

Anexo 13. Informes del estado hídrico ejemplares de
Algarrobos en la Quebrada de Camar

Informe Anual Plan de Seguimiento Ambiental Biótico – Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Mine-ra del Salar de Atacama

Región de Antofagasta

Contenido

1	Informe fisiología enero 2023.....	2
2	Informe fisiología abril 2023	3
3	Informe fisiología julio 2023	4
4	Informe fisiología octubre 2023.....	5

1 Informe fisiología enero 2023



Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta



INFORME DE ESTADO HÍDRICO EN ALGARROBO DE LA QUEBRADA DE CAMAR

Enero 2023

Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta
Facultad de Ciencias Agronómicas
Universidad de Chile

Mandante:
SQM

Tabla de contenido

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
Objetivo	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Área de estudio	6
Individuos medidos en estudio	6
Equipos utilizados	8
Metodología para medición del estado hídrico de las plantas	8
• Potencial hídrico en pre-alba y mediodía	8
• Conductancia estomática	9
Análisis estadístico	9
RESULTADOS	11
Potencial hídrico en pre-alba	11
Potencial hídrico en mediodía	15
Conductancia estomática	19
DISCUSIÓN	24
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27
APÉNDICES	30
1. Certificado de calibración de porómetro	30
ANEXOS	31
1. Registro fotográfico	31
2. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C	35
3. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C	35
4. Prueba de Kruskal Wallis sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C	36
5. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo	36
6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo	36
7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo	37
8. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego	37
9. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego	37

10.	Prueba de Kruskal Wallis sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego	38
11.	Resultados de Potencial hídrico en pre-alba	38
12.	Resultados de Potencial hídrico en mediodía.....	39
13.	Resultados de Conductancia estomática.....	40
14.	Profesionales involucrados en el desarrollo del informe.....	41

RESUMEN

El presente informe es parte del programa de seguimiento de flora y vegetación de la quebrada de Camar indicado como parte de las acciones del Programa de Cumplimiento (Acción 24) aprobado mediante Res. Ex. N° 38/2022 por la Superintendencia de Medio Ambiente, y en el marco del procedimiento sancionatorio Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016. Se tiene por objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos que se encuentran en la Quebrada de Camar y que son parte del seguimiento ambiental en el marco de la RCA 226/2006.

Para dar cumplimiento con el objetivo propuesto, se realizó en el mes de enero 2023, una campaña de medición de variables fisiológicas asociadas al estado hídrico de los algarrobos presentes en la Quebrada de Camar en el Salar de Atacama. Se trabajó con una muestra de 18 individuos de algarrobo pertenecientes a la serie A y que están distribuidos en torno al pozo de extracción Camar-2. Complementariamente, se tomaron muestras en 9 ejemplares pertenecientes a la serie B (árboles control), que están alejados de dicho pozo y que se encuentran ubicados hacia el Este de los individuos objeto de estudio, 1 ejemplar de la serie C, 1 ejemplar la serie D y 2 ejemplares de la serie AX, los cuales se ubican en la zona de los árboles de la serie A. Las comparaciones realizadas fueron entre la serie A y las series B y C, según su ubicación respecto a la tubería que atraviesa la quebrada y respecto a si son regados o no.

Los principales resultados obtenidos para este período (enero 2023), indican que existen diferencias significativas en potencial hídrico en pre-alba, mediodía y conductancia estomática entre la serie A y las series B y C, donde las series B y C presentan valores más bajos en todas las variables. Por otra parte, no se observaron diferencias, entre los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería, en ninguna de las tres variables medidas, por lo que la tubería no tendría efecto en el estado hídrico de los algarrobos. Por otro lado, al comparar los algarrobos regados y no regados, se observan diferencias significativas en el potencial hídrico de pre-alba y de mediodía, y en la conductancia estomática, los algarrobos no regados tuvieron los valores más bajos en estas variables.

Al analizar la dinámica temporal de las variables, los valores de potencial son más altos que los registrados en los meses de julio de 2021 y 2022, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno. Por otro lado, se observa un efecto de la aplicación del riego en los árboles de la serie A, donde alcanzan valores superiores a los de la serie B en todas las variables medidas en 2023.

INTRODUCCIÓN

En el borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, específicamente en el sector correspondiente a la Quebrada de Camar, existe una población de Algarrobos, identificados preliminarmente como *Prosopis flexuosa* (RCA 226/2006), que posteriormente, en base a estudios taxonómicos específicos, en 2019 estos mismos individuos fueron identificados como *Prosopis alba* (Ibañez, 2019). Ambas especies son freatófitas de la familia fabaceae.

En torno a esta población de Algarrobos, la empresa SQM Salar S.A. dispuso de un pozo de extracción de agua, conocido como Camar-2 autorizado por la RCA 226/2006, definiéndose un Área de Estudio con el objeto de realizar el seguimiento a los ejemplares cercanos, correspondiendo a los Algarrobos que se encontraban en el área de influencia de este pozo.

Posteriormente, en el marco del procedimiento sancionatorio iniciado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) mediante la Resolución Exenta N°1/Rol F-041-2016 (rectificado por Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016), se considera la complementación de la información contenida en los informes del Plan de Seguimiento Ambiental Biológico (PSAB) en cuanto a la población de algarrobos cercanos al pozo (serie A) y la implementación de un programa de seguimiento de la vegetación y flora de la Quebrada de Camar. Para esto, se considera un estudio eco-fisiológico enfocado en la población de algarrobos que se desarrolla en la quebrada (Acción 24).

Considerando lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, analizando el estado hídrico de una muestra de 18 individuos de algarrobos de la serie A, distribuidos en las proximidades del pozo Camar-2 a través de variables como el potencial hídrico (pre alba y mediodía) y la conductancia estomática, y su comparación con otros individuos de algarrobos pertenecientes a las series B y C. Por otro lado, se considera comparar todos los ejemplares a monitorear según su ubicación respecto a una tubería que cruza el área de estudio de norte a sur, y entre individuos regados y no regados (el riego inició en diciembre de 2022).

Se ha observado que cuando un árbol tiene estrés por falta de agua, presenta valores más negativos de potencial hídrico. Giordano et al. (2011) menciona potenciales de pre-alba de entre -1,3 y -3,8 MPa para individuos de *Prosopis flexuosa* con acceso restringido a la napa, medidos entre los meses de diciembre y marzo, siendo más negativo en la medida que se reduce la oferta de agua. Al mediodía se esperaría registrar valores más negativos de potencial hídrico, en comparación con la pre-alba, debido a que en ese momento del día se produce el mayor déficit de presión de vapor, por lo que la columna de agua queda sometida a una mayor tensión. Así mismo, la conductancia estomática también debería disminuir cuando presenta estrés hídrico, como resultado del cierre estomático para disminuir la pérdida de vapor de agua (Taiz y Zeiger, 2002).

La información que se entrega en este informe fue obtenida, analizada y discutida por el Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (Anexo 14).

Objetivo

Caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, objeto de seguimiento ambiental en el marco de la RCA 226/2006, mediante la medición de variables que permiten determinar el estado hídrico de una muestra de individuos de *Prosopis alba* (n=18), distribuidos en las proximidades del pozo Camar-2 (serie A), y comparar las muestras con individuos de las series B y C (n=10; B02, B03, B04, B09, B10, B11, B17, B20, B21 y C58), según su ubicación respecto de la tubería (n=31) y según el riego aplicado (n=31).

Objetivos específicos

- Medir el potencial hídrico Ψ (MPa) de 31 individuos en muestras vegetales (ramillas) con cámara de presión tipo Scholander en dos momentos, pre-alba y mediodía.
- Estimar la conductancia estomática g_s ($\text{mmol/m}^2 \text{ s}^{-1}$) de 31 individuos a través de un porómetro de flujo estacionario marca Meter, con muestras vegetales (hojas).
- Realizar un análisis estadístico de los resultados considerando la existencia de diferencias significativas entre: (1) individuos de la serie A y resto de los individuos de las series B y C; (2) entre individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería; y (3) entre individuos con y sin riego.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio se ubica en una zona altiplánica, en el sector oriental de la provincia de Antofagasta, II Región, Chile, en el Salar de Atacama. El estudio se realiza en la quebrada de Camar, la que tiene una superficie total de 38 km² (Ramirez, 1972). La cuenca del Salar de Atacama tiene una influencia del tipo climático “Desértico Marginal de Altura”, que se localiza por sobre los 2000 metros de altura, por lo que las temperaturas son más atenuadas, presentando una media anual de 10 °C. Las primeras lluvias se presentan en los meses de verano, debido al invierno altiplánico, y fluctúan entre 50 y 100 mm anuales. Según la estación meteorológica más cercana, la precipitación media anual registrada es de 27,8 mm, mientras que la temperatura media anual es de 13,4 °C (DGA, 2004).

En la cuenca del Salar de Atacama los suelos son muy escasos, debido a que está constituida mayoritariamente por el cuerpo salino del Salar de Atacama, identificando en la zona adyacente al salar una unidad taxonómica que corresponde al tipo Entisol. Este tipo de suelo se caracteriza por su carencia de horizontes bien desarrollados, poco evolucionados por la aridez de la zona, su alto contenido salino y pH elevado (DGA, 2004). La zona de estudio está dominada en gran medida por individuos de Algarrobo, que son parte de la base de subsistencia tradicional de la Comunidad de Camar.

Individuos medidos en estudio

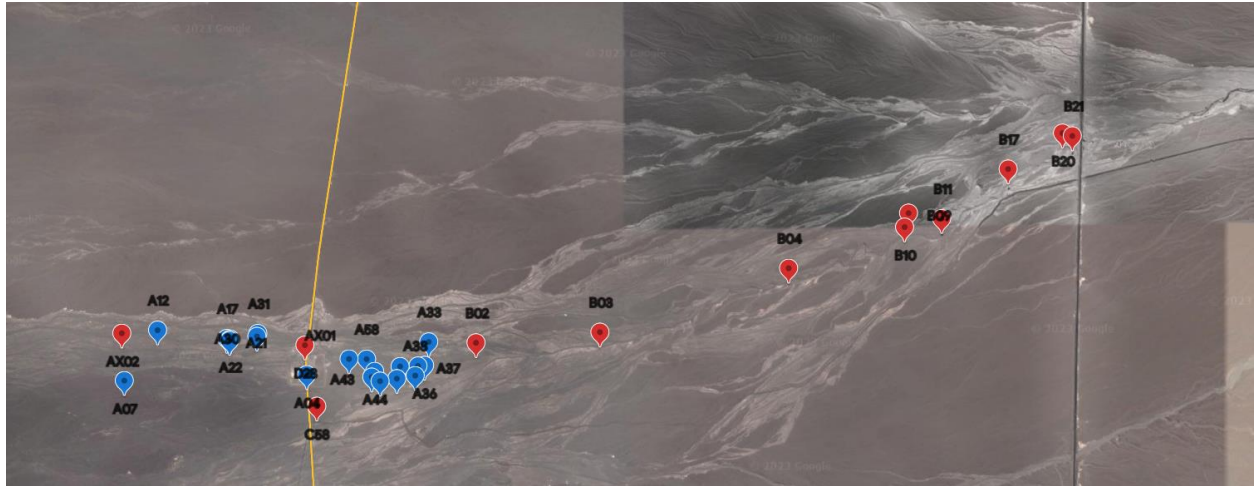
Se realizaron mediciones del estado hídrico en ejemplares de algarrobo ubicados en las proximidades del pozo Camar-2 de la empresa SQM Salar S.A., en el Salar de Atacama, específicamente en la Quebrada de Camar. Los árboles del Área de Estudio se encuentran a menos de 1,1 km del pozo Camar-2, y se consideró un grupo de 18 árboles (serie A) que corresponden a la población objetivo de este seguimiento. Estos árboles están distribuidos aguas arriba y aguas abajo respecto de la tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio, además de contar con un sistema de riego, como se indican en la Tabla 1, y cuya ubicación se puede visualizar en la Figura 1. Las mediciones fueron realizadas entre los días 25 y 27 de enero de 2023. Cabe destacar, que también se considera un grupo de ejemplares constituidos por 9 individuos, los que corresponden a árboles de la serie B, 1 individuo de la serie C, 1 individuo de la serie D y 2 individuos de la serie AX.

Tabla 1. Ubicación de los árboles, su ubicación respecto de la tubería y presencia de riego (Proyección: UTM; Datum: WGS84; zona: 19S).

N	Árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Serie	Posición c/respecto tubería	Riego
1	A04	598066	7409720	A	aguas abajo	si
2	A07	597031	7409692	A	aguas abajo	si

N	Árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Serie	Posición c/respecto tubería	Riego
3	A12	597223	7409975	A	aguas abajo	si
4	A17	597603	7409916	A	aguas abajo	si
5	A21	597632	7409915	A	aguas abajo	si
6	A22	597634	7409921	A	aguas abajo	si
7	A30	597788	7409952	A	aguas abajo	si
8	A31	597792	7409953	A	aguas abajo	si
9	A33	598759	7409902	A	aguas arriba	si
10	A36	598732	7409766	A	aguas arriba	si
11	A37	598698	7409766	A	aguas arriba	si
12	A38	598677	7409695	A	aguas arriba	si
13	A40	598574	7409693	A	aguas arriba	si
14	A41	598469	7409677	A	aguas arriba	si
15	A43	598432	7409734	A	aguas arriba	si
16	A44	598449	7409740	A	aguas arriba	si
17	A47	598581	7409758	A	aguas arriba	si
18	A58	598407	7409807	A	aguas arriba	si
19	B02	599016	7409889	B	aguas arriba	no
20	B03	599710	7409937	B	aguas arriba	no
21	B04	600761	7410288	B	aguas arriba	no
22	B09	601420	7410585	B	aguas arriba	no
23	B10	601403	7410509	B	aguas arriba	no
24	B11	601603	7410548	B	aguas arriba	no
25	B17	601972	7410806	B	aguas arriba	no
26	B20	602261	7410998	B	aguas arriba	no
27	B21	602313	7410998	B	aguas arriba	no
28	C58	598113	7409506	C	aguas arriba	no
29	D28	598055	7409879	D	aguas abajo	no
30	AX01	598305	7409804	AX	aguas arriba	si
31	AX02	597020	7409942	AX	aguas abajo	no

Figura 1. Ubicación puntos de medición variables fisiológicas.



Puntos azules: árboles con riego. Puntos rojos: árboles sin riego. Línea amarilla: tubería.

Fuente: Laboratorio SAP a partir de Geobiota, 2023.

Equipos utilizados

Variable	Materiales y/o equipos
Potencial hídrico de ramilla	Cámara de presión tipo Scholander. No requiere de calibración.
Conductancia estomática	Porómetro Meter SC-1. Certificado de calibración (Apéndice 1).

Metodología para medición del estado hídrico de las plantas

- **Potencial hídrico en pre-alba y mediodía**

El potencial hídrico se midió en pre-alba de manera de registrar la capacidad de recuperación hídrica de los árboles durante la noche (Acevedo et al., 1985). Las mediciones se realizaron con una cámara de presión (Scholander et al., 1965; May et al., 2011), que es el equipo más utilizado para una lectura rápida y sencilla, y es el mejor método disponible para condiciones de campo (García et al., 2009). Para la medición se utilizó nitrógeno gaseoso como gas presurizado, en ramillas formadas durante la temporada anterior. Se seleccionaron 2 ramillas por árbol, las que se ubicaron al interior de una bolsa plástica sellada con una capa de papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980). Cada ramilla se cortó, se desenvolvió y se introdujo inmediatamente en la cámara de presión para medir su potencial hídrico entre las 5:45 y 7:25 am.

El potencial hídrico en mediodía fue medido para registrar el estado hídrico al momento de mayor demanda de vapor de agua por parte de la atmósfera, debido a la alta radiación y mayor déficit de presión de vapor. Previo a la medición, se eligieron 2 ramillas y se envolvieron en bolsas plásticas con papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980; Williams, 2001; Sellés et al., 2002) durante 1 hora aproximadamente, para equilibrar el potencial hídrico foliar y xilemático. Posteriormente se midió el potencial hídrico entre las 12:00 y 13:00 horas, de la misma forma que se describió para la medición de pre-alba.

- **Conductancia estomática**

La transpiración corresponde al flujo de vapor de agua, desde las plantas hacia la atmósfera. Este flujo de vapor de agua ocurre desde los espacios intercelulares de la cavidad subestomática, moviéndose por difusión, a través de los estomas, hacia la atmósfera.

Los estomas son poros que están en la cara abaxial de las hojas de algarrobo, cuya apertura responde a condiciones ambientales. La conductancia estomática es un indicador de la apertura de estos, determina la facilidad con que las hojas transpiran, y su magnitud depende de la densidad, tamaño y grado de apertura de los estomas. Si los estomas se cierran, la conductancia estomática disminuirá y el flujo de vapor de agua se reducirá.

La conductancia estomática (gs) es el principal factor limitante para la fotosíntesis y es sensible al estado del agua en la planta. Evaluar con precisión el comportamiento de la conductancia estomática, sobre todo en individuos bajo estrés por déficit de agua, en zonas desérticas o xerofíticas, es esencial para entender el flujo del agua en las especies y sería un indicador de su producción y biomasa (Doudou et al., 2022).

La conductancia estomática se mide con un porómetro de flujo estacionario marca Meter, modelo SC-01, el que es calibrado por el profesional a cargo de esta medición, previo a las mediciones de cada día, respecto de las condiciones ambientales presentes en ese momento. Las mediciones se realizan entre las horas de máxima apertura estomática, en hojas adultas y sanas de exposición Este, de 10:00 a 11:30 am.

Análisis estadístico

Se realizaron comparaciones para determinar la existencia de diferencias significativas entre:

1. individuos de la serie A (N=18), que corresponden a la población objeto del seguimiento histórico en el contexto del PSAB, posicionados en las proximidades del pozo Camar-2, y el resto de los individuos de las series B y C (N=10).
2. Individuos ubicados aguas arriba (N=21, pertenecientes a las series A, B, C y AX) y aguas abajo (N=10, pertenecientes a las series A, D y AX) de la tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio.
3. Individuos con riego (N=19, pertenecientes a las series A y AX) y sin riego (N=12, pertenecientes a las series B, C, D y AX).

Cuando no se pudo realizar alguna medición de potencial hídrico o conductancia estomática, el análisis estadístico se realiza de igual manera reduciendo el N definido anteriormente.

Las variables medidas en los Algarrobos se analizaron a través de un análisis de varianza considerando como factor fijo la serie a la que corresponden (anexos 2, 3 y 4), la ubicación respecto de la tubería (anexos 5, 6 y 7) y la presencia de un sistema de riego (anexos 8, 9 y 10).

Cuando se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, se procedió a realizar una prueba de separación de medias, por medio de la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2011), al 5% de probabilidad de error lo que es igual a un nivel de confianza del 95%.

Cuando no se cumplió con el supuesto de normalidad de la varianza, se transformaron los datos a su valor inverso o recíproco (Pérez, 2018) y cuando persistió el problema se usó un análisis de varianza no paramétrico (Kruskal Wallis). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat v.2020.

RESULTADOS

Potencial hídrico en pre-alba

A continuación, se presentan los valores de potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) medidos en enero de 2023, con los promedios obtenidos en la serie A y B-C, en los árboles aguas arriba y abajo de la tubería, y en los árboles con y sin riego. Los valores de la población objetivo (serie A) fluctuaron entre -1,2 y <-4,0 MPa.

La tabla 2 muestra los valores de Ψ_{pa} en los algarrobos de la serie A cercanos al pozo Camar-2, y de los algarrobos de las series B y C. Se encontraron diferencias significativas entre estas series ($p=0,0020$), donde los árboles de las series B y C alcanzan un Ψ_{pa} más bajo (-2,98 MPa). Se puede observar que los árboles A17 y C58 no pudieron ser medidos por falta de ramillas.

Tabla 2. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) medido en enero de 2023 en algarrobos de la serie A y series B y C.

Serie	Árbol	Ψ_{pa} (MPa)
A	A04	-2,40
	A07	-2,45
	A12	-2,80
	A17	- ¹
	A21	-1,70
	A22	-1,60
	A30	<-4,00
	A31	-2,30
	A33	-2,10
	A36	-2,00
	A37	-2,05
	A38	-1,60
	A40	-1,75
	A41	-1,20
	A43	-1,75
	A44	-2,35
	A47	-1,95
	A58	-2,30
Promedio		-2,14±0,19 a
B-C	B02	-3,90
	B03	-2,60
	B04	-3,50
	B09	-2,45
	B10	-3,20

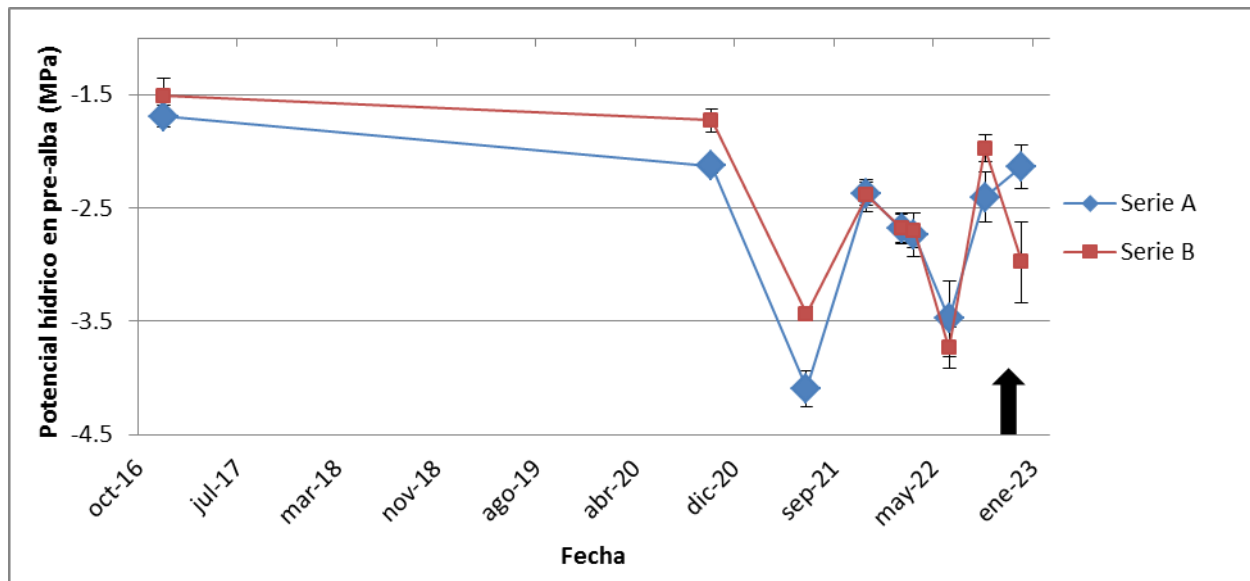
B11	-2,95
B17	-3,25
B20	-2,50
B21	-2,45
C58	- ¹

Promedio	-2,98±0,35 b
Promedio Total	-2,43±0,18

¹ No fueron medidos por falta de ramillas. Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

En la figura 2 se observa la evolución en el tiempo del potencial hídrico en pre-alba en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que en los meses de julio se presentan los valores más bajos de potencial, tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego la serie B alcanza valores superiores o similares a los de la serie A, mientras que en la última campaña, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B.

Figura 2: Evolución temporal del potencial hídrico en pre-alba desde 2017 a 2023.



Flecha negra indica el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A.

La tabla 3 muestra los valores de Ψ_{pa} en los algarrobos ubicados aguas arriba de la tubería y aguas abajo. No se encontraron diferencias significativas ($p=0,7699$), observando un Ψ_{pa} promedio de -2,35 MPa, con un Error Estándar de 0,19. Además de los árboles mencionados anteriormente (A17 y C58), el árbol AX02 tampoco pudo ser medido por falta de ramillas.

Tabla 3. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) medido en enero de 2023 en algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería.

Posición c/respecto tubería	Árbol	Ψ_{pa} (MPa)
aguas arriba	A33	-2,10
	A36	-2,00
	A37	-2,05
	A38	-1,60
	A40	-1,75
	A41	-1,20
	A43	-1,75
	A44	-2,35
	A47	-1,95
	A58	-2,30
	AX01	-1,65
	B02	-3,90
	B03	-2,60
	B04	-3,50
	B09	-2,45
	B10	-3,20
	B11	-2,95
	B17	-3,25
	B20	-2,50
	B21	-2,45
	C58	- ¹
Promedio		-2,38±0,19 a
aguas abajo	A04	-2,40
	A07	-2,45
	A12	-2,80
	A17	- ¹
	A21	-1,70
	A22	-1,60
	A30	<-4,00
	A31	-2,30
	AX02	- ¹
	D28	-1,00
Promedio		-2,28±0,44 a
Promedio Total		-2,35±0,19

¹ No fueron medidos por falta de ramillas. Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

La tabla 4 muestra los valores de Ψ_{pa} en algarrobos con dos niveles distintos de riego (con y sin riego). Se encontraron diferencias significativas ($p=0,0192$), observando un Ψ_{pa} promedio de -2,11 MPa para la condición con riego, y de -2,78 para la condición sin riego.

Tabla 4. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) medido en enero de 2023 en algarrobos con riego y sin riego.

Riego	Árbol	Ψ_{pa} (MPa)
Con Riego	A04	-2,40
	A07	-2,45
	A12	-2,80
	A17	⁻¹
	A21	-1,70
	A22	-1,60
	A30	-4,00
	A31	-2,30
	A33	-2,10
	A36	-2,00
	A37	-2,05
	A38	-1,60
	A40	-1,75
	A41	-1,20
	A43	-1,75
	A44	-2,35
	A47	-1,95
	A58	-2,30
	AX01	-1,65
Promedio		-2,11±0,18 a
Sin Riego	AX02	⁻¹
	B02	-3,90
	B03	-2,60
	B04	-3,50
	B09	-2,45
	B10	-3,20
	B11	-2,95
	B17	-3,25
	B20	-2,50
	B21	-2,45
	C58	⁻¹
	D28	-1,00
Promedio		-2,78±0,41 b

Promedio Total	-2,35±0,19
----------------	------------

¹ No fueron medidos por falta de ramillas. Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 90% según el test DGC de separación de medias.

Potencial hídrico en mediodía

A continuación, se presentan los valores de potencial hídrico de ramilla en mediodía (Ψ_{md}) medidos en enero de 2023, con los promedios obtenidos en la serie A y B-C, en los árboles aguas arriba y abajo de la tubería, y en los árboles con y sin riego. Los valores de la población objetivo (serie A) fluctuaron entre -1,9 y <-4,0 MPa.

La tabla 5 muestra los valores de Ψ_{md} en los algarrobos de la serie A cercanos al pozo Camar-2, y de los algarrobos de las series B y C. Se encontraron diferencias significativas entre estas series ($p=0,0005$), donde los árboles de las series B y C alcanzan un Ψ_{md} más bajo (-3,67 MPa).

Tabla 5. Potencial hídrico de ramilla en mediodía (Ψ_{md}) medido en enero de 2023 en algarrobos de la serie A y series B y C.

Serie	Árbol	Ψ_{md} (MPa)
A	A04	-3,30
	A07	-3,20
	A12	<-4,00
	A17	¹
	A21	-2,90
	A22	-2,80
	A30	-3,10
	A31	-2,95
	A33	-3,20
	A36	-2,85
	A37	-3,05
	A38	-2,20
	A40	-3,15
	A41	-1,90
	A43	-2,20
	A44	-2,80
	A47	-3,20
	A58	-2,70
Promedio		-2,91±0,20 a
B-C	B02	<-4,00
	B03	<-4,00
	B04	<-4,00
	B09	-2,95

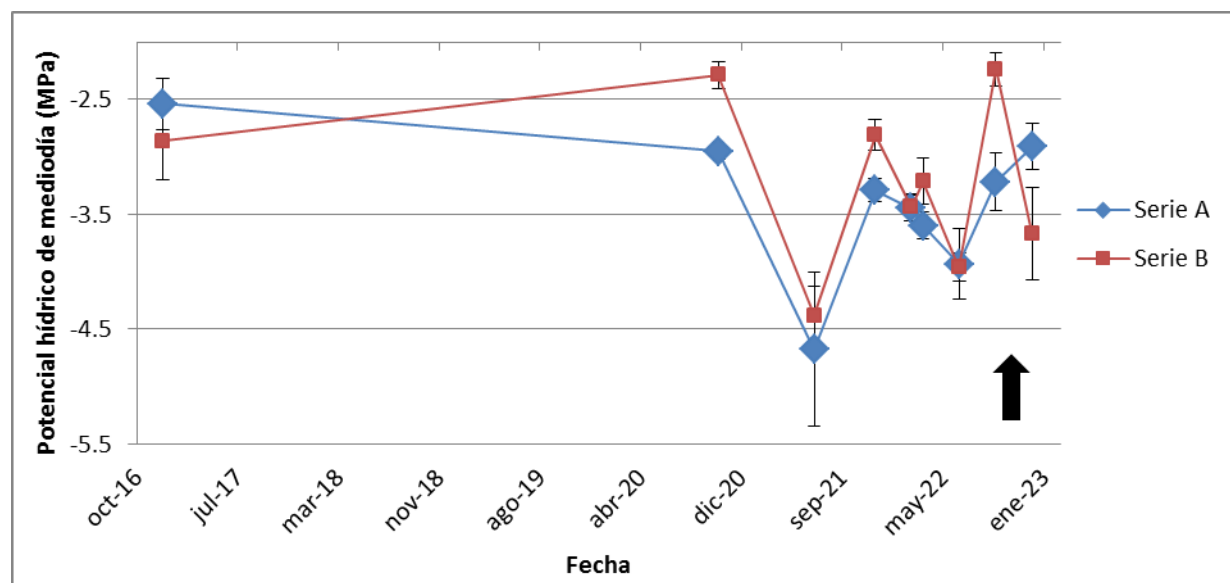
B10	<-4,00
B11	-3,80
B17	-3,50
B20	-3,40
B21	-3,35
C58	- ¹

Promedio	-3,67±0,40 b
Promedio Total	-3,17±0,20

¹ No fueron medidos por falta de ramillas. Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

En la figura 3 se observa la evolución en el tiempo del potencial hídrico de mediodía en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que en los meses de julio se presentan valores más bajos de potencial de cada año, tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego la serie B alcanza valores superiores o similares a los de la serie A, mientras que en la última campaña, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B.

Figura 3: Evolución temporal del potencial hídrico de mediodía desde 2017 a 2023.



Flecha negra indica el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A.

La tabla 6 muestra los valores de Ψ_{md} en los algarrobos ubicados aguas arriba de la tubería y aguas abajo. No se encontraron diferencias significativas ($p=0,8385$), observando un Ψ_{md} promedio de -3,11 MPa, con un Error Estándar de 0,21.

Tabla 6. Potencial hídrico de ramilla en mediodía (Ψ_{md}) medido en enero de 2023 en algarrobos ubicados aguas arriba y aguas debajo de la tubería.

Posición c/respecto tubería	Árbol	Ψ_{md} (MPa)
aguas arriba	A33	-3,20
	A36	-2,85
	A37	-3,05
	A38	-2,20
	A40	-3,15
	A41	-1,90
	A43	-2,20
	A44	-2,80
	A47	-3,20
	A58	-2,70
	AX01	-2,30
	B02	<-4,00
	B03	<-4,00
	B04	<-4,00
	B09	-2,95
	B10	<-4,00
	B11	-3,80
	B17	-3,50
	B20	-3,40
	B21	-3,35
	C58	- ¹
Promedio		-3,13±0,21 a
aguas abajo	A04	-3,30
	A07	-3,20
	A12	<-4,00
	A17	-1
	A21	-2,90
	A22	-2,80
	A30	-3,10
	A31	-2,95
	AX02	- ¹
	D28	-2,35
Promedio		-3,08±0,48 a
Promedio Total		-3,11±0,21

¹ No fueron medidos por falta de ramillas. Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

La tabla 7 muestra los valores de Ψ_{md} en algarrobos con dos niveles distintos de riego (con y sin riego). Se encontraron diferencias significativas ($p=0,0033$), donde los individuos sin riego alcanzan el valor más bajo (-3,54 MPa).

Tabla 7. Potencial hídrico de ramilla en mediodía (Ψ_{md}) medido en enero de 2023 en algarrobos con riego y sin riego.

Riego	Árbol	Ψ_{md} (MPa)
Con Riego	A04	-3,30
	A07	-3,20
	A12	-4,00
	A17	- ¹
	A21	-2,90
	A22	-2,80
	A30	-3,10
	A31	-2,95
	A33	-3,20
	A36	-2,85
	A37	-3,05
	A38	-2,20
	A40	-3,15
	A41	-1,90
	A43	-2,20
	A44	-2,80
	A47	-3,20
	A58	-2,70
	AX01	-2,30
Promedio		-2,88±0,19 a
Sin Riego	AX02	- ¹
	B02	-4,00
	B03	-4,00
	B04	-4,00
	B09	-2,95
	B10	-4,00
	B11	-3,80
	B17	-3,50
	B20	-3,40
	B21	-3,35
	C58	- ¹
	D28	-2,35

Promedio	-3,54±0,46 b
Promedio Total	-3,11±0,21

¹ No fueron medidos por falta de ramillas. Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

Conductancia estomática

A continuación, se presentan los valores de conductancia estomática (gs) medidos en enero de 2023, con los promedios obtenidos en la serie A y B-C, en los árboles aguas arriba y abajo de la tubería, y en los árboles con y sin riego. Los valores de la población objetivo (serie A) fluctuaron entre 222,23 y 528,83 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La tabla 8 muestra los valores de gs en los algarrobos de la serie A cercanos al pozo Camar-2, y de los algarrobos de las series B y C. Se encontraron diferencias significativas entre estas series ($p=0,0034$), donde los árboles de las series B y C alcanzan una gs más baja (208,06 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Tabla 8. Conductancia estomática (gs) medida en enero de 2023 en algarrobos de la serie A y series B y C.

Serie	Árbol	gs ($\text{mmol/m}^2 \text{s}^{-1}$)
A	A04	293,38
	A07	246,68
	A12	349,38
	A17	528,83
	A21	377,38
	A22	287,43
	A30	227,75
	A31	264,30
	A33	222,23
	A36	276,78
	A37	233,80
	A38	360,38
	A40	274,23
	A41	233,00
	A43	285,20
	A44	237,80
	A47	359,50
	A58	290,10
Promedio		297,12±18,38 a
B-C	B02	167,80
	B03	147,90

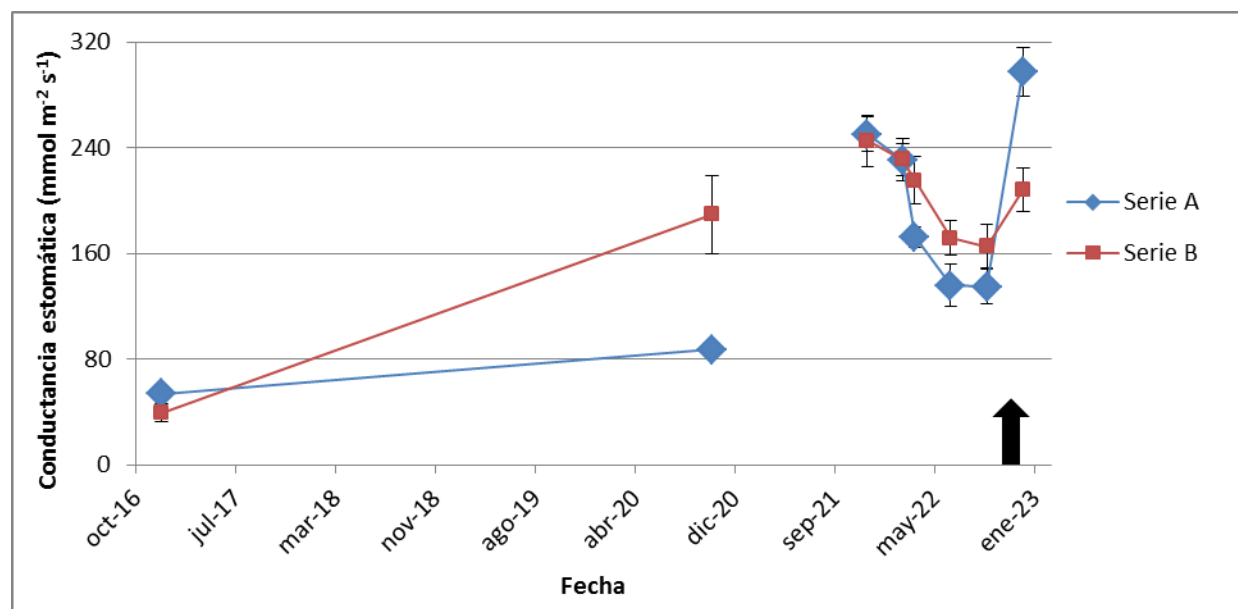
B04	172,43
B09	266,18
B10	157,85
B11	167,80
B17	250,33
B20	285,25
B21	238,28
C58	226,78

Promedio	208,06±16,86 b
Promedio Total	265,31±15,64

Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

En la figura 4 se observa la evolución en el tiempo de la conductancia estomática en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que antes de la aplicación de riego, la serie B alcanzo valores superiores o similares a los de la serie A, mientras que en la última campaña, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B.

Figura 4: Evolución temporal de la conductancia estomática desde 2017 a 2023.



Flecha negra indica el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A.

La tabla 9 muestra los valores de g_s en los algarrobos ubicados aguas arriba de la tubería y aguas abajo. No se encontraron diferencias significativas ($p=0,1242$), observando una g_s promedio de $259,78 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, con un Error Estándar de 15,00.

Tabla 9. Conductancia estomática (g_s) medida en enero de 2023 en algarrobos ubicados aguas arriba y aguas debajo de la tubería.

Posición c/respecto tubería	Árbol	gs (mmol/m ² s ¹)
aguas arriba	A33	222,23
	A36	276,78
	A37	233,80
	A38	360,38
	A40	274,23
	A41	233,00
	A43	285,20
	A44	237,80
	A47	359,50
	A58	290,10
	AX01	282,55
	B02	167,80
	B03	147,90
	B04	172,43
	B09	266,18
	B10	157,85
	B11	167,80
	B17	250,33
	B20	285,25
	B21	238,28
	C58	226,78
Promedio		244,58±13,31 a
aguas abajo	A04	293,38
	A07	246,68
	A12	349,38
	A17	528,83
	A21	377,38
	A22	287,43
	A30	227,75
	A31	264,30
	AX02	182,18
	D28	159,75
Promedio		291,70±37,86 a
Promedio Total		259,78±15,00

Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

La tabla 10 muestra los valores de gs en algarrobos con dos niveles distintos de riego (con y sin riego). Se encontraron diferencias significativas ($p=0,0007$), donde los individuos sin riego alcanzan el valor más bajo ($201,88 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Tabla 10. Conductancia estomática (gs) medida en enero de 2023 en algarrobos con riego y sin riego.

Riego	Árbol	gs ($\text{mmol/m}^2 \text{ s}^{-1}$)
Con Riego	A04	293,38
	A07	246,68
	A12	349,38
	A17	528,83
	A21	377,38
	A22	287,43
	A30	227,75
	A31	264,30
	A33	222,23
	A36	276,78
	A37	233,80
	A38	360,38
	A40	274,23
	A41	233,00
	A43	285,20
	A44	237,80
	A47	359,50
	A58	290,10
	AX01	282,55
Promedio		296,35±17,38 a
Sin Riego	AX02	182,18
	B02	167,80
	B03	147,90
	B04	172,43
	B09	266,18
	B10	157,85
	B11	167,80
	B17	250,33
	B20	285,25
	B21	238,28
	C58	226,78
	D28	159,75

Promedio	201,88±15,25 b
Promedio Total	259,78±15,00

Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

DISCUSIÓN

Los algarrobos ubicados en las proximidades del pozo Camar-2 presentan una baja cobertura y escaso a nulo crecimiento (Anexo 1. Registro fotográfico), lo cual se refleja en la inexistencia de ramillas en los árboles A17, C58 y AX02 y la presencia de solo dos ramillas medibles en los árboles A38, A41, y tres ramillas en los árboles A12, A30, A31, B02 y D28 para la realización de las mediciones de potencial hídrico. Esta falta de ramillas apropiadas para la medición se puede deber, en parte, a la escasa regeneración de ramillas, al ramoneo producido por burros que hay en la zona y a la naturaleza de la medición de los potenciales hídricos que requiere de 4 ramillas por campaña de medición (2 para Ψ_{pa} y 2 para Ψ_{md}).

En esta campaña, de los individuos de la población objetivo (serie A), el árbol A30, presenta el valor más bajo en el potencial hídrico de pre-alba ($<-4,0$ MPa), esto a pesar de que cuenta con un sistema de riego que lo mantiene con un suministro de agua. Esto se puede deber a problemas puntuales de este individuo, lo que imposibilitaría que el árbol aumente su potencial hídrico en pre-alba. Probablemente, puede existir un problema con las raíces que impediría que el árbol absorba agua desde el suelo, como un efecto de la rizósfera existente o la compactación del suelo (Darrah et al., 2006; Grzesiak et al., 2012), o también puede ser que el sistema de riego esté obstruido (gotero tapado en este árbol).

En la campaña de enero 2023 se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables fisiológicas de estado hídrico, entre las series A (cercano al pozo Camar-2) y B-C, los valores más bajos, y por ende con mayor estrés hídrico, se encuentran en las series B y C, con valores de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y g_s de $-2,98$ MPa, $-3,67$ MPa y $208,06 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Esta diferencia se debe principalmente a que los árboles de la serie A presentan un sistema de riego que los mantiene con un mejor estado hídrico, alcanzando valores de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y g_s de $-2,14$ MPa, $-2,91$ MPa y $297,12 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Al comparar los valores de estas variables fisiológicas de estado hídrico de los algarrobos ubicados aguas arriba y los algarrobos aguas abajo de la tubería que atraviesa la quebrada, no se observan diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las tres variables medidas. Por ende, el estado hídrico en ambos grupos es similar, ya que en ambos grupos existen árboles con riego y sin riego, alcanzando un valor promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y g_s de $-2,35$ MPa, $-3,11$ MPa y $259,78 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Esto indica que la presencia de la tubería no está produciendo ningún efecto en el estado hídrico de los algarrobos, y su presencia no afectaría a los algarrobos ubicados aguas abajo de la tubería.

Cuando se compara el estado hídrico de los árboles con y sin riego, se observa que los individuos sin riego tuvieron menor potencial hídrico en pre-alba y mediodía, y menor conductancia estomática, deduciendo que estos árboles están más estresados hídricamente. Esto se debe a que los algarrobos sin riego están sometidos a una condición donde la demanda atmosférica de vapor de agua no es suplida por la disponibilidad hídrica, observándose a mediodía una mayor tensión de la columna de agua al interior de las plantas sin riego y, por ende, un potencial hídrico de mediodía más negativo, que a su vez repercute en una menor conductancia estomática debido a cierre parcial de estomas (Taiz y Zeiger, 2002).

Considerando que durante la pre-alba, el potencial de la ramilla está en equilibrio con el potencial hídrico del suelo (Bucci et al., 2004), y que por lo tanto este es un indicador indirecto del estado hídrico del suelo, se puede deducir que hay diferencias en el estado hídrico del suelo entre los algarrobos con y sin riego.

Los valores observados están dentro de los rangos medidos por Giordano et al. (2011) en *Prosopis flexuosa*, sin embargo estos autores describen diferencias en potencial hídrico de pre-alba y conductancia estomática en árboles de valle y duna, que difieren en su acceso al recurso hídrico, señalando valores de entre -1,2 y -2,2 MPa de potencial de pre-alba y $250 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en conductancia estomática en árboles con acceso al recurso hídrico, y valores de entre -1,3 y -3,8 MPa de potencial de pre-alba y conductancia estomática de alrededor de $60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en árboles con acceso restringido al agua en el desierto del monte central en Argentina, esto nos da a pensar que los árboles analizados en la serie A estarían en un buen estado hídrico (al comparar el potencial hídrico en pre-alba), lo que se debería a que estos árboles están siendo regados. Por otro lado, los individuos que no pertenecen a la serie A se encuentran en una condición de déficit intermedio, ya que su potencial hídrico promedio en pre-alba es superior a los -3,0 MPa (Tablas 2 y 4). La conductancia estomática de los árboles de la serie A como los regados tienen valores aproximados a $297 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, valor incluso mayor a lo mencionado por estos autores en *Prosopis* en zonas de valle, lo que refleja un mayor intercambio gaseoso en estos árboles que los de la serie B y no regados, pese a ello el valor de conductancia estomática de estos árboles no es tan bajo como lo observado por Giordano en árboles de duna (Tablas 8 y 10).

Al analizar la dinámica temporal de las variables analizadas, se observa un patrón similar en el potencial hídrico en pre-alba y mediodía, donde los valores obtenidos en los meses de julio son los más bajos de cada año, tanto para la serie A como para la serie B. Este cambio temporal de potenciales coincide con lo evaluado en *Prosopis tamarugo*, donde se observa un patrón de menor potencial hídrico de pre-alba en la época de invierno, y un mayor valor en la época estival (SAP, 2021). Por otro lado, se observa un efecto de la aplicación del riego, ya que previo a esta aplicación, los valores de potencial hídrico y conductancia estomática de la serie B eran superiores o similares a los de la serie A. Posteriormente, iniciado el riego en los árboles de la serie A, estos alcanzaron valores superiores a la serie B en las tres variables medidas.

CONCLUSIONES

En la campaña de enero de 2023, se evidencia que:

- Existen diferencias significativas en potencial hídrico en pre-alba, mediodía y conductancia estomática entre la serie A y las series B y C, donde las series B y C presentan valores más bajos en todas las variables.
- Adicionalmente, al comparar los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería, ninguna de las tres variables medidas se diferencian, por lo que la tubería no tendría efecto en el estado hídrico de los algarrobos.
- Por otro lado, al comparar los algarrobos regados y no regados, se observa que el potencial hídrico de pre-alba y de mediodía, y la conductancia estomática es más bajo en los árboles sin riego, mostrando un estado hídrico disminuido (mayor nivel de estrés).

En relación con las mediciones anteriores, se evidencia que:

- Los valores de potencial de esta campaña son más altos que los registrados en los meses de julio, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno.
- Se observa un efecto de la aplicación del riego en los árboles de la serie A, donde alcanzan valores superiores a los de la serie B en todas las variables medidas en enero de 2023.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., Sotomayor, D. and Zenteno, V. 1985. Parámetros hídricos de tejidos foliares de *Prosopis tamarugo* Phil. In: Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*. Habit, M. (Eds). Arica, Chile. 11-15 de junio de 1984, FAO: 500.
- Allen, D. & Ort, D. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends in Plant Science*, 6(1), 36–42.
- Briner, C. 1985. Caracterización fenotípica de los biotipos de tamarugo en la Pampa del Tamarugal. In: Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*. Habit, M. (Eds). Arica, Chile. 11-15 de junio de 1984, FAO: 500.
- Bucci, S., Scholz, F., Goldstein, G., Meinzer, F., Hinojosa, J., Hoffmann, W. and Franco, A. 2004. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiology* 24: 1119-1127.
- Carevic, F. 2013. Análisis de las respuestas ecofisiológicas de progenies del género *Prosopis* con vistas a la selección temprana por su resistencia a sequías. Informe final proyecto 047/2011. Ministerio de Agricultura.
- Darrah, P., Jones, D., Kirk, G. & Roose, T. 2006. Modelling the rhizosphere: a review of methods for “upscaling” to the whole-plant scale. *European Journal of Soil Science* 57(1):13-25.
- Dirección General de Agua (DGA). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doudou, L., Ximeng, L., Benye X., Virginia H. 2020. Evaluation of method to model stomatal conductance and its use to assess biomass increase in poplar trees.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 1997. *Prosopis chilensis*, especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina. Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Sistemas Agroforestales.
- Fundación CRYCIT. 2017. Informe final sobre estudios e investigaciones que intentan explicar el estado actual de ejemplares de algarrobos, en una población ubicada en las proximidades del pozo Camar 2 de SQM, en el Salar de Atacama, Chile. Apéndice 5-C. SQM.
- García, A., Cun, R., Chong, C., Duarte, C. y Montero, L. 2009. Calibration of a hydraulic pressure chamber developed in Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18(3):24-29.

- Garrido, M., Silva, H., Franck, N., Arenas, J. and Acevedo, E. 2018. Evaluation of Morpho-Physiological Traits Adjustent of *Prosopis tamarugo* Under Long-Term Groundwater Depletion in the Hyper-Arid Atacama Desert. *Frontiers in Plant Science* 9: 453. doi:10.3389/fpls.2018.00453
- Giordano, C., Guevara, A., Boccalandro, H., Sartor, C. and Villagra, P. 2011. Water status, drought responses, and growth of *Prosopis flexuosa* trees with different Access to the water table in a warm South American desert. *Plant Ecol.* 212:1123-1134.
- Grzesiak, S., Grzesiak, M., Hura, T., Marcinska, I. & Rzepka, A. 2012. Changes in root system structure, leaf wáter potential and gas Exchange of maize and triticales seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany* 88:2-10.
- Hidroestudios. 2020. Modelación de la vitalidad y análisis cuantitativo de posibles causas de afectación en algarrobos de Camar. Apéndice 5-D. SQM.
- Ibáñez, S. 2019. Informe taxonómico de identificación de las especies de *Prosopis* en la Quebrada de Camar. Apéndice 4.7-10. SQM.
- Johnson, D., Domec, J.P., Carter, Z., Schwantes, A., Woodruff, D., McCulloh, K., et al. 2018. Co-occurring woody species have diverse hydraulic strategies and mortality rates during an extreme drought: Belowground hydraulic failure during drought. *Plant Cell and Environment* 41(3): 576-588.
- Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP). 2021. Informe Proyecto Pampa Hermosa Llamara 2021. SQM.
- May, C., Pérez, A., Ruiz, E., Ic, A. y García, A. 2011. Effect of moisture levels on growth and wáter potential of *Capsicum chinense* Jacq. and their relationship to the development of *Bemisia tabaci* Genn, *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(2011):1039-1045.
- Meyer, W.S. & Ritchie, J.T. 1980. Resistance to Water Flow in the Sorghum Plant. *Plant Physiology* 65: 33-39.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2012a. Ficha de antecedentes de especie 582, *Prosopis flexuosa* DC. Clasificación según estado de conservación.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2012b. Ficha de antecedentes de especie 578, *Prosopis alba* Grise. var. alba. Clasificación según estado de conservación.
- Pérez, L. 2018. How do we proceed to violations of parametric methods assumptions? or how to work with non-normal biological variables? *Revista del Jardín Botánico Nacional* 39: 1-12.

- Ramirez, E. 1972. Caracterización climatológica e hidrológica del Salar de Atacama. CORFO.
- Scholander, P., Bradstreet Edda, D., Hemmingsen, E. and Hammel, H. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* 148: 339–346.
- Sellés, V., Ferreyra, E. y Maldonado, P. 2022. Cámara de presión, Instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. *Aconex* 76:18-22.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2002. *Plant Physiology* (Third Edition). Sinauer Associates, Inc. Sunderland.
- Vernieri, P., Lenzi, A., Figaro, M., Tognoni, F. and Pardossi, A. 2001. How the roots contribute to the ability of *Phaseolus vulgaris* L. to cope with chilling-induced water stress. *J. Exp. Bot.*, 52(364): 2199-2206.
- Williams, L. 2001. Irrigation of winegrapes in California. *Practical Winery & Vineyard* 23:42-55.

APÉNDICES

1. Certificado de calibración de porómetro



METER

METER Group, Inc. USA
Certificate of Quality Assurance

Model	Leaf Porometer, SC-1	Date	July 16, 2021
Order Type	Controller Serial Number: LP4527	Technician	KH
Sensor Serial Number	Calibration Value		
LPS3821	2204200		

This document is to certify that the instrument indicated above has been tested and approved by the Quality Assurance department at METER Group, Inc. USA , and has shown to function properly and to be free of event flaws or defects.

Manufactured in USA

METER Group, Inc. USA
2365 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163
T 509.332.2756 F 509.332.5158
E info@metergroup.com W metergroup.com

ANEXOS

1. Registro fotográfico

Se presenta registro fotográfico de los individuos de Algarrobos obtenidos en enero de 2023.

Serie A



Árbol A04



Árbol A07



Árbol A12



Árbol A17



Árbol A21



Árbol A22



Árbol A30



Árbol A31



Árbol A33



Árbol A36



Árbol A37



Árbol A38



Árbol A40



Árbol A41



Árbol A43



Árbol A44



Árbol A47



Árbol A58

Serie B



Árbol B02



Árbol B03



Árbol B04



Árbol B09



Árbol B10



Árbol B11



Árbol B17



Árbol B20



Árbol B21

Series C, D y AX



Árbol C58



Árbol D28



Árbol AX01



Árbol AX02

2. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHpa	26	0.33	0.31	24.32

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4.18	1	4.18	11.99	0.0020
Grupo	4.18	1	4.18	11.99	0.0020
Error	8.36	24	0.35		
Total	12.54	25			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.4997

Error: 0.3483 gl: 24

Grupo Medias n E.E.

A -2.14 17 0.14 A

B -2.98 9 0.20 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	26	0.40	0.38	14.36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	3.35	1	3.35	16.15	0.0005
Grupo	3.35	1	3.35	16.15	0.0005
Error	4.98	24	0.21		
Total	8.34	25			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.3858

Error: 0.2076 gl: 24

Grupo Medias n E.E.

A -2.91 17 0.11 A

B -3.67 9 0.15 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**4. Prueba de Kruskal Wallis sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C**

Variable	Grupo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
gs	A	18	297.12	75.80	280.99	8.55	0.0034
gs	B	10	208.06	50.59	199.60		

Trat. Ranks

B 8.40 A

A 17.89 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**5. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHpa	28	3.3E-03	0.00	32.29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.05	1	0.05	0.09	0.7699
Posición c/respecto tuberí..	0.05	1	0.05	0.09	0.7699
Error	14.95	26	0.58		
Total	15.00	27			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.6745

Error: 0.5751 gl: 26

Posición c/respecto tuberí.. Medias n E.E.

aguas abajo -2.28 8 0.27 A

aguas arriba -2.38 20 0.17 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)**6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	28	1.6E-03	0.00	19.58

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.02	1	0.02	0.04	0.8385
Posición c/respecto tuberí..	0.02	1	0.02	0.04	0.8385
Error	9.66	26	0.37		
Total	9.67	27			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.5421

Error: 0.3714 gl: 26

Posición c/respecto tuberí..	Medias	n	E.E.
aguas abajo	-3.08	8	0.22 A
aguas arriba	-3.13	20	0.14 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	31	0.08	0.05	29.82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	15043.97	1	15043.97	2.51	0.1242
Posición c/respecto tuberí..	15043.97	1	15043.97	2.51	0.1242
Error	174056.29	29	6001.94		
Total	189100.26	30			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=60.1895

Error: 6001.9411 gl: 29

Posición c/respecto tuberí..	Medias	n	E.E.
aguas abajo	291.70	10	24.50 A
aguas arriba	244.58	21	16.91 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHpa	28	0.19	0.16	29.05

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.90	1	2.90	6.23	0.0192
Riego	2.90	1	2.90	6.23	0.0192
Error	12.10	26	0.47		
Total	15.00	27			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.5523

Error: 0.4655 gl: 26

Riego	Medias	n	E.E.
si	-2.11	18	0.16 A
no	-2.78	10	0.22 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

9. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	28	0.29	0.26	16.55

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.78	1	2.78	10.47	0.0033
Riego	2.78	1	2.78	10.47	0.0033
Error	6.90	26	0.27		
Total	9.67	27			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.4169

Error: 0.2652 gl: 26

Riego Medias n E.E.

si -2.88 18 0.12 A

no -3.54 10 0.16 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

10. Prueba de Kruskal Wallis sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Riego	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
gs	no	12	201.88	48.22	177.30	11.61	0.0007
gs	si	19	296.35	73.74	282.55		

Trat. Ranks

no 9.00 A

si 20.42 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

11. Resultados de Potencial hídrico en pre-alba

Árbol	Hora	Ψpa 1 (MPa)	Ψpa 2 (MPa)
A04	6:34	-2.3	-2.5
A07	6:02	-2.4	-2.5
A12	6:12	-2.8	-2.8
A17	-	-	-
A21	6:20	-1.7	-1.7
A22	6:22	-1.6	-1.6
A30	6:24	<-4.0	-
A31	6:25	-2.3	-
A33	6:19	-2.3	-1.9
A36	6:15	-1.9	-2.1
A37	6:12	-1.8	-2.3
A38	6:10	-1.6	-
A40	6:02	-1.4	-2.1
A41	6:00	-1.2	-
A43	5:54	-1.6	-1.9
A44	5:55	-2.4	-2.3
A47	6:06	-1.7	-2.2
A58	5:52	-2.1	-2.5
AX01	5:46	-1.7	-1.6
AX02	-	-	-
B02	7:12	-3.9	-
B03	7:25	-2.5	-2.7
B04	6:39	-3.5	-3.5
B09	6:25	-2.4	-2.5
B10	6:26	-3.5	-2.9

B11	6:20	-2.9	-3.0
B17	6:14	-3.2	-3.3
B20	6:05	-2.5	-2.5
B21	6:06	-2.4	-2.5
C58	-	-	-
D28	6:30	-1.0	-

12. Resultados de Potencial hídrico en mediodía

Árbol	Hora	$\Psi_{md\ 1}$ (MPa)	$\Psi_{md\ 2}$ (MPa)
A04	12:00	-3.3	-3.3
A07	12:41	-3.2	-3.2
A12	12:33	<-4.0	-
A17	-	-	-
A21	12:22	-2.9	-2.9
A22	12:23	-2.8	-2.8
A30	12:16	-3.4	-2.8
A31	12:15	-3.0	-2.9
A33	12:02	-3.0	-3.4
A36	12:06	-2.8	-2.9
A37	12:07	-2.9	-3.2
A38	12:08	-2.2	-
A40	12:11	-3.1	-3.2
A41	12:15	-1.9	-
A43	12:18	-2.2	-2.2
A44	12:16	-2.8	-2.8
A47	12:13	-3.2	-3.2
A58	12:21	-2.7	-2.7
AX01	12:23	-2.1	-2.5
AX02	-	-	-
B02	12:40	<-4.0	<-4.0
B03	12:35	<-4.0	<-4.0
B04	12:29	<-4.0	<-4.0
B09	12:21	-3.1	-2.8
B10	12:22	<-4.0	<-4.0
B11	12:19	-3.6	<-4.0
B17	12:15	-3.5	-3.5
B20	12:01	-3.4	-3.4
B21	12:00	-3.2	-3.5
C58	-	-	-
D28	12:10	-2.4	-2.3

13. Resultados de Conductancia estomática

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
A04	10:03	192.0	A07	11:21	188.0
		347.2			273.8
		326.3			266.7
		308.0			258.2
A12	11:04	402.4	A17	10:53	706.8
		252.2			436.8
		351.2			382.1
		391.7			589.6
A21	10:46	314.5	A22	10:40	197.1
		463.1			309.8
		350.0			347.1
		381.9			295.7
A30	10:31	211.8	A31	10:24	273.0
		205.0			255.5
		248.3			289.5
		245.9			239.2
A33	9:58	185.1	A36	10:05	260.6
		234.1			300.2
		175.2			247.9
		294.5			298.4
A37	10:12	236.0	A38	10:20	230.8
		256.5			483.8
		220.2			522.2
		222.5			204.7
A40	10:29	240.3	A41	10:43	205.2
		261.3			239.4
		284.8			293.6
		310.5			193.8
A43	10:57	295.4	A44	10:51	244.3
		349.6			201.5
		242.7			235.5
		253.1			269.9
A47	10:35	277.2	A58	11:04	314.4
		318.1			326.3
		411.5			296.7
		431.2			223.0

AX01	11:10	261.7	AX02	11:12	207.2
		317.0			206.6
		245.0			132.7
		306.5			182.2
B02	11:37	140.9	B03	11:23	141.4
		174.3			172.8
		183.2			126.3
		172.8			151.1
B04	11:05	183.3	B09	10:42	244.2
		166.3			352.1
		162.1			272.0
		178.0			196.4
B10	10:54	141.2	B11	10:31	179.9
		173.6			175.1
		154.7			195.4
		161.9			120.8
B17	10:15	244.2	B20	10:03	317.4
		269.9			251.0
		193.8			293.5
		293.4			279.1
B21	9:52	222.4	C58	9:54	260.6
		263.7			260.3
		227.6			204.0
		239.4			182.2
D28	10:14	128.5			
		158.2			
		178.2			
		174.1			

14. Profesionales involucrados en el desarrollo del informe

Paola Silva C.: Dra. Mg. Cs. Ing. Agr. Investigadora laboratorio SAP.

José Ayamante M.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo del análisis de datos y elaboración de informes.

Sótero Astaburuaga O.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno.

Marcelo Becerra D.: Ingeniero Agrónomo a cargo de la toma de datos en terreno.

2 Informe fisiología abril 2023



Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta



INFORME DE ESTADO HÍDRICO EN ALGARROBO DE LA QUEBRADA DE CAMAR

Abril 2023

Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta
Facultad de Ciencias Agronómicas
Universidad de Chile

Mandante:
SQM

Tabla de contenido

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	4
Objetivo	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Área de estudio	6
Individuos medidos en estudio	6
Equipos utilizados	8
Metodología para medición del estado hídrico de las plantas	8
• Potencial hídrico en pre-alba y mediodía	8
• Conductancia estomática	9
Análisis estadístico	9
RESULTADOS	11
Serie A vs Series B-C	12
Ubicación respecto de la tubería	12
Aplicación de riego	13
Evolución temporal	13
DISCUSIÓN	16
CONCLUSIONES	19
BIBLIOGRAFÍA	20
APÉNDICES	22
1. Certificado de calibración de porómetro	22
ANEXOS	23
1. Registro fotográfico	23
2. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C	27
3. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C	27
4. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C	28
5. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo	28
6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo	28
7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo	29
8. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego	29

9.	Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego	29
10.	Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego	30
11.	Resultados de Potencial hídrico en pre-alba	30
12.	Resultados de Potencial hídrico en mediodía.....	31
13.	Resultados de Conductancia estomática.....	32
14.	Profesionales involucrados en el desarrollo del informe.....	34

Tabla de figuras

Figura 1. Ubicación puntos de medición variables fisiológicas. Puntos azules: árboles con riego. Puntos rojos: árboles sin riego.....	8
Figura 2. Evolución temporal del potencial hídrico en pre-alba para árboles de las series A y B, desde 2017 a 2023.....	14
Figura 3. Evolución temporal del potencial hídrico de mediodía para árboles de las series A y B, desde 2017 a 2023.....	14
Figura 4. Evolución temporal de la conductancia estomática para árboles de las series A y B, desde 2017 a 2023.	15
Figura 5. Árbol A41 en enero de 2023 (1) y abril de 2023 (2).	16

RESUMEN

El presente informe es parte del programa de seguimiento de flora y vegetación de la quebrada de Camar indicado como parte de las acciones del Programa de Cumplimiento (Acción 24) aprobado mediante Res. Ex. N° 38/2022 por la Superintendencia de Medio Ambiente, y en el marco del procedimiento sancionatorio Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016. Se tiene por objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos que se encuentran en la Quebrada de Camar y que son parte del seguimiento ambiental en el marco de la RCA 226/2006.

Para dar cumplimiento con el objetivo propuesto, se realizó en el mes de abril 2023, una campaña de medición de variables fisiológicas asociadas al estado hídrico de los algarrobos presentes en la Quebrada de Camar en el Salar de Atacama. Se trabajó con una muestra de 18 individuos de algarrobo pertenecientes a la serie A, que están distribuidos en torno al pozo de extracción Camar-2 y que han sido monitoreados históricamente. Complementariamente, se tomaron muestras en 9 ejemplares pertenecientes a la serie B, que están alejados de dicho pozo y que se encuentran ubicados hacia el Este de los individuos objeto de estudio, 1 ejemplar de la serie C, 1 ejemplar la serie D y 2 ejemplares de la serie AX, los cuales se ubican en la zona de los árboles de la serie A. Las comparaciones realizadas fueron entre la serie A y las series B y C, según su ubicación respecto a la tubería que atraviesa la quebrada de norte a sur y respecto a si son regados o no.

Los principales resultados obtenidos para este periodo (abril 2023), indican que en la serie A se tiene mayor potencial hídrico en pre-alba y mediodía que las series B-C, mientras que, no se observan diferencias en la conductancia estomática. Por otra parte, en los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería solo se observaron diferencias en potencial hídrico en mediodía, con los valores más bajos en los árboles ubicados aguas arriba, sin embargo, al comparar con el potencial hídrico en pre-alba y la conductancia estomática, la tubería no tendría efecto en el estado hídrico de los algarrobos. Al comparar los algarrobos regados y no regados, se observan diferencias significativas en el potencial hídrico de pre-alba y de mediodía, donde los algarrobos no regados tuvieron los valores más bajos, sin observarse cambios en la conductancia estomática.

Al analizar la dinámica temporal de las variables de potencial hídrico en pre-alba, potencial hídrico de mediodía y conductancia estomática, los valores de potencial hídrico son más altos que los registrados en los meses de julio de 2021 y 2022, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno. Por otro lado, se observa un efecto de la aplicación del riego en los árboles de la serie A, donde alcanzan valores superiores a los de la serie B en todas las variables medidas desde enero de 2023.

INTRODUCCIÓN

En el borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, específicamente en el sector correspondiente a la Quebrada de Camar, existe una población de Algarrobos, identificados preliminarmente como *Prosopis flexuosa* (RCA 226/2006), que posteriormente, en base a estudios taxonómicos específicos realizados en 2019, estos mismos individuos fueron identificados como *Prosopis alba* (Ibañez, 2019). Ambas especies son freatófitas de la familia Fabaceae.

En torno a esta población de Algarrobos, la empresa SQM Salar S.A. dispuso de un pozo de extracción de agua, conocido como Camar-2 autorizado por la RCA 226/2006, definiéndose un Área de Estudio con el objeto de realizar el seguimiento a los ejemplares cercanos, correspondiendo a los Algarrobos que se encontraban en el área de influencia de este pozo. Cabe destacar que el pozo Camar-2 se encuentra actualmente fuera de operación y desmantelado, funcionando solamente como un pozo de observación.

Posteriormente, en el marco del procedimiento sancionatorio iniciado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) mediante la Resolución Exenta N°1/Rol F-041-2016 (rectificado por Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016), se considera la complementación de la información contenida en los informes del Plan de Seguimiento Ambiental Biológico (PSAB) en cuanto a la población de algarrobos cercanos al pozo (serie A) y la implementación de un programa de seguimiento de la vegetación y flora de la Quebrada de Camar. Para esto, se considera un estudio eco-fisiológico enfocado en la población de algarrobos que se desarrolla en la quebrada (Acción 24).

Considerando lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, analizando el estado hídrico de una muestra de 18 individuos de algarrobos de la serie A, distribuidos en las proximidades del pozo Camar-2 a través de las variables potencial hídrico (pre alba y mediodía) y conductancia estomática, y su comparación con otros individuos de algarrobos pertenecientes a las series B y C (n=10). Por otro lado, se considera comparar todos los ejemplares (n=31) a monitorear según su ubicación respecto a una tubería que cruza el área de estudio de norte a sur, y entre individuos regados y no regados (el riego inició en diciembre de 2022).

Se ha observado que cuando un árbol tiene estrés por falta de agua, presenta valores más negativos de potencial hídrico. Giordano et al. (2011) menciona potenciales de pre-alba de entre -1,3 y -3,8 MPa para individuos de *Prosopis flexuosa* con acceso restringido a la napa, medidos entre los meses de diciembre y marzo, siendo más negativo en la medida que se reduce la oferta de agua. Al mediodía se esperaría registrar valores más negativos de potencial hídrico, en comparación con la pre-alba, debido a que en ese momento del día se produce el mayor déficit de presión de vapor, por lo que la columna de agua queda sometida a una mayor tensión. Así mismo, la conductancia estomática también debería disminuir cuando presenta estrés hídrico, como resultado del cierre estomático para disminuir la pérdida de vapor de agua (Taiz y Zeiger, 2002).

La información que se entrega en este informe fue obtenida, analizada y discutida por el Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (Anexo 14).

Objetivo

Caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, objeto de seguimiento ambiental en el marco de la RCA 226/2006, mediante la medición de variables que permiten determinar el estado hídrico de una muestra de ($n=18$) individuos de *Prosopis alba*, distribuidos en las proximidades del pozo Camar-2 (serie A), y comparar las muestras con individuos de otras series (B y C, $n=10$), según su ubicación respecto de la tubería y según el riego aplicado.

Objetivos específicos

- Medir el potencial hídrico Ψ (MPa) de 31 individuos en muestras vegetales (ramillas) con cámara de presión tipo Scholander en dos momentos, pre-alba y mediodía.
- Estimar la conductancia estomática g_s ($\text{mmol/m}^2 \text{ s}^{-1}$) de 31 individuos a través de un porómetro de flujo estacionario, con muestras vegetales (hojas).
- Realizar un análisis estadístico de los resultados considerando la existencia de diferencias significativas entre: (1) individuos de la serie A y resto de los individuos de las series B y C; (2) entre individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería; y (3) entre individuos con y sin riego.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio se ubica en una zona altiplánica, en el sector oriental de la provincia de Antofagasta, II Región, Chile, en el Salar de Atacama (Figura 1). El estudio se realiza en la quebrada de Camar, la que tiene una superficie total de 38 km² (Ramírez, 1972). La cuenca del Salar de Atacama tiene una influencia del tipo climático “Desértico Marginal de Altura”, que se localiza por sobre los 2000 metros de altura, por lo que las temperaturas son más atenuadas, presentando una media anual de 10 °C. Las primeras lluvias se presentan en los meses de verano, debido al invierno altiplánico, y fluctúan entre 50 y 100 mm anuales (DGA, 2004). Según la estación meteorológica más cercana, la precipitación media anual registrada es de 27,8 mm, mientras que la temperatura media anual es de 13,4 °C (DGA, 2004).

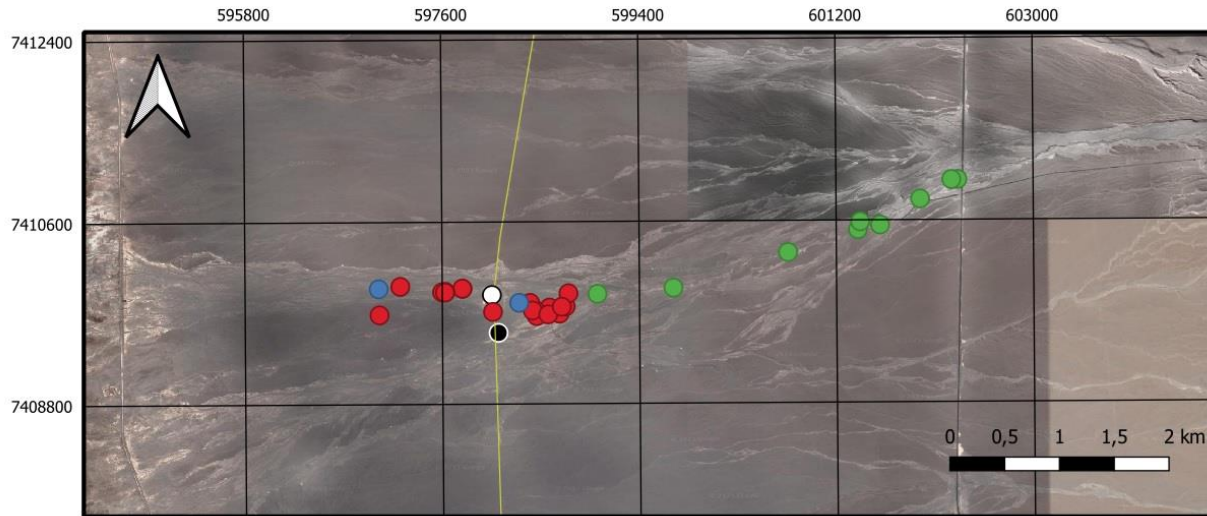
En la cuenca del Salar de Atacama los suelos son muy escasos, debido a que está constituida mayoritariamente por el cuerpo salino del Salar de Atacama, identificando en la zona adyacente al salar una unidad taxonómica que corresponde al tipo Entisol. Este tipo de suelo se caracteriza por su carencia de horizontes bien desarrollados, poco evolucionados por la aridez de la zona, su alto contenido salino y pH elevado (DGA, 2004). La zona de estudio está dominada en gran medida por individuos de Algarrobo, que son parte de la base de subsistencia tradicional de la Comunidad de Camar.

Individuos medidos en estudio

Se realizaron mediciones del estado hídrico en ejemplares de algarrobo ubicados en las proximidades del pozo Camar-2 (actualmente fuera de operación desde el año 2018 y desmantelado, funcionando solamente como un pozo de observación) de la empresa SQM Salar S.A., en el Salar de Atacama, específicamente en la Quebrada de Camar. Los árboles del Área de Estudio se encuentran a menos de 1,1 km del pozo Camar-2, y se consideró un grupo de 18 árboles (serie A) que corresponden a la población objetivo de este seguimiento. Estos árboles están distribuidos aguas arriba y aguas abajo respecto de la tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio, además cuenta con un sistema de riego, como se indican en la Tabla 1, y cuya ubicación se puede visualizar en la Figura 1. Las mediciones fueron realizadas entre los días 25 y 27 de abril de 2023. Cabe destacar, que también se considera un grupo de ejemplares constituidos por 9 individuos, los que corresponden a árboles de la serie B, 1 individuo de la serie C, 1 individuo de la serie D y 2 individuos de la serie AX.

Tabla 1. Ubicación de los árboles, su ubicación respecto de la tubería y presencia de riego (Proyección: UTM; Datum: WGS84; zona: 19S).

N	Árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Serie	Posición c/respecto tubería	Riego
1	A04	598066	7409720	A	aguas abajo	si
2	A07	597031	7409692	A	aguas abajo	si
3	A12	597223	7409975	A	aguas abajo	si
4	A17	597603	7409916	A	aguas abajo	si
5	A21	597632	7409915	A	aguas abajo	si
6	A22	597634	7409921	A	aguas abajo	si
7	A30	597788	7409952	A	aguas abajo	si
8	A31	597792	7409953	A	aguas abajo	si
9	A33	598759	7409902	A	aguas arriba	si
10	A36	598732	7409766	A	aguas arriba	si
11	A37	598698	7409766	A	aguas arriba	si
12	A38	598677	7409695	A	aguas arriba	si
13	A40	598574	7409693	A	aguas arriba	si
14	A41	598469	7409677	A	aguas arriba	si
15	A43	598432	7409734	A	aguas arriba	si
16	A44	598449	7409740	A	aguas arriba	si
17	A47	598581	7409758	A	aguas arriba	si
18	A58	598407	7409807	A	aguas arriba	si
19	B02	599016	7409889	B	aguas arriba	no
20	B03	599710	7409937	B	aguas arriba	no
21	B04	600761	7410288	B	aguas arriba	no
22	B09	601420	7410585	B	aguas arriba	no
23	B10	601403	7410509	B	aguas arriba	no
24	B11	601603	7410548	B	aguas arriba	no
25	B17	601972	7410806	B	aguas arriba	no
26	B20	602261	7410998	B	aguas arriba	no
27	B21	602313	7410998	B	aguas arriba	no
28	C58	598113	7409506	C	aguas arriba	no
29	D28	598055	7409879	D	aguas abajo	no
30	AX01	598305	7409804	AX	aguas arriba	si
31	AX02	597020	7409942	AX	aguas abajo	no



DISTRIBUCIÓN DE INDIVIDUOS DE ALGARROBOS PARA ESTUDIO FISIOLÓGICO DE ESTADO HÍDRICO EN EL BORDE ESTE DEL SALAR DE ATACAMA



LEYENDA

- Ejemplares de *Prosopis alba* de la serie A
- Ejemplares de *Prosopis alba* de la serie B
- Ejemplares de *Prosopis alba* de la serie C
- Ejemplares de *Prosopis alba* de la serie D
- Ejemplares de *Prosopis alba* de la serie AX

— Tubería



Fuente: Laboratorio SAP a partir de Geobiota, 2023.

Figura 1. Ubicación puntos de medición variables fisiológicas.

Equipos utilizados

Para la medición de potencial hídrico (en pre-alba y mediodía) se utilizó una cámara de presión tipo Scholander, la que no requiere calibración. Por otro lado, para la medición de conductancia estomática, se utilizó un porómetro marca Meter SC-1, el que se calibra previo a realizar las mediciones y cuyo certificado de calibración se presenta en el apéndice 1.

Metodología para medición del estado hídrico de las plantas

• Potencial hídrico en pre-alba y mediodía

El potencial hídrico se midió en pre-alba de manera de registrar la capacidad de recuperación hídrica de los árboles durante la noche (Acevedo et al., 1985). Las mediciones se realizaron con una cámara de presión (Scholander et al., 1965; May et al., 2011), que es el equipo más utilizado

para una lectura rápida y sencilla, y es el mejor método disponible para condiciones de campo (García et al., 2009). Para la medición se utilizó nitrógeno gaseoso como gas presurizado, en ramillas formadas durante la temporada anterior. Se seleccionaron 2 ramillas por árbol, las que se ubicaron al interior de una bolsa plástica sellada con una capa de papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980). Cada ramilla se cortó, se desenvolvió y se introdujo inmediatamente en la cámara de presión para medir su potencial hídrico entre las 5:45 y 7:25 am.

El potencial hídrico en mediodía fue medido para registrar el estado hídrico al momento de mayor demanda de vapor de agua por parte de la atmósfera, debido a la alta radiación y mayor déficit de presión de vapor. Previo a la medición, se eligieron 2 ramillas y se envolvieron en bolsas plásticas con papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980; Williams, 2001; Sellés et al., 2002) durante 1 hora aproximadamente, para equilibrar el potencial hídrico foliar y xilemático. Posteriormente se midió el potencial hídrico entre las 12:00 y 13:30 horas, de la misma forma que se describió para la medición de pre-alba.

- **Conductancia estomática**

La transpiración corresponde al flujo de vapor de agua, desde las plantas hacia la atmósfera. Este flujo de vapor de agua ocurre desde los espacios intercelulares de la cavidad subestomática, moviéndose por difusión, a través de los estomas, hacia la atmósfera.

Los estomas son poros que están en la cara abaxial de las hojas de algarrobo, cuya apertura responde a condiciones ambientales. La conductancia estomática es un indicador de la apertura de estos, determina la facilidad con que las hojas transpiran, y su magnitud depende de la densidad, tamaño y grado de apertura de los estomas (METER Group, 2020). Si los estomas se cierran, la conductancia estomática disminuirá y el flujo de vapor de agua se reducirá.

La conductancia estomática (gs) es el principal factor limitante para la fotosíntesis y es sensible al estado del agua en la planta. Evaluar con precisión el comportamiento de la conductancia estomática, sobre todo en individuos bajo estrés por déficit de agua, en zonas desérticas o xerofíticas, es esencial para entender el flujo del agua en las especies y sería un indicador de su producción y biomasa (Doudou et al., 2020), ya que se produce un intercambio gaseoso con la salida hacia la atmósfera de vapor de agua y la captación de CO₂ por las plantas necesario para la producción de biomasa (Carvajal y Andrade, 2020).

La conductancia estomática se mide con un porómetro de flujo estacionario marca Meter, modelo SC-01, el que es calibrado por el profesional a cargo de esta medición, previo a las mediciones de cada día, respecto de las condiciones ambientales presentes en ese momento. Las mediciones se realizan entre las horas de máxima apertura estomática, en hojas adultas y sanas de exposición Este, de 10:00 a 11:30 am.

Análisis estadístico

Se realizaron comparaciones para determinar la existencia de diferencias significativas entre:

1. Individuos de la serie A (N=18), que corresponden a la población objeto del seguimiento histórico en el contexto del PSAB, posicionados en las proximidades del pozo Camar-2, y el resto de los individuos de las series B y C (N=10).
2. Individuos ubicados aguas arriba (N=21, pertenecientes a las series A, B, C y AX) y aguas abajo (N=10, pertenecientes a las series A, D y AX) de la tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio.
3. Individuos con riego (N=19, pertenecientes a las series A y AX) y sin riego (N=12, pertenecientes a las series B, C, D y AX).

Cuando no se pudo realizar alguna medición de potencial hídrico o conductancia estomática, el análisis estadístico se realiza de igual manera reduciendo el N definido anteriormente.

Las variables medidas en los Algarrobos se analizaron a través de un análisis de varianza considerando como factor fijo la serie a la que corresponden (anexos 2, 3 y 4), la ubicación respecto de la tubería (anexos 5, 6 y 7) y la presencia de un sistema de riego (anexos 8, 9 y 10).

Cuando se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, se procedió a realizar una prueba de separación de medias, por medio de la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2011), al 5% de probabilidad de error lo que es igual a un nivel de confianza del 95%.

Cuando no se cumplió con el supuesto de normalidad de la varianza, se transformaron los datos a su valor inverso o recíproco y cuando persistió el problema se usó un análisis de varianza no paramétrico (Kruskal Wallis) (Pérez, 2018). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat v.2020.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los valores de potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) y mediodía (Ψ_{md}), y conductancia estomática (gs) medidos en abril de 2023 (tabla 2). Los valores de la población objetivo (serie A) fluctuaron entre -0,9 y -3,9 MPa en Ψ_{pa} , entre -1,8 y -3,1 MPa en Ψ_{md} , y entre 152,43 y 390,03 mmol m⁻² s⁻¹ en gs.

Tabla 2. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) medidos en abril de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Árbol	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Serie	Posición*	Riego
A04	-1,80	-2,10	265,25	A	Abajo	Si
A07	-1,40	-2,45	152,43	A	Abajo	Si
A12	-2,10	-3,00	252,25	A	Abajo	Si
A17	-	-	223,45	A	Abajo	Si
A21	-1,10	-1,80	279,28	A	Abajo	Si
A22	-	-	186,95	A	Abajo	Si
A30	-	-2,80	218,95	A	Abajo	Si
A31	-1,70	-	301,58	A	Abajo	Si
A33	-1,85	-3,00	232,13	A	Arriba	Si
A36	-1,60	-2,95	259,08	A	Arriba	Si
A37	-1,70	-2,80	286,68	A	Arriba	Si
A38	-	-1,80	329,58	A	Arriba	Si
A40	-1,85	-2,80	263,08	A	Arriba	Si
A41	-3,90	-	295,20	A	Arriba	Si
A43	-0,90	-2,70	390,03	A	Arriba	Si
A44	-2,30	-3,10	251,80	A	Arriba	Si
A47	-1,60	-2,65	318,95	A	Arriba	Si
A58	-1,80	-2,20	314,48	A	Arriba	Si
B02	-1,40	-3,90	219,78	B	Arriba	No
B03	-1,95	-2,85	160,23	B	Arriba	No
B04	-2,20	-3,90	166,40	B	Arriba	No
B09	-2,00	-2,90	321,40	B	Arriba	No
B10	-3,40	-4,15	122,05	B	Arriba	No
B11	-2,65	-4,00	156,93	B	Arriba	No
B17	-2,50	-2,75	265,78	B	Arriba	No
B20	-2,15	-3,10	336,30	B	Arriba	No
B21	-2,55	-3,40	233,95	B	Arriba	No
C58	-	-	276,55	C	Arriba	No
D28	-2,60	-1,80	374,13	D	Abajo	No

Árbol	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Serie	Posición*	Riego
AX01	-2,20	-2,80	293,33	AX	Arriba	Si
AX02	-1,80	-2,90	286,43	AX	Abajo	No

*: Posición respecto de la tubería. -: Árboles no medidos por falta de ramillas.

En esta campaña los árboles A17, A22, A30, A38 y C58 no pudieron ser medidos en pre-alba por falta de ramillas. Por otro lado, al mediodía los árboles A17, A22, A31, A41 y C58 no pudieron ser medidos por el mismo motivo.

Comparación de algarrobos de la Serie A y Series B-C

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en abril de 2023 para los árboles de la serie A y de las series B-C (tabla 3). Se encontraron diferencias significativas al comparar los potenciales hídricos en pre-alba ($p=0,0180$) y mediodía ($p=0,0027$), donde los árboles de las series B-C alcanzan el valor más bajo de Ψ_{pa} (-2,31 MPa) y Ψ_{md} (-3,44 MPa). Al comparar la conductancia estomática, no se encontraron diferencias entre las series ($p=0,1001$), alcanzando un valor promedio de $252,87 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un error estándar de 12,19.

Tabla 3. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para serie A y series B-C, medidos en abril de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Serie	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
A	-1,83±0,19 a	-2,58±0,12 a	267,84±13,04 a
B-C	-2,31±0,19 b	-3,44±0,19 b	225,94±23,32 a
Promedio	-2,02±0,14	-2,92±0,13	252,87±12,19

Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test Kruskal Wallis (Ψ_{pa} y Ψ_{md}) y DGC (gs) de separación de medias.

Comparación de algarrobos según su ubicación respecto de la tubería

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en abril de 2023 para los árboles ubicados aguas arriba de la tubería y aguas abajo (tabla 4). Se encontraron diferencias significativas solo en potencial hídrico de mediodía ($p=0,0220$), donde los árboles ubicados aguas arriba de la tubería alcanzan el valor más bajo (-3,04 MPa). Al comparar el potencial hídrico en pre-alba, no se encontraron diferencias entre ambos grupos de árboles ($p=0,2343$), alcanzando un valor promedio de -2,04 MPa, con un error estándar de 0,13. Por otra parte, la conductancia estomática tampoco mostró diferencias respecto de la ubicación de los árboles ($p=0,7700$), alcanzando un valor promedio de $259,17 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un error estándar de 11,75.

Tabla 4. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería, medidos en abril de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Ubicación respecto de la tubería	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Aguas arriba	-2,13±0,16 a	-3,04±0,14 b	261,60±14,85 a
Aguas abajo	-1,79±0,18 a	-2,41±0,19 a	254,07±19,86 a
Promedio	-2,04±0,13	-2,87±0,13	259,17±11,75

Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

Comparación de algarrobos con y sin riego

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en abril de 2023 para los árboles con y sin riego (tabla 5). Se encontraron diferencias significativas tanto en el potencial hídrico en pre-alba ($p=0,0207$) como en el de mediodía ($p=0,0081$), donde los árboles sin riego alcanzan el valor más bajo de Ψ_{pa} (-2,29 MPa) y Ψ_{md} (-3,24 MPa). Al comparar la conductancia estomática, no se encontraron diferencias respecto del riego ($p=0,2916$), alcanzando un valor promedio de 259,17 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un error estándar de 11,75.

Tabla 5. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para individuos con y sin riego, medidos en abril de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Riego	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Con riego	-1,85±0,18 a	-2,60±0,11 a	269,18±12,40 a
Sin riego	-2,29±0,16 b	-3,24±0,21 b	243,33±23,18 a
Promedio	-2,04±0,13	-2,87±0,13	259,17±11,75

Valores Promedio corresponden a las medias \pm 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test Kruskal Wallis (Ψ_{pa}) y DGC (Ψ_{md} y gs) de separación de medias.

Evolución temporal

En la figura 2 se observa la evolución en el tiempo (desde noviembre de 2016 a la actualidad) del potencial hídrico en pre-alba en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que en los meses de julio (2021 y 2022) se presentan los valores más bajos de potencial (inferiores a -3,0 MPa), tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego (diciembre 2022) la serie B alcanza valores superiores o similares a los de la serie A, mientras que, en las últimas dos campañas, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B.

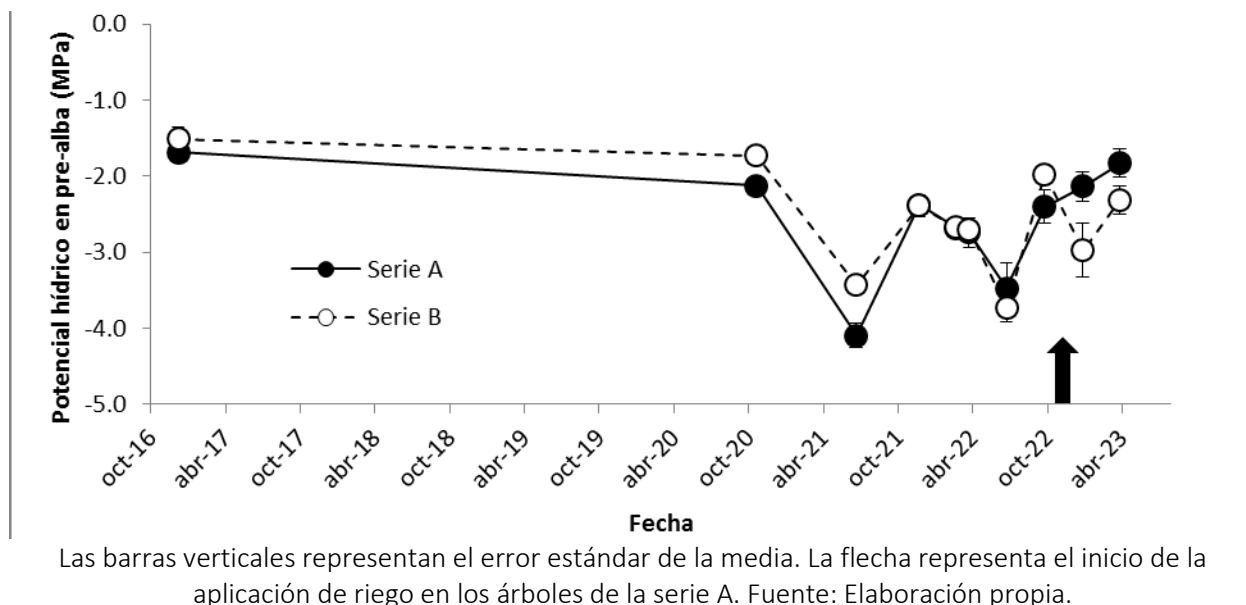


Figura 2. Evolución temporal del potencial hídrico en pre-alba para árboles de las series A y B, desde 2017 a 2023.

En la figura 3 se observa la evolución en el tiempo del potencial hídrico de mediodía en los árboles de la serie A y B. Al igual que en el potencial hídrico en pre-alba, se aprecia que en los meses de julio (2021 y 2022) se presentan valores más bajos de potencial de cada año (en 2021 alcanzan valores inferiores a los -4,0 MPa), tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego la serie B alcanza valores superiores o similares a los de la serie A, mientras que, en las últimas dos campañas, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B.

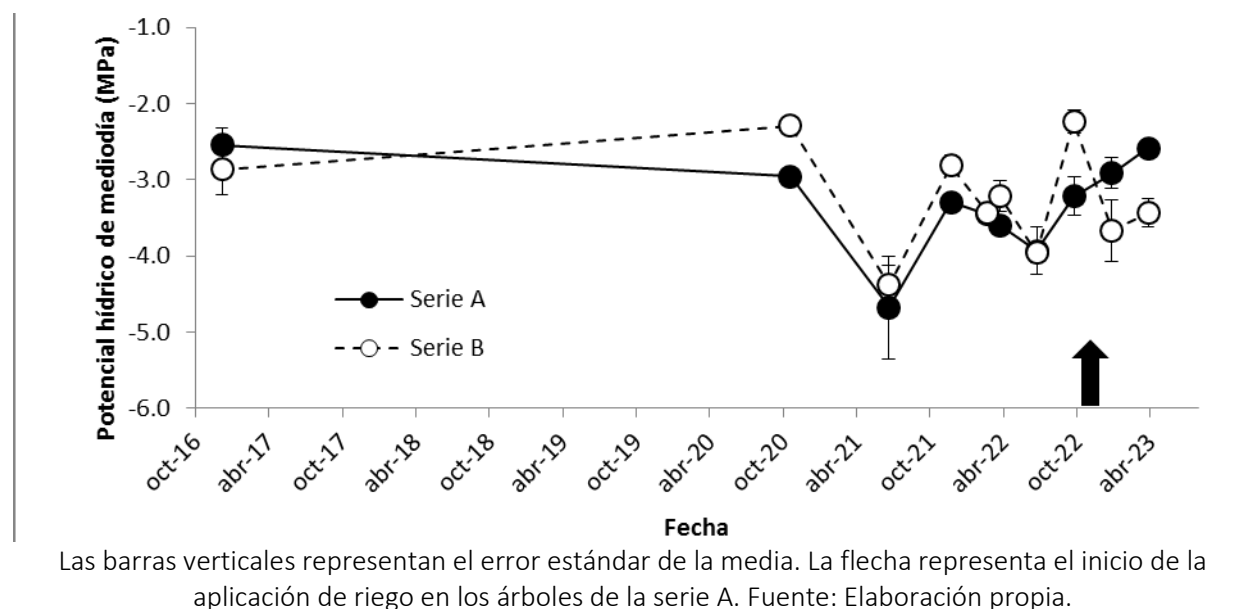
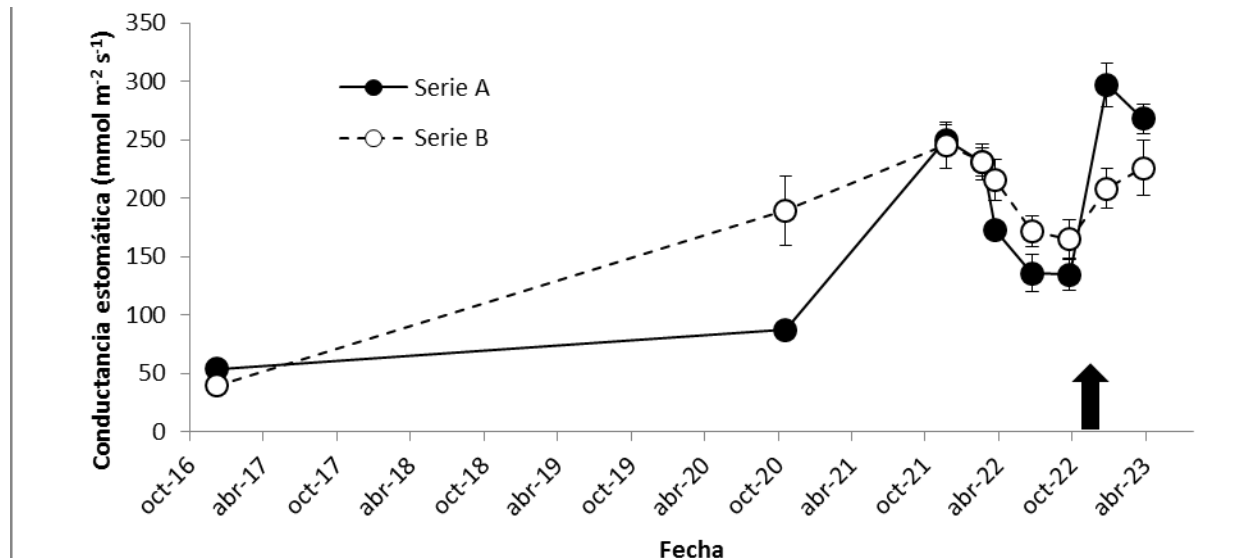


Figura 3. Evolución temporal del potencial hídrico de mediodía para árboles de las series A y B, desde 2017 a 2023.

En la figura 4 se observa la evolución en el tiempo (desde noviembre de 2016 a la actualidad) de la conductancia estomática en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que antes de la aplicación de riego, la serie B alcanzó valores superiores o similares a los de la serie A (durante 2021 y 2022), mientras que, en las últimas dos campañas, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Evolución temporal de la conductancia estomática para árboles de las series A y B, desde 2017 a 2023.

DISCUSIÓN

En abril de 2023 se observaron Algarrobos ubicados en las proximidades del pozo Camar-2 que presentan una baja cobertura y/o escaso a nulo crecimiento (Anexo 1. Registro fotográfico), lo cual se refleja en la inexistencia de ramillas en los árboles A17, A22 y C58, y la presencia de solo una ramilla medible en los árboles A30, A31, A38 y A41 para la realización de las mediciones de potencial hídrico. Esta falta de ramillas apropiadas para la medición se puede deber, en parte, a la escasa regeneración de ramillas, al ramoneo producido por burros que hay en la zona y a la naturaleza destructiva de la medición de los potenciales hídricos que corta 4 ramillas por campaña de medición (2 para Ψ_{pa} y 2 para Ψ_{md}).

En esta campaña, de los individuos de la población objetivo (serie A), el árbol A41 (Figura 5) presenta el valor más bajo en el potencial hídrico de pre-alba (-3,9 MPa). Pese a que este árbol cuenta con un sistema de riego que lo mantiene con un suministro de agua, su Ψ_{pa} es más bajo que en los individuos sin riego. Esto se puede deber a problemas puntuales de este individuo, lo que imposibilitaría que el árbol aumente su potencial hídrico en pre-alba. Probablemente, puede existir un problema con las raíces que impediría que el árbol absorba agua desde el suelo, como un efecto de la rizósfera existente o la compactación del suelo (Darrah et al., 2006; Grzesiak et al., 2012).



Figura 5. Árbol A41 en enero de 2023 (1) y abril de 2023 (2).

En esta campaña se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables fisiológicas de potencial hídrico, entre las series A (cercano al pozo Camar-2) y B-C. Los valores más bajos, y por ende más estresados hídricamente, se encuentran en las series B- C, con valores de Ψ_{pa} y Ψ_{md} de -2,31 y -3,44 MPa, respectivamente. Esta diferencia se debe principalmente a que los árboles de la serie A presentan un sistema de riego, que los mantiene con un mejor estado hídrico, alcanzando valores de Ψ_{pa} y Ψ_{md} de -1,83 y -2,58 MPa, respectivamente.

Es así como, al comparar el estado hídrico de los árboles con y sin riego, se observa la misma diferencia, donde los individuos sin riego tuvieron menor potencial hídrico en pre-alba (-2,29 MPa) y mediodía (-3,24 MPa), lo que indicaría que estos árboles tienen un estado hídrico disminuido. Esto se debería a que los algarrobos sin riego están sometidos a una condición

donde la demanda atmosférica de vapor de agua no es suplida completamente por la disponibilidad hídrica, observándose a mediodía una mayor tensión de la columna de agua al interior de las plantas sin riego y, por ende, un potencial hídrico de mediodía más negativo. Así mismo, considerando que durante la pre-alba el potencial de la ramilla está en equilibrio con el potencial hídrico del suelo (Bucci et al., 2004), y que por lo tanto este es un indicador indirecto del estado hídrico del suelo, se puede deducir que hay diferencias en el estado hídrico del suelo entre los algarrobos con y sin riego.

Al comparar los valores de potencial hídrico de los algarrobos ubicados aguas arriba y los algarrobos aguas abajo de la tubería que atraviesa la quebrada, solo se observan diferencias estadísticamente significativas al mediodía. Donde los valores más bajos están en los algarrobos ubicados aguas arriba de la tubería (-3,04 MPa). Esto se puede deber a un mejoramiento del estado hídrico en el último trimestre de los árboles ubicados aguas abajo, donde el 80% de los individuos han sido regados en los últimos 4 meses, a diferencia de los ubicados aguas arriba que solo el 50% de los árboles ha sido regado en el mismo periodo, expresando su diferencia al mediodía cuando es mayor la tensión sobre la columna de agua. Sin embargo, que no haya diferencias también en pre-alba, que se debería a que ambos grupos de árboles logran recuperar su estado hídrico durante la noche y reponer su potencial hídrico promedio de forma similar, indicaría que la presencia de la tubería no está produciendo un efecto significativo en el estado hídrico de los algarrobos (conductancia estomática y potencial hídrico de pre-alba), y su presencia no afectaría a los algarrobos ubicados aguas abajo de la tubería.

Por otra parte, al observar la conductancia estomática no se encontraron diferencias entre las series A y B-C, ni entre individuos con y sin riego, ni entre individuos aguas arriba y abajo de la tubería, contrario a lo observado en la campaña pasada (enero 2023), donde los individuos de la serie B-C y sin riego alcanzaron valores más bajos. Esta ausencia de diferencias se debe a que en esta campaña los árboles con riego (serie A) disminuyeron su valor de conductancia estomática, mientras que los árboles sin riego aumentaron su valor, respecto de la campaña anterior.

Los valores observados en esta campaña están dentro de los rangos medidos por Giordano et al. (2011) en *Prosopis flexuosa*, los que describen diferencias en potencial hídrico de pre-alba y conductancia estomática en árboles que difieren en su acceso al recurso hídrico. Estos autores señalan para árboles con acceso al recurso hídrico valores entre -1,2 y -2,2 MPa de potencial de pre-alba y 250 mmol m⁻² s⁻¹ en conductancia estomática, y para árboles con acceso restringido al agua señalan valores de entre -1,3 y -3,8 MPa de potencial de pre-alba y conductancia estomática de alrededor de 60 mmol m⁻² s⁻¹. Esto nos da a pensar que los árboles analizados en la serie A estarían en un buen estado hídrico (al comparar el potencial hídrico en pre-alba), lo que se debería a que estos árboles están siendo regados. Por otro lado, los individuos que no pertenecen a la serie A se encuentran en una condición de déficit hídrico leve, ya que su potencial hídrico promedio en pre-alba es inferior a los -2,2 MPa (-2,31 y -2,28 MPa para algarrobos de las series B-C y algarrobos sin riego, respectivamente). Por otra parte, la conductancia estomática de los árboles de la serie A como los regados tienen valores de 267,8 mmol m⁻² s⁻¹, valor superior a lo mencionado por Giordano et al. (2011) en *Prosopis* con acceso al agua. Mientras, en el resto de los árboles, si bien su valor es inferior a los 250 mmol m⁻² s⁻¹, no se diferencia significativamente y no es tan bajo como lo observado por Giordano en árboles con

acceso restringido al agua (225,9 y 247,2 mmol m⁻² s⁻¹ para algarrobos de las series B-C y algarrobos sin riego, respectivamente). Como ya se señaló el déficit hídrico se produce cuando la demanda hídrica es mayor que el suministro hídrico, en este sentido hay que considerar que la demanda depende de las condiciones atmosféricas como de la magnitud de área foliar que se encuentra transpirando, si esta se reduce como es el caso de la mayoría de los individuos del estudio la demanda será menor, situación que puede explicar que los valores fisiológicos de potenciales hídricos y conductancia estomática estén dentro de rangos de déficit hídrico leve.

Al analizar la dinámica temporal de las variables medidas, se observa un patrón similar en el potencial hídrico en pre-alba y mediodía, donde los valores obtenidos en los meses de julio son los más bajos de cada año, tanto para la serie A como para la serie B. Este cambio temporal de potenciales coincide con lo evaluado en *Prosopis tamarugo*, donde se observa un patrón de menor potencial hídrico de pre-alba en la época de invierno, y un mayor valor en la época estival (SAP, 2021). Por otro lado, se observa un efecto de la aplicación del riego, ya que previo a esta aplicación, los valores de potencial hídrico y conductancia estomática de la serie B eran superiores o similares a los de la serie A. Posteriormente, iniciado el riego en los árboles de la serie A, estos alcanzaron valores superiores a la serie B en las tres variables medidas.

CONCLUSIONES

En la campaña de abril de 2023, se evidencia que:

- Los algarrobos de la serie A muestran un mejor estado hídrico que los algarrobos de las series B-C, sin embargo, esta situación no provoca diferencias en la conductancia estomática de estos árboles.
- Los algarrobos ubicados aguas arriba de la tubería evidencian una mayor tensión de la columna de agua a mediodía que los algarrobos ubicados aguas abajo, sin embargo, esto no provoca cambios en el potencial hídrico de pre-alba ni en la conductancia estomática.
- Los algarrobos regados muestran un mejor estado hídrico que los no regados, sin embargo, esta situación no provoca cambios en la conductancia estomática de estos árboles.

En relación con las mediciones anteriores, se evidencia que:

- Los valores de potencial hídrico de esta campaña son más altos que los registrados en los meses de julio, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno.
- Se observa un efecto de la aplicación del riego en los árboles de la serie A, donde alcanzan valores superiores a los de la serie B en todas las variables medidas desde enero de 2023.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., Sotomayor, D. and Zenteno, V. 1985. Parámetros hídricos de tejidos foliares de *Prosopis tamarugo* Phil. In: Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*. Habit, M. (Eds). Arica, Chile. 11-15 de junio de 1984, FAO: 500.
- Bucci, S., Scholz, F., Goldstein, G., Meinzer, F., Hinojosa, J., Hoffmann, W. and Franco, A. 2004. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiology* 24: 1119-1127.
- Carvajal, B. y Andrade, H. 2020. Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso de suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia* 24(1): 13-22.
- Darrah, P., Jones, D., Kirk, G. & Roose, T. 2006. Modelling the rhizosphere: a review of methods for “upscaling” to the whole-plant scale. *European Journal of Soil Science* 57(1):13-25.
- Dirección General de Agua (DGA). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doudou, L., Ximeng, L., Benye X., Virginia H. 2020. Evaluation of method to model stomatal conductance and its use to assess biomass increase in poplar trees.
- García, A., Cun, R., Chong, C., Duarte, C. y Montero, L. 2009. Calibration of a hydraulic pressure chamber developed in Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18(3):24-29.
- Giordano, C., Guevara, A., Boccalandro, H., Sartor, C. and Villagra, P. 2011. Water status, drought responses, and growth of *Prosopis flexuosa* trees with different Access to the water table in a warm South American desert. *Plant Ecol.* 212:1123-1134.
- Grzesiak, S., Grzesiak, M., Hura, T., Marcinska, I. & Rzepka, A. 2012. Changes in root system structure, leaf water potential and gas Exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany* 88:2-10.
- Ibáñez, S. 2019. Informe taxonómico de identificación de las especies de *Prosopis* en la Quebrada de Camar. Apéndice 4.7-10. SQM.
- Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP). 2021. Informe Proyecto Pampa Hermosa Llamara 2021. SQM.

- May, C., Pérez, A., Ruiz, E., Ic, A. y García, A. 2011. Effect of moisture levels on growth and water potential of *Capsicum chinense* Jacq. and their relationship to the development of *Bemisia tabaci* Genn, Tropical and Subtropical Agroecosystems 14(2011):1039-1045.
- METER Group. 2020. Manual Porómetro de hoja SC-1. USA.
- Meyer, W.S. & Ritchie, J.T. 1980. Resistance to Water Flow in the Sorghum Plant. Plant Physiology 65: 33-39.
- Pérez, L. 2018. How do we proceed to violations of parametric methods assumptions? or how to work with non-normal biological variables? Revista del Jardín Botánico Nacional 39: 1-12.
- Ramirez, E. 1972. Caracterización climatológica e hidrológica del Salar de Atacama. CORFO.
- Scholander, P., Bradstreet Edda, D., Hemmingsen, E. and Hammel, H. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. Science 148: 339–346.
- Sellés, V., Ferreyra, E. y Maldonado, P. 2002. Cámara de presión, Instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. Aconex 76:18-22.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2002. Plant Physiology (Third Edition). Sinauer Associates, Inc. Sunderland.
- Williams, L. 2001. Irrigation of winegrapes in California. Practical Winery & Vineyard 23:42-55.

APÉNDICES

1. Certificado de calibración de porómetro



METER

METER Group, Inc. USA
Certificate of Quality Assurance

Model	Leaf Porometer, SC-1	Date	July 16, 2021
Order Type	Controller Serial Number: LP4527	Technician	KH
Sensor Serial Number	Calibration Value		
LPS3821	2204200		

This document is to certify that the instrument indicated above has been tested and approved by the Quality Assurance department at METER Group, Inc. USA , and has shown to function properly and to be free of event flaws or defects.

Manufactured in USA

METER Group, Inc. USA
2365 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163
T 509.332.2756 F 509.332.5158
E info@metergroup.com W metergroup.com

ANEXOS

1. Registro fotográfico

Se presenta registro fotográfico de los individuos de Algarrobos obtenidos en abril de 2023.

Serie A



Árbol A04



Árbol A07



Árbol A12



Árbol A17



Árbol A21



Árbol A22



Árbol A30



Árbol A31



Árbol A33



Árbol A36



Árbol A37



Árbol A38



Árbol A40



Árbol A41



Árbol A43



Árbol A44



Árbol A47



Árbol A58

Serie B



Árbol B02



Árbol B03



Árbol B04



Árbol B09



Árbol B10



Árbol B11



Árbol B17



Árbol B20



Árbol B21

Series C, D y AX



Árbol C58



Árbol D28



Árbol AX01



Árbol AX02

2. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Grupo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PHpa	A	14	-1.83	0.70	-1.75	5.58	0.0180
PHpa	B	9	-2.31	0.56	-2.20		

Trat. Ranks

B	7.83	A
A	14.68	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Grupo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PHmd	A	14	-2.58	0.44	-2.75	8.95	0.0027
PHmd	B	9	-3.44	0.56	-3.40		

Trat. Ranks

B	6.72	A
A	15.39	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

4. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	28	0.10	0.07	24.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	11288.16	1	11288.16	2.91	0.1001
Grupo	11288.16	1	11288.16	2.91	0.1001
Error	100968.21	26	3883.39		
Total	112256.37	27			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=50.4472

Error: 3883.3926 gl: 26

Grupo Medias n E.E.

A	267.84	18	14.69	A
B	225.94	10	19.71	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

5. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHpa	26	0.06	0.02	31.45

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.61	1	0.61	1.49	0.2343
Posición c/respecto tuberí..	0.61	1	0.61	1.49	0.2343
Error	9.86	24	0.41		
Total	10.48	25			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.6024

Error: 0.4110 gl: 24

Posición c/respecto tuberí.. Medias n E.E.

aguas abajo	-1.79	7	0.24	A
aguas arriba	-2.13	19	0.15	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	26	0.20	0.17	20.35

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.05	1	2.05	6.00	0.0220
Posición c/respecto tuberí..	2.05	1	2.05	6.00	0.0220
Error	8.19	24	0.34		
Total	10.23	25			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.5487

Error: 0.3410 gl: 24

Posición c/respecto tuberí..	Medias	n	E.E.
aguas abajo	-2.41	7	0.22 A
aguas arriba	-3.04	19	0.13 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	31	3.0E-03	0.00	25.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	384.60	1	384.60	0.09	0.7700
Posición c/respecto tuberí..	384.60	1	384.60	0.09	0.7700
Error	128106.00	29	4417.45		
Total	128490.60	30			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=51.6369

Error: 4417.4484 gl: 29

Posición c/respecto tuberí..	Medias	n	E.E.
aguas arriba	261.60	21	14.50 A
aguas abajo	254.07	10	21.02 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Riego	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PHpa	no	11	-2.29	0.53	-2.20	5.33	0.0207
PHpa	si	15	-1.85	0.68	-1.80		

Trat.	Ranks
no	9.45 A
si	16.47 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

9. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	26	0.26	0.23	19.61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2.63	1	2.63	8.32	0.0081
Riego	2.63	1	2.63	8.32	0.0081
Error	7.60	24	0.32		
Total	10.23	25			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.4554

Error: 0.3165 gl: 24

Riego	Medias	n	E.E.
si	-2.60	15	0.15 A
no	-3.24	11	0.17 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

10. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	31	0.04	0.01	25.19

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4916.67	1	4916.67	1.15	0.2916
Riego	4916.67	1	4916.67	1.15	0.2916
Error	123573.93	29	4261.17		
Total	128490.60	30			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=48.8259

Error: 4261.1701 gl: 29

Riego Medias n E.E.

si 269.18 19 14.98 A

no 243.33 12 18.84 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

11. Resultados de Potencial hídrico en pre-alba

Árbol	Hora	Ψpa 1 (MPa)	Ψpa 2 (MPa)
A04	6:21	-1,8	-
A07	5:45	-1,3	-1,5
A12	5:57	-2,1	-
A17		-	-
A21	6:06	-1,1	-
A22		-	-
A30		-	-
A31	6:12	-1,7	-
A33	5:51	-2,1	-1,6
A36	5:54	-1,7	-1,5
A37	5:56	-1,7	-1,7
A38		-	-
A40	6:09	-1,8	-1,9
A41	6:11	-3,9	-
A43	6:16	-0,9	-
A44	6:15	-2,3	-
A47	6:04	-1,5	-1,7
A58	6:19	-1,8	-
AX01	6:23	-2,2	-
AX02	5:52	-1,8	-
B02	5:45	-1,4	-
B03	6:45	-2,1	-1,8
B04	6:35	-2,2	-2,2
B09	6:13	-2,1	-1,9

Árbol	Hora	$\Psi_{pa} 1$ (MPa)	$\Psi_{pa} 2$ (MPa)
B10	6:17	-3,4	-3,4
B11	6:03	-2,5	-2,8
B17	5:54	-2,6	-2,4
B20	5:48	-2,2	-2,1
B21	5:45	-2,5	-2,6
C58		-	-
D28	6:18	-2,6	-

-: medición no realizada por falta de ramillas.

12. Resultados de Potencial hídrico en mediodía

Árbol	Hora	$\Psi_{md} 1$ (MPa)	$\Psi_{md} 2$ (MPa)
A04	12:26	-2,1	-
A07	12:57	-2,4	-2,5
A12	12:47	-3,0	-
A17		-	-
A21	12:40	-1,8	-
A22		-	-
A30	12:36	-2,8	-
A31		-	-
A33	12:13	-3,2	-2,8
A36	12:16	-2,8	-3,1
A37	12:18	-2,4	-3,2
A38	12:20	-1,8	-
A40	12:27	-2,1	-3,5
A41		-	-
A43	12:33	-2,7	-
A44	12:35	-3,0	-3,2
A47	12:24	-2,5	-2,8
A58	12:35	-2,2	-
AX01	12:38	-2,8	-
AX02	12:51	-2,9	-
B02	12:30	-3,9	-
B03	12:46	-2,9	-2,8
B04	12:52	-3,9	-
B09	13:10	-2,9	-
B10	13:08	-4,3	-4,0
B11	13:18	-4,3	-3,7
B17	13:25	-2,4	-3,1
B20	13:29	-3,4	-2,8
B21	13:30	-3,5	-3,3

Árbol	Hora	$\Psi_{md} 1$ (MPa)	$\Psi_{md} 2$ (MPa)
C58		-	-
D28	13:29	-1,8	-

-: medición no realizada por falta de ramillas.

13. Resultados de Conductancia estomática

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
A04	11:37	222,3	A07	10:01	124,8
		217,9			159,2
		303,0			124,0
		317,8			201,7
A12	10:26	185,1	A17	10:41	147,7
		260,5			232,3
		263,4			144,1
		300,0			369,7
A21	10:50	298,8	A22	10:58	117,9
		195,7			335,5
		301,5			207,4
		321,1			87,0
A30	11:10	250,7	A31	11:17	277,0
		203,6			389,6
		214,3			296,3
		207,2			243,4
A33	11:06	225,2	A36	10:59	255,7
		279,1			244,0
		171,5			292,5
		252,7			244,1
A37	10:54	323,9	A38	10:48	338,0
		200,8			392,6
		271,7			307,0
		350,3			280,7
A40	10:34	296,7	A41	10:28	277,8
		240,6			214,4
		232,5			379,5
		282,5			309,1
A43	10:13	370,7	A44	10:20	232,7
		335,4			272,6
		403,1			223,8

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
		450,9			278,1
		487,7			268,4
A47	10:41	203,6	A58	10:05	333,3
		288,9			354,2
		295,6			302,0
		306,2			228,9
AX01	9:58	205,1	AX02	10:13	271,4
		302,5			281,5
		359,5			363,9
		251,0			167,1
B02	10:06	202,8	B03	10:26	135,5
		214,8			179,1
		210,5			159,2
		156,7			247,4
B04	10:49	185,2	B09	11:15	308,1
		161,6			365,2
		162,1			364,9
		86,1			163,5
B10	11:06	101,5	B11	11:24	159,8
		154,0			138,9
		146,6			165,5
		285,2			312,3
B17	11:35	309,2	B20	11:53	283,3
		189,1			367,4
		279,6			382,2
		260,2			327,3
B21	11:45	229,0	C58	11:56	251,0
		247,4			282,9
		199,2			245,0
		367,8			
D28	11:29	437,7			
		446,4			
		244,6			

14. Profesionales involucrados en el desarrollo del informe

Paola Silva C.: Dra. Mg. Cs. Ing. Agr. Investigadora laboratorio SAP.

José Ayamante M.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno, análisis de datos y elaboración de informes.

Sótero Astaburuaga O.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno.

3 Informe fisiología julio 2023



La Fundación de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile es una organización sin fines de lucro que busca promover el estudio y la investigación de las ciencias agropecuarias.



INFORME DE ESTADO HÍDRICO EN ALGARROBO DE LA QUEBRADA DE CAMAR

Julio 2023

Ingrid Zelaya

Mandante:



Tabla de contenido

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
Objetivo.....	5
Objetivos específicos.....	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Área de estudio.....	6
Individuos medidos en estudio	7
Equipos utilizados	9
Metodología para medición del estado hídrico de las plantas	9
• Potencial hídrico en pre-alba y mediodía.....	9
• Conductancia estomática.....	10
Análisis estadístico	11
RESULTADOS	13
Comparación de algarrobos de la Serie A y Series B-C.....	14
Comparación de algarrobos según su ubicación respecto de la tubería	14
Comparación de algarrobos con y sin riego.....	15
Evolución temporal.....	15
DISCUSIÓN	18
CONCLUSIONES	20
BIBLIOGRAFÍA	21
APÉNDICES	24
1. Certificado de calibración de porómetro.....	24
ANEXOS.....	25
1. Registro fotográfico.....	25
2. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C.....	29
3. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C.....	29
4. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C.....	30

5.	Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo .	31
6.	Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo	31
7.	Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo	31
8.	Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego.....	32
9.	Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego	32
10.	Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego.....	33
11.	Resultados de Potencial hídrico en pre-alba	33
12.	Resultados de Potencial hídrico en mediodía	34
13.	Resultados de Conductancia estomática	35
14.	Profesionales involucrados en el desarrollo del informe	36

Tabla de figuras

Figura 1.	Ubicación puntos de medición variables fisiológicas.	7
Figura 2.	Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico en pre-alba durante julio de 2023.....	10
Figura 3.	Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico de mediodía durante julio de 2023.	10
Figura 4.	Registro fotográfico mediciones de conductancia estomática durante julio de 2023.	11
Figura 5.	Evolución temporal, potencial hídrico en pre-alba en las series A y B, desde 2020 a 2023.	16
Figura 6.	Evolución temporal, potencial hídrico de mediodía de las series A y B, desde 2020 a 2023.....	16
Figura 7.	Evolución temporal, conductancia estomática para las series A y B, desde 2020 a 2023.	17
Figura 8.	Árboles A38 (1) y A43 (2) en julio de 2023.	18

RESUMEN

El presente informe es parte del programa de seguimiento de flora y vegetación de la quebrada de Camar indicado como parte de las acciones del Programa de Cumplimiento (Acción 24) aprobado mediante Res. Ex. N° 38/2022 por la Superintendencia de Medio Ambiente, y en el marco del procedimiento sancionatorio Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016. Se tiene por objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos que se encuentran en la Quebrada de Camar y que son parte del seguimiento ambiental en el marco de la RCA 226/2006.

Para dar cumplimiento con el objetivo propuesto, se realizó en el mes de julio 2023, una campaña de medición de variables fisiológicas asociadas al estado hídrico de los algarrobos presentes en la Quebrada de Camar en el Salar de Atacama. Se trabajó con una muestra de 18 individuos de algarrobo pertenecientes a la serie A, que están distribuidos en torno al ex pozo de extracción Camar-2 (cuya operación fue detenida en 2018 y su infraestructura de bombeo desmantelada en 2021) y que han sido monitoreados históricamente. Complementariamente, se tomaron muestras en 9 ejemplares pertenecientes a la serie B, que están alejados de dicho pozo y que se encuentran ubicados hacia el Este de los individuos objeto de estudio, 1 ejemplar de la serie C, 1 ejemplar de la serie D y 2 ejemplares de la serie AX, los cuales se ubican en la zona de los árboles de la serie A. Las comparaciones realizadas fueron entre la serie A y las series B y C, según su ubicación respecto a la tubería que atraviesa la quebrada de norte a sur y respecto a si son regados o no.

Los principales resultados obtenidos para este periodo (julio 2023), indican que la serie A no se diferencia en ninguna de las tres variables medidas (potencial hídrico en pre-alba, mediodía y conductancia estomática) con las series B-C. Así mismo, en los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería tampoco se observaron diferencias en las tres variables medidas. Adicionalmente, al comparar los algarrobos regados y no regados, no se observan diferencias significativas en las tres variables. La ausencia de diferencias significativas puede ser efecto de las bajas temperaturas de la época invernal, las que producirían una disminución del potencial hídrico y conductancia estomática, independiente del régimen de riego.

Al analizar la dinámica temporal de las variables de potencial hídrico en pre-alba, potencial hídrico de mediodía y conductancia estomática, en los meses de julio los valores de potencial hídrico son los más bajos de cada año, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno. Por otro lado, se observa un mejor estado hídrico en los árboles de la serie A y en el grupo de árboles regados en los meses de mayor demanda hídrica (enero y abril de 2023).

INTRODUCCIÓN

En el borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, específicamente en el sector correspondiente a la Quebrada de Camar, existe una población de Algarrobos, identificados preliminarmente como *Prosopis flexuosa* (RCA 226/2006), que posteriormente, en base a estudios taxonómicos específicos realizados en 2019, fueron identificados como *Prosopis alba* (Ibañez, 2019). Ambas especies son freatófitas de la familia Fabaceae. A partir del año 2022 cambia el nombre de estas especies, debido a la desintegración del género *Prosopis*, llamándose desde ahora *Neltuma flexuosa* y *Neltuma alba*, respectivamente (Hughes et al., 2022).

En torno a esta población de Algarrobos, la empresa SQM Salar S.A. dispuso de un pozo de extracción de agua, conocido como Camar-2 autorizado por la RCA 226/2006, definiéndose un Área de Estudio con el objeto de realizar el seguimiento a los ejemplares cercanos, correspondiendo a los Algarrobos que se encontraban en el área de influencia de este pozo. Este pozo no se encuentra operativo y fue desmantelado.

Posteriormente, en el marco del procedimiento sancionatorio iniciado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) mediante la Resolución Exenta N°1/Rol F-041-2016 (rectificado por Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016), se considera la complementación de la información contenida en los informes del Plan de Seguimiento Ambiental Biológico (PSAB) en cuanto a la población de algarrobos cercanos al pozo (serie A) y la implementación de un programa de seguimiento de la vegetación y flora de la Quebrada de Camar. Para esto, se considera un estudio eco-fisiológico enfocado en la población de algarrobos que se desarrolla en la quebrada (Acción 24).

Considerando lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, analizando el estado hídrico de una muestra de 18 individuos de algarrobos de la serie A, distribuidos en las proximidades del pozo Camar-2 a través de las variables potencial hídrico (pre alba y mediodía) y conductancia estomática, y su comparación con otros individuos de algarrobos pertenecientes a las series B y C (n=10). Por otro lado, se considera comparar todos los ejemplares (n=31) a monitorear según su ubicación respecto a una tubería que cruza el área de estudio de norte a sur, y entre individuos regados y no regados (el riego inició en diciembre de 2022).

Se ha observado que cuando un árbol tiene estrés por falta de agua, presenta valores más negativos de potencial hídrico. Giordano *et al.* (2011) menciona potenciales de pre-alba de entre -1,3 y -3,8 MPa para individuos de *Prosopis flexuosa* (*Neltuma flexuosa*) con acceso restringido a la napa, medidos entre los meses de diciembre y marzo, siendo más negativo en la medida que se reduce la oferta de agua. Al mediodía se esperaría registrar valores más negativos de potencial hídrico, en comparación con la pre-alba, debido a que en ese momento del día se produce el mayor déficit de presión de vapor, por lo que la columna de agua queda sometida a una mayor tensión. Así mismo, la conductancia estomática también debería disminuir cuando presenta estrés hídrico, como resultado del cierre estomático para disminuir la pérdida de vapor de agua (Taiz y Zeiger, 2002).

La información que se entrega en este informe fue obtenida, analizada y discutida por el Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP) de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (Anexo 14).

Objetivo

Caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, objeto de seguimiento ambiental en el marco de la RCA 226/2006, mediante la medición de variables que permiten determinar el estado hídrico de una muestra de (n=18) individuos de *Neltuma alba*, distribuidos en las proximidades del pozo Camar-2 (serie A), y comparar las muestras con individuos de otras series (B y C, n=10), según su ubicación respecto de la tubería y según el riego aplicado.

Objetivos específicos

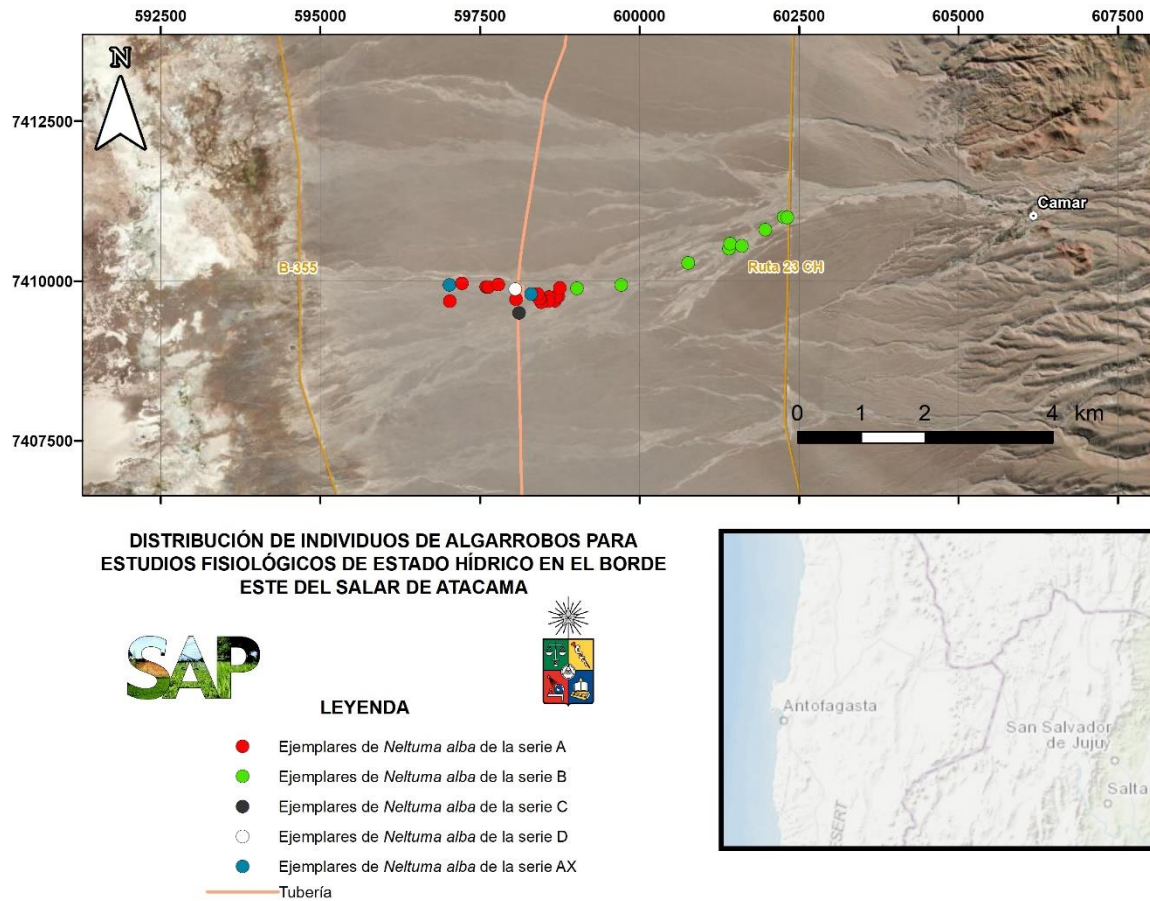
- Medir el potencial hídrico Ψ (MPa) de 31 individuos en muestras vegetales (ramillas) con cámara de presión tipo Scholander en dos momentos, pre-alba y mediodía.
- Estimar la conductancia estomática g_s ($\text{mmol/m}^2 \text{ s}^{-1}$) de 31 individuos a través de un porómetro de flujo estacionario, con muestras vegetales (hojas).
- Realizar un análisis estadístico de los resultados considerando la existencia de diferencias significativas entre: (1) individuos de la serie A y resto de los individuos de las series B y C; (2) entre individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería; y (3) entre individuos con y sin riego.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio se ubica en una zona altiplánica, en el sector oriental de la provincia de Antofagasta, II Región, Chile, en el Salar de Atacama (Figura 1). El estudio se realiza en la quebrada de Camar, la que tiene una superficie total de 38 km² (Ramírez, 1972). La cuenca del Salar de Atacama tiene una influencia del tipo climático “Desértico Marginal de Altura”, que se localiza por sobre los 2.000 metros de altura, por lo que las temperaturas son más atenuadas, presentando una media anual de 10 °C. Las lluvias se concentran en los meses de verano, debido al invierno altiplánico, y fluctúan entre 50 y 100 mm anuales (DGA, 2004). Según la estación meteorológica más cercana (Camar, San Pedro de Atacama), la precipitación acumulada de los últimos doce meses es de 53,7 mm, mientras que la temperatura media anual es de 16,3 °C (INIA, 2023).

Figura 1. Ubicación puntos de medición variables fisiológicas.



Fuente: Laboratorio SAP a partir de Geobiota, 2023.

En la cuenca del Salar de Atacama los suelos son muy escasos, debido a que está constituida mayoritariamente por el cuerpo salino del Salar de Atacama, identificando en la zona adyacente al salar una unidad taxonómica que corresponde al tipo Entisol. Este tipo de suelo se caracteriza por su carencia de horizontes bien desarrollados, poco evolucionados por la aridez de la zona, su alto contenido salino y pH elevado (DGA, 2004). La zona de estudio está dominada en gran medida por individuos de Algarrobo, que son parte de la base de subsistencia tradicional de la Comunidad de Camar.

Individuos medidos en estudio

Se realizaron mediciones del estado hídrico en ejemplares de algarrobo ubicados en las proximidades del pozo Camar-2 (no se encuentra operativo y fue desmantelado) de la empresa SQM Salar S.A., en el Salar de Atacama, específicamente en la Quebrada de Camar. Los árboles del Área de Estudio se encuentran a menos de 1,1 km del pozo Camar-2, y se consideró un grupo de

18 árboles (serie A) que corresponden a la población objetivo de este seguimiento. Estos árboles están distribuidos aguas arriba y aguas abajo respecto de una tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio, además, cuentan con un sistema de riego, como se indican en la Tabla 1, y cuya ubicación se puede visualizar en la Figura 1. Las mediciones fueron realizadas entre los días 26 y 28 de julio de 2023. Cabe destacar, que también se considera un grupo de ejemplares constituidos por 9 individuos, los que corresponden a árboles de la serie B, 1 individuo de la serie C, 1 individuo de la serie D y 2 individuos de la serie AX.

Tabla 1. Ubicación de los árboles, su ubicación respecto de la tubería y presencia de riego (Proyección: UTM; Datum: WGS84; zona: 19S).

N	Árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Serie	Posición c/respecto tubería	Riego
1	A04	598066	7409720	A	aguas abajo	Si
2	A07	597031	7409692	A	aguas abajo	Si
3	A12	597223	7409975	A	aguas abajo	Si
4	A17	597603	7409916	A	aguas abajo	Si
5	A21	597632	7409915	A	aguas abajo	Si
6	A22	597634	7409921	A	aguas abajo	Si
7	A30	597788	7409952	A	aguas abajo	Si
8	A31	597792	7409953	A	aguas abajo	Si
9	A33	598759	7409902	A	aguas arriba	Si
10	A36	598732	7409766	A	aguas arriba	Si
11	A37	598698	7409766	A	aguas arriba	Si
12	A38	598677	7409695	A	aguas arriba	Si
13	A40	598574	7409693	A	aguas arriba	Si
14	A41	598469	7409677	A	aguas arriba	Si
15	A43	598432	7409734	A	aguas arriba	Si
16	A44	598449	7409740	A	aguas arriba	Si
17	A47	598581	7409758	A	aguas arriba	Si
18	A58	598407	7409807	A	aguas arriba	Si
19	B02	599016	7409889	B	aguas arriba	No
20	B03	599710	7409937	B	aguas arriba	No
21	B04	600761	7410288	B	aguas arriba	No
22	B09	601420	7410585	B	aguas arriba	No
23	B10	601403	7410509	B	aguas arriba	No
24	B11	601603	7410548	B	aguas arriba	No
25	B17	601972	7410806	B	aguas arriba	No
26	B20	602261	7410998	B	aguas arriba	No
27	B21	602313	7410998	B	aguas arriba	No
28	C58	598113	7409506	C	aguas arriba	No
29	D28	598055	7409879	D	aguas abajo	No
30	AX01	598305	7409804	AX	aguas arriba	Si
31	AX02	597020	7409942	AX	aguas abajo	No

Equipos utilizados

Para la medición de potencial hídrico (en pre-alba y mediodía) se utilizó una cámara de presión tipo Scholander, la que no requiere calibración. Por otro lado, para la medición de conductancia estomática, se utilizó un porómetro marca Meter SC-1, el que se calibra previo a realizar las mediciones y cuyo certificado de calibración se presenta en el apéndice 1.

Metodología para medición del estado hídrico de las plantas

- **Potencial hídrico en pre-alba y mediodía**

El potencial hídrico se midió en pre-alba de manera de registrar la capacidad de recuperación hídrica de los árboles durante la noche (Acevedo *et al.*, 1985). Las mediciones se realizaron con una cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965; May *et al.*, 2011), que es el equipo más utilizado para una lectura rápida y sencilla, y es el mejor método disponible para condiciones de campo (García *et al.*, 2009). Para la medición se utilizó nitrógeno gaseoso como gas presurizado, en ramillas formadas durante la temporada anterior. Se seleccionaron 2 ramillas por árbol, las que se ubicaron al interior de una bolsa plástica sellada con una capa de papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980). Cada ramilla se cortó, se desenvolvió y se introdujo inmediatamente en la cámara de presión para medir su potencial hídrico entre las 5:45 y 7:25 am.

El potencial hídrico en mediodía fue medido para registrar el estado hídrico al momento de mayor demanda de vapor de agua por parte de la atmósfera, debido a la alta radiación y mayor déficit de presión de vapor. Previo a la medición, se eligieron 2 ramillas y se envolvieron en bolsas plásticas con papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980; Williams, 2001; Sellés *et al.*, 2002) durante 1 hora aproximadamente, para equilibrar el potencial hídrico foliar y xilemático. Posteriormente se midió el potencial hídrico entre las 12:00 y 13:30 horas, de la misma forma que se describió para la medición de pre-alba.

En las figuras 2 y 3 se presentan registros fotográficos de las mediciones de potencial hídrico realizadas entre el 26 y 28 de julio de 2023.

Figura 2. Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico en pre-alba durante julio de 2023.



Figura 3. Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico de mediodía durante julio de 2023.



- **Conductancia estomática**

La transpiración corresponde al flujo de vapor de agua, desde las plantas hacia la atmósfera. Este flujo de vapor de agua ocurre desde los espacios intercelulares de la cavidad subestomática, moviéndose por difusión, a través de los estomas, hacia la atmósfera.

Los estomas son poros que están en la cara abaxial de las hojas de algarrobo, cuya apertura responde a condiciones ambientales. La conductancia estomática es un indicador de la apertura de estos, determina la facilidad con que las hojas transpiran, y su magnitud depende de la

densidad, tamaño y grado de apertura de los estomas (METER Group, 2020). Si los estomas se cierran, la conductancia estomática disminuirá y el flujo de vapor de agua se reducirá.

La conductancia estomática (gs) es el principal factor limitante para la fotosíntesis y es sensible al estado del agua en la planta. Evaluar con precisión el comportamiento de la conductancia estomática, sobre todo en individuos bajo estrés por déficit de agua, en zonas desérticas o xerofíticas, es esencial para entender el flujo del agua en las especies y sería un indicador de su producción y biomasa (Doudou *et al.*, 2020), ya que se produce un intercambio gaseoso con la salida hacia la atmósfera de vapor de agua y la captación de CO₂ por las plantas necesario para la producción de biomasa (Carvajal y Andrade, 2020).

La conductancia estomática se mide con un porómetro de flujo estacionario marca Meter, modelo SC-01, el que es calibrado por el profesional a cargo de esta medición (Sótero Astaburuaga), previo a las mediciones de cada día, respecto de las condiciones ambientales presentes en ese momento. Las mediciones se realizan entre las horas de máxima apertura estomática, en hojas adultas y sanas de exposición Este, de 10:00 a 11:30 am. En la figura 4 se presentan registros fotográficos de las mediciones de conductancia estomática realizadas entre el 26 y 28 de julio de 2023.

Figura 4. Registro fotográfico mediciones de conductancia estomática durante julio de 2023.



Análisis estadístico

Se realizaron comparaciones para determinar la existencia de diferencias significativas entre:

1. Individuos de la serie A (N=18), que corresponden a la población objeto del seguimiento histórico en el contexto del PSAB, posicionados en las proximidades del pozo Camar-2, y el resto de los individuos de las series B y C (N=10).
2. Individuos ubicados aguas arriba (N=21, pertenecientes a las series A, B, C y AX) y aguas abajo (N=10, pertenecientes a las series A, D y AX) de la tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio.
3. Individuos con riego (N=19, pertenecientes a las series A y AX) y sin riego (N=12, pertenecientes a las series B, C, D y AX).

Cuando no se pudo realizar alguna medición de potencial hídrico o conductancia estomática, el análisis estadístico se realiza de igual manera reduciendo el N definido anteriormente. Las variables medidas en los Algarrobos se estudiaron a través de un análisis de varianza considerando como factor fijo la serie a la que corresponden (anexos 2, 3 y 4), la ubicación respecto de la tubería (anexos 5, 6 y 7), y la presencia de un sistema de riego (anexos 8, 9 y 10).

Cuando se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, se procedió a realizar una prueba de separación de medias, por medio de la prueba DGC (Di Rienzo *et al.*, 2011), al 5% de probabilidad de error lo que es igual a un nivel de confianza del 95%.

Cuando no se cumplió con el supuesto de normalidad de la varianza, se transformaron los datos a su valor inverso y cuando persistió el no cumplimiento, se usó un análisis de varianza no paramétrico (Kruskal Wallis) (Pérez, 2018). Cuando no se cumplió con el supuesto de homocedasticidad de la varianza, se utilizó un modelo heterocedástico (modelo lineal general). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat v.2020.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los valores de potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) y mediodía (Ψ_{md}), y conductancia estomática (gs) medidos en julio de 2023 (tabla 2). Los valores de la población objetivo (serie A) fluctuaron entre -1,7 y <-4,5 MPa en Ψ_{pa} , entre -2,25 y <-4,5 MPa en Ψ_{md} , y entre 58,6 y 308,73 mmol m⁻² s⁻¹ en gs.

Tabla 2. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) medidos en julio de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Árbol	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs (mmol/m ² s ¹)	Serie	Posición*	Riego
A04	-2,60	-2,70	226,18	A	Abajo	Si
A07	-2,40	-3,15	160,53	A	Abajo	Si
A12	-2,70	-3,40	190,25	A	Abajo	Si
A17	-	-	58,60	A	Abajo	Si
A21	-2,60	-	141,65	A	Abajo	Si
A22	-3,10	-	117,35	A	Abajo	Si
A30	-	-	161,68	A	Abajo	Si
A31	-2,90	-	146,40	A	Abajo	Si
A33	-2,30	-2,45	99,80	A	Arriba	Si
A36	-1,80	-2,25	254,45	A	Arriba	Si
A37	-2,20	-2,70	172,78	A	Arriba	Si
A38	<-4,50	<-4,50	203,08	A	Arriba	Si
A40	-2,30	<-4,50	241,40	A	Arriba	Si
A41	-2,50	-	182,73	A	Arriba	Si
A43	<-4,50	-4,00	280,98	A	Arriba	Si
A44	-2,60	-3,25	263,80	A	Arriba	Si
A47	-1,70	<-4,50	219,58	A	Arriba	Si
A58	-3,20	-3,00	225,18	A	Arriba	Si
B02	<-4,50	-3,80	101,55	B	Arriba	No
B03	-2,70	-2,80	171,50	B	Arriba	No
B04	-2,40	-3,10	140,95	B	Arriba	No
B09	-2,70	-3,05	151,83	B	Arriba	No
B10	-3,00	-3,65	91,13	B	Arriba	No
B11	-2,75	-3,55	136,10	B	Arriba	No
B17	-2,55	-3,35	243,90	B	Arriba	No
B20	-2,70	-2,50	132,53	B	Arriba	No
B21	-1,90	-3,20	205,20	B	Arriba	No
C58	-	-	130,30	C	Arriba	No
D28	-2,20	-3,30	200,05	D	Abajo	No
AX01	-2,00	-4,20	308,73	AX	Arriba	Si
AX02	-3,80	-	-	AX	Abajo	No

*: Posición respecto de la tubería. -: Árboles no medidos por falta de ramillas u hojas.

En esta campaña los árboles A17, A30 y C58 no pudieron ser medidos en pre-alba por falta de ramillas. Así mismo, por el mismo motivo los árboles A17, A21, A22, A30, A31, A41, C58 y AX02 no pudieron ser medidos al mediodía. Por otro lado, no se pudo medir la conductancia estomática en el árbol AX02 por falta de hojas.

Comparación de algarrobos de la Serie A y Series B-C

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en julio de 2023 para los árboles de la serie A y de las series B-C (tabla 3). No se encontraron diferencias significativas al comparar los potenciales hídricos en pre-alba ($p=0,6876$), mediodía ($p=0,6052$) y conductancia estomática ($p=0,1173$). Se alcanzaron valores promedio de $-2,76$ MPa en potencial hídrico en pre-alba, $-3,30$ MPa en potencial hídrico de mediodía y $173,26$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Tabla 3. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para serie A y series B-C, medidos en julio de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Serie	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
A	$-2,74 \pm 0,20$ a	$-3,37 \pm 0,24$ a	$185,91 \pm 14,09$ a
B-C	$-2,80 \pm 0,24$ a	$-3,22 \pm 0,14$ a	$150,50 \pm 14,57$ a
Promedio	$-2,76 \pm 0,15$	$-3,30 \pm 0,15$	$173,26 \pm 10,78$

Valores Promedio corresponden a las medias ± 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

Comparación de algarrobos según su ubicación respecto de la tubería

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en julio de 2023 para los árboles ubicados aguas arriba de la tubería y aguas abajo (tabla 4). No se encontraron diferencias significativas en potencial hídrico en pre-alba ($p=0,4911$), alcanzando un valor promedio de $-2,75$ MPa. Al comparar el potencial hídrico de mediodía no se encontraron diferencias entre ambos grupos de árboles ($p=0,5073$), alcanzando un valor promedio de $-3,34$ MPa. Por otra parte, la conductancia estomática tampoco mostró diferencias respecto de la ubicación de los árboles ($p=0,1806$), alcanzando un valor promedio de $178,67$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Tabla 4. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería, medidos en julio de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Ubicación respecto de la tubería	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Aguas arriba	$-2,74 \pm 0,19$ a	$-3,39 \pm 0,16$ a	$188,45 \pm 13,81$ a
Aguas abajo	$-2,79 \pm 0,17$ a	$-3,14 \pm 0,15$ a	$155,85 \pm 16,40$ a
Promedio	$-2,75 \pm 0,14$	$-3,34 \pm 0,14$	$178,67 \pm 11,04$

Valores Promedio corresponden a las medias ± 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test Kruskal Wallis (Ψ_{pa}) y DGC (Ψ_{md} y gs) de separación de medias.

Comparación de algarrobos con y sin riego

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en julio de 2023 para los árboles con y sin riego (tabla 5). No se encontraron diferencias significativas tanto en el potencial hídrico en pre-alba ($p=0,4226$) como en el de mediodía ($p=0,4472$). Así mismo, al comparar la conductancia estomática, no se encontraron diferencias respecto del riego ($p=0,1038$).

Tabla 5. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para individuos con y sin riego, medidos en julio de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

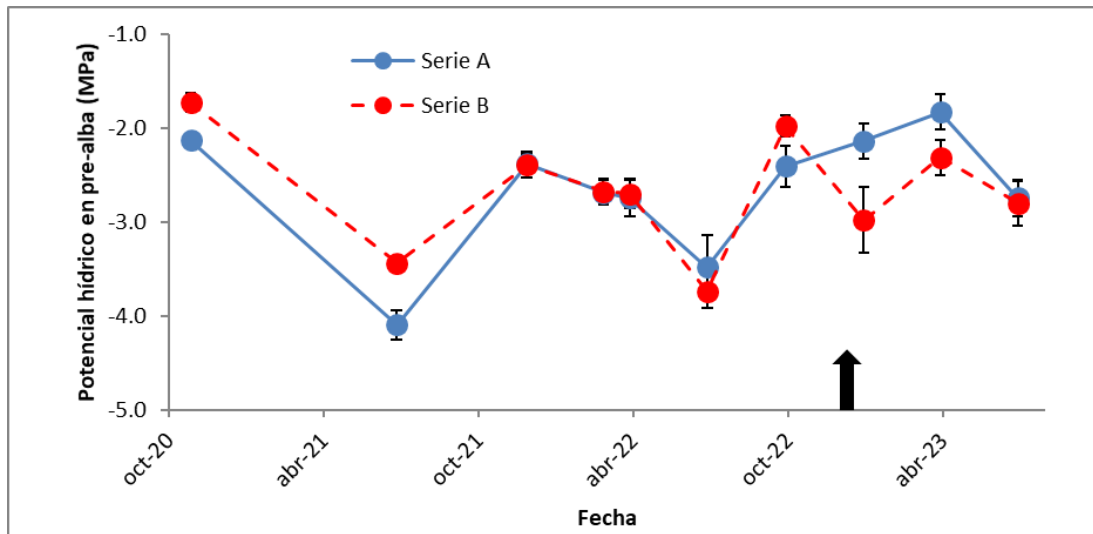
Riego	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs (mmol m ⁻² s ⁻¹)
Con riego	-2,70 \pm 0,19 a	-3,43 \pm 0,23 a	192,37 \pm 14,81 a
Sin riego	-2,84 \pm 0,22 a	-3,23 \pm 0,12 a	155,00 \pm 13,93 a
Promedio	-2,75\pm0,14	-3,34\pm0,14	178,67\pm11,04

Valores Promedio corresponden a las medias ± 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test Kruskal Wallis (Ψ_{pa}) y DGC (Ψ_{md} y gs) de separación de medias.

Evolución temporal

En la figura 5 se observa la evolución en el tiempo (desde noviembre de 2016 a la actualidad) del potencial hídrico en pre-alba en los árboles de la serie A y B. En los meses de julio (2021 y 2022) se observan los valores más bajos de potencial (inferiores a -3,0 MPa), tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego (diciembre 2022) la serie B tuvo valores superiores o similares a los de la serie A, lo que se da por el mejor estado hídrico de los árboles B11, B17, B20 y B21, medidos desde noviembre de 2020. Estos árboles se encuentran distribuidos cercanos a la ruta CH-23, donde los árboles B20 y B21 reciben diariamente agua liberada desde el poblado de Camar. Pese a ello, al iniciar el riego, la serie A alcanza valores superiores a los de la serie B en enero y abril de 2023. En esta campaña de julio 2023, se alcanzaron valores inferiores de potencial hídrico en pre-alba respecto de la campaña anterior, con valores similares en ambas series, sin embargo, los valores no disminuyeron tanto como en otros años.

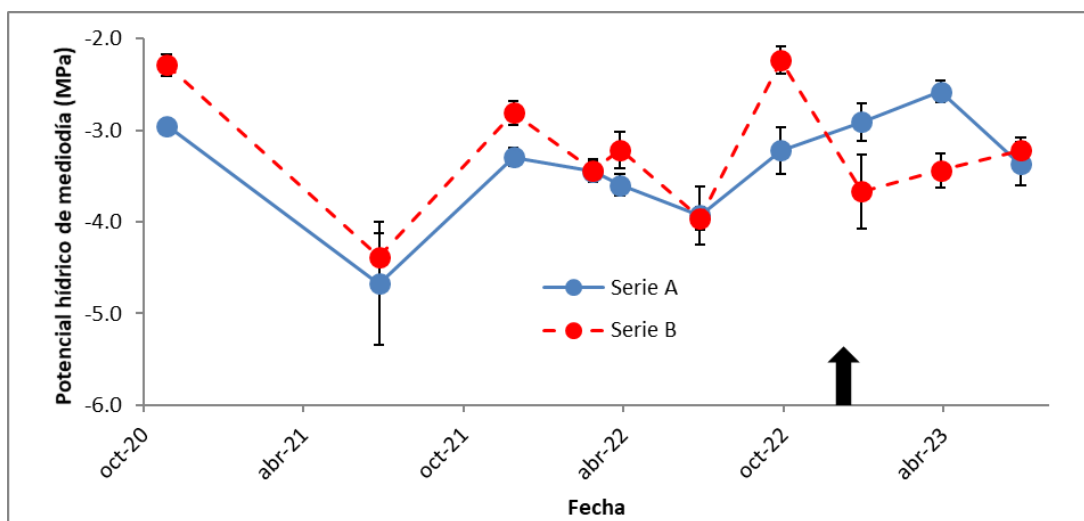
Figura 5. Evolución temporal, potencial hídrico en pre-alba en las series A y B, desde 2020 a 2023.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se observa la evolución en el tiempo del potencial hídrico de mediodía en los árboles de la serie A y B. Al igual que en el potencial hídrico en pre-alba, se aprecia que en los meses de julio (2021 y 2022) se presentaron valores más bajos de potencial de cada año (en 2021 alcanzan valores inferiores a los -4,0 MPa), tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego la serie B alcanzó una media superior a la de la serie A, mientras que, en las campañas de enero y abril, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B. Sin embargo, en la campaña de julio de 2023, la serie A reduce su potencial hídrico de pre-alba, igualándose con el valor de la serie B.

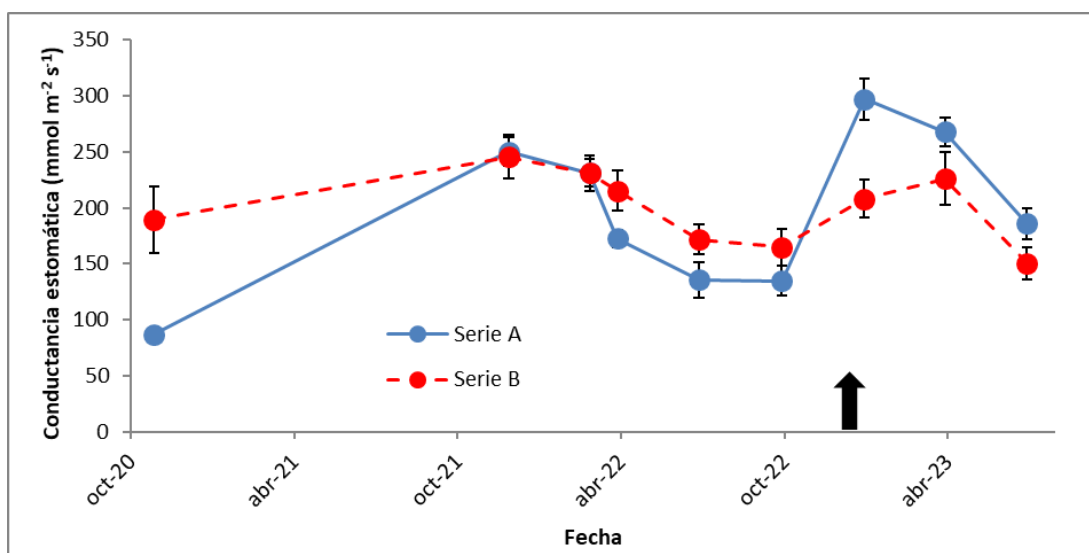
Figura 6. Evolución temporal, potencial hídrico de mediodía de las series A y B, desde 2020 a 2023.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se observa la evolución en el tiempo (desde noviembre de 2016 a la actualidad) de la conductancia estomática en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que antes de la aplicación de riego, la serie B alcanzó valores superiores o similares a los de la serie A (durante 2021 y 2022), mientras que, en las últimas tres campañas, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B. En esta campaña de julio se observaron los valores más bajos de conductancia estomática de este año.

Figura 7. Evolución temporal, conductancia estomática para las series A y B, desde 2020 a 2023.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

En julio de 2023 se observaron Algarrobos ubicados en las proximidades del pozo Camar-2 que presentan una baja cobertura y/o escaso a nulo crecimiento (Anexo 1. Registro fotográfico), lo cual se refleja en la inexistencia de ramillas en los árboles A17, A30 y C58, y la presencia de solo una ramilla medible en los árboles A21, A22, A31, A41 y AX02 para la realización de las mediciones de potencial hídrico. Esta falta de ramillas se puede deber, a la escasa regeneración de ramillas, al ramoneo producido por burros que hay en la zona, a la naturaleza destructiva de la medición de los potenciales hídricos que corta 4 ramillas por campaña de medición (2 para Ψ_{pa} y 2 para Ψ_{md}), y a la variabilidad estacional donde se presenta una menor cobertura y producción de biomasa en invierno.

La ficha de clasificación de estado de conservación de *N. alba* y *N. flexuosa*, describen estas especies como de hojas caducas, es decir, que pierden gran parte de sus hojas en invierno (MMA, 2012a; MMA, 2012b). Así mismo, *N. chilensis*, también ha sido descrito como caducifolio en su distribución sur en Latinoamérica, lo que se produce como resultado del efecto de las heladas (FAO, 1997). Esto podría explicar la falta de hojas observado en los Algarrobos evaluados en julio.

En esta campaña, los árboles A38 y A43, de la población objetivo (serie A) (Figura 8) presentan el valor más bajo en el potencial hídrico de pre-alba ($<-4,5$ MPa). Pese a que estos árboles cuentan con un sistema de riego que los mantienen con un suministro de agua, su Ψ_{pa} es más bajo que en los individuos sin riego (excepto B02 que alcanza el mismo valor de potencial hídrico). Estos bajos potenciales se pueden deber a la falta de ramillas apropiadas, que en general se da en la mayoría de los individuos, pero que en estos árboles es más notorio al existir poca regeneración. Esto no exime que puedan existir problemas puntuales con las raíces que pudieran impedir que el árbol absorba agua desde el suelo, como un efecto de la rizósfera existente o la compactación del suelo (Darrah *et al.*, 2006; Grzesiak *et al.*, 2012).

Figura 8. Árboles A38 (1) y A43 (2) en julio de 2023.



En esta campaña no se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables fisiológicas de potencial hídrico (pre-alba y mediodía) y conductancia estomática, entre las series A (cercano al pozo Camar-2) y B-C, observándose una media de $-2,76$ MPa, $-3,30$ MPa y $173,26$

mmol m⁻²s⁻¹, respectivamente). Por otra parte, al comparar el estado hídrico de los algarrobos con y sin riego, tampoco se observó diferencias entre estos grupos en la campaña de Julio, encontrando una media de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y g_s de: -2,75 MPa, -3,34 MPa y 178,67 mmol m⁻²s⁻¹, respectivamente. Esto, posiblemente debido al receso invernal de estos árboles (MMA, 2012a; MMA, 2012b), los cuales en esta época del año presentan una disminución de la cobertura, mayor senescencia de hojas y disminución de la producción de ramillas nuevas. Al comparar los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas debajo de la tubería que atraviesa la quebrada, tampoco se observaron diferencias, contrario a lo observado en el mes de abril de 2023 en el potencial hídrico de mediodía, lo que mostraría que, en esta campaña, la tubería no tendría un efecto en el estado hídrico de los algarrobos analizados.

Los valores observados en la campaña están dentro del rango mencionado por Giordano *et al.* (2011) para *Neltuma flexuosa* ubicados en zonas de valle (mayor acceso al agua) y dunas (menor acceso al agua). Sin embargo, vale la pena destacar que las mediciones realizadas por estos autores corresponden a valores medidos en verano. Los potenciales hídricos tienen cambios estacionales, es así como al analizar la dinámica temporal de las variables medidas, se observa un patrón similar en el potencial hídrico en pre-alba y mediodía, donde los valores obtenidos en los meses de julio tienden a ser los más bajos de cada año (Figura 5 y Figura 6). Este cambio temporal de potenciales coincide con lo evaluado en otras especies freatófitas del Desierto de Atacama *Strombocarpa tamarugo* (SAP, 2021) y *Strombocarpa burkartii* (Carevic *et al.*, 2017). El menor potencial hídrico observado en julio podría ser efecto de las bajas temperaturas, que pueden provocar alteraciones en el grado de control estomático y disminución de la conductividad hidráulica de las raíces (Allen y Ort, 2001). El menor potencial hídrico de *Strombocarpa burkartii* en los meses de junio y julio se asoció a un mayor porcentaje de pérdida de la conductividad hidráulica durante estos meses (Carevic *et al.*, 2017), que podría ser debido a cavitación del xilema (Hacke y Sauter, 1996) y explicar de esta forma el comportamiento observado en los árboles de algarrobo de Camar. Este comportamiento estacional de menor potencial hídrico en invierno se ha observado también en diversas especies, lo que se ha atribuido también a cambios en la fluidez y permeabilidad de las membranas (Sellin y Kupper, 2007) o a cambios a la viscosidad del agua (López y Nobel, 1990), induciendo a una disminución del potencial hídrico mínimo (mediodía).

El déficit hídrico se produce cuando la demanda hídrica es mayor que el suministro hídrico, en este sentido hay que considerar que la demanda depende tanto de las condiciones atmosféricas como de la magnitud de área foliar que se encuentra transpirando, es así que, desde que comenzó el riego de los algarrobos, enero 2023, las diferencias entre las series A y B-C como en la serie regada y no regada se han observado en los meses en que es mayor la demanda atmosférica y el área foliar de los algarrobos (enero y abril). No se observaron diferencias en julio y los valores bajos de potencial hídrico y consecuentemente los de conductancia estomática se pueden explicar por la baja temperatura del periodo invernal.

CONCLUSIONES

En la campaña de julio de 2023, se evidencia que:

- Los algarrobos de la serie A muestran un estado hídrico similar al de los algarrobos de las series B-C, sin diferencias en las tres variables medidas.
- No se observan diferencias en los algarrobos en relación a su ubicación respecto de la tubería, por lo que no se observa una afectación en los algarrobos ubicados aguas abajo.
- Los algarrobos regados no se diferencian en ninguna variable con los algarrobos no regados.
- La ausencia de diferencias significativas en las tres variables puede ser un efecto de la estacionalidad por las bajas temperaturas, donde en general se observa una disminución de todas las variables en todos los árboles.

En relación con las mediciones anteriores, se evidencia que:

- Los valores de potencial hídrico de esta campaña son los más bajos del año, como se registra en años anteriores, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno.
- Se observa un efecto de la aplicación del riego en los árboles de la serie A, donde alcanzan valores superiores a los de la serie B en todas las variables medidas desde enero de 2023, y a pesar de disminuir su valor, en esta campaña alcanza valores similares a los de la serie B.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., Sotomayor, D. and Zenteno, V. 1985. Parámetros hídricos de tejidos foliares de *Prosopis tamarugo* Phil. In: Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*. Habit, M. (Eds). Arica, Chile. 11-15 de junio de 1984, FAO: 500.
- Allen, D. & Ort, D. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends in Plant Science*, 6(1), 36–42.
- Bucci, S., Scholz, F., Goldstein, G., Meinzer, F., Hinojosa, J., Hoffmann, W. and Franco, A. 2004. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiology* 24: 1119-1127.
- Carvajal, B. y Andrade, H. 2020. Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso de suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia* 24(1): 13-22.
- Carevic, F. S., Delatorre-Herrera, J. and Carrasco, A. 2017. Plant water variables and reproductive traits are influenced by seasonal climatic variables in *Prosopis burkartii* (Fabaceae) at Northern Chile. *Flora* 233: 7-11.
- Darrah, P., Jones, D., Kirk, G. & Roose, T. 2006. Modelling the rhizosphere: a review of methods for “upscaling” to the whole-plant scale. *European Journal of Soil Science* 57(1):13-25.
- Dirección General de Agua (DGA). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doudou, L., Ximeng, L., Benye X., Virginia H. 2020. Evaluation of method to model stomatal conductance and its use to assess biomass increase in poplar trees. *Agricultural Water Management* 259:107228.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 1997. *Prosopis chilensis*, especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina. Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Sistemas Agroforestales.
- García, A., Cun, R., Chong, C., Duarte, C. y Montero, L. 2009. Calibration of a hydraulic pressure chamber developed in Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18(3):24-29.
- Giordano, C., Guevara, A., Boccalandro, H., Sartor, C. and Villagra, P. 2011. Water status, drought responses, and growth of *Prosopis flexuosa* trees with different Access to the water table in a warm South American desert. *Plant Ecol.* 212:1123-1134.

- Grzesiak, S., Grzesiak, M., Hura, T., Marcinska, I. & Rzepka, A. 2012. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany* 88:2-10.
- Hacke, U. y Sauter, J. 1996. Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. *Oecologia* 105:435-439.
- Hughes, C., Ringelberg, J., Lewis, G. y Catalano, S. 2022. Desintegración del género *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, clado mimosoide). *PhytoKeys* 205:147-189.
- Ibáñez, S. 2019. Informe taxonómico de identificación de las especies de *Prosopis* en la Quebrada de Camar. Apéndice 4.7-10. SQM.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2023. Agrometeorología, Red Agrometeorológica INIA, Estación Camar, San Pedro de Atacama. Consultado el 6 de noviembre de 2023.
- Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP). 2021. Informe Proyecto Pampa Hermosa Llamara 2021. SQM.
- López, F. y Nobel, P. 1990. Root hydraulic conductivity of two cactus species in relation to root age, temperature, and soil water status. *Journal of Experimental Botany* 42:143-149.
- May, C., Pérez, A., Ruiz, E., Ic, A. y García, A. 2011. Effect of moisture levels on growth and water potential of *Capsicum chinense* Jacq. and their relationship to the development of *Bemisia tabaci* Genn, *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(2011):1039-1045.
- METER Group. 2020. Manual Porómetro de hoja SC-1. USA.
- Meyer, W.S. & Ritchie, J.T. 1980. Resistance to Water Flow in the Sorghum Plant. *Plant Physiology* 65: 33-39.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2012a. Ficha de antecedentes de especie 582, *Prosopis flexuosa* DC. Clasificación según estado de conservación.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2012b. Ficha de antecedentes de especie 578, *Prosopis alba* Grise. var. *alba*. Clasificación según estado de conservación.
- Pérez, L. 2018. How do we proceed to violations of parametric methods assumptions? or how to work with non-normal biological variables? *Revista del Jardín Botánico Nacional* 39: 1-12.
- Ramírez, E. 1972. Caracterización climatológica e hidrológica del Salar de Atacama. CORFO.

- Scholander, P., Bradstreet Edda, D., Hemmingsen, E. and Hammel, H. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* 148: 339–346.
- Sellés, V., Ferreyra, E. y Maldonado, P. 2002. Cámara de presión, Instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. *Aconex* 76:18-22.
- Sellin, A. y Kupper, P. 2007. Temperature, light and leaf hydraulic conductance of little-leaf linden (*Tilia cordata*) in a mixed forest canopy. *Tree Physiology* 27:679-688.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2002. *Plant Physiology* (Third Edition). Sinauer Associates, Inc. Sunderland.
- Williams, L. 2001. Irrigation of winegrapes in California. *Practical Winery & Vineyard* 23:42-55.

APÉNDICES

1. Certificado de calibración de porómetro



METER

METER Group, Inc. USA
Certificate of Quality Assurance

Model	Leaf Porometer, SC-1	Date	July 16, 2021
Order Type	Controller Serial Number: LP4527	Technician	KH
Sensor Serial Number		Calibration Value	
LPS3821		2204200	

This document is to certify that the instrument indicated above has been tested and approved by the Quality Assurance department at METER Group, Inc. USA , and has shown to function properly and to be free of event flaws or defects.

Manufactured in USA

METER Group, Inc. USA
2365 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163
T 509.332.2756 F 509.332.5158
E info@metergroup.com W metergroup.com

ANEXOS

1. Registro fotográfico

Se presenta registro fotográfico de los individuos de Algarrobos obtenidos en julio de 2023.

Serie A



Árbol A04



Árbol A07



Árbol A12



Árbol A17



Árbol A21



Árbol A22



Árbol A30



Árbol A31



Árbol A33



Árbol A36



Árbol A37



Árbol A38



Árbol A40



Árbol A41



Árbol A43



Árbol A44



Árbol A47



Árbol A58

Serie B



Árbol B02



Árbol B03



Árbol B04



Árbol B09



Árbol B10



Árbol B11



Árbol B17



Árbol B20



Árbol B21

Series C, D y AX



Árbol C58



Árbol D28



Árbol AX01



Árbol AX02

2. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
INV PHpa	25	0.01	0.00	24.00

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.4E-03	1	1.4E-03	0.17	0.6876
Grupo	1.4E-03	1	1.4E-03	0.17	0.6876
Error	0.20	23	0.01		
Total	0.20	24			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.0780

Error: 0.0085 gl: 23

Grupo Medias n E.E.

B -0.37 9 0.03 A

A -0.39 16 0.02 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.000_PHmd_REML<-glms(PHmd~1+Grupo
```

```
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Grupo))
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.000_PHmd_REML

Variable dependiente: PHmd

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
21	48.25	52.03	-20.13	0.82	0.01	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	574.96	<0.0001
Grupo	1	0.28	0.6052

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	740.71	<0.0001
Grupo	1	0.28	0.6052

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1 Grupo	1	19	0.28	0.6052

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Formula: ~ 1 | Grupo

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
A	1.00
B	0.51

PHmd - Medias ajustadas y errores estándares para Grupo

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Grupo	Medias	E.E.
B	-3.22	0.14 A
A	-3.37	0.24 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

4. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	28	0.09	0.06	31.99

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	8061.59	1	8061.59	2.62	0.1173
Grupo	8061.59	1	8061.59	2.62	0.1173
Error	79858.13	26	3071.47		

Total 87919.72 27

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=44.8647

Error: 3071.4666 gl: 26

Grupo Medias n E.E.

A 185.91 18 13.06 A

B 150.50 10 17.53 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

5. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Posición c/respecto tuberí..	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PHpa	aguas abajo	8	-2.79	0.49	-2.65	0.47	0.4911
PHpa	aguas arriba	20	-2.74	0.85	-2.58		

6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	23	0.02	0.00	20.10

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.21	1	0.21	0.46	0.5073
Posición c/respecto tuberí..	0.21	1	0.21	0.46	0.5073
Error	9.48	21	0.45		
Total	9.69	22			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.7825

Error: 0.4515 gl: 21

Posición c/respecto tuberí.. Medias n E.E.

aguas abajo -3.14 4 0.34 A

aguas arriba -3.39 19 0.15 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	30	0.06	0.03	33.35

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6694.25	1	6694.25	1.89	0.1806
Posición c/respecto tuberí..	6694.25	1	6694.25	1.89	0.1806
Error	99415.63	28	3550.56		
Total	106109.88	29			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=48.2370

Error: 3550.5583 gl: 28

Posición c/respecto tuberí.. Medias n E.E.

aguas arriba 188.45 21 13.00 A

aguas abajo 155.85 9 19.86 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8. Prueba de Kruskal Wallis sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego

Prueba de Kruskal Wallis

Variable	Riego	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PHpa	no	11	-2.84	0.73	-2.70	0.64	0.4226
PHpa	si	17	-2.70	0.79	-2.60		

9. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.001_PHmd_REML<-glS (PHmd~1+Riego  
,weights=varComb (varIdent (form=~1|Riego))  
,method="REML"  
,na.action=na.omit  
,data=mlm.modeloR.data01)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.001_PHmd_REML

Variable dependiente: PHmd

Medidas de ajuste del modelo

N	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
23	50.89	55.07	-21.45	0.82	0.02	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	660.49	<0.0001
Riego	1	0.60	0.4472

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	902.02	<0.0001
Riego	1	0.60	0.4472

Pruebas de hipótesis tipo III - prueba

	Source	numDF	denDF	F-value	p-value
1	Riego	1	21	0.60	0.4472

Estructura de varianzas

Modelo de varianzas: varIdent

Formula: ~ 1 | Riego

Parámetros de la función de varianza

Parámetro	Estim
si	1.00
no	0.48

PHmd - Medias ajustadas y errores estándares para Riego

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Riego	Medias	E.E.
no	-3.23	0.12 A
si	-3.43	0.23 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

10. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	30	0.09	0.06	32.84

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	9729.80	1	9729.80	2.83	0.1038
Riego	9729.80	1	9729.80	2.83	0.1038
Error	96380.08	28	3442.15		
Total	106109.88	29			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=45.5816

Error: 3442.1456 gl: 28

Riego Medias n E.E.

si	192.37	19	13.46	A
no	155.00	11	17.69	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

11. Resultados de Potencial hídrico en pre-alba

Árbol	Hora	Ψpa 1 (MPa)	Ψpa 2 (MPa)
A04	6:17	-2,6	-
A07	5:45	-2,1	-2,7
A12	5:52	-2,7	-
A17		-	-
A21	6:02	-2,6	-
A22	6:03	-3,1	-
A30		-	-
A31	6:07	-2,9	-
A33	5:58	-2,0	-2,6
A36	6:01	-1,7	-1,9
A37	6:04	-1,7	-2,7
A38	6:05	-4,5	-
A40	6:12	-2,3	-
A41	6:16	-2,5	-
A43	6:19	-4,5	-
A44	6:22	-2,5	-2,7
A47	6:09	-1,7	-
A58	6:26	-3,2	-
AX01	6:29	-2,0	-
AX02	5:48	-3,8	-
B02	5:50	-4,5	-
B03	6:53	-2,8	-2,6
B04	6:33	-2,7	-2,1
B09	6:13	-2,6	-2,8

Árbol	Hora	$\Psi_{pa} 1$ (MPa)	$\Psi_{pa} 2$ (MPa)
B10	6:11	-3,0	-3,0
B11	6:09	-2,7	-2,8
B17	6:04	-2,5	-2,6
B20	5:56	-2,7	-
B21	5:55	-2,5	-1,3
C58		-	-
D28	6:12	-2,2	-

-: medición no realizada por falta de ramillas.

12. Resultados de Potencial hídrico en mediodía

Árbol	Hora	$\Psi_{md} 1$ (MPa)	$\Psi_{md} 2$ (MPa)
A04	12:24	-2,7	-
A07	11:56	-2,8	-3,5
A12	12:03	-3,4	-
A17		-	-
A21		-	-
A22		-	-
A30		-	-
A31		-	-
A33	12:07	-2,5	-2,4
A36	12:10	-2,3	-2,2
A37	12:12	-2,7	-
A38	12:15	-4,5	-
A40	12:17	-4,5	-
A41		-	-
A43	12:20	-4,0	-
A44	12:19	-3,7	-2,8
A47	12:16	-4,5	-
A58	12:22	-3,0	-
AX01	12:24	-4,2	-
AX02		-	-
B02	12:31	-3,8	-
B03	12:21	-2,8	-2,8
B04	12:14	-3,7	-2,5
B09	12:08	-3,0	-3,1
B10	12:11	-3,3	-4,0
B11	12:06	-3,5	-3,6
B17	12:04	-3,5	-3,2
B20	11:57	-2,5	-
B21	11:56	-3,3	-3,1

Árbol	Hora	$\Psi_{md\ 1}$ (MPa)	$\Psi_{md\ 2}$ (MPa)
C58		-	-
D28	12:19	-3,3	-

-: medición no realizada por falta de ramillas.

13. Resultados de Conductancia estomática

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
A04	11:08	242,8	A07	9:58	171,8
		258,2			133,8
		218,7			195,2
		185,0			141,3
A12	10:16	154,7	A17	10:25	58,6
		214,6			-
		218,4			-
		173,3			-
A21	10:30	110,8	A22	10:35	145,5
		162,0			89,2
		142,8			-
		151,0			-
A30	11:44	293,1	A31	11:48	94,4
		94,8			173,8
		116,7			171,0
		142,1			-
A33	10:02	96,1	A36	10:15	270,2
		101,1			273,7
		80,8			244,9
		121,2			229,0
A37	10:25	151,2	A38	10:33	160,5
		139,0			211,4
		195,1			239,1
		205,8			201,3
A40	10:51	309,8	A41	11:00	219,8
		272,8			146,2
		171,6			173,7
		211,4			191,2
A43	11:18	308,9	A44	11:11	261,2
		242,9			300,0
		300,1			294,4

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
		272,0			199,6
		284,5			253,0
A47	10:44	151,6	A58	11:25	209,2
		239,8			191,7
		202,4			246,8
		384,7			-
AX01	11:32	287,3	AX02		-
		273,7			-
		289,2			-
		86,4			126,0
B02	11:23	79,6	B03	11:06	216,0
		157,9			114,5
		82,3			229,5
		170,9			154,4
B04	10:54	111,7	B09	10:37	192,4
		119,7			158,1
		161,5			102,4
		91,2			111,8
B10	10:43	135,4	B11	10:28	159,2
		69,1			141,7
		68,8			131,7
		217,6			119,1
B17	10:20	244,2	B20	10:10	100,2
		268,4			182,5
		245,4			128,3
		174,3			65,6
B21	10:02	223,3	C58	11:17	195,0
		238,1			-
		185,1			-
		192,0			
D28	10:57	203,2			
		231,6			
		173,4			

-: medición no realizada por falta de hojas.

14. Profesionales involucrados en el desarrollo del informe

Paola Silva C.: Dra. Mg. Cs. Ing. Agr. Investigadora laboratorio SAP.

José Ayamante M.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno, análisis de datos y elaboración de informes.

Sótero Astaburuaga O.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno.

4 Informe fisiología octubre 2023



La Fundación de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile es una organización sin fines de lucro que busca promover el estudio y la investigación de las ciencias agropecuarias.



INFORME DE ESTADO HÍDRICO EN ALGARROBO DE LA QUEBRADA DE CAMAR

Octubre 2023

Mandante:



Tabla de contenido

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
Objetivo	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Área de estudio	6
Individuos medidos en estudio	7
Equipos utilizados	8
Metodología para medición del estado hídrico de las plantas	8
• Potencial hídrico en pre-alba y mediodía	8
• Conductancia estomática	9
Análisis estadístico	10
RESULTADOS	12
Comparación de algarrobos de la Serie A y Series B-C	13
Comparación de algarrobos según su ubicación respecto de la tubería	13
Comparación de algarrobos con y sin riego	14
Evolución temporal	14
DISCUSIÓN	17
CONCLUSIONES	19
BIBLIOGRAFÍA	20
APÉNDICES	23
1. Certificado de calibración de porómetro	23
ANEXOS	24
1. Registro fotográfico	24
2. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C	28
3. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C	28
4. Modelo lineal general sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C	29
5. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo	30
6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo	31
7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo	31
8. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego	32

9.	Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego	32
10.	Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego	33
11.	Resultados de Potencial hídrico en pre-alba	33
12.	Resultados de Potencial hídrico en mediodía.....	34
13.	Resultados de Conductancia estomática.....	35
14.	Profesionales involucrados en el desarrollo del informe.....	37

Tabla de figuras

Figura 1.	Ubicación puntos de medición variables fisiológicas.	6
Figura 2.	Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico en pre-alba.	9
Figura 3.	Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico de mediodía.	9
Figura 4.	Registro fotográfico mediciones de conductancia estomática.	10
Figura 5.	Evolución temporal, potencial hídrico en pre-alba en las series A y B, desde 2020 a 2023.	15
Figura 6.	Evolución temporal, potencial hídrico de mediodía de las series A y B, desde 2020 a 2023.	15
Figura 7.	Evolución temporal, conductancia estomática para las series A y B, desde 2020 a 2023.	16

RESUMEN

El presente informe es parte del programa de seguimiento de flora y vegetación de la quebrada de Camar indicado como parte de las acciones del Programa de Cumplimiento (Acción 24) aprobado mediante Res. Ex. N°38/2022 por la Superintendencia de Medio Ambiente, y en el marco del procedimiento sancionatorio Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016. Se tiene por objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos que se encuentran en la Quebrada de Camar y que son parte del seguimiento ambiental en el marco de la RCA N°226/2006.

Para dar cumplimiento con el objetivo propuesto, se realizó en el mes de octubre 2023, una campaña de medición de variables fisiológicas asociadas al estado hídrico de los algarrobos presentes en la Quebrada de Camar en el Salar de Atacama. Se trabajó con una muestra de 18 individuos de algarrobo pertenecientes a la serie A, que están distribuidos en torno al ex pozo de extracción Camar-2 (cuya operación fue detenida en 2018 y su infraestructura de bombeo desmantelada en 2021) y que han sido monitoreados históricamente. Complementariamente, se tomaron muestras en 9 ejemplares pertenecientes a la serie B, que están alejados de dicho pozo y que se encuentran ubicados hacia el Este de los individuos objeto de estudio, 1 ejemplar de la serie C, 1 ejemplar de la serie D y 2 ejemplares de la serie AX, los cuales se ubican en la zona de los árboles de la serie A. Las comparaciones realizadas fueron entre la serie A y las series B y C, según su ubicación respecto a la tubería que atraviesa la quebrada de norte a sur y respecto a si son regados o no.

Los principales resultados obtenidos para este periodo (octubre 2023), indican que la serie A se diferencia con las series B-C en las variables de potencial hídrico en pre-alba y conductancia estomática, con los valores más bajos en las series B-C. Así mismo, en los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería, se observan las mismas diferencias con los valores más bajos en los árboles ubicados aguas arriba. Adicionalmente, al comparar los algarrobos regados y no regados, se observan diferencias significativas en potencial hídrico en pre-alba y en conductancia estomática, con los valores más bajos en los árboles sin riego. Las diferencias observadas tendrían relación a la aplicación del riego, expresándose diferencias en los meses de mayor demanda atmosférica, alcanzando siempre valores más altos en los individuos que reciben riego.

Al analizar la dinámica temporal de las variables de potencial hídrico en pre-alba, potencial hídrico de mediodía y conductancia estomática, en los meses de julio los valores de potencial hídrico son los más bajos de cada año, lo que es una respuesta a la variación estacional, en el que se observan los valores más negativos en invierno. Posteriormente, en el mes de octubre se observa un alza en todas las variables, alcanzando en potencial hídrico en pre-alba, el valor más alto de todo el seguimiento, en los árboles de la serie A. Por otro lado, se observa un mejor estado hídrico en los árboles de la serie A, representado por el alto valor de la conductancia estomática, cuya alza en esta campaña es de mayor magnitud que lo observado en la serie B.

INTRODUCCIÓN

En el borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, específicamente en el sector correspondiente a la Quebrada de Camar, existe una población de Algarrobos, identificados preliminarmente como *Prosopis flexuosa* (RCA N°226/2006), que posteriormente, en base a estudios taxonómicos específicos realizados en 2019, fueron identificados como *Prosopis alba* (Ibañez, 2019). Ambas especies son freatófitas de la familia Fabaceae. A partir del año 2022 cambia el nombre de estas especies, debido a la desintegración del género *Prosopis*, llamándose desde ahora *Neltuma flexuosa* y *Neltuma alba*, respectivamente (Hughes *et al.*, 2022).

En torno a esta población de Algarrobos, la empresa SQM Salar S.A. dispuso de un pozo de extracción de agua, conocido como Camar-2 autorizado por la RCA N°226/2006, definiéndose un Área de Estudio con el objeto de realizar el seguimiento a los ejemplares cercanos, correspondiendo a los Algarrobos que se encontraban en el área de influencia de este pozo. Este pozo no se encuentra operativo (en el año 2018) y fue desmantelado (en el año 2021).

Posteriormente, en el marco del procedimiento sancionatorio iniciado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) mediante la Resolución Exenta N°1/Rol F-041-2016 (rectificado por Res. Ex. N°4/Rol F-041-2016), se considera la complementación de la información contenida en los informes del Plan de Seguimiento Ambiental Biológico (PSAB) en cuanto a la población de algarrobos cercanos al pozo (serie A) y la implementación de un programa de seguimiento de la vegetación y flora de la Quebrada de Camar. Para esto, se considera un estudio eco-fisiológico enfocado en la población de algarrobos que se desarrolla en la quebrada (Acción 24).

Considerando lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, analizando el estado hídrico de una muestra de 18 individuos de algarrobos de la serie A, distribuidos en las proximidades del actualmente inoperativo y desmantelado ex pozo Camar-2 a través de las variables potencial hídrico (pre alba y mediodía) y conductancia estomática, y su comparación con otros individuos de algarrobos pertenecientes a las series B y C (n=10). Por otro lado, se considera comparar todos los ejemplares (n=31) a monitorear según su ubicación respecto a una tubería que cruza el área de estudio de norte a sur, y entre individuos regados y no regados (el riego inició en diciembre de 2022).

Cuando un árbol tiene estrés por falta de agua, presenta valores más negativos de potencial hídrico (Tyree *et al.*, 2002). Giordano *et al.* (2011) menciona potenciales de pre-alba de entre -1,3 y -3,8 MPa para individuos de *Prosopis flexuosa* (*Neltuma flexuosa*) con acceso restringido a la napa, medidos entre los meses de diciembre y marzo, siendo más negativo en la medida que se reduce la oferta de agua. Al mediodía se esperaría registrar valores más negativos de potencial hídrico, en comparación con la pre-alba, debido a que en ese momento del día se produce el mayor déficit de presión de vapor, por lo que la columna de agua queda sometida a una mayor tensión. Así mismo, la conductancia estomática también debería disminuir cuando presenta estrés hídrico, como resultado del cierre estomático para disminuir la pérdida de vapor de agua (Taiz y Zeiger, 2002).

La información que se entrega en este informe fue obtenida, analizada y discutida por los profesionales Paola Silva, José Ayamante y Sótero Astaburuaga (Anexo 14).

Objetivo

Caracterizar el estado fisiológico de la población de los algarrobos de Camar, objeto de seguimiento ambiental en el marco de la RCA N°226/2006, mediante la medición de variables que permiten determinar el estado hídrico de una muestra de individuos de *Neltuma alba* (n=18), distribuidos en las proximidades del actualmente inoperativo y desmantelado ex pozo Camar-2 (serie A), y comparar esta muestra con individuos de las series B y C (n=10), según su ubicación respecto de la tubería y según el riego aplicado.

Objetivos específicos

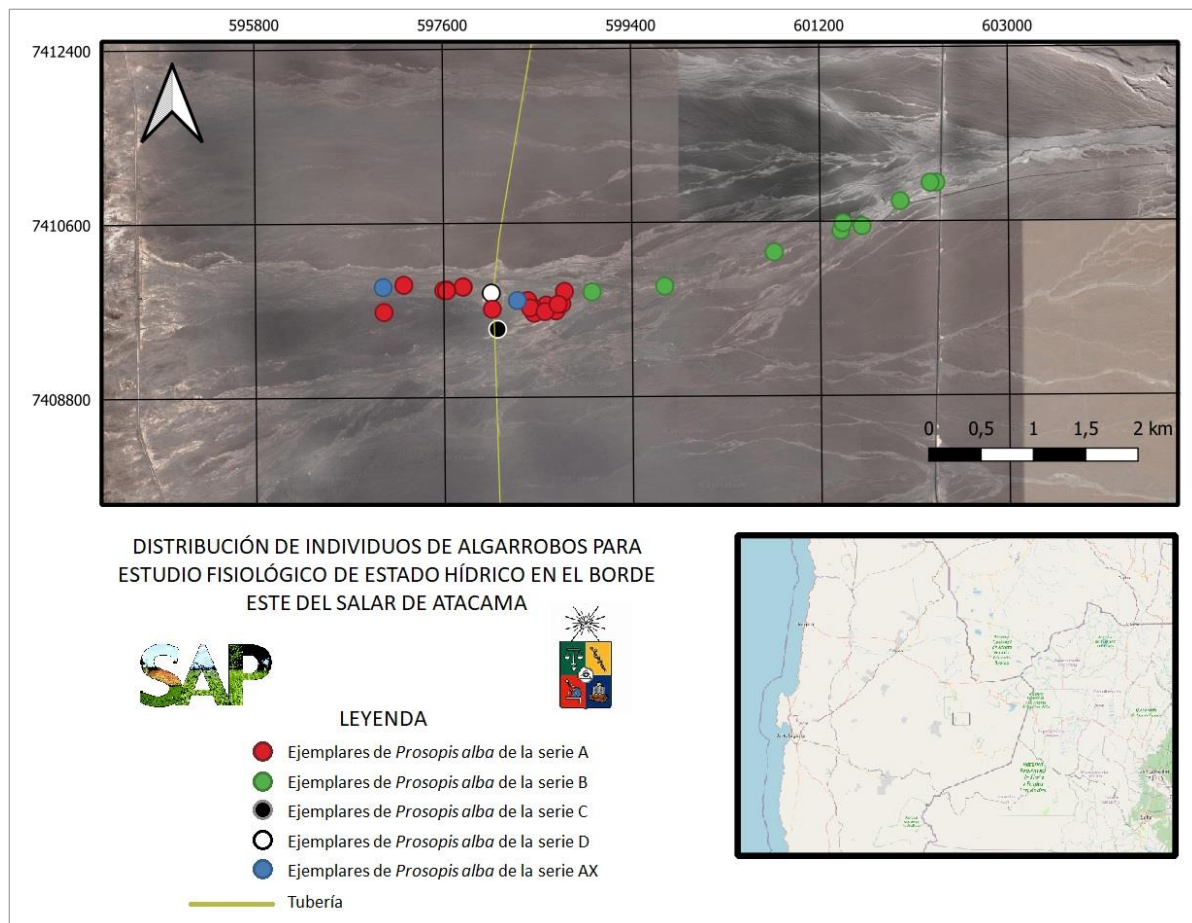
- Medir el potencial hídrico Ψ (MPa) de 31 individuos en muestras vegetales (ramillas) con cámara de presión tipo Scholander en dos momentos, pre-alba y mediodía.
- Estimar la conductancia estomática g_s ($\text{mmol/m}^2 \text{ s}^{-1}$) de 31 individuos a través de un porómetro de flujo estacionario, con muestras vegetales (hojas).
- Realizar un análisis estadístico de los resultados considerando la existencia de diferencias significativas entre: (1) individuos de la serie A y resto de los individuos de las series B y C; (2) entre individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería; y (3) entre individuos con y sin riego.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio se ubica en una zona altiplánica, en el sector oriental de la provincia de Antofagasta, II Región, Chile, en el Salar de Atacama (Figura 1). El estudio se realiza en la quebrada de Camar, la que tiene una superficie total de 38 km² (Ramírez, 1972). La cuenca del Salar de Atacama tiene una influencia del tipo climático “Desértico Marginal de Altura”, que se localiza por sobre los 2.000 metros de altura, por lo que las temperaturas son más atenuadas, presentando una media anual de 10 °C. Las lluvias se concentran en los meses de verano, debido al invierno altiplánico, y fluctúan entre 50 y 100 mm anuales (DGA, 2004). Según la estación meteorológica más cercana (Camar, San Pedro de Atacama), la precipitación acumulada de los últimos doce meses es de 53,7 mm, mientras que la temperatura media anual es de 16,3 °C (INIA, 2023).

Figura 1. Ubicación puntos de medición variables fisiológicas.



Fuente: Laboratorio SAP a partir de Geobiota, 2023.

En la cuenca del Salar de Atacama los suelos son muy escasos, debido a que está constituida mayoritariamente por el cuerpo salino del Salar de Atacama, identificando en la zona adyacente

al salar una unidad taxonómica que corresponde al tipo Entisol. Este tipo de suelo se caracteriza por su carencia de horizontes bien desarrollados, poco evolucionados por la aridez de la zona, su alto contenido salino y pH elevado (DGA, 2004). La zona de estudio está dominada en gran medida por individuos de Algarrobo, que son parte de la base de subsistencia tradicional de la Comunidad de Camar.

Individuos medidos en estudio

Se realizaron mediciones del estado hídrico en ejemplares de algarrobo ubicados en las proximidades del ex pozo Camar-2 (no se encuentra operativo y fue desmantelado) de la empresa SQM Salar S.A., en el Salar de Atacama, específicamente en la Quebrada de Camar. Los árboles del Área de Estudio se encuentran a menos de 1,1 km del ex pozo Camar-2, y se consideró un grupo de 18 árboles (serie A) que corresponden a la población objetivo de este seguimiento. Estos árboles están distribuidos aguas arriba y aguas abajo respecto de una tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio, además, cuentan con un sistema de riego, como se indican en la Tabla 1, y cuya ubicación se puede visualizar en la Figura 1. Las mediciones fueron realizadas entre los días 18 y 20 de octubre de 2023. Cabe destacar, que también se considera un grupo de ejemplares constituidos por 9 individuos, los que corresponden a árboles de la serie B, 1 individuo de la serie C, 1 individuo de la serie D y 2 individuos de la serie AX.

Tabla 1. Ubicación de los árboles, su ubicación respecto de la tubería y presencia de riego (Proyección: UTM; Datum: WGS84; zona: 19S).

N	Árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Serie	Posición c/respecto tubería	Riego
1	A04	598066	7409720	A	aguas abajo	Si
2	A07	597031	7409692	A	aguas abajo	Si
3	A12	597223	7409975	A	aguas abajo	Si
4	A17	597603	7409916	A	aguas abajo	Si
5	A21	597632	7409915	A	aguas abajo	Si
6	A22	597634	7409921	A	aguas abajo	Si
7	A30	597788	7409952	A	aguas abajo	Si
8	A31	597792	7409953	A	aguas abajo	Si
9	A33	598759	7409902	A	aguas arriba	Si
10	A36	598732	7409766	A	aguas arriba	Si
11	A37	598698	7409766	A	aguas arriba	Si
12	A38	598677	7409695	A	aguas arriba	Si
13	A40	598574	7409693	A	aguas arriba	Si
14	A41	598469	7409677	A	aguas arriba	Si
15	A43	598432	7409734	A	aguas arriba	Si
16	A44	598449	7409740	A	aguas arriba	Si
17	A47	598581	7409758	A	aguas arriba	Si
18	A58	598407	7409807	A	aguas arriba	Si
19	B02	599016	7409889	B	aguas arriba	No
20	B03	599710	7409937	B	aguas arriba	No

N	Árbol	Coordenada Este	Coordenada Norte	Serie	Posición c/respecto tubería	Riego
21	B04	600761	7410288	B	aguas arriba	No
22	B09	601420	7410585	B	aguas arriba	No
23	B10	601403	7410509	B	aguas arriba	No
24	B11	601603	7410548	B	aguas arriba	No
25	B17	601972	7410806	B	aguas arriba	No
26	B20	602261	7410998	B	aguas arriba	No
27	B21	602313	7410998	B	aguas arriba	No
28	C58	598113	7409506	C	aguas arriba	No
29	D28	598055	7409879	D	aguas abajo	No
30	AX01	598305	7409804	AX	aguas arriba	Si
31	AX02	597020	7409942	AX	aguas abajo	No

Equipos utilizados

Para la medición de potencial hídrico (en pre-alba y mediodía) se utilizó una cámara de presión tipo Scholander, la que no requiere calibración. Por otro lado, para la medición de conductancia estomática, se utilizó un porómetro marca Meter SC-1, el que se calibra previo a realizar las mediciones y cuyo certificado de calibración se presenta en el apéndice 1.

Metodología para medición del estado hídrico de las plantas

- **Potencial hídrico en pre-alba y mediodía**

El potencial hídrico se midió en pre-alba de manera de registrar la capacidad de recuperación hídrica de los árboles durante la noche (Acevedo *et al.*, 1985). Las mediciones se realizaron con una cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965; May *et al.*, 2011), que es el equipo más utilizado para una lectura rápida y sencilla, y es el mejor método disponible para condiciones de campo (García *et al.*, 2009). Para la medición se utilizó nitrógeno gaseoso como gas presurizado, en ramillas formadas durante la temporada anterior. Se seleccionaron 2 ramillas por árbol, las que se ubicaron al interior de una bolsa plástica sellada con una capa de papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980). Cada ramilla se cortó, se desenvolvió y se introdujo inmediatamente en la cámara de presión para medir su potencial hídrico entre las 5:45 y 6:45 am.

El potencial hídrico en mediodía fue medido para registrar el estado hídrico al momento de mayor demanda de vapor de agua por parte de la atmósfera, debido a la alta radiación y mayor déficit de presión de vapor. Previo a la medición, se eligieron 2 ramillas y se envolvieron en bolsas plásticas con papel aluminio (Meyer & Ritchie, 1980; Williams, 2001; Sellés *et al.*, 2002) durante 1 hora aproximadamente, para equilibrar el potencial hídrico foliar y xilemático. Posteriormente se midió el potencial hídrico entre las 12:00 y 13:00 horas, de la misma forma que se describió para la medición de pre-alba.

En las figuras 2 y 3 se presentan registros fotográficos de las mediciones de potencial hídrico realizadas entre el 18 y 20 de octubre de 2023.

Figura 2. Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico en pre-alba.



Figura 3. Registro fotográfico mediciones de potencial hídrico de mediodía.



- **Conductancia estomática**

La transpiración corresponde al flujo de vapor de agua, desde las plantas hacia la atmósfera. Este flujo de vapor de agua ocurre desde los espacios intercelulares de la cavidad subestomática, moviéndose por difusión, a través de los estomas, hacia la atmósfera.

Los estomas son poros que están en la cara abaxial de las hojas de algarrobo, cuya apertura responde a condiciones ambientales. La conductancia estomática es un indicador de la apertura de estos, determina la facilidad con que las hojas transpiran, y su magnitud depende de la densidad, tamaño y grado de apertura de los estomas (METER Group, 2020). Si los estomas se cierran, la conductancia estomática disminuirá y el flujo de vapor de agua se reducirá.

La conductancia estomática (gs) es el principal factor limitante para la fotosíntesis y es sensible al estado del agua en la planta. Evaluar con precisión el comportamiento de la conductancia

estomática, sobre todo en individuos bajo estrés por déficit de agua, en zonas desérticas o xerofíticas, es esencial para entender el flujo del agua en las especies y sería un indicador de su producción y biomasa (Doudou *et al.*, 2020), ya que se produce un intercambio gaseoso con la salida hacia la atmósfera de vapor de agua y la captación de CO₂ por las plantas necesario para la producción de biomasa (Carvajal y Andrade, 2020).

La conductancia estomática se mide con un porómetro de flujo estacionario marca Meter, modelo SC-01, el que es calibrado por el profesional a cargo de esta medición (Sótero Astaburuaga), previo a las mediciones de cada día, respecto de las condiciones ambientales presentes en ese momento. Las mediciones se realizan entre las horas de máxima apertura estomática, en hojas adultas y sanas de exposición Este, de 10:00 a 11:30 am. En la figura 4 se presentan registros fotográficos de las mediciones de conductancia estomática realizadas entre el 18 y 20 de octubre de 2023.

Figura 4. Registro fotográfico mediciones de conductancia estomática.



Análisis estadístico

Se realizaron comparaciones para determinar la existencia de diferencias significativas entre:

1. Individuos de la serie A (N=18), que corresponden a la población objeto del seguimiento histórico en el contexto del PSAB, posicionados en las proximidades del pozo Camar-2, y el resto de los individuos de las series B y C (N=10).
2. Individuos ubicados aguas arriba (N=21, pertenecientes a las series A, B, C y AX) y aguas abajo (N=10, pertenecientes a las series A, D y AX) de la tubería que atraviesa de norte a sur el área de estudio.
3. Individuos con riego (N=19, pertenecientes a las series A y AX) y sin riego (N=12, pertenecientes a las series B, C, D y AX).

Cuando no se pudo realizar alguna medición de potencial hídrico o conductancia estomática, el análisis estadístico se realiza de igual manera reduciendo el N definido anteriormente. Las variables medidas en los Algarrobos se estudiaron a través de un análisis de varianza considerando

como factor fijo la serie a la que corresponden (anexos 2, 3 y 4), la ubicación respecto de la tubería (anexos 5, 6 y 7), y la presencia de un sistema de riego (anexos 8, 9 y 10).

Cuando se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, se procedió a realizar una prueba de separación de medias, por medio de la prueba DGC o LSD-Fisher (Di Rienzo *et al.*, 2011), al 5% de probabilidad de error lo que es igual a un nivel de confianza del 95%.

Cuando no se cumplió con el supuesto de normalidad de la varianza, se transformaron los datos a su valor inverso y cuando persistió el no cumplimiento, se usó un análisis de varianza no paramétrico (Kruskal Wallis) (Pérez, 2018). Cuando no se cumplió con el supuesto de homocedasticidad de la varianza, se utilizó un modelo heterocedástico (modelo lineal general). Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat v.2020.

RESULTADOS

A continuación, se presentan los valores de potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}) y mediodía (Ψ_{md}), y conductancia estomática (gs) medidos en octubre de 2023 (tabla 2). Los valores de la población objetivo (serie A) fluctuaron entre -0,7 y -2,15 MPa en Ψ_{pa} , entre -1,05 y -3,0 MPa en Ψ_{md} , y entre 98,8 y 491,3 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en gs.

Tabla 2. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) medidos en octubre de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Árbol	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol/m}^2 \text{s}^{-1}$)	Serie	Posición*	Riego
A04	-1,00	-1,80	226,10	A	Abajo	Si
A07	-0,90	-2,05	171,48	A	Abajo	Si
A12	-0,90	-1,70	394,40	A	Abajo	Si
A17	-	-	402,70	A	Abajo	Si
A21	-1,00	-2,00	349,50	A	Abajo	Si
A22	-	-	491,30	A	Abajo	Si
A30	-1,00	-1,50	387,80	A	Abajo	Si
A31	-1,00	-	350,38	A	Abajo	Si
A33	-1,60	-1,90	199,95	A	Arriba	Si
A36	-1,35	-1,80	151,65	A	Arriba	Si
A37	-1,15	-1,75	192,53	A	Arriba	Si
A38	-0,80	-1,70	334,80	A	Arriba	Si
A40	-1,25	-2,10	249,93	A	Arriba	Si
A41	-1,00	-1,50	302,63	A	Arriba	Si
A43	-0,90	-1,30	199,15	A	Arriba	Si
A44	-0,90	-2,40	205,93	A	Arriba	Si
A47	-0,95	-1,75	273,23	A	Arriba	Si
A58	-0,90	-1,50	286,18	A	Arriba	Si
B02	-0,70	-2,50	150,80	B	Arriba	No
B03	-1,40	-2,65	186,30	B	Arriba	No
B04	-1,55	-2,45	163,53	B	Arriba	No
B09	-1,40	-1,05	170,50	B	Arriba	No
B10	-2,15	-3,00	187,15	B	Arriba	No
B11	-1,45	-2,10	121,78	B	Arriba	No
B17	-1,05	-1,50	273,10	B	Arriba	No
B20	-1,05	-1,30	229,28	B	Arriba	No
B21	-1,20	-1,95	160,75	B	Arriba	No
C58	-	-	98,80	C	Arriba	No
D28	-1,10	-2,00	336,08	D	Abajo	No
AX01	-1,20	-2,00	269,68	AX	Arriba	Si
AX02	-	-	464,83	AX	Abajo	No

*: Posición respecto de la tubería. -: Árboles no medidos por falta de ramillas u hojas.

En esta campaña los árboles A17, A22, C58 y AX02 no pudieron ser medidos en pre-alba y mediodía por falta de ramillas. Así mismo, el árbol A31 no pudo ser medido al mediodía.

Comparación de algarrobos de la Serie A y Series B-C

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en octubre de 2023 para los árboles de la serie A y de las series B-C (tabla 3). Se encontraron diferencias significativas al comparar el potencial hídrico en pre-alba ($p=0,0254$) y la conductancia estomática ($p=0,0003$), con los valores más bajos en los árboles de la serie B-C ($-1,33$ MPa y $174,2$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente). Por el contrario, el potencial hídrico de mediodía no se diferenció significativamente ($p=0,2535$), alcanzando un valor promedio de $-1,89$ MPa.

Tabla 3. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para serie A y series B-C, medidos en octubre de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Serie	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
A	$-1,04 \pm 0,05$ a	$-1,78 \pm 0,07$ a	$287,20 \pm 22,51$ a
B-C	$-1,33 \pm 0,14$ b	$-2,06 \pm 0,22$ a	$174,20 \pm 15,78$ b
Promedio	$-1,14 \pm 0,06$	$-1,89 \pm 0,10$	$246,84 \pm 18,53$

Valores promedio corresponden a las medias ± 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC (Ψ_{pa} y Ψ_{md}) y LSD-Fisher (gs) de separación de medias.

Comparación de algarrobos según su ubicación respecto de la tubería

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en octubre de 2023 para los árboles ubicados aguas arriba de la tubería y aguas abajo (tabla 4). Se encontraron diferencias significativas en potencial hídrico en pre-alba ($p=0,0140$) y en la conductancia estomática ($p<0,0001$), alcanzando los valores más bajos en los árboles ubicados aguas arriba ($-1,2$ MPa y $209,89$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente). Por el contrario, el potencial hídrico de mediodía no mostró diferencias entre ambos grupos de árboles ($p=0,7511$), alcanzando un valor promedio de $-1,89$ MPa.

Tabla 4. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para individuos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería, medidos en octubre de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

Ubicación respecto de la tubería	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Aguas arriba	$-1,20 \pm 0,08$ b	$-1,91 \pm 0,11$ a	$209,89 \pm 13,65$ b
Aguas abajo	$-0,99 \pm 0,03$ a	$-1,84 \pm 0,09$ a	$357,46 \pm 30,95$ a
Promedio	$-1,14 \pm 0,06$	$-1,89 \pm 0,09$	$257,49 \pm 18,32$

Valores promedio corresponden a las medias ± 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test LSD-Fisher (Ψ_{pa}) y DGC (Ψ_{md} y gs) de separación de medias.

Comparación de algarrobos con y sin riego

A continuación, se presentan los valores promedio de Ψ_{pa} , Ψ_{md} y gs medidos en octubre de 2023 para los árboles con y sin riego (tabla 5). Se encontraron diferencias significativas tanto en el potencial hídrico en pre-alba ($p=0,0318$) como en conductancia estomática ($p=0,0460$). Los valores más bajos se encontraron en los árboles sin riego, con valores de $-1,31$ MPa y $211,91$ mmol $m^{-2} s^{-1}$, respectivamente. Por el contrario, al comparar el potencial hídrico de mediodía, no se encontraron diferencias respecto del riego ($p=0,2379$), con un valor promedio de $-1,89$ MPa.

Tabla 5. Potencial hídrico de ramilla en pre-alba (Ψ_{pa}), potencial hídrico de ramilla de mediodía (Ψ_{md}) y conductancia estomática (gs) promedios para individuos con y sin riego, medidos en octubre de 2023 en algarrobos de la Quebrada de Camar.

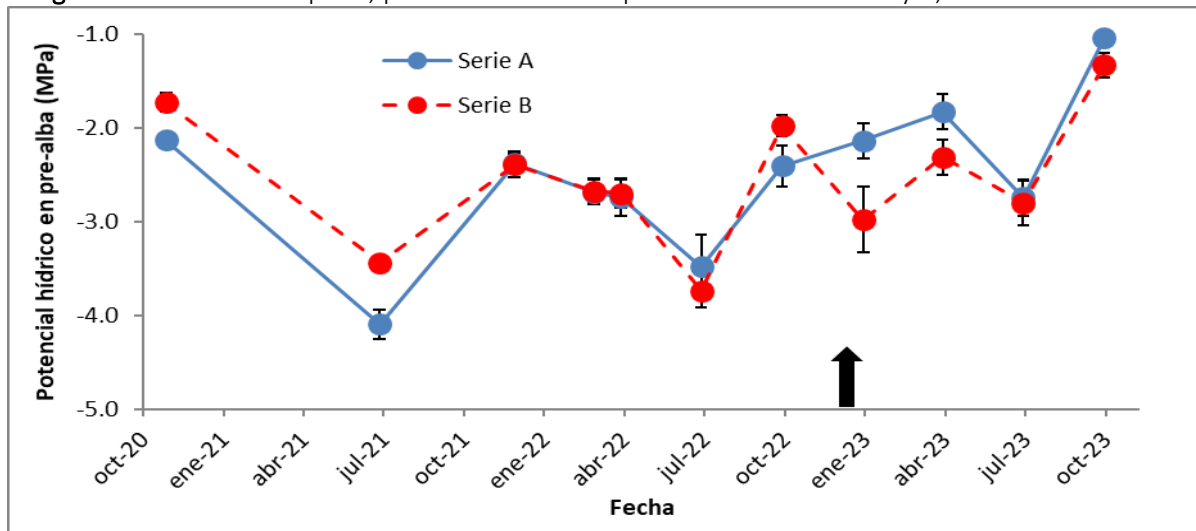
Riego	Ψ_{pa} (MPa)	Ψ_{md} (MPa)	gs (mmol $m^{-2} s^{-1}$)
Con riego	$-1,05 \pm 0,05$ a	$-1,80 \pm 0,07$ a	$286,28 \pm 21,31$ a
Sin riego	$-1,31 \pm 0,12$ b	$-2,05 \pm 0,20$ a	$211,91 \pm 29,65$ b
Promedio	$-1,14 \pm 0,06$	$-1,89 \pm 0,09$	$257,49 \pm 18,32$

Valores promedio corresponden a las medias ± 1 Error Estándar. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% según el test DGC de separación de medias.

Evolución temporal

En la figura 5 se observa la evolución en el tiempo (desde noviembre de 2020 a la actualidad) del potencial hídrico en pre-alba en los árboles de la serie A y B. En los meses de julio (2021 y 2022) se observan los valores más bajos de potencial (inferiores a $-3,0$ MPa), tanto en la serie A como en la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego (diciembre 2022) la serie B tuvo valores superiores o similares a los de la serie A, lo que se da por el mejor estado hídrico de los árboles B11, B17, B20 y B21. Estos árboles se encuentran distribuidos cercanos a la ruta CH-23, donde los árboles B20 y B21 reciben diariamente agua liberada desde el poblado de Camar, lo que ha sido observado desde el inicio de las mediciones en 2020. Pese a ello, al iniciar el riego, la serie A alcanza valores superiores a los de la serie B en enero, abril y octubre de 2023. En la campaña de octubre 2023, se alcanzaron los valores más altos de todo el seguimiento, tanto en la serie A como en la serie B.

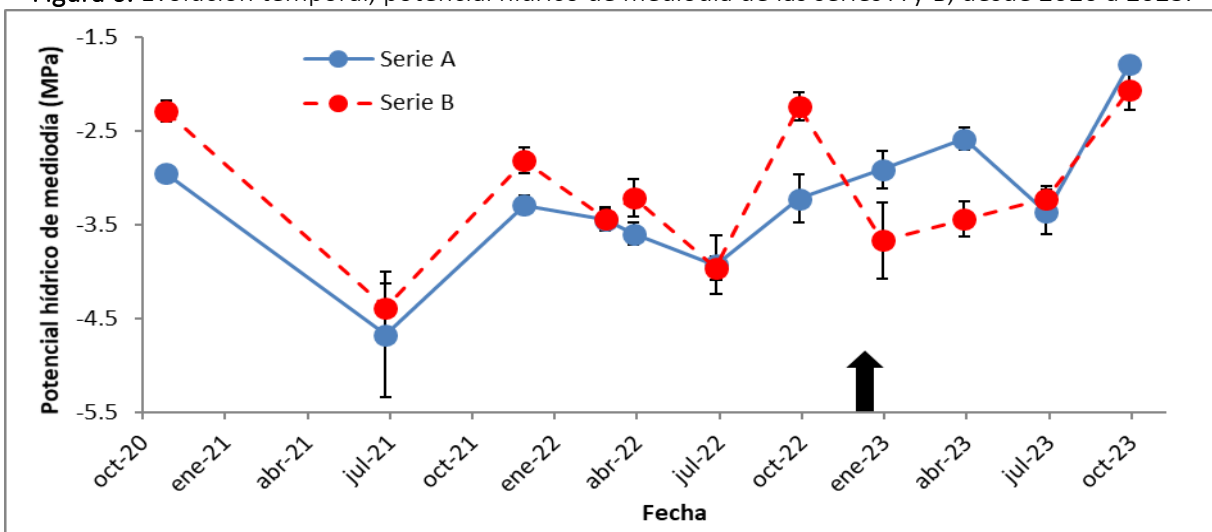
Figura 5. Evolución temporal, potencial hídrico en pre-alba en las series A y B, desde 2020 a 2023.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6 se observa la evolución en el tiempo del potencial hídrico de mediodía en los árboles de la serie A y B. Al igual que en el potencial hídrico en pre-alba, se aprecia que en los meses de julio (2021 y 2022) se presentaron valores más bajos de potencial de cada año (en 2021 alcanzan valores inferiores a los -4,0 MPa), tanto para la serie A como para la serie B. Por otro lado, antes de la aplicación de riego la serie B alcanzó una media superior a la de la serie A, mientras que, en las campañas de enero y abril de 2023, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B. En esta campaña de octubre de 2023, la serie A alcanza el valor de potencial hídrico de mediodía más alto de todo el seguimiento (-1,78 MPa).

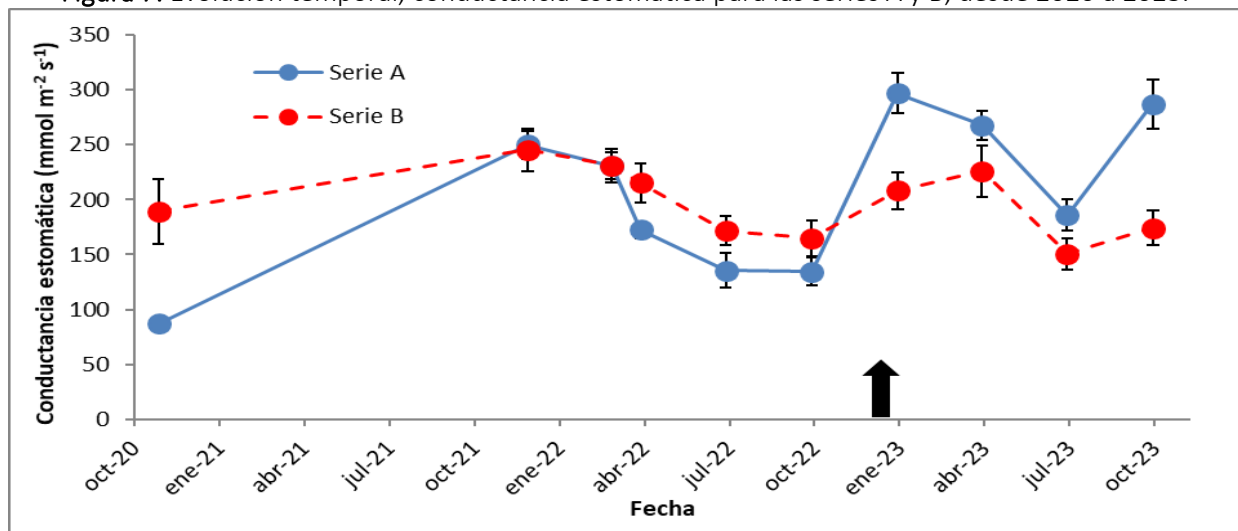
Figura 6. Evolución temporal, potencial hídrico de mediodía de las series A y B, desde 2020 a 2023.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7 se observa la evolución en el tiempo (desde noviembre de 2020 a la actualidad) de la conductancia estomática en los árboles de la serie A y B. Se aprecia que antes de la aplicación de riego, la serie B alcanzó valores superiores o similares a los de la serie A (hasta 2022), mientras que, en las últimas cuatro campañas, con la aplicación del riego en la serie A, esta alcanza valores superiores a los de la serie B. En esta campaña de octubre se observaron valores más altos de conductancia estomática respecto de la campaña realizada en invierno de este año.

Figura 7. Evolución temporal, conductancia estomática para las series A y B, desde 2020 a 2023.



Las barras verticales representan el error estándar de la media. La flecha representa el inicio de la aplicación de riego en los árboles de la serie A. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

En octubre de 2023 se observaron algarrobos ubicados en las proximidades del ex pozo Camar-2 que presentan un aumento significativo en su cobertura, respecto de lo observado en la campaña de julio de 2023 (Anexo 1. Registro fotográfico). Lo que se refleja en la mayor cantidad de datos obtenidos comparado con la campaña anterior. Pese a esto, no fue posible medir los árboles A17, A22, AX02 y C58 por la inexistencia de ramillas medibles, mientras que en el árbol A31 solo se pudo medir en una ramilla el potencial hídrico. Esta falta de ramillas se puede deber, a la escasa regeneración de ramillas, al ramoneo producido por burros que hay en la zona, y a la naturaleza destructiva de la medición de los potenciales hídricos que corta 4 ramillas por campaña de medición (2 para Ψ_{pa} y 2 para Ψ_{md}). En este sentido no se recomienda realizar mediciones de potencial hídrico en árboles que tengan solo una ramilla, con el objetivo de favorecer la recuperación de estos.

La ficha de clasificación de estado de conservación de *N. alba* y *N. flexuosa*, describen estas especies como de hojas caducas, es decir, que pierden gran parte de sus hojas en invierno (MMA, 2012a; MMA, 2012b). Así mismo, *N. chilensis*, también ha sido descrito como caducifolio en su distribución sur en Latinoamérica, lo que se produce como resultado del efecto de las heladas (FAO, 1997). Esto podría explicar la falta de hojas observada en algarrobos durante el mes julio.

En esta campaña se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables fisiológicas de potencial hídrico en pre-alba y conductancia estomática, entre las series A (cercano al pozo Camar-2) y B-C, observándose en la serie B-C los valores más bajos (-1,33 MPa y 174,2 mmol m⁻²s⁻¹, respectivamente). Por otra parte, al comparar el estado hídrico de los algarrobos con y sin riego, también se observaron las mismas diferencias entre estos grupos, encontrando el valor más bajo en los árboles sin riego (-1,31 MPa y 211,91 mmol m⁻²s⁻¹, respectivamente). Así mismo, al comparar los algarrobos ubicados aguas arriba y aguas abajo de la tubería que atraviesa la quebrada, también se observaron las mismas diferencias, con los valores más bajos en los árboles ubicados aguas arriba (-1,2 MPa y 209,89 mmol m⁻²s⁻¹), lo que se podría explicar debido a la cantidad de árboles sin riego que hay aguas arriba de la tubería (48%), mientras que aguas abajo solo dos árboles no tienen sistema de riego (18%).

Al observar los valores de potencial en pre-alba en la serie A (-1,04 MPa), como en la serie regada (-1,05 MPa), los valores en esta campaña superan el rango mencionado por Giordano *et al.* (2011) para *Neltuma flexuosa* ubicados en zonas de valle (mayor acceso al agua), lo que se explica por la aplicación del riego en la mayoría de los árboles, alcanzando valores más altos de potencial. Por otro lado, los individuos de las series B-C (sin riego) tienen sus valores de potencial en pre-alba y conductancia estomática dentro del rango de individuos de *Neltuma flexuosa* ubicados en zonas de mayor acceso al agua como es la zona de valle donde hicieron sus evaluaciones.

El déficit hídrico se produce cuando la demanda hídrica es mayor que el suministro hídrico, en este sentido hay que considerar que la demanda depende tanto de las condiciones atmosféricas como de la magnitud de área foliar que se encuentra transpirando, es así que, desde que comenzó el riego de los algarrobos, enero 2023, las diferencias entre las series A y B-C como en la serie

regada y no regada se han observado en los meses en que es mayor tanto la demanda atmosférica como el área foliar de los algarrobos (enero, abril y octubre).

Al analizar la dinámica temporal de las variables medidas, se observa un patrón similar en el potencial hídrico en pre-alba y mediodía, donde los valores de potencial presentan cambios estacionales. En los meses de julio el potencial tiende a ser el más negativos de cada año (Figura 5 y Figura 6). Este cambio temporal de potenciales coincide con lo evaluado en otras especies freatófitas del Desierto de Atacama *Strombocarpa tamarugo* (SAP, 2021) y *Strombocarpa burkartii* (Carevic *et al.*, 2017). El menor potencial hídrico observado en julio podría ser efecto de las bajas temperaturas (Allen y Ort, 2001), a la cavitación del xilema (Hacke y Sauter, 1996), a cambios en la fluidez y permeabilidad de las membranas (Sellin y Kupper, 2007) o a cambios a la viscosidad del agua (López y Nobel, 1990).

CONCLUSIONES

En la campaña de octubre de 2023, se evidencia que:

- Los algarrobos de la serie A muestran un mejor estado hídrico que los algarrobos de las series B-C, expresado en un mayor potencial hídrico en pre-alba y conductancia estomática.
- Se observan diferencias en los algarrobos en relación a su ubicación respecto de la tubería, con los valores más bajos en los árboles ubicados aguas arriba.
- Los algarrobos regados se diferencian con los algarrobos no regados en las variables de potencial hídrico en pre-alba y conductancia estomática.
- Las diferencias observadas tendrían relación a la aplicación del riego, expresándose diferencias en los meses de mayor demanda atmosférica, alcanzando siempre valores más altos en los individuos que reciben riego.

En relación con las mediciones anteriores, se evidencia que:

- Los valores de potencial hídrico de esta campaña son los más altos del año, observándose un alza después de la campaña invernal, como respuesta a la variación estacional.
- Se observa un efecto de la aplicación del riego en los árboles de la serie A, mostrando una tendencia de mayor potencial hídrico y conductancia estomática que la serie B, durante todo el año 2023, a excepción de julio donde los valores de todas las variables son más bajos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., Sotomayor, D. and Zenteno, V. 1985. Parámetros hídricos de tejidos foliares de *Prosopis tamarugo* Phil. In: Estado actual del conocimiento sobre *Prosopis tamarugo*. Habit, M. (Eds). Arica, Chile. 11-15 de junio de 1984, FAO: 500.
- Allen, D. & Ort, D. 2001. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends in Plant Science*, 6(1), 36–42.
- Bucci, S., Scholz, F., Goldstein, G., Meinzer, F., Hinojosa, J., Hoffmann, W. and Franco, A. 2004. Processes preventing nocturnal equilibration between leaf and soil water potential in tropical savanna woody species. *Tree Physiology* 24: 1119-1127.
- Carvajal, B. y Andrade, H. 2020. Captura de carbono en biomasa de sistemas de uso de suelo, municipio de Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia* 24(1): 13-22.
- Carevic, F. S., Delatorre-Herrera, J. and Carrasco, A. 2017. Plant water variables and reproductive traits are influenced by seasonal climatic variables in *Prosopis burkartii* (Fabaceae) at Northern Chile. *Flora* 233: 7-11.
- Dirección General de Agua (DGA). 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca Salar de Atacama.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Doudou, L., Ximeng, L., Benye X., Virginia H. 2020. Evaluation of method to model stomatal conductance and its use to assess biomass increase in poplar trees. *Agricultural Water Management* 259:107228.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 1997. *Prosopis chilensis*, especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina. Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Sistemas Agroforestales.
- García, A., Cun, R., Chong, C., Duarte, C. y Montero, L. 2009. Calibration of a hydraulic pressure chamber developed in Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18(3):24-29.
- Giordano, C., Guevara, A., Boccalandro, H., Sartor, C. and Villagra, P. 2011. Water status, drought responses, and growth of *Prosopis flexuosa* trees with different Access to the water table in a warm South American desert. *Plant Ecol.* 212:1123-1134.
- Hacke, U. y Sauter, J. 1996. Xylem dysfunction during winter and recovery of hydraulic conductivity in diffuse-porous and ring-porous trees. *Oecologia* 105:435-439.

- Hughes, C., Ringelberg, J., Lewis, G. y Catalano, S. 2022. Desintegración del género *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, clado mimosoide). *PhytoKeys* 205:147-189.
- Ibáñez, S. 2019. Informe taxonómico de identificación de las especies de *Prosopis* en la Quebrada de Camar. Apéndice 4.7-10. SQM.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2023. Agrometeorología, Red Agrometeorológica INIA, Estación Camar, San Pedro de Atacama. Consultado el 6 de noviembre de 2023.
- Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta (SAP). 2021. Informe Proyecto Pampa Hermosa Llamara 2021. SQM.
- López, F. y Nobel, P. 1990. Root hydraulic conductivity of two cactus species in relation to root age, temperature, and soil water status. *Journal of Experimental Botany* 42:143-149.
- May, C., Pérez, A., Ruiz, E., Ic, A. y García, A. 2011. Effect of moisture levels on growth and water potential of *Capsicum chinense* Jacq. and their relationship to the development of *Bemisia tabaci* Genn, *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(2011):1039-1045.
- METER Group. 2020. Manual Porómetro de hoja SC-1. USA.
- Meyer, W.S. & Ritchie, J.T. 1980. Resistance to Water Flow in the Sorghum Plant. *Plant Physiology* 65: 33-39.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2012a. Ficha de antecedentes de especie 582, *Prosopis flexuosa* DC. Clasificación según estado de conservación.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). 2012b. Ficha de antecedentes de especie 578, *Prosopis alba* Grise. var. alba. Clasificación según estado de conservación.
- Pérez, L. 2018. How do we proceed to violations of parametric methods assumptions? or how to work with non-normal biological variables? *Revista del Jardín Botánico Nacional* 39: 1-12.
- Ramírez, E. 1972. Caracterización climatológica e hidrológica del Salar de Atacama. CORFO.
- Scholander, P., Bradstreet Edda, D., Hemmingsen, E. and Hammel, H. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* 148: 339–346.
- Sellés, V., Ferreyra, E. y Maldonado, P. 2002. Cámara de presión, Instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. *Aconex* 76:18-22.

Sellin, A. y Kupper, P. 2007. Temperature, light and leaf hydraulic conductance of little-leaf linden (*Tilia cordata*) in a mixed forest canopy. *Tree Physiology* 27:679-688.

Taiz, L. & Zeiger, E. 2002. *Plant Physiology* (Third Edition). Sinauer Associates, Inc. Sunderland.

Tyree, M., Vargas, G., Engelbrecht, B. y Kursar, T. 2002. Drought until death do us part: a case study of the desiccation-tolerance of a tropical moist forest seedling-tree, *Licania platypus* (Hemsl.) Fritsch. *J. Exp. Bot.* 53:2239-2247.

Williams, L. 2001. Irrigation of winegrapes in California. *Practical Winery & Vineyard* 23:42-55.

APÉNDICES

1. Certificado de calibración de porómetro



METER

METER Group, Inc. USA
Certificate of Quality Assurance

Model	Leaf Porometer, SC-1	Date	July 16, 2021
Order Type	Controller Serial Number: LP4527	Technician	KH
Sensor Serial Number		Calibration Value	
LPS3821		2204200	

This document is to certify that the instrument indicated above has been tested and approved by the Quality Assurance department at METER Group, Inc. USA , and has shown to function properly and to be free of event flaws or defects.

Manufactured in USA

METER Group, Inc. USA
2365 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163
T 509.332.2756 F 509.332.5158
E info@metergroup.com W metergroup.com

ANEXOS

1. Registro fotográfico

Se presenta registro fotográfico de los individuos de Algarrobos obtenidos en octubre de 2023.

Serie A



Árbol A04



Árbol A07



Árbol A12



Árbol A17



Árbol A21



Árbol A22



Árbol A30



Árbol A31



Árbol A33



Árbol A36



Árbol A37



Árbol A38



Árbol A40



Árbol A41



Árbol A43



Árbol A44



Árbol A47



Árbol A58

Serie B



Árbol B02



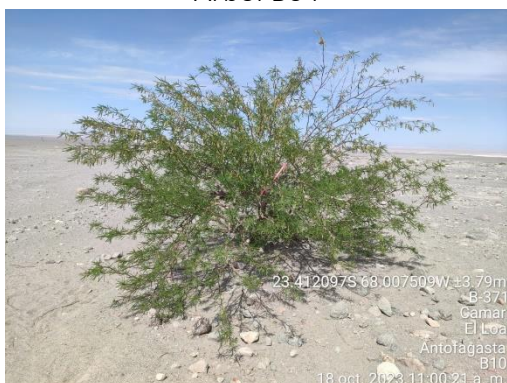
Árbol B03



Árbol B04



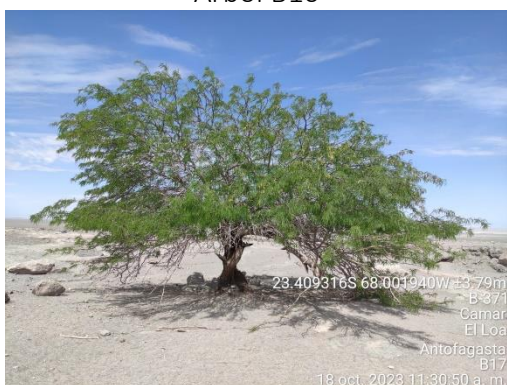
Árbol B09



Árbol B10



Árbol B11



Árbol B17



Árbol B20



Árbol B21

Series C, D y AX



Árbol C58



Árbol D28



Árbol AX01



Árbol AX02

2. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre Serie A y Serie B-C

PHpa

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHpa	25	0.20	0.16	25.52

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.49	1	0.49	5.72	0.0254
Grupo	0.49	1	0.49	5.72	0.0254
Error	1.95	23	0.08		
Total	2.44	24			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.2467

Error: 0.0849 gl: 23

Grupo Medias n E.E.

B -1.33 9 0.10 A

A -1.04 16 0.07 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre Serie A y Serie B-C

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.000_PHmd_REML<-glm(PHmd~1+Grupo
```



```
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Grupo))
,method=\"REML\"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data00)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.000_PHmd_REML

Variable dependiente: PHmd

Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
24	33.16	37.52	-12.58	0.28	0.08	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	690.80	<0.0001
Grupo	1	1.37	0.2535

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Grupo	1	22	1.37	0.2535

PHmd - Medias ajustadas y errores estándares para Grupo

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Grupo	Medias	E.E.
A	-1.78	0.07
B	-2.06	0.22

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Grupo

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
A	1.00
B	2.36

4. Modelo lineal general sobre conductancia estomática entre Serie A y Serie B-C

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.002_gs_REML<-glms(gs~1+Grupo
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Grupo))
,method=\"REML\"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data02)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.002_gs_REML

Variable dependiente: gs

Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
28	312.37	317.40	-152.18	95.49	0.32	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	267.76	<0.0001
Grupo	1	16.90	0.0003

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Grupo	1	26	16.90	0.0003

gs - Medias ajustadas y errores estándares para Grupo

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Grupo Medias E.E.

A	287.20	22.51	A
B	174.20	15.78	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Grupo

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
A	1.00
B	0.52

5. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles aguas arriba y abajo

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.004_PHpa_REML<-glm(PHpa~1+Posicion.c.respecto.tuberia
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Posicion.c.respecto.tuberia))
,method="REML"
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data03)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.004_PHpa_REML

Variable dependiente: PHpa

Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
27	10.69	15.56	-1.34	0.07	0.10	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	1671.01	<0.0001
Posicion.c.respecto.tuberi..	1	6.98	0.0140

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Posicion.c.respecto.tuberi..	1	25	6.98	0.0140

PHpa - Medias ajustadas y errores estándares para Posicion.c.respecto.tuberia

LSD Fisher (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Posicion.c.respecto.tuberi... Medias E.E.

aguas abajo -0.99 0.03 A

aguas arriba -1.20 0.08 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Posicion.c.respecto.tuberia

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
aguas abajo	1.00
aguas arriba	4.91

6. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles aguas arriba y abajo

PHmd

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHmd	26	4.3E-03	0.00	24.16

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		0.02	1	0.02	0.10	0.7511
Posición c/respecto tuberí...		0.02	1	0.02	0.10	0.7511
Error		5.03	24	0.21		
Total		5.05	25			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.4573

Error: 0.2094 gl: 24

Posición c/respecto tuberí... Medias n E.E.

aguas arriba -1.91 20 0.10 A

aguas abajo -1.84 6 0.19 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

7. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles aguas arriba y abajo

gs

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	31	0.47	0.45	29.25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

	F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		147519.54	1	147519.54	26.01	<0.0001
Posición c/respecto tuberí...		147519.54	1	147519.54	26.01	<0.0001
Error		164480.02	29	5671.72		
Total		311999.56	30			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=58.5103

Error: 5671.7247 gl: 29

Posición c/respecto tuberí... Medias n E.E.

aguas arriba 209.89 21 16.43 A

aguas abajo 357.46 10 23.82 B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

8. Análisis de varianza sobre potencial hídrico de pre-alba entre árboles con y sin riego

PHpa

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PHpa	27	0.17	0.14	24.91

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.42	1	0.42	5.17	0.0318
Riego	0.42	1	0.42	5.17	0.0318
Error	2.02	25	0.08		
Total	2.44	26			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=0.2304

Error: 0.0810 gl: 25

Riego Medias n E.E.

no -1.31 10 0.09 A

si -1.05 17 0.07 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

9. Modelo lineal general sobre potencial hídrico de mediodía entre árboles con y sin riego

Especificación del modelo en R

```
mlm.modelo.005_PHmd_REML<-glms(PHmd~1+Riego
,weights=varComb(varIdent(form=~1|Riego))
,method="REML")
,na.action=na.omit
,data=mlm.modeloR.data05)
```

Resultados para el modelo: mlm.modelo.005_PHmd_REML

Variable dependiente: PHmd

Medidas de ajuste del modelo

n	AIC	BIC	logLik	Sigma	R2	0
26	34.14	38.85	-13.07	0.28	0.08	

AIC y BIC menores implica mejor

Pruebas de hipótesis secuenciales

	numDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	781.83	<0.0001
Riego	1	1.47	0.2379

Pruebas de hipótesis marginales

Source	numDF	denDF	F-value	p-value
Riego	1	24	1.47	0.2379

PHmd - Medias ajustadas y errores estándares para Riego

DGC (Alfa=0.05)

Procedimiento de corrección de p-valores: No

Riego Medias E.E.

si -1.80 0.07 A

no -2.05 0.20 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Estructura de varianzas

Modelo de covarianzas de los efectos aleatorios: varIdent

Formula: ~ 1 | Riego

Parámetros de la función de varianza

Param	Estim
si	1.00
no	2.26

10. Análisis de varianza sobre conductancia estomática entre árboles con y sin riego

gs

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
gs	31	0.13	0.10	37.56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	40680.37	1	40680.37	4.35	0.0460
Riego	40680.37	1	40680.37	4.35	0.0460
Error	271319.19	29	9355.83		
Total	311999.56	30			

Test:DGC Alfa=0.05 PCALT=72.3481

Error: 9355.8342 gl: 29

Riego Medias n E.E.

no	211.91	12	27.92	A
si	286.28	19	22.19	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

11. Resultados de Potencial hídrico en pre-alba

Árbol	Hora	$\Psi_{pa\ 1}$ (MPa)	$\Psi_{pa\ 2}$ (MPa)
A04	6:02	-1,0	-
A07	6:38	-1,2	-0,6
A12	6:27	-0,9	-
A17	-	-	-
A21	6:20	-1,0	-
A22	-	-	-
A30	6:10	-1,0	-
A31	6:11	-1,0	-
A33	6:00	-1,7	-1,5
A36	6:03	-1,2	-1,5
A37	6:06	-1,0	-1,3
A38	6:11	-0,8	-
A40	6:17	-1,5	-1,0
A41	6:21	-1,0	-
A43	6:27	-0,9	-
A44	6:26	-0,9	-

Árbol	Hora	$\Psi_{pa} 1$ (MPa)	$\Psi_{pa} 2$ (MPa)
A47	6:15	-0,8	-1,1
A58	6:31	-0,9	-
AX01	6:35	-1,2	-
AX02	-	-	-
B02	6:40	-0,7	-
B03	6:33	-1,4	-1,4
B04	6:25	-1,4	-1,7
B09	6:13	-1,4	-1,4
B10	6:19	-2,2	-2,1
B11	6:11	-1,3	-1,6
B17	6:03	-1,2	-0,9
B20	5:57	-1,0	-1,1
B21	5:58	-1,1	-1,3
C58	-	-	-
D28	6:04	-1,1	-

-: medición no realizada por falta de ramillas.

12. Resultados de Potencial hídrico en mediodía

Árbol	Hora	$\Psi_{md} 1$ (MPa)	$\Psi_{md} 2$ (MPa)
A04	12:10	-1,8	-
A07	12:46	-2,1	-2,0
A12	12:39	-1,7	-
A17	-	-	-
A21	12:30	-2,0	-
A22	-	-	-
A30	12:25	-1,5	-
A31	-	-	-
A33	12:06	-1,8	-2,0
A36	12:08	-1,7	-1,9
A37	12:10	-1,8	-1,7
A38	12:13	-1,7	-
A40	12:18	-2,0	-2,2
A41	12:20	-1,5	-
A43	12:22	-1,3	-
A44	12:21	-2,4	-
A47	12:16	-1,8	-1,7
A58	12:23	-1,5	-
AX01	12:26	-2,0	-
AX02	-	-	-

Árbol	Hora	Ψmd 1 (MPa)	Ψmd 2 (MPa)
B02	12:30	-2,5	-
B03	12:36	-2,6	-2,7
B04	12:40	-2,5	-2,4
B09	12:45	-1,0	-1,1
B10	12:43	-3,0	-3,0
B11	12:50	-2,1	-2,1
B17	12:54	-1,5	-1,5
B20	13:01	-1,4	-1,2
B21	12:59	-2,1	-1,8
C58	-	-	-
D28	12:17	-2,0	-

-: medición no realizada por falta de ramillas.

13. Resultados de Conductancia estomática

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
A04	9:56	165,7	A07	11:30	165,4
		155,6			165,4
		273,4			169,2
		309,7			185,9
A12	11:07	185,6	A17	10:52	354,3
		652,3			146,1
		383,8			467,1
		355,9			643,3
A21	10:45	421,3	A22	10:37	188,3
		534,6			617,7
		198,4			576,4
		243,7			582,8
A30	10:29	441,8	A31	10:22	372,6
		419,6			207,9
		421,1			340,4
		268,7			480,6
A33	9:59	153,7	A36	10:09	139,4
		237,7			157,8
		257,9			117,1
		150,5			192,3
A37	10:16	211,0	A38	10:23	353,4
		150,9			292,0
		225,2			316,5

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
		183,0			377,3
		258,6			486,2
A40	10:37	265,8	A41	10:48	192,7
		259,6			264,6
		215,7			267,0
		135,9			229,0
A43	11:02	219,0	A44	10:55	142,8
		212,5			255,8
		229,2			196,1
		280,2			288,2
A47	10:31	248,1	A58	11:08	320,8
		274,2			331,5
		290,4			204,2
		253,3			308,1
AX01	11:15	255,0	AX02	11:18	463,0
		300,8			753,6
		269,6			334,6
		145,1			253,9
B02	10:23	174,4	B03	10:37	151,2
		159,9			159,1
		123,8			181,0
		212,1			190,1
B04	10:49	182,3	B09	11:06	142,1
		134,8			150,8
		124,9			199,0
		125,1			99,4
B10	10:59	175,1	B11	11:14	122,1
		181,4			143,8
		267,0			121,8
		211,5			208,4
B17	11:29	236,3	B20	11:45	248,8
		229,3			229,7
		415,3			230,2
		115,9			98,8
B21	11:39	164,7	C58	9:48	-
		193,7			-
		168,7			-
D28	10:08	370,1			

Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)	Árbol	Hora	gs (mmol/m ² s ¹)
		158,2			
		365,5			
		450,5			

-: medición no realizada por falta de hojas.

14. Profesionales involucrados en el desarrollo del informe

Paola Silva C.: Dra. Mg. Cs. Ing. Agr. Investigadora laboratorio SAP.

José Ayamante M.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno, análisis de datos y elaboración de informes.

Sótero Astaburuaga O.: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables a cargo de la toma de datos en terreno.