas áridas y garantizar una gestión eficiente de los recursos hídricos a lo largo del tiempo.

El monitoreo de los equipos puede ser realizado por los pobladores locales, involucrándolos activamente en el proceso mediante una adecuada socialización y sensibilización. Es fundamental reconocer que los habitantes de la zona son actores clave en las áreas de estudio, ya que poseen un conocimiento profundo de su entorno y pueden contribuir de manera significativa al éxito del proyecto. Para garantizar la sostenibilidad de este monitoreo, es esencial destinar financiamiento específico para la supervisión continua de los equipos, lo cual puede ser gestionado

por un miembro capacitado de la comunidad. Este enfoque no solo fomenta la apropiación local del proyecto, sino que también brinda oportunidades de empleo y desarrollo de habilidades dentro de la comunidad, fortaleciendo el vínculo entre los proyectos de investigación y la comunidad.

Bajo el objetivo de reforestación con *Polylepis rugulosa* en zonas semiáridas, es fundamental realizar una serie de evaluaciones previas para determinar si el ecosistema puede soportar un aumento en la carga de vegetación. Estas evaluaciones deben incluir un análisis detallado de la ecofisiología de la especie, caracterización climática y la disponibilidad hídrica del área. Es común priorizar la selección de sitios con acceso a recursos hídricos más abundantes y suelos con características de retención de humedad. Sin embargo, en Candarave, es crucial destacar que la alta radiación solar y el escaso periodo de precipitación podrían incrementar el déficit de presión de vapor, lo que intensificaría la transpiración y el flujo de savia, aumentando significativamente la demanda de agua. Dado que la recarga hídrica anual por precipitación es de ~300 mm/año, esta situación podría volverse insostenible para el ecosistema a largo plazo si no se implementan estrategias de manejo adecuadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bethenod, O., Katerji, N., Goujet, R., Bertolini, J. M., & Rana, G. (2000). *Determination and validation of corn crop transpiration by sap flow measurement under field conditions*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s007040070004>
- Bhatla, S. C., & Lal, M. A. (n.d.). *Plant Physiology, Development and Metabolism*.
- Bodo, A. V., & Arain, M. A. (2021). Radial variations in xylem sap flux in a temperate red pine plantation forest. *Ecological Processes*, 10(1).
<https://doi.org/10.1186/s13717-021-00295-4>
- Buyinza, J., Muthuri, C. W., Downey, A., Njoroge, J., Denton, M. D., & Nuberg, I. K. (2019). Contrasting water use patterns of two important agroforestry tree species in the Mt Elgon region of Uganda. *Australian Forestry*, 82(sup1), 57–65. <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1547944>
- Carabajo-Hidalgo, A., Sabaté, S., Crespo, P., & Asbjornsen, H. (2023). Brief windows with more favorable atmospheric conditions explain patterns of *Polylepis reticulata* tree water use in a high-Altitude Andean forest. *Tree Physiology*, 43(12), 2085–2097. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad109>
- Crampe, E. A., Segura, C., & Jones, J. A. (2021). Fifty years of runoff response to conversion of old-growth forest to planted forest in the H. J. Andrews forest,

Oregon, USA. *Hydrological Processes*, 35(5), e14168.
<https://doi.org/10.1002/hyp.14168>

Chang, X., Zhao, W., & He, Z. (2014). Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.11.004>

Chen, X., Zhao, P., Hu, Y., Ouyang, L., Zhu, L., & Ni, G. (2019). Canopy transpiration and its cooling effect of three urban tree species in a subtropical city- Guangzhou, China. *Urban Forestry and Urban Greening*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126368>

Clausnitzer, F., Köstner, B., Schwärzel, K., & Bernhofer, C. (2011). Relationships between canopy transpiration, atmospheric conditions and soil water availability-Analyses of long-term sap-flow measurements in an old Norway spruce forest at the Ore Mountains/Germany. In *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 151, Issue 8, pp. 1023–1034). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.04.007>

Cruz-Baltuano, A., Huarahuara-Toma, R., Silva-Borda, A., Chucuya, S., Franco-León, P., Huayna, G., Ramos-Fernández, L., & Pino-Vargas, E. (2025). Assessment of Observed and Projected Extreme Droughts in Perú—Case

Study: Candarave, Tacna. *Atmosphere*, 16(1).
<https://doi.org/10.3390/atmos16010018>

Dalsgaard, L., Mikkelsen, T. N., & Bastrup-Birk, A. (2011). Sap flow for beech (*Fagus sylvatica* L.) in a natural and a managed forest - Effect of spatial heterogeneity. *Journal of Plant Ecology*, 4(1–2), 23–35.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtq037>

Farinacci, M. D., Jones, J., & Silva, L. C. (2024). Carbon-Water Tradeoffs in Old-Growth and Young Forests of the Pacific Northwest. *AGU Advances*, 5(4), e2024AV001188.

Franco, P., Cáceres, C., Navarro, M., Jove, C., Ignacio, J., & Oyague, E. (2021). *Polylepis tarapacana* forests in Maure basin, southern Peru. Opportunities for its conservation. *Estudios Geográficos*, 82(290).
<https://doi.org/10.3989/ESTGEOGR.202071.071>

Giménez, C., Gallardo, M., & Thompson, R. B. (2013). Plant–Water Relations. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.05257-x>

Guo, Q. (2015). *Sap Flow of Abies georgei var. smithii and its relationship with the environment factors in the Tibetan Subalpine Region, China*.
<https://doi.org/DOI:10.1007/s11629-015-3618-3>

- Hayat, M., Iqbal, S., Zha, T., Jia, X., Qian, D., Bourque, C. P. A., Khan, A., Tian, Y., Bai, Y., Liu, P., & Yang, R. (2021). Biophysical control on nighttime sap flow in *Salix psammophila* in a semiarid shrubland ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108329>
- Jung, E. Y., Otieno, D., Kwon, H., Berger, S., Hauer, M., & Tenhunen, J. (2014). Influence of elevation on canopy transpiration of temperate deciduous forests in a complex mountainous terrain of South Korea. *Plant and Soil*, 378(1–2), 153–172. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-2019-z>
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). Plant physiological ecology: Second edition. In *Plant Physiological Ecology: Second Edition*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>
- Lambers, H., & Oliveira, R. S. (2008). *Plant Physiological Ecology*.
- Liu, C., Du, T., Li, F., Kang, S., Li, S., & Tong, L. (2012). Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of northwest China. *Agricultural Water Management*, 104, 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.014>
- Morales Aranibar, L., Aragón Alvarado, G., & Silva Flores, E. D. (2019). *Caracterización fenotípica del género *Polylepis* en el bosque nativo de la*

provincia *de* *Candarave-Tacna.*

<https://doi.org/https://doi.org/10.33326/26176033.2013.15.311>

Mosquera, G. M., Célleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, *30*(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>

Otieno, D., Li, Y., Liu, X., Zhou, G., Cheng, J., Ou, Y., Liu, S., Chen, X., Zhang, Q., Tang, X., Zhang, D., Jung, E. Y., & Tenhunen, J. (2017). Spatial heterogeneity in stand characteristics alters water use patterns of mountain forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, *236*, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.01.007>

Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. G., & Alves, I. (1999). Evapotranspiration: Concepts and Future Trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *125*(2), 45–51. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1999\)125:2\(45\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1999)125:2(45))

Perämäki M. (2005). A physical analysis of sap flow dynamics in trees. <https://doi.org/10.14214/df.2>

Perry, T. D., & Jones, J. A. (2017). Summer streamflow deficits from regenerating Douglas-fir forest in the Pacific Northwest, USA: Summer streamflow deficits

from regenerating Douglas-fir forest. *Ecohydrology*, 10(2), e1790.
<https://doi.org/10.1002/eco.1790>

Restaino, C. M., Peterson, D. L., & Littell, J. (2016). Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(34), 9557–9562. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602384113>

Rocha, A. D., Vulova, S., Meier, F., Förster, M., & Kleinschmit, B. (2022). Mapping evapotranspirative and radiative cooling services in an urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104051.

Shahenshah, & Isoda, A. (2010). Effects of water stress on leaf temperature and chlorophyll fluorescence parameters in cotton and peanut. *Plant Production Science*, 13(3), 269–278. <https://doi.org/10.1626/pps.13.269>

Segura, C., Bladon, K. D., Hatten, J. A., Jones, J. A., Hale, V. C., & Ice, G. G. (2020). Long-term effects of forest harvesting on summer low flow deficits in the Coast Range of Oregon. *Journal of Hydrology*, 585, 124749. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124749>

Skubel, R., Arain, M. A., Peichl, M., Brodeur, J. J., Khomik, M., Thorne, R., ... & Kula, M. (2015). Age effects on the water-use efficiency and water-use dynamics of temperate pine plantation forests. *Hydrological Processes*, 29(18), 4100-4113.

- Tong, Y., Liu, J., Han, X., Zhang, T., Dong, Y., Wu, M., Qin, S., Wei, Y., Chen, Z., & Zhou, Y. (2023). Radial and seasonal variation of sap flow and its response to meteorological factors in sandy *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Three North Shelterbelt of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109239>
- Van der Molen, M. K., Dolman, A. J., Ciais, P., Eglin, T., Gobron, N., Law, B. E., Meir, P., Peters, W., Phillips, O. L., Reichstein, M., Chen, T., Dekker, S. C., Doubková, M., Friedl, M. A., Jung, M., van den Hurk, B. J. J. M., de Jeu, R. A. M., Kruijt, B., Ohta, T., ... Wang, G. (2011). Drought and ecosystem carbon cycling. In *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 151, Issue 7, pp. 765–773). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.018>
- Yu X, Zhang Y, Zhao X, Li J. 2023. Systemic effects of the vapor pressure deficit on the physiology and productivity of protected vegetables. *Vegetable Research* 3:20 doi: 10.48130/VR-2023-0020
- Yang, J., He, Z., Lin, P., Du, J., Tian, Q., Feng, J., Liu, Y., Guo, L., Wang, G., Yan, J., & Zhao, W. (2022). Variability in Minimal-Damage Sap Flow Observations and Whole-Tree Transpiration Estimates in a Coniferous Forest. *Water (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/w14162551>
- Zhang, Y., Kang, S., Ward, E. J., Ding, R., Zhang, X., & Zheng, R. (2011). Evapotranspiration components determined by sap flow and microlysimetry

techniques of a vineyard in northwest China: Dynamics and influential factors.

Agricultural Water Management, 98(8), 1207–1214.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.03.006>

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías de instalación de equipos y monitoreo en los Bosques de *Polylepis* Rugulosa, Cotapampa, Candarave, Tacna.









Anexo 2. Extracción de cores para la evaluación de la difusividad térmica de la madera y medición del diámetro xilema funcional.



Anexo 3. Procesos en el laboratorio ARIDEZA, UNJBG, Tacna, para determinar la difusividad térmica de la madera

