



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Facultad de Ciencias Farmacéuticas,
Bioquímicas y Biotecnológicas
Escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica**

**Determinación de la asimilación de dióxido de carbono en Yara
(*Neltuma calderensis*) en temporada seca en el distrito de Mollebaya.**

Tesis presentada por:

Salazar Corrales, Ana Paula

ORCID: 0009-0000-7963-0651

para optar el Título Profesional de Ingeniera Biotecnóloga

Asesor:

Mg. Tejada Meza, Kevin

ORCID: 0000-0002-9716-7821

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA BIOTECNOLOGICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 22 de Junio del 2026

Dictamen: 015491-C-EPIB-2026

Visto el borrador del expediente 015491, presentado por:

2019602942 - SALAZAR CORRALES ANA PAULA

Titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA ASIMILACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN YARA (NELTUMA
CALDERENSIS) EN TEMPORADA SECA EN EL DISTRITO DE MOLLEBAYA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO BIOTECNOLOGO

**42098888 - CORDOVA BARRIOS CINTHIA CAROL
DICTAMINADOR**



**71093620 - JOHNSON CORRALES FABRIZIO
DICTAMINADOR**



**71219609 - ITA BALTA YUMA ARACELY
DICTAMINADOR**



Determinación de la asimilación de dióxido de carbono en Yara (Neltuma calderensis) en tiempo en el distrito de Mollebaya.

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

INDICE DE SIMILITUD

5%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

2

www.bible.com

Fuente de Internet

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

4

FCA CONSULTORES AMBIENTALES S.A.C.. "PAMA del Fundo Blueberries Perú-IGA0013774", R.D.G. N° 349-2018-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2021

Publicación

5

www.coursehero.com

Fuente de Internet

6

tesis.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

7

files01.core.ac.uk

Fuente de Internet

8

documents.mx

Fuente de Internet

9

doczz.es

Fuente de Internet

10

ri.agro.uba.ar

Fuente de Internet

11

pt.slideshare.net

Fuente de Internet

12

ECO-MAPPING SOCIEDAD ANONIMA CERRADA. "Actualización del Plan de Manejo Ambiental de los Instrumentos de Gestión Ambiental (DAP y DIA) de la Planta de Fabricación de Triplay-IGA0009706", R.D. N° 635-2019-PRODUCE/DVMYPE-I/DGAAMI, 2021

Publicación

13

repository.eia.edu.co

Fuente de Internet

Dedicatoria

La palabra del Señor vino a mí y me dijo:

«Antes de formarte en el vientre, ya te había elegido;

antes de que nacieras, ya te había apartado;

te había nombrado profeta para las naciones».

Yo respondí:

«¡Ah, mi Señor y Dios! ¡Soy muy joven y no sé hablar!».

Pero el Señor me dijo:

«No digas: “Soy muy joven”, porque vas a ir adondequiera que yo te envíe y vas a decir todo lo que yo te ordene. No tengas temor delante de ellos que yo estoy contigo para librarte», afirma el Señor.

Jeremías 1, 4-8

A Dios,

a Leonor y Carmen Fuentes y a toda mi familia

Agradecimientos.

A Dios, que estuvo a mi lado siempre incluso en los momentos más difíciles, por mandarme a tantos ángeles que me dieron luz cuando lo necesité, por dotarme de una curiosidad insaciable y por darme un corazón noble.

A mi abuelita Carmen, que estuvo siempre pendiente de mí en cada amanecida, me escuchó y apoyó en cada uno de mis proyectos desde que tengo memoria. A mi tía Leonor, con quien siempre me sentí en casa sin importar dónde estuviera, por su amor que trasciende incluso la muerte.

A mis padres y a toda mi familia quienes sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A todo el equipo de la empresa CONEXXA S.R.L. en colaboración con Sociedad Minera Cerro Verde, quienes me brindaron la oportunidad de llevar a cabo esta investigación mediante su financiamiento y en especial al equipo de trabajo del Ing. Elio Ponce, Ing. Cándida Carpio y demás colaboradores quienes me apoyaron durante todo el desenvolvimiento de la tesis, siempre de manera amable y profesional.

A Sr. Eddie Rondón y Sra Nadya Ali quienes conservan uno de los pocos bosques de yara que se mantienen en Arequipa y me permitieron ingresar a su terreno durante la ejecución del presente estudio.

A Ing. Kevin Tejada quien me brindó su tiempo y expertis al asesorarme en este estudio, al Ing. Fabrizio Johnson quien siempre tuvo un consejo y palabras de apoyo, al Ing Rajiv Málaga e Ing. Derly Ortiz quienes no dudaron en apoyarme en mis proyectos, a la Dra. Haruna Barazorda que me ayudó y escuchó con amor en un momento decisivo y finalmente a Ing. Cinthia Córdova quien permitió que me desempeñe en este proyecto y de quien aprendí, durante mi época universitaria, que con disciplina y organización todo es posible.

RESUMEN

La arborización sostenible y la restauración ecológica en zonas semiáridas altoandinas, como Arequipa, dependen en buena medida de contar con especies nativas capaces de fijar carbono y soportar el estrés hídrico. *Neltuma calderensis* ("Yaro") cumple con varios de esos requisitos: es endémica, resiste sequías extremas y radiación elevada, y además ayuda a rehabilitar suelos degradados. Pese a estas cualidades, no existían datos cuantitativos sobre su asimilación neta de CO₂ ni sobre su regulación metabólico-fotosintética en temporada seca, justamente el periodo más exigente para evaluar su respuesta fisiológica.

Teniendo en cuenta este vacío, el presente estudio se propuso determinar la asimilación de CO₂ en *N. calderensis* durante la temporada seca (junio-julio 2025) en Quebrada Honda, Mollebaya-Arequipa. La idea de fondo era evaluar su potencial como especie fijadora de carbono y, a la vez, como recurso genético para programas futuros de mejoramiento genético y biotecnología vegetal. Se seleccionaron 20 individuos mediante muestreo no probabilístico (criterios morfométricos y fitosanitarios). Se midieron en tres hojas por individuo: asimilación neta (A_n), conductancia estomática al vapor de agua gsw ($0.042 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y conductancia estomática al CO₂ gtc ($0.026 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de 8:00 a 16:00 h (en intervalos de 2 h) con el analizador LI-6800; además, en cinco hojas por individuo se evaluaron área foliar (A_f) (7.655 cm^2), densidad estomática (DE estomas/mm²) e índice estomático (IE %) en haz (DE= 280.47, IE = 16.4) y envés (DE=152.17, IE= 8.55).

Durante toda la temporada seca, la A_n se mantuvo positiva: el valor más alto se registró a las 8:00 h ($20.15 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} / \text{s}$) y el más bajo a las 16:00 h ($4.95 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} / \text{s}$), incluso con una presión de vapor de agua en la hoja que fue de moderada a alta (entre 1.4 y 3.2 kPa). Esa variación a lo largo del día estuvo ligada, principalmente, a cómo se regularon gsw y gtc, lo cual deja en evidencia el carácter anfiestomático e hiperestomático adaxial de la especie. En conjunto, estos resultados aportan evidencia cuantitativa sobre la eficiencia metabólico-fotosintética de *N. calderensis* en condiciones de sequía, y dan una base fisiológica concreta para considerarla en futuras líneas de mejoramiento genético dirigido y biotecnología vegetal en zonas semiáridas del sur del Perú, aportando, de paso, a la conservación de la biodiversidad nativa.

Palabras clave: *Neltuma calderensis*, LI-6800, estomas.

ABSTRACT

Across high-Andean semi-arid regions like Arequipa, native species capable of sequestering carbon while tolerating water stress have become a priority for ecological restoration and sustainable afforestation efforts. *Neltuma calderensis* ("Yaro"), an endemic species, fits this profile well: it withstands extreme drought and high radiation, and it contributes meaningfully to soil rehabilitation. Quantitative data on its net CO₂ assimilation and photosynthetic-metabolic regulation during the dry season were lacking, though, and this gap mattered because the dry season is precisely the period when physiological mechanisms under water and photochemical stress can best be assessed.

This study set out to determine the CO₂ assimilation rate of *N. calderensis* during the dry season (June–July 2025) in Quebrada Honda, Mollebaya, Arequipa, with the broader aim of evaluating its potential both as a carbon-sequestering species and as a genetic resource for future plant breeding and biotechnology programs. Twenty individuals were selected through non-probabilistic sampling, applying morphometric and phytosanitary criteria. Net CO₂ assimilation (A_n), stomatal conductance to water vapor ($g_{sw} = 0.042 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), and stomatal conductance to CO₂ ($g_{tc} = 0.026 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) were measured on three leaves per individual, from 08:00 to 16:00 h at 2-hour intervals, using a LI-6800 portable photosynthesis system. On five additional leaves per individual, leaf area ($A_f = 7.655 \text{ cm}^2$), stomatal density (SD, stomata/mm²), and stomatal index (SI, %) were assessed on both the adaxial (SD = 280.47, SI = 16.4) and abaxial (SD = 152.17, SI = 8.55) surfaces.

Net CO₂ assimilation stayed positive throughout the dry season: the highest value occurred at 08:00 h ($20.15 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), the lowest at 16:00 h ($4.95 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), and this held true even under high leaf-to-air vapor pressure deficits (1.4 to 3.2 kPa). Much of the variation in A_n tracked the dynamic regulation of g_{sw} and g_{tc} , which points to the species' amphistomatic nature, with a notably hyperstomatic adaxial surface conferring much of its resilience.

Taken together, these findings offer quantitative evidence of the photosynthetic-metabolic efficiency of *N. calderensis* under dry-season conditions. They also lay the physiological groundwork for including the species in genetic improvement and biotechnology programs across semi-arid southern Peru, supporting both native biodiversity conservation and soil recovery efforts.

Keywords: *Neltuma calderensis*, LI-6800, stomata.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS.....	2
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I.....	4
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Neltuma calderensis	4
1.1.1. Distribución y Hábitat.....	4
1.1.2. Taxonomía.....	5
1.1.3. Características	5
1.1.4. Potencial como especie para forestación en zonas áridas.....	6
1.2. Asimilación de CO₂ en plantas	6
1.2.1. Fotosíntesis y captura de carbono.	6
1.2.2. Ciclo de Calvin y plantas C3.....	7
1.2.3. Mecanismos de adaptación a sequía y aridez.	8
1.2.4. Factores ambientales determinantes en la asimilación de CO ₂	9
1.3. Ecosistemas áridos a nivel global	10
1.3.1. Importancia de las tierras áridas en el ciclo global de carbono.	10
1.3.2. Urbanización del área.....	12
1.5.1. Técnicas instrumentales para la medición del intercambio gaseoso.	13
1.6. Analizador de gases LI-6800 (LICOR).	14
1.7. Estomas	16
1.7.1. Características estomáticas	18
1.7.2. Factores que influyen tanto en DE como en IE.....	19
1.7.3. Métodos de medición.....	20
1.8. Marco legal.	21
1.8.1. Marco Legal Internacional.	21

1.8.2. Marco Legal Nacional	22
CAPÍTULO II:	23
2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. Lugar de ejecución:	23
2.2. Materiales.	23
2.2.1. Material biológico.....	23
2.2.1. Reactivos químicos.....	23
2.2.2. Materiales de laboratorio	24
2.2.3. Aparatos y equipos	24
2.2.5. Software.....	24
2.3. Métodos	25
2.3.1. Caracterización del suelo.....	25
2.3.4. Determinación taxonómica.	28
2.3.5. Estimación de la asimilación neta de CO ₂	28
2.3.7. Medición de características estomáticas en el software ImageJ.	32
2.3.8. Registro de condiciones meteorológicas.....	33
2.4. Diagrama de flujo de actividades	33
CAPÍTULO III:	34
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
3.1. Determinación de las características del suelo	34
3.1.1. Textura y condiciones fisicoquímicas del suelo:	35
3.2. Composición del entorno vegetal de <i>Neltuma calderensis</i>	39
3.3. Caracterización de individuos de <i>Neltuma calderensis</i> en el área de muestreo. 42	
3.4. Asimilación neta de CO₂ en <i>Neltuma calderensis</i> en función de la hora del día (8:00. A 16:00 h)	45
3.5. Asimilación neta de CO₂ por individuo	50
3.6. Determinación de área foliar.	53
3.7. Determinación de densidad e índice estomático	56
3.8. Análisis de la relación entre variables ambientales y la asimilación de CO₂ en <i>Neltuma calderensis</i>.	69
3.8.1. Datos meteorológicos.....	69
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos geográficos de las calicatas_____	34
Tabla 2. Densidad e índice estomático en la superficie abaxial y adaxial (n=20) _____	57
Tabla 4. Principales genes en el desarrollo y formación de estomas _____	61
Anexo 4 A. Tabla 5. Características adicionales de los individuos y criterios de inclusión (desglosados) _____	131
Anexo 4 B. Tabla 6. Caracterización inicial de las calicatas por horizonte _____	132



ÍNDICE DE FIGURAS

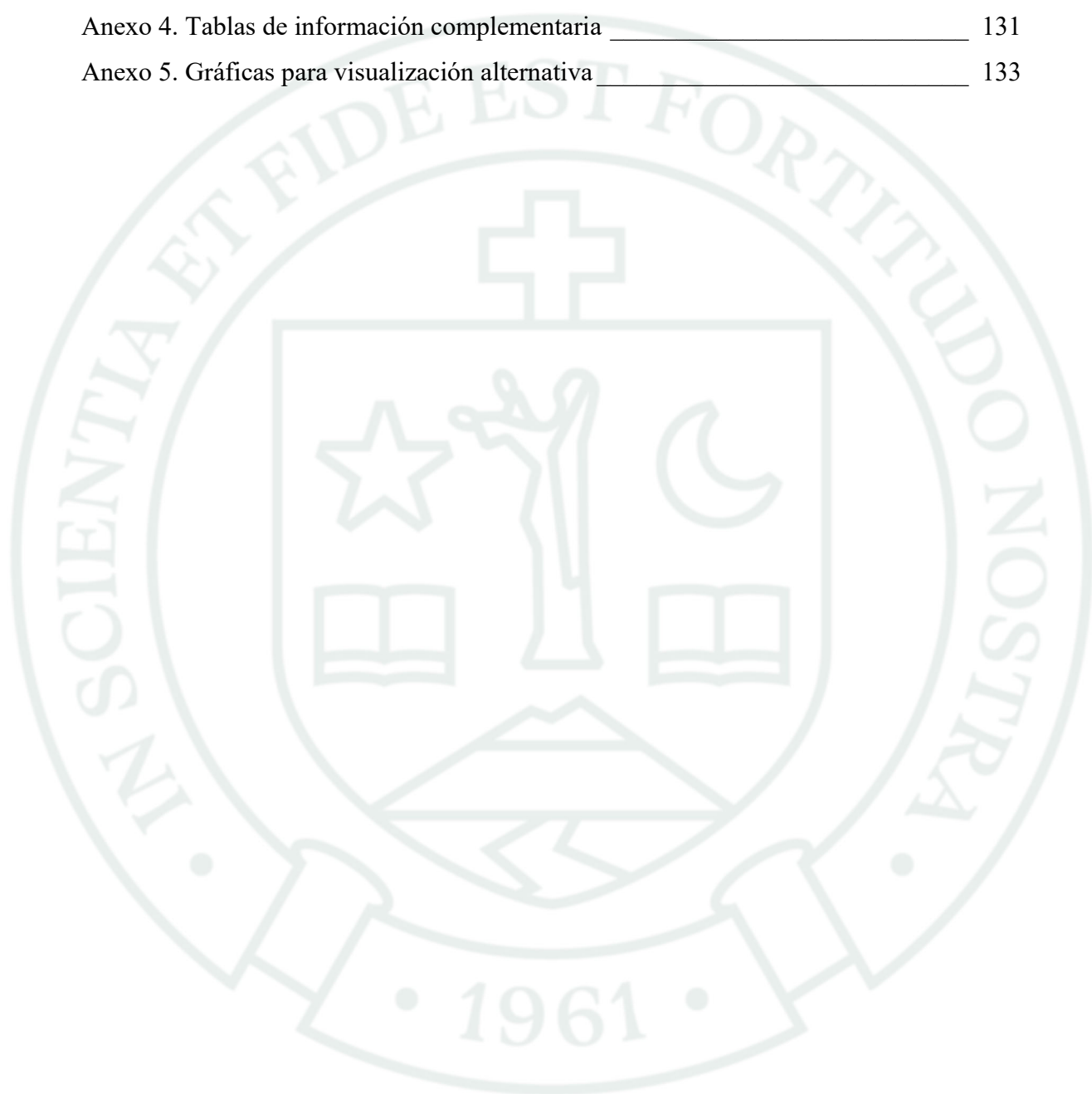
Figura 1 Diagrama de flujo de funcionamiento del equipo (cámara de hojas) Fuente LI-6800 Manual de funcionamiento (41).	15
Figura 2. Apertura y cierre estomático Adaptado y Modificado de A. Daszkowska-Golec et a. (46)	16
Figura 3 Mecanismo molecular de apertura y cierre estomático Adaptado y Modificado de A. Daszkowska-Golec et a. (46)	17
Figura 4. Workflow para medición de A_n	30
Figura 5. Diagrama de flujo de actividades	33
Figura 6. Distribución espacial de las calicatas imagen satelital Google Earth Pro	34
Figura 7. Gráfico de abundancia relativa y familias del entorno vegetal de Neltuma calderensis.	39
Figura 8. Mapa de relieve 2D del área de muestreo ISO 19117	42
Figura 9. Edad satelital y distribución especial de los 20 individuos Neltuma calderensis.	44
Figura 10. Asimilación de CO_2 por horario en junio y julio-2025.	45
Figura 11. Estrategias de crecimiento en individuos juveniles de Neltuma calderensis.	46
Figura 12. Box plot de asimilación neta de CO_2 por estrategia en Neltuma calderensis a) Junio y b) Julio.	48
Figura 13. Radar de sectores asimilación de CO_2 por árbol en los meses de junio y julio	50
Figura 14. Gráfica de distribución espacial coloreada por asimilación de CO_2 .	51
Figura 15. Tendencias entre área y asimilación por árbol (n=20)	54
Figura 16. Gráfica de distribución espacial coloreada por área foliar	55
Figura 17. Fotografía de las superficies foliares (a) Envés (b) Haz	56
Figura 18 presenta cuatro boxes plot (a) DE en abaxial, (b) DE en adaxial, (c) IE en abaxial y (d) IE en adaxial. Es importante señalar que tanto DE como IE no reflejan directamente la regulación estomática funcional (apertura o cierre), sino que constituyen un carácter morfológico fijo definido durante la formación de las hojas (131)	58
Figura 19. Mapa de calor de la relación de Asimilación CO_2 y características estomáticas	64
Figura 20. Gráfica de correlación lineal entre conductancia estomática y asimilación neta de CO_2	66
Figura 21. Gráfica de correlación lineal entre conductancia total al CO_2 y Asimilación	67

Figura 22. Gráfico de variables meteorológicas promedio y desviación estándar en junio-2025. a. Temperatura (°C), b. Humedad Relativa (%) c.Presión atmosférica (hPa) d. Velocidad del viento (m/s) e. Dirección del viento (°)	69
Figura 23 Gráfico de variables meteorológicas promedio y desviación estándar en julio-2025 a. Temperatura (°C), b. Humedad Relativa (%) c.Presión atmosférica (hPa) d. Velocidad del viento (m/s) e. Dirección del viento (°)	71
Figura 24. Asimilación neta de CO ₂ vs. Temperatura ambiental (a), Humedad relativa (b), Presión atmosférica (c), Velocidad de viento (d) y Dirección del viento (e).	73
Figura 25. Hojas de <i>N.calderensis</i> . (Fotografía de Ing. Elio Ponce)	96
Figura 26. Inflorescencia de <i>N. calderensis</i> (Fotografía de Ing. Elio Ponce)	96
Figura 27. Vainas inmaduras de <i>N.calderensis</i> (Fotografía de Ing. Elio Ponce)	97
Figura 28. Fruto maduro de <i>N.calderensis</i> (Fotografía de Ing. Elio Ponce)	97
Figura 29. La materia orgánica de <i>Neltuma calderensis</i> mejora las propiedades físicoquímicas del suelo, incrementando la disponibilidad de nutrientes en el suelo.	98
Figura 30. Presencia de hornos de ladrillo sumamente cercanos a la zona de muestreo Y16-Y19	99
Figura 31. Presencia de papel higiénico usado cercano a los silos y zona de muestreo	99
Figura 32. Presencia de papel higiénico usado cerca a los silos y zona de muestreo	100
Figura 33. Imagen Satelital (2004) aún se observan andenes y zonas no pobladas el círculo rojo representa la zona de muestreo.	100
Figura 34. Imagen satelital (2014), el terreno ya estaba lotizado y ya no existían andenes.	101
Figura 35. Imagen satelital (2025) Pérdida de vegetación arbórea en el flanco superior izquierdo	101
Figura 36. Primera calicata (Horizontes 1-2)	102
Figura 37. Calicata 1 Horizontes 1-3	103
Figura 38. Concrecencia rojiza en calicata 1	104
Figura 39. Concrecencia blanca en calicata 1	104
Figura 40. Calicata 2 horizonte 1	105
Figura 41. Calicata 2 horizonte 2 y 3 (concrecencia gris)	105
Figura 42. Abundantes raíces en calicata pero poco profundas	106
Figura 43. Calicata 3 Horizonte 1	106
Figura 44. Calicata 3 Horizonte 2	107
Figura 45. Calicata 3 Horizonte 3	107

Figura 46. Especie: <i>Cantua volcanica</i> Familia: Polemoniaceae	108
Figura 47. Especie: <i>Grindelia hirsutula</i> Familia: Asteraceae	108
Figura 48. Especie: <i>Krameria lappacea</i> Familia: Krameriaceae	108
Figura 49. Especie: <i>Ephedra americana</i> Familia: Ephedraceae	109
Figura 50 Especie: <i>Tarasa operculata</i> Familia: Malvaceae	109
Figura 51 Especie: <i>Ambrosia sp.</i> Familia: Asteraceae	109
Figura 52. Especie. <i>Adesmia spinosissima</i> Familia. Fabaceae	110
Figura 53. Especie: <i>Encelia farinose</i> Familia: Asteraceae	110
Figura 54. Especie: <i>Gochnatia arequipensis</i> Familia Asteraceae	111
Figura 55. Especie: <i>Senna versicolor</i> Familia: Fabaceae	111
Figura 56. Especie: <i>Balvisia verticillata</i> Familia: Vivianiaceae	111
Figura 57. Especie <i>Baccharia salicifolia</i> Familia: Asteraceae	112
Figura 58. Especie. <i>Carrycactus brevistylus</i> Familia Cactaceae	112
Figura 59. Especie: <i>Alternanthera porrigens</i> Familia. Amaranthaceae	112
Figura 60. Especie <i>Opuntia ficus</i> Familia Cactaceae	113
Figura 61. Especie <i>Spergularia squarrosa</i> Familia Caryophyllaceae	113
Figura 62. Especies/ Familia <i>Borteloua hirsuta</i> / Poaceae y <i>Sabulina nuttallii</i> / Caryophyllaceae	113
Figura 63. Moho en troncos, Fotografía de Ing. Elio Ponce	114
Figura 64. Hongo - <i>Peniophora albobadia</i> Fotografía de Ing. Elio Ponce(a)	114
Figura 65. Hongo - <i>Peniophora albobadia</i> Fotografía de Ing. Elio Ponce(b)	115
Figura 66 Hongo - <i>Peniophora albobadia</i> Fotografía de Ing. Elio Ponce(c)	115
Figura 67. Líquenes <i>Physcia sp.</i> Fotografía de Ing. Elio Ponce(a)	116
Figura 68. Líquenes <i>Physcia sp.</i> Fotografía de Ing. Elio Ponce(b)	116
Figura 69. Imagen referencial de posición de la estación meteorológica	117
Figura 70. Asimilación de CO ₂ por individuo (Y1-Y20) en ambos meses	133
Figura 71. Estrategia de crecimiento a y b en individuos con alta exposición solar respecto a la A _n .	133
Figura 72. Box Plot temperatura conforme a las estrategias a y b.	134
Figura 73. Variación de temperatura foliar y acumulación de temperatura por estrategia	134
Figura 74. Relación temperatura vs A _n coloreada por horario	135
Figura 75. Relación entre promedio general de asimilación de CO ₂	136

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registros fotográficos	96
Anexo 2. Informes y constancias	118
Anexo 3. Informes y constancias	127
Anexo 4. Tablas de información complementaria	131
Anexo 5. Gráficas para visualización alternativa	133



Abreviaturas

A_n – Asimilación neta de dióxido de carbono.

A_f – Área foliar

ABA – Ácido abscísico (hormona vegetal)

APG IV – Angiosperm Phylogeny Group IV (Sistema de clasificación de angiospermas)

CAM – Metabolismo ácido de crasuláceas (adaptación fotosintética)

CE – Conductividad eléctrica

CENEPRED – Centro Nacional De Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres

D – Diámetro del campo visual

DE – Densidad estomática

ECA – Estándares de Calidad Ambiental

EEUU – Estados Unidos

FAO – Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FN – Número de campo ocular (microscopía)

GPS – Global Positioning System

gsw – Conductancia estomática al vapor de agua

gtc – Conductancia total al dióxido de carbono

hPa – Hectopascal

HUSA – Herbario de la Universidad Nacional de San Agustín

ICP-MS – Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (técnica analítica)

IE – Índice estomático

INIA – Instituto Nacional de Innovación Agraria

IRGA – Analizador de gases por infrarrojo

ISO – International Organization for Standardization

KMZ – Keyhole Markup Zipped (comprimido de coordenadas)

LABSAF – Laboratorio de Suelos, Agua y Foliaves

LED – Diodo emisor de luz

MINAM – Ministerio del Ambiente

MO – Materia orgánica

NPQ – Quenching no fotoquímico

OSINFOR – Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre

PSII – Fotosistema II

qPCR – Reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa en tiempo real

ROs – Especies reactivas de oxígeno

RuBisCO – Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa

SENAMHI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Θ_m – Contenido de agua del suelo en capacidad de campo

T_{opt} – Temperatura óptima

USB – Universal Serial Bus

USDA – United States Department of Agriculture

UTM – Universal Transverse Mercator

UV – Ultravioleta

VPD – Déficit de presión de vapor

W_d – Peso seco constante

W_w – Peso húmedo

WUE_i – Eficiencia intrínseca en el uso del agua

INTRODUCCIÓN

Neltuma calderensis, conocida en la región como “Yaro” o “Yara”, es una leguminosa (*Fabaceae*) arbórea endémica de Arequipa, Perú (1). Esta especie exhibe notable adaptación a ambientes áridos, sequía estacional, suelos pobres y arenosos y alta radiación solar (2). Sus frutos, por otra parte, cuentan con propiedades nutraceuticas ya documentadas: compuestos fenólicos, polifenoles, flavonoides y antioxidantes, junto con vitaminas A y C. A esto se suma un aporte considerable de carbohidratos por cada 100 g (hasta 55.25%), fibra (27.78%) y proteínas (5.78%), además de macroelementos como Ca, P y Mg y aminoácidos esenciales, entre ellos treonina, triptófano y fenilalanina (3).

Su taxonomía fue actualizada en 2022 a partir de un análisis filogenético de 997 genes nucleares, que evidenciaron la polifilia del género *Prosopis*, *Prosopis pallida* (propia de África y Asia) a *N. calderensis* (América). A pesar de ser similares a nivel macroscópico esta tiene rasgos morfológicos y evolutivos que los distinguen (4). Los antecedentes reportaban que *N. calderensis* debía su capacidad de supervivencia a su sistema radicular freatofítico (1), sin embargo, se desconocía si este contaba con otros mecanismos adaptativos (plasticidad fenotípica, respuestas fisiológicas tempranas a eventos climáticos como El Niño) y más aún datos cuantitativos sobre la asimilación neta de CO₂ (A_n).

El presente estudio midió la A_n en 20 individuos de la especie durante la temporada seca y determinó su relación con parámetros foliares (área foliar total, densidad estomática, índice estomático, dinámica estomática expresada en gsw y gtc, ambientales (temperatura ambiental, humedad relativa, diferencia de presión de vapor, velocidad y dirección del viento) y edáficos (presencia de metales, caracterización del suelo y capacidad de campo). Con ello se contribuye a llenar el vacío existente, sentar fundamentos para investigaciones futuras y permitir que la biotecnología implemente soluciones sostenibles alineadas con los desafíos de la agenda 2030, específicamente con los objetivos 13 y 15 (5). Ya que al conocer la influencia de dichos factores se puede hacer seguimiento, manipulación y mejoramiento genético dirigido a esta y a otras especies. Promoviendo su conservación, la restauración de ecosistemas (flora y fauna) y el secuestro de carbono en regiones áridas, con condiciones agrestes para la mayoría de las especies.

HIPÓTESIS

Se sabe que, la asimilación neta de dióxido de carbono y otros parámetros fisiológicos de las plantas son determinantes para establecer su eficiencia como sumideros de carbono. Investigaciones previas han demostrado que el género *Neltuma* y *Prosopis*, presentan alta eficiencia como captadores de carbono con tasas fotosintéticas significativas incluso durante periodos de sequía estacional. Evidenciando mecanismos de adaptación genética y fisiológica. En vista de esto, es que se puede determinar la asimilación neta de dióxido de carbono en Yara (*Neltuma calderensis*) en temporada seca en el distrito de Mollebaya y con ello cuantificar su dinámica de asimilación neta de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), confirmando su capacidad de mantener la fotosíntesis activa bajo estrés hídrico y resaltando su potencial como recurso genético.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la asimilación neta de dióxido de carbono en Yara (*Neltuma calderensis*) en temporada seca en el distrito de Mollebaya.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características del suelo y entorno vegetal del ecosistema de *N. calderensis*.
- Medir la asimilación neta de CO₂ en *N. calderensis* en función de la hora del día (8:00 a.m. a 4:00 p.m.).
- Determinar la densidad e índice estomático foliar en *N. calderensis* y su relación con la asimilación neta de CO₂.
- Analizar la relación entre las variables ambientales y la asimilación neta de CO₂ en *N. calderensis*.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. *Neltuma calderensis*

Neltuma calderensis, conocida comúnmente como “Yara” o “Yaro” fue antes descrita durante décadas bajo la denominación de *Prosopis pallida*, pero reclasificada en el año 2022 gracias a un estudio filogenético de 997 genes nucleares que revelaron la polifilia del género *Prosopis* que daba lugar a tres géneros segregados *Anonychium*, *Strombocarpa* y *Neltuma* (originario de América) (4). Sin embargo, es preciso reportar que antes de dicha actualización se realizaron estudios de especies pertenecientes al mismo clado (sobre todo en Argentina y Chile), que resultaron útiles para enmarcar y discutir los resultados de esta investigación.

Se reportaron cerca de 150 géneros, que abarcaban 1020 especies, de las cuales 271 taxones endémicos se atribuían a Perú; dos de ellas resultaban especies endémicas y en particular *N. calderensis* perteneciente a la región de Arequipa (6).

A pesar de que algunos congéneres, muestran similitudes macroscópicas, presenta rasgos morfológicos propios como: mayor distancia entre foliolos, dos hojas por peciolo, exudados azucarados, hojas glaucas, frutos leguminosos torcidos en madurez (7).

El futuro de la investigación en *N. calderensis* es sumamente promisorio en diferentes áreas: alimentos para humanos y animales en tierras áridas, suplementos nutricionales, harinas sin gluten, mejora genética dirigida (resistencia a la salinidad, alta radiación y mayor fijación de nitrógeno). Además, sus compuestos bioactivos con aplicaciones farmacológicas y biotecnológicas podrían aportar de forma significativa al problema de la resistencia a antibióticos o a la contaminación por pesticidas químicos (2,3,8–10).

1.1.1. Distribución y Hábitat

N. calderensis habita en matorrales desérticos andinos de la provincia de Arequipa (entre los 2000-2500 m.s.n.m) (3), tolera sequía extrema y condiciones edáficas adversas (sustratos derivados de piedra volcánica, mesetas pedregosas, arenosas y salinas) (11). Se la puede encontrar en la periferia agrícola y urbana en distritos de Hunter, Socabaya, Mollebaya y Yarabamba. Es precisamente esta localidad la que recibe el nombre de este árbol ya que en quechua significa “pampa de yaros” (1).

Lamentablemente esta especie se encuentra drásticamente disminuida, debido a actividades mineras, industriales, tala, hornos de ladrillos, expansión agrícola y urbana desmedida y poco planificada, sobreexplotación de recursos, construcción de carreteras, etc (12).

Esta especie ya fue clasificada como “Vulnerable” en 2006 (13), pero desde entonces la población se ha visto significativamente menguada por lo que es necesario una nueva evaluación debido al incremento de amenazas que viene enfrentando.

1.1.2. Taxonomía

Clase: Equisetopsida

Orden: Fabal

Familia: *Fabaceae*

Género: *Neltuma*

Especie: *Neltuma calderensis*

Nombre común: Yaro (11)

1.1.3. Características morfológicas

Se trata de un árbol de entre 1 y 5 m de altura. En estados tempranos, sus ramas son flexuosas, de coloración verdosa y lenticeladas; con el paso del tiempo, sin embargo, terminan lignificándose y adquieren un tono grisáceo (6). Por braquiblasto presenta dos espinas, con longitudes de 1.5 a 6.0 cm y diámetros de 2 a 7 mm. Las hojas, de 5 a 10 cm de largo, cuentan con 16 a 24 pares de folíolos lineales oblongos y ligeramente ciliados.

Por braquiblasto presenta dos espinas, con longitudes de 1.5 a 6.0 cm y diámetros de 2 a 7 mm. Las hojas, de 5 a 10 cm de largo, cuentan con 16 a 24 pares de folíolos lineales oblongos y ligeramente ciliados.

En cuanto a las inflorescencias, estas alcanzan de 3.5 a 7.0 cm de largo y muestran tonalidades naranjas o amarillas, con cáliz dentado, lóbulos triangulares y pétalos lineales-lanceolados. Los frutos, leguminosos y entre 5 y 7 por braquiblasto, son alargados y estriados, con una tonalidad que va de crema a marrón; miden de 15 a 20 cm de largo y contienen, cada uno, entre 12 y 28 semillas (6).

En el Anexo 1. Se encuentra un registro fotográfico de hojas, inflorescencias y frutos de *N. calderensis*.

1.1.4. Potencial como especie para forestación en zonas áridas.

Esta especie puede representar una opción promisorio para la restauración ecológica en zonas áridas. Al tratarse de una especie nativa, evita el desequilibrio ecológico asociados a especies introducidas (1). Entre los principales beneficios están:

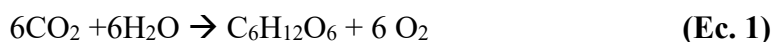
- Menor requerimiento hídrico, por lo tanto, menores costos de mantenimiento (1).
- Resistencia a condiciones agrestes, incluida la supervivencia en suelos pobres y climas extremos; además, la capa de biomasa generada “mulch” (**Ver Anexo 1 A Figura 29**), se constituye como materia orgánica disponible para el suelo promoviendo la restauración de áreas degradadas (14).
- Servicios ecosistémicos de regulación y apoyo, tales como la captura de CO₂, la protección contra la erosión del suelo y la creación de hábitats para la fauna local (15).
- Valor para la conservación, ya que, se encuentra categorizada como vulnerable (13).
- Valor en industria farmacéutica y biotecnológica (producción de gomas, resinas, miel, ceras, suplementos, antibióticos, etc) (3).

1.2. Asimilación de CO₂ en plantas

1.2.1. Fotosíntesis y captura de carbono.

La fotosíntesis es un proceso esencial por el cual las plantas, bacterias y algunas algas capturan dióxido de carbono (CO₂) atmosférico en compuestos orgánicos, empleando para aquello la radiación solar (16). Este mecanismo no solo sostiene el crecimiento o desarrollo de estos organismos, sino que también desempeña un rol central en el ciclo del carbono al ser sumidero natural, por lo tanto, contribuye a mitigar el incremento de las concentraciones atmosféricas del CO₂ (17).

La siguiente ecuación general, representa el balance estequiométrico del proceso:



En esta reacción, seis moléculas de dióxido de carbono y seis de agua, se combinan en presencia de energía lumínica para producir una molécula de glucosa y seis de oxígeno como subproducto (18).

Sin embargo, la eficiencia fotosintética varía significativa entre especies debido a las condiciones ambientales (temperatura, disponibilidad de agua, la intensidad de luz, concentración de CO_2 y la presencia de nutrientes limitantes modulan la tasa de carbono (19).

1.2.2. Ciclo de Calvin y plantas C3

Las plantas C3, son la mayoría de las especies vegetales sobre la superficie terrestre (entre un 85 y 95%). Reciben este nombre debido a que producen compuestos de 3 carbonos (3-PGA) durante el Ciclo de Calvin-Benson donde la enzima RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) es la responsable de la fijación de CO_2 . Este proceso ocurre en las células epidérmicas sin mecanismos especializados. Esto hace que estas plantas en su mayoría sean más sensibles en altas temperaturas, baja concentración interna de CO_2 y otros agentes estresantes que activan la fotorrespiración (20,21).

Una de las principales limitantes en plantas C3 en zonas áridas es mantener la conductancia estomática (g_s) dado que si las estomas permanecen abiertos, se incrementa la pérdida de agua por transpiración y reduce la eficiencia en el uso del agua (WUE). Bajo estrés hídrico las plantas suelen optar por la limitación estomática lo que dificulta la fotosíntesis y disminuye la A_n . Todo ello sumado a que la RuBisCO al ser una enzima depende de condiciones térmicas estables y puede actuar como oxigenasa ante el estrés térmico (22,23).

A pesar de lo que esto conlleva, diversas especies leñosas adaptadas a zonas áridas como *N. calderensis*, han desarrollado estrategias complementarias que les permiten sobrevivir en entornos complicados y mantener tasas de asimilación positivas (12,24).

1.2.3. Mecanismos de adaptación a sequía y aridez.

Las plantas de ecosistemas áridos desarrollaron diversas adaptaciones fisiológicas, morfológicas y bioquímicas que optimizan el uso de recursos y aseguran su supervivencia bajo condiciones de estrés hídrico severo (25).

En estas estrategias destacaron las siguientes:

Sistema radicular altamente especializado, raíces profundas capaces de alcanzar agua a nivel freático, un fenómeno conocido como freatofitismo (26).

Entre las modificaciones foliares están la reducción del área foliar, el engrosamiento de la cutícula, plegamiento de folíolos (diaheliotropismo o nyctinastia) y la orientación estratégica de las hojas y crecimiento (arbustivo cuando está aislado y arbóreo cuando hay individuos unidos). Estas permiten minimizar la exposición solar y con ello disminuyen la transpiración sin comprometer gravemente la capacidad fotosintética (27,28).

A nivel microscópico, se observó que algunas plantas tienen una menor densidad estomática sumado a mecanismos altamente eficientes de apertura y cierre, lo que optimiza el intercambio gaseoso y reduce las pérdidas de agua por transpiración (26). Durante periodos de estrés intenso, algunas plantas optan por incrementar sus mecanismos fotoprotectores, principalmente incrementando el quenching no fotoquímico (NPQ) (zeoxantina), activando proteínas de shock térmico, alta capacidad antioxidante y una elevada tasa de fotorrespiración. Aunque estos procesos disipan eficazmente el exceso de energía luminosa y protegen el aparato fotosintético, ocasionan una notable disminución en la eficiencia fotosintética neta (25).

La plasticidad fisiológica también desempeña un papel crucial, ya que permite ajustes rápidos en parámetros como la conductancia estomática, la eficiencia en el uso del agua y la actividad enzimática, facilitando así la supervivencia frente a fluctuaciones ambientales abruptas (27,28).

En algunas especies, la adopción de vías metabólicas alternativas de fijación de carbono (C4 o CAM) representa una especialización que mejora significativamente la eficiencia fotosintética bajo altas temperaturas y baja humedad relativa (29).

1.2.4. Factores ambientales determinantes en la asimilación de CO₂.

En ecosistemas áridos, los factores ambientales que modulan la A_n adquieren una relevancia particular. La temperatura desempeña un papel esencial, ya que afecta directamente la actividad de las enzimas implicadas en la fotosíntesis, de forma particular a la RuBisCo: en plantas C3, el incremento de temperatura beneficia la fotosíntesis, pero por encima de ciertos umbrales (variables entre especies), el efecto se invierte y puede llegar a ser inhibitorio (30). Por otra parte, la disponibilidad hídrica, puesto que reduce la entrada del CO₂ a través del cierre estomático y con esto también disminuye la tasa fotosintética, llevando a algunas especies a la respiración en lugar de la fotosíntesis, lo cual altera el equilibrio de carbono (30). Asimismo, la radiación excesiva genera estrés fotooxidativo, y requiere por lo tanto mecanismos de fotoprotección de la planta (25). Finalmente, el aumento en las concentraciones atmosféricas de CO₂ suele potenciar la fotosíntesis, sobre todo en plantas C3, aunque esta respuesta depende de otros factores limitantes como la disponibilidad de agua y nutrientes (27).

1.2.4.1. Conductancia estomática.

Es un parámetro fisiológico que cuantifica la facilidad con la que las estomas difunden vapor de agua y CO₂, esta variable se encuentra ligada a la DE e IE. La conductancia estomática al vapor de agua (g_{sw}) determina la tasa de transpiración y, por lo tanto, regula la pérdida de agua, el enfriamiento foliar y el ascenso de savia. Mientras que la conductancia estomática al CO₂ se deriva directamente de g_{sw} (31).

$$g_{tc} = \frac{g_{sw}}{1.6} \quad (\text{Ec. 7})$$

Ya que el CO₂ se difunde 1.6 veces más lento que el vapor de agua debido a su mayor peso molecular (**Ec 7**). Cuando hay mayor g_{sw} se favorece la entrada de CO₂ pero también incrementa la pérdida de agua de forma simultánea (32).

1.2.4.2. Déficit de presión de vapor de agua (VPD)

Representa la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire (e_s) a determinada temperatura y la presión de vapor real de la atmósfera (e_a), es un factor determinante para la conductancia estomática y por lo tanto para la fotosíntesis (33). Cuando el VPD es alto la mayoría de las plantas cierran sus estomas para prevenir la

excesiva pérdida de agua, teniendo impacto directo en el intercambio de gases. El VPD puede variar por el contenido de humedad en el aire, suelo o la temperatura (33). La ecuación para calcularla fue propuesta por Otto Tentes en 1930 (34) y más tarde fue validada por la FAO (35). La temperatura se expresa en (°C) y el VPD es expresado en kPa.

$$VPD = e_s - e_a \quad (\text{Ec. 8})$$

$$e_s(T) = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T}{T + 237.3}\right) \quad (\text{Ec. 9})$$

En el caso de VPD de la hoja es la presión de vapor a nivel de la hoja, para calcular esta se toma de referencia la temperatura foliar, la temperatura ambiental y la humedad relativa de la cámara de medición.

Un VPD bajo (<0.8 kPa) atmósfera muy húmeda, lo que favorece la apertura estomática máxima, pero aumenta el riesgo de enfermedades foliares sobre todo fúngicas. Un VPD óptimo (0.8-1.2 kPa) el rango ideal para la mayoría de los cultivos maximiza fotosíntesis con control razonable de pérdida de agua. Finalmente, un VPD alto (>1.5-2.0 kPa) la mayoría de las especies cierran sus estomas de forma significativa para evitar la deshidratación (33,36,37).

1.3. Ecosistemas áridos a nivel global

1.3.1. Importancia de las tierras áridas en el ciclo global de carbono.

Las tierras áridas que incluyen desiertos, estepas, zonas áridas y semiáridas, se definen por el índice de aridez, precipitación anual sobre la evapotranspiración potencial de referencia, valores de índice de aridez inferiores a 0.65 los clasifican como áridos (38). Constituyen uno de los biomas más extensos y vulnerables del planeta, cubriendo cerca del 40.6% de la superficie terrestre (39). Las tierras áridas han experimentado una expansión neta del 7.6% en las tres últimas décadas previas a 2020 (39).

Durante mucho tiempo fueron subestimadas por su aparente baja productividad primaria, pero recientemente se ha ratificado su papel como reguladoras de variabilidad interanual del sumidero terrestre de terrestre CO₂ el cual absorbe aproximadamente el 29% de las emisiones antropogénicas (40).

En Arequipa el 81% del territorio regional se clasifica como tierras de protección lo que la hace tener limitaciones severas para uso agrícola, pecuario e incluso para el ámbito forestal, esto es debido principalmente a la aridez costera, sequías en el flanco occidental y bajas temperaturas en la puna, esto sumado a patrones globales como la desertificación, es bastante preocupante (41).

En el Informe titulado “Escenarios de riesgo por sequías meteorológicas del departamento de Arequipa-2025” elaborado por CENAPRED empleando información procedente de diferentes reportes de SENAMHI, que el departamento de Arequipa, presenta un clima semiárido donde las tres cuartas partes del año se evidencian estaciones secas (42). Se ha documentado también la alta susceptibilidad a sequías meteorológicas en gran parte del departamento lo que afecta especialmente modelos de agricultura de secano, pastizales y ecosistemas naturales (dependientes exclusivamente de la lluvia). Todo ello sumado a fenómenos como El Niño, contribuye a la problemática generando un déficit de lluvias entre -60% a -100% (42,43).

El estrés hídrico afecta negativamente el transporte de agua de las hojas, disminuye la transpiración y la eficiencia fotosintética, en condiciones simuladas de estrés hídrico hacia el día 28, se observaron efectos directos en conductancia estomática que se redujo en un 48.11% respecto al control, tasa fotosintética neta se redujo en 26.39%° respecto al control, reducción de altura, diámetro del tallo y área foliar en algodón (44).

En un estudio más amplio sobre la fisiología vegetal en general se evaluó la respuesta de diversos cultivos cereales y hortalizas comparándola con el referente general *Arabidopsis thaliana*. En cereales y hortalizas, la caída típica de conductancia estomática está entre 40 y 70% y la asimilación neta disminuye entre el 20 y 50% bajo sequía severa, sin embargo, la respuesta depende del tiempo de exposición al estrés y el nivel de estrés hídrico (45).

Se ha demostrado también, que las especies introducidas en pastizales en condiciones de sequía, se ven afectadas negativamente en un 25.9% más que las nativas. Las especies leñosas introducidas se ven afectadas negativamente en un 44.8% más que las leñosas nativas. Esta diferencia resalta una mayor vulnerabilidad de los árboles y

arbustos introducidos en términos de supervivencia y tasa de crecimiento bajo estrés hídrico (46).

En el contexto regional, en el “Plan Regional de Reforestación y Arborización de Arequipa”, se promueve el uso prioritario de especies nativas adaptadas (*Schinus molle*, *Polylepis spp.*, entre otras) a condiciones áridas y ambientales locales (temperatura, altura, presión atmosférica, entre otros) (41).

1.3.2. Urbanización del área.

Las tierras áridas y semiáridas cubren cerca de 41% de la superficie terrestre emergida y sostiene a más de 2 mil millones de personas, lo que equivale a aproximadamente el 40% de la población mundial (47). Perú no constituye una excepción, ya que este es un fenómeno global. Mollebaya, situado a unos 19 Km de la ciudad de Arequipa, experimenta un crecimiento residencial que ejerce presión sobre los ecosistemas locales. Aunque el desarrollo urbano resultó necesario para la expansión y el crecimiento humano, contribuyendo a la reducción de las áreas verdes, en consecuencia, a la disminución de la capacidad de asimilación de CO₂. De acuerdo con estudios sobre vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Arequipa Metropolitana, la urbanización intensiva generó efectos tales como la reducción de la cobertura vegetal y el incremento de la “isla de calor”, limitando la capacidad natural de los ecosistemas para capturar y almacenar carbono (36).

1.4. Recursos genéticos

La primera vez que se hizo referencia al término “recurso genético” fue en “El Convenio sobre la Diversidad Biológica” (CDB) donde se los definió como material genético que contenga unidades funcionales de herencia, es decir genes, ya sea de origen vegetal, animal, fúngico, bacteriano o viral (48). Esta definición fue operacionalizada en el Art. 2 del “Tratado Internacional sobre los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura” de la FAO, en este mismo se resalta su importancia para la seguridad alimentaria y la adaptación agrícola al cambio climático (49).

El Perú es uno de los países más megadiversos del mundo, debido a su variedad de microclimas y ecosistemas, lo que permite la existencia de variedades genéticas únicas (50). A pesar de esto, los recursos genéticos nativos especialmente los de zonas áridas, no han sido suficientemente estudiados y es importante empezar a

revalorizarlos ya que podrían contribuir en la solución de problemáticas globales como la desertificación de tierras, la restauración de suelos degradados, la crisis de agua y la mitigación de gases de efecto invernadero (51,52).

En este marco, las especies nativas tolerantes al estrés abiótico como *N. calderensis*, y con propiedades de rehabilitación edáfica, fijación de carbono, supervivencia a extrema sequía, frutos con propiedades nutraceuticas, se perfilan como recursos genéticos valiosos (53).

1.5. Métodos de evaluación de asimilación de CO₂.

1.5.1. Técnicas instrumentales para la medición del intercambio gaseoso.

1.5.1.1. Análisis de gases por infrarrojo (IRGAS).

Esta técnica se fundamenta en el cálculo por diferencia de tasa neta de asimilación de concentraciones en el flujo de aire entrante y saliente de la cámara foliar (54). Una de las principales ventajas son las evaluaciones *in situ*.

1.5.1.2. Cámaras de intercambio gaseoso.

Esta técnica se fundamenta en la generación de microambientes controlados alrededor de hojas o plantas, registran variaciones continuas en CO₂, temperatura y humedad durante ciclos fotosintéticos (54). Ofrecen mayor exactitud que los IRGAs aislados, ya que estos tienen la ventaja de poder integrar varios sensores multifuncionales, permitiendo el análisis de múltiples variables. Su diseño cerrado o semicerrado en su mayoría minimiza errores ambientales, pero en la mayoría de los equipos limitan su aplicabilidad en ambientes cerrados o muy controlados, haciendo difícil su manejo en campo (55).

1.5.1.3. Análisis de fluorescencia de clorofila.

Esta técnica no se centra en evaluar como tal el análisis de gases, sino que evalúa la eficiencia del fotosistema II (PSII), mediante la emisión de luz inducida (56). El rendimiento de este fotosistema compromete al proceso fotosintético en su totalidad, por lo cual hay estudios que prefieren evaluar prioritariamente este tópico (57). Sin embargo, los estudios más completos incluyen alguna de las dos técnicas anteriores y complementariamente esta (58).

1.6. Analizador de gases LI-6800 (LICOR).

El LI-6800 es un analizador portátil que mide el intercambio gaseoso en CO₂ y H₂O(g) *in situ* en muestras foliares. Emplea el software Bluestem OS v2.1, el cual permite ajustar y mantener condiciones ambientales dentro de la cámara de medición, lo que se traduce en resultados confiables y reproducibles (59,60).

El equipo trabaja con un sistema de flujo abierto: ya que permite el flujo constante a través de la cámara foliar (Ver **Figura 1**), de modo que las mediciones reflejan el comportamiento real de la hoja sin acumulación de gases ni perturbaciones intrínsecas al muestreo. Esto lo diferencia de los sistemas cerrado en cuatro aspectos concretos: no genera gradientes de CO₂, evita la recirculación del aire, previene el incremento excesivo de humedad y no enmascara la respuesta fisiológica real de la planta.

Para cuantificar el intercambio gaseoso, el LI-6800 incorpora dos analizadores infrarrojos (IRGA) de alta precisión. Uno registra la concentración de CO₂ y H₂O en el aire de entrada (X_r, condición de referencia o suplementada por el equipo) y otro en el aire de salida (X_s, condición luego de pasar por la hoja) (59).

El principio de funcionamiento de los IRGA se basa en la absorción de longitudes de onda específicas del espectro infrarrojo: al pasar el haz por la cámara, la intensidad que llega al detector de salida disminuye proporcionalmente a la concentración de cada gas. La diferencia entre señal de entrada y salida permite calcular la asimilación neta de A_n mediante balance de masa (59). Como se puede observar en la **(Ec. 2)**

$$A_n = \frac{F}{S} (C_r - C_s) \quad \text{(Ec. 2)}$$

F = Flujo de aire

S = Área foliar

C_r = Concentración de referencia o alimentada por el equipo

C_s = Concentración de muestra

Para que este cálculo sea válido, es necesario que las condiciones de muestro, permanezcan estables. Las variables que el equipo controla son temperatura, humedad relativa, presión de vapor, flujo de aire y velocidad del ventilador de mezcla como se observa en la **Figura 1**. Cualquier oscilación no controlada en estas variables

desencadena el cierre estomático como respuesta al estrés, lo que distorsionaría la A_n medida e impediría aislar el efecto fisiológico real (61).

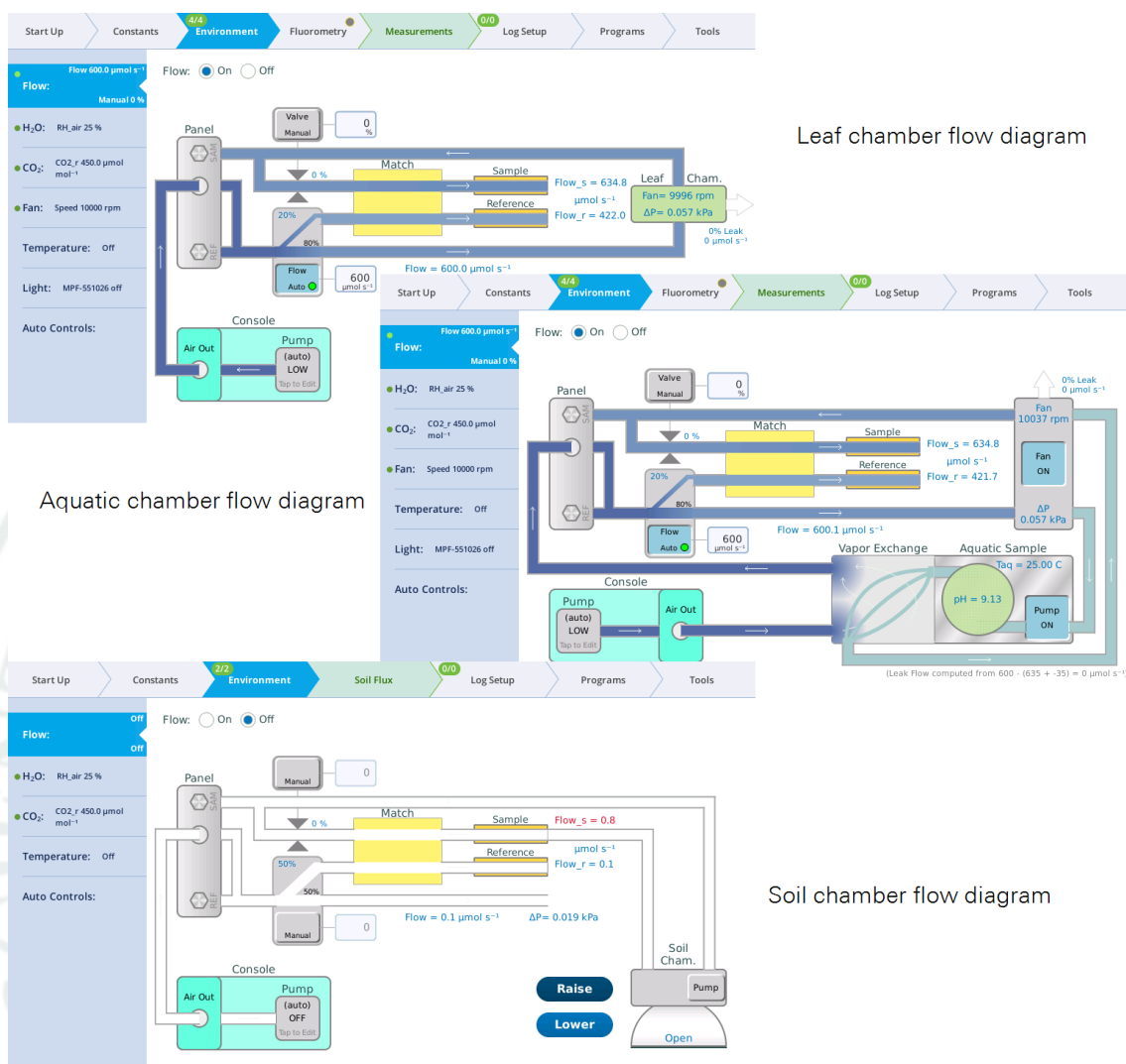


Figura 1. Diagrama de flujo de funcionamiento del equipo (cámara de hojas)

Fuente LI-6800 Manual de funcionamiento (59).

La temperatura de la hoja incide directamente sobre la actividad de la RuBisCO, si no se mantiene constante durante la medición, puede reducir artificialmente la A_n o inducir fotoinhibición, dificultando la interpretación de los resultados. Por otra parte, el déficit de presión de vapor (VPD) es uno de los principales responsables de inducir la transpiración y con esto el cierre estomático, ya que valores elevados reducen la apertura de las estomas. Al controlar la humedad dentro de la cámara se estabiliza el VPD y con ello se mantiene el intercambio gaseoso (59).

De igual forma, un flujo de aire constante evita tanto el agotamiento local de CO_2 como la acumulación de humedad o la deshidratación excesiva de la hoja, lo que garantiza un buen calculo en el balance de masa debido a las condiciones representativas.

Finalmente, el ventilador de mezcla de alta velocidad elimina la resistencia de la capa límite alrededor de la hoja. Sin él, se forman gradientes de concentración diferentes entre la superficie foliar y el aire circundante lo que subestima la conductancia estomática real y sesga resultados (60).

Por lo que, el control de estas variables en conjunto suprime las respuestas fisiológicas no deseadas, cierre estomático por VPD elevado, cambios enzimáticos, artefactos por capa límite y permite que la A_n refleje únicamente el comportamiento fotosintético de la hoja (59).

1.7. Estomas

Las hojas son los órganos más susceptibles a los efectos del estrés en las plantas; en particular las estomas desempeñan un papel crucial en numerosos procesos vinculados con la homeostasis celular (62). Dichas estructuras celulares compuestas por células oclusivas especializadas responden a estímulos externos como humedad y temperatura, mediante su apertura y cierre, participan directamente en la respiración y fotosíntesis (63).

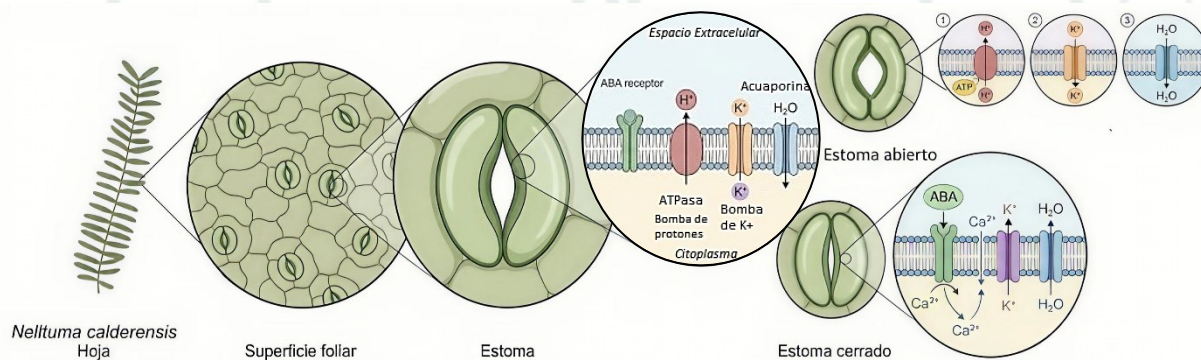


Figura 2. Apertura y cierre estomático Adaptado y Modificado de A. Daszkowska-Golec et al. (64)

En la **Figura 2** que será descrita de izquierda a derecha se observa una hoja de *N. calderensis* con su morfología característica, pinnada con folíolos opuestos a lo largo del raquis (65). El acercamiento progresivo muestra la superficie foliar, donde se distinguen claramente células epidérmicas especializadas (estomas) y no especializadas o pavimentosas (66).

Aunque las células estomáticas comparten los mismos organelos básicos que las células epidérmicas (núcleo, mitocondrias, cloroplastos, etc). Las células estomáticas, tienen la capacidad de modular dinámicamente la apertura y cierre del ostiolo o poro estomático (66).

La osmosis y a su vez los gradientes electroquímicos son los principales gestores de este proceso, ya que mediante la regulación del intercambio de las células guarda, generan condiciones de turgencia (apertura) o flacidez (cierre celular) (67).

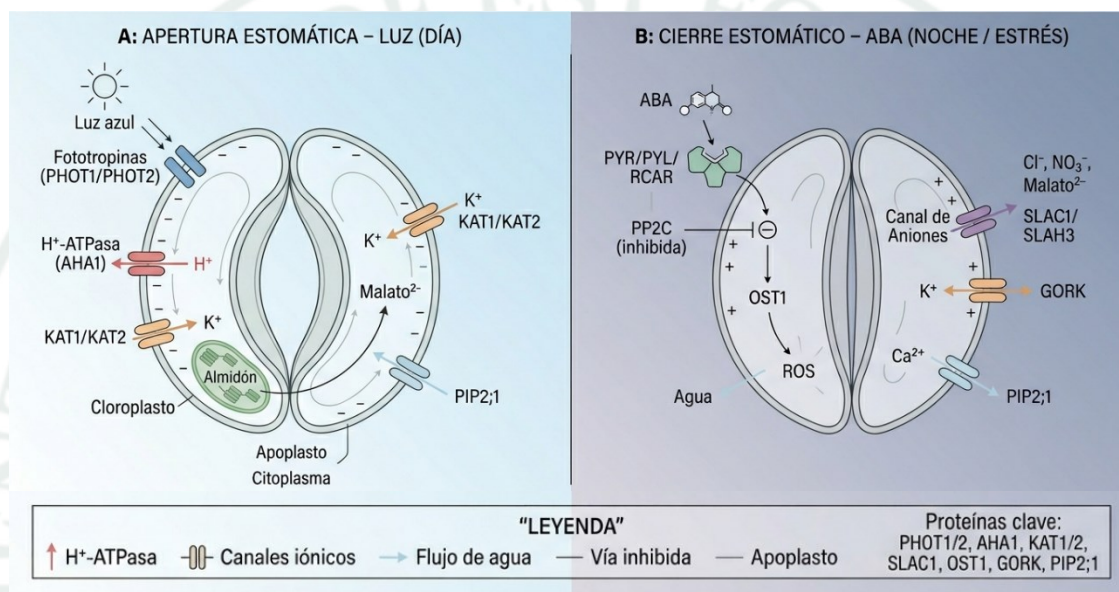


Figura 3 Mecanismo molecular de apertura y cierre estomático Adaptado y Modificado de A. Daszkowska-Golec et al. (64)

Las **Figuras 2 y 3** reportadas en este apartado se realizaron empleando el programa de ilustración científica profesional Illustrae.co, Paint y Power Point.

Es precisamente en la membrana de las células guarda como se visualiza en la **Figura 3**, donde se encuentran ubicadas las proteínas de transporte, dentro de las que destacan la bomba de protones H^+ ATPasa principalmente AHA1 y 2, los canales de potasio (KAT1 y KAT2 para entrada y GORK para salida), las acuaporinas (PIP2;1) y los receptores de ácido abscísico (ABA) (PYR/PYL/RCAR). Todas ellas cumplen un rol fundamental en la dinámica estomática (67)(64).

Durante la apertura estomática **Figura 3A**, la excitación fotónica en las fototropinas (PHOT1/PHOT2) mediante la luz azul activan la bomba de protones (AHA1/AHA2) dependiente de ATP, provoca la inherente salida de H^+ desde el citoplasma al espacio extracelular o apoplasto, generando una hiperpolarización de la membrana, lo que conduce a un cambio de gradiente favoreciendo la entrada de iones K^+ mediante los

canales de potasio (KAT1 y KAT2) (64,68). En consecuencia, los solutos al interior del citoplasma se incrementan reduciendo el potencial hídrico y activando a las acuaporinas PIP2;1 quienes introducen agua al interior de la célula (69). Este aumento en el contenido de agua genera turgencia celular en las células guarda, quienes se curvan expresándose como la apertura del estoma (64).

Mientras que el cierre estomático **Figura 3B**, está fuertemente ligado al ABA o en la noche al no recibir luz azul. El ABA una fitohormona clave en respuesta al estrés hídrico. El ABA es percibido por sus receptores específicos (PYR/PYL/RCAR), que inhiben las fosfatasa tipo 2C (PP2C-ABI1/ABI2). Esto libera y activa la quinasa OST1 (SnRK2.6), la cual fosforila y activa el canal de aniones lento SLAC1, el canal de potasio de salida GORK, y la acuaporina PIP2;1. Adicionalmente, OST1 promueve la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) vía NADPH oxidasas (RBOHD/F), contribuyendo al aumento de Ca^{+2} en el citoplasma. la salida de K^{+} y agua incrementa el potencial hídrico, lo que favorece la salida del agua. La pérdida de agua conduce a la flacidez de las células guarda, causando la relajación y con ello el cierre del ostiolo (64,69).

1.7.1. Características estomáticas

En 1986, se propuso incorporar a los estudios de anatomía foliar variables específicas, como el índice estomático (IE) y la densidad estomática (DE) (70).

Para el cálculo de la densidad e índice estomáticos, es necesario determinar el área del campo visual. Para lo cual se emplean las siguientes ecuaciones (**Ec. 3-4**)

$$\text{Diámetro de campo visual} = \frac{\text{Número de campo del ocular (FN)}}{\text{Aumento total del objetivo}} \quad (\text{Ec. 3})$$

El área del campo visual se calculó aplicando (71):

$$\text{Área de campo visual} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

La densidad estomática (estomas/ mm^2) definido por el número de estomas por campo visual sobre el área del campo visual (70), se calcula de la siguiente manera (**Ec. 5-6**)

$$\text{DE} = \frac{\text{Número de estomas por campo visual}}{\text{Área del campo visual}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Mientras que el índice estomático (%) (**Ec. 6**) representa el cociente entre el número de estomas y la sumatoria entre células estomáticas y epidérmicas, multiplicado por cien (70).

$$IE = \frac{\text{Número de estomas por campo visual}}{\text{Número de estomas} + \text{Número de cél.epidérmicas}} \times 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

Fisiológicamente, DE altas incrementan el potencial de conductancia estomática y, por lo tanto, la fotosíntesis neta, pero también eleva el riesgo de deshidratación en condiciones de estrés hídrico (72). A diferencia de IE, que refleja de forma más completa la diferenciación celular (estomas y células epidérmicas) es un indicador más estable de la respuesta plástica a factores ambientales, por lo cual es el menos afectado por el tamaño celular (73).

1.7.2. Factores que influyen tanto en DE como en IE.

Tanto DE como IE determinan la capacidad máxima de intercambio gaseoso por hoja y por lo tanto la capacidad límite superior de la conductancia estomática. Estos rasgos influyen directamente en eficiencia de uso de agua (WUE), fotosíntesis, y transpiración (74).

En un estudio realizado en más de mil especies, con 340 comunidades vegetales, se demostró que la morfología estomática puede variar en respuesta a condiciones ambientales, mostrando variaciones morfológicas funcionales (en ambientes húmedos se observó mayor densidad estomática y en secos menor densidad o estomas más grandes). Por otro lado, se determinó que cuando las estomas eran pequeños y numerosos se mostraba un mayor control y respuesta rápida mientras que estomas grandes y menos densos equivalen se observó un menor costo energético pero menor regulación (74).

Los factores ambientales como la intensidad lumínica, altura, concentración de CO₂, contaminación, salinidad, disponibilidad hídrica, humedad relativa y temperatura solo pueden influir sobre el rango establecido genéticamente, dado que la especie y el genotipo determinan el potencial máximo de diferenciación estomática (73–75).

1.7.3. Métodos de medición

1.7.3.1. Método de impresión epidérmica

Este método consiste en aplicar poliestireno-xilol (barniz/ esmalte transparente) sobre la epidermis de la hoja, dejar secar y retirar la película con cinta adhesiva para observarla bajo microscopio óptico.

Este método permite cuantificar DE e IE con precisión en hojas frescas o secas. En el presente estudio se empleó el método de impresión epidérmica, debido a su simplicidad y bajo costo (76,77).

1.7.3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Esta técnica aunque costosa y de mayor preparación, ofrece una resolución superior, ya que aporta tridimensionalidad lo que hace posible determinar forma, tamaño (largo y ancho de las células oclusivas) y presencia de ceras epicuticulares. (78,79). No es recomendable emplearla en la evaluación de gran cantidad de muestras.

Para ello se puede preparar la muestra de dos maneras (convencional o cry-SEM/Coolstage).

- Convencional: Fijación con glutaraldehído al 2.5%, deshidratación progresiva, secado por congelación y montaje en portaobjetos y recubrimiento con capa fina ya sea de carbón u oro, lo que permite que la muestra sea conductora y evita la carga electrostática (79).
- Cryo-SEM o Coolstage: Permite observar muestras frescas evitando la deshidratación y preservación del estoma en frío (-15°C) lo que permite que se mantenga en su estado natural (78).

1.8. Marco legal.

1.8.1. Marco Legal Internacional.

Las estrategias de restauración ecológica encuentran su respaldo internacional en el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), adoptado originalmente en 1992 durante la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro (1993). Al basarse en tres metas claras (conservar la variabilidad biológica, usar sosteniblemente los recursos genéticos y distribuir de forma justa sus beneficios), este tratado hace énfasis en el estudio de especies nativas y endémicas, como la base técnica del sector (48).

De este marco matriz derivan herramientas específicas. El Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología (2000) es una de ellas; su enfoque se centra en mitigar riesgos para la biodiversidad y la salud humana mediante la regulación de organismos genéticamente modificados (80). El acceso a los recursos genéticos y la distribución equitativa de sus beneficios, priorizando a comunidades indígenas y locales, en cambio, al Protocolo de Nagoya (2010) (81,82).

Este estudio no incluye modificación genética; la mención de estos marcos normativos obedece a que los datos generados aquí sirven como línea base para programas de mejoramiento y restauración. Respecto al cambio climático, el Acuerdo de París (2015) enfoca la atención en los ecosistemas terrestres como sumideros para la captura y almacenamiento de CO₂ (82). En este contexto la presente investigación contribuye directamente a la comprensión de potencial de especies leñosas nativas como sumideros de carbono, especialmente en zonas áridas y semiáridas.

Se alinea este trabajo, al aportar datos cuantitativos sobre la capacidad de fijación de carbono que poseen las especies leñosas nativas en contextos de aridez y semiaridez. Esta postura empalma con los objetivos del Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de Ecosistemas (2021-2030), donde se prioriza el uso de flora adaptada para revertir la degradación (83). En este contexto, la evaluación de *N. calderensis* resulta clave. Su tolerancia al estrés hídrico severo y su viabilidad en campo, sumadas a una demanda de recursos notablemente baja, la convierten en una alternativa estratégica y poco explotada para la recuperación ecológica

1.8.2. Marco Legal Nacional.

El amparo jurídico para la conservación en el Perú (Constitución Política, Arts. 66 y 68) define a las especies nativas como pilares del equilibrio ecológico local. Es bajo esta premisa constitucional donde la Ley N° 26839 (Ley sobre la Conservación y Aprovechamiento Sostenible de la Diversidad Biológica, 1997) promueve la investigación científica como la herramienta base para salvaguardar estos recursos (84). En esa misma línea, la gestión y restauración de los ecosistemas degradados encuentran su marco operativo en la Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre (2011), la cual exige priorizar la reforestación con flora nativa (85). La necesidad de aplicar este marco legal se vuelve crítica al analizar la situación de *Neltuma calderensis* (antes clasificada como *Prosopis pallida* y conocida localmente como Yaro). Ya en 2006, mediante el Decreto Supremo N.º 043-2006-AG, la especie fue categorizada como “vulnerable” (13). El declive crítico de sus poblaciones no es casual: responde a una presión antrópica severa donde la urbanización descontrolada, la minería, la industria y la expansión agrícola desarticulaban sus hábitats. A esto se suma la sobreexplotación directa, la apertura de carreteras y la quema de bosques; un conjunto de malas prácticas ejecutadas sin la menor proyección ambiental. Frente a este escenario, el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) organismo adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) opera como el brazo regulador clave para el manejo de los recursos forestales (86). Al priorizar esta entidad los programas de restauración con flora nativa, los datos cuantitativos obtenidos en esta investigación se integran de forma directa como el sustento técnico que exigen las agendas actuales de reforestación.

CAPÍTULO II:

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lugar de ejecución:

Los ambientes utilizados para la etapa de investigación fueron el Laboratorio de Biotecnología Vegetal del Vivero de Uchumayo de la Sociedad Minera Cerro Verde, localizado en el distrito de Uchumayo, pueblo tradicional de Congata y Campo Quebrada Honda, Mollebaya, Arequipa, Perú.

2.2. Materiales.

2.2.1. Material biológico

Se estudiaron individuos forestales de Yaro (*Neltuma calderensis*), provenientes de Quebrada Honda, distrito de Mollebaya, Arequipa, Perú (235240.3 m E, 8171890.01 m S, 19K, altitud aproximada 2445 m.s.n.m). Las muestras correspondieron a 20 individuos elegidos tomándose en cuenta criterios morfométricos (altura total 4.15 ± 1.25 m y diámetro de copa 7.1 ± 1.28 m) y fitosanitarios (presencia de brotes, ausencia de signos visibles de daño mecánico, infecciones de insectos, necrosis foliar o defoliación marcada) Se puede visualizar en el **Anexo 1 A** La corroboró su identidad taxonómica a través del servicio de identificación del Laboratorio de botánica del Herbarium Arequipense (HUSA) perteneciente a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA) empleando la clasificación APG IV (**Ver Anexo 2 A**).

2.2.1. Reactivos químicos

- Agua destilada
- Cartuchos de CO₂ comprimido.
- Pall Stuttgarter Masse Ceramic Substrate (Pall Corporation).
- Drierite® dessicant (W.A. Hammond Drierite Co. Ltd., Estados Unidos).
- Soda Lime Sofnoline® (Molecular Products Ltd., Reino Unido).

2.2.2. Materiales de laboratorio

- Beaker
- Portaobjetos

2.2.3. Aparatos y equipos

- GPS marca Garmin modelo eTrex 10.
- Sistema portátil de fotosíntesis LI-6800 (LI-COR Biosciences).
- Microscopio ZEISS modelo Primo Star iLED (M60-2-0011).
- Estufa Ecocell 55 Standard (MM Group).
- Balanza electrónica.
- Memoria USB.
- Cámara fotográfica

2.2.4. Materiales para el campo

- Tijera de podar, Tijera de escritorio.
- Pala, lampa, barreta.
- Flexómetro (10m).
- Cinta Masking.
- Micas.
- Pabito.
- Bolsas de polipropileno de 30 x 40 cm, bolsas de papel Kraft.
- Papel Toalla, Papel Film, Papel Kraft.
- Cartuchos de CO₂ comprimido.
- Hojas Bond.
- Rotuladores indelebles.
- Saquillo.
- Cartón.

2.2.5. Software

- Google Colab.
- Google Earth Pro.
- Illustrae.co.
- ImageJ.
- Lucidchart.

- Microsoft Excel.
- Microsoft Paint.
- Microsoft Power Point
- Microsoft Word

2.3. Métodos

2.3.1. Caracterización del suelo

2.3.1.1. Delimitación y medición de área de estudio

Posterior a la georreferenciación de los puntos de muestreo de los árboles de *Neltuma calderensis*. Los datos tomados en coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) se exportaron y abrieron en formato .KMZ en el programa Google Earth Pro. Donde se utilizó la herramienta “Polígono” para trazar un contorno, conectando los 20 puntos en orden. En la ventana “Propiedades del polígono” se observa la pestaña “Medidas”, donde aparecen el perímetro y el área que fueron medidos en metros y metros cuadrados respectivamente (87).

El Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) sugiere que en terrenos planos el área máxima para toma de muestra única es de 5 hectáreas, en terrenos accidentados se reduce a 4 hectáreas (88). El área de muestreo no supera estos parámetros.

2.3.1.2. Calicatas y horizontes

La FAO, recomienda que, en áreas con variabilidad baja a moderada, como el área del presente estudio, se posicionen las calicatas en intervalos regulares en un transecto en zigzag, esto permite representar de manera más eficiente la diversidad del suelo sin excavar más pozos de los necesarios (89). Siguiendo esta recomendación se seleccionaron 3 puntos geográficos representativos del área de estudio donde se excavaron 3 calicatas de 1m³, se retiraron además de 5 a 10 cm de materia orgánica para evitar contaminación en la caracterización de suelo de los horizontes profundos. Tomando en cuenta las directrices propuestas por la FAO y la USDA se evitaron áreas con alteraciones, erosión, alta compactación, con pendientes pronunciadas y suelos saturados; debido a que el muestreo se realizó en época seca, se cumple con los requisitos de estabilidad y precisión requeridos para la caracterización de horizontes (90,91).

Se colocó el material excavado en una lona para facilitar el relleno al finalizar y la contaminación en la toma de muestra. Se consideró en cada calicata un escalón de 40 cm como solicita la FAO, para asegurar el descenso seguro (91). Después de haber medido y registrado la profundidad de la calicata, se procedió a identificar y describir los horizontes detectados, de los cuales se registró (profundidad superior e inferior, color, textura, estructura, consistencia, concrecencias, límites y número de raíces principales, secundarias y terciarias presentes en cada horizonte), finalmente se realizó el registro fotográfico con escala métrica referencial (91).

Una vez identificados y descritos los horizontes se realizó la toma de muestra de suelo con una pala y se depositó en bolsas de polietileno debidamente rotuladas (sitio, profundidad y fecha de muestreo) (90). Considerando aproximadamente 5 Kg en total por horizonte (2.5 Kg de muestra y 2.5 Kg de contramuestra) para realizar la caracterización de propiedades fisicoquímicas y barrido de metales por ICP, los dos últimos fueron servicios tercerizados.

Culminando, se rellenaron las calicatas con el material excavado, respetando el orden de los horizontes para minimizar el impacto en el sitio (90). Durante todo el muestreo se emplearon EPP, como calzado adecuado, lentes, guantes y mascarilla, para procurar la seguridad de los colaboradores. Se vertió el contenido de la bolsa, previamente identificada por horizonte y calicata, en un saco para realizar una mezcla homogénea. Posteriormente, se extendió el suelo en forma de zigzag, se dividió en cuatro cuadrantes, de los cuales se extrajeron muestras hasta obtener 1Kg para análisis de propiedades fisicoquímicas, 1Kg para barrido de metales por ICP y 500 gr para capacidad de campo. Y sus respectivas contramuestras.

2.3.2. Caracterización del entorno vegetal y bioindicadores

La caracterización del entorno vegetal (a la redonda de los 20 individuos) se llevó a cabo empleando las recomendaciones del Marco Metodológico del Inventario Nacional Forestal y Fauna Silvestre-Perú (92) se registraron herbáceas, arbustos y leñosas. Se estimó la abundancia relativa mediante cobertura visual y frecuencia, se determinó la composición por familias y registraron los datos. Adicionalmente se consultó la Memoria descriptiva de Cobertura vegetal del Departamento de Arequipa del Geoservidor de MINAM (93). Finalmente se registraron fotos de los individuos más representativos para

tabular y determinar la prevalencia de familias y abundancia relativa de las especies observadas.

De la misma manera, se realizó la estimación de bioindicadores (líquenes y musgos) ya que constituyen el componente biótico no vascular para su registro e identificación. Este enfoque permitió evidenciar las condiciones ambientales del lugar de muestreo.

2.3.3. *Criterios de inclusión de los individuos.*

Alineado a las características morfológicas descritas por A. Galán et al. (11) y empleando criterios morfométricos y fitosanitarios, entre los cuales se consideraron rangos definidos de altura total y diámetro de copa, así como un estado fitosanitario adecuado, determinado por presencia de brotes, ausencia de signos visibles de daño mecánico (roturas, heridas), infecciones de insectos, necrosis foliar o defoliación marcada (>30% de la copa afectada). Se seleccionaron 20 individuos de *Neltuma calderensis* que cumplieran estos criterios a los cuales se les georreferenció con el GPS marca Garmin modelo eTrex, con el cual se verificó que tenía por lo menos tres satélites (en todos los casos se detectaron más de 14), posteriormente se presionó “Marcar el Waypoint”, luego “OK”, se guardó el punto y se registró manualmente como backup (número de punto, altura y coordenadas en UTM). Finalmente se colocó la etiqueta de identificación de individuo disponible en **Anexo 3 A**.

Dado que, los individuos pertenecen a un ecosistema natural sin intervención de siembra humana o planes de forestación, no se dispone de registros etarios. Por ello, se realizó una estimación aproximada de la edad mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales provenientes de Google Earth Pro.

Las coordenadas obtenidas mediante la geolocalización con GPS Garmin eTrex, se importaron al programa Google Earth Pro en formato “.KMZ”. Posteriormente se utilizó la herramienta de “Visualización histórica” en el menú superior izquierdo. Se registró una estimación mínima de edad con base en el primer año donde se detectaron indicios visibles (sombra proyectada o copa perceptible).

De inmediato se reconocieron limitaciones inherentes al método: existencia no detectable por tamaño del individuo o calidad de la imagen, falta de nitidez en las imágenes disponibles, muerte o confusión de un individuo aledaño. Debido a estas imprecisiones la

estimación satelital solo se consideró como referencia complementaria en discusión y no como criterio principal de exclusión.

Adicionalmente, se registraron otras variables descriptivas de potencial relevancia para el análisis como número de ejes, inclinación o pendiente a favor de la quebrada, densidad foliar, nivel relativo de exposición solar y presencia de bioindicadores (**Ver Anexo 4 A**).

2.3.4. Determinación taxonómica.

Se llevó a cabo la determinación taxonómica de especies forestales siguiendo el protocolo de herborización, colección y preservación de ejemplares botánicos establecido por el Organismo de Supervisión de Recursos Forestales y de Fauna Silvestre (OSINFOR) (94). El registro de datos se adaptó tomando en cuenta **Ver Anexo 3 D** dando como resultado así **Anexo 3 B** la cual fue adaptada según los objetivos del estudio.

Se recolectaron tres ramas terminales de cada ejemplar, incluyendo hojas adultas y jóvenes en buen estado, cuando fue posible con flores y frutos. Con el fin de garantizar la calidad de la muestra, se realizó el prensado de forma inmediata tras la colecta, preservando la estructura morfológica de los ejemplares y asegurando la visibilidad del haz y envés de las hojas. El proceso de prensado siguió una secuencia ordenada: prensa como base, seguida de cartón y papel kraft (en reemplazo del papel periódico), donde se pre codificó la muestra; se registraron en la esquina inferior derecha, el código de colecta, localidad-distrito, departamento-país y nombre del colector. Esta secuencia se repitió hasta formar una pila de máximo 30 cm de altura, cerrada con la otra prensa. Se aplicó presión empleando pabito cordado dispuesto en forma de cruz, las muestras se dejaron secar, monitoreándolas periódicamente para prevenir infecciones fúngicas.

Una vez secas, las muestras fueron recodificadas conforme a los requerimientos del Herbario de la Universidad Nacional de San Agustín (HUSA), donde se llevó a cabo la identificación taxonómica de los ejemplares incluyendo información como nombre común, n. científico, familia y género, hábito, hábitat, procedencia, coordenadas, altitud, colector, fecha y número de colecta el modelo de la ficha está disponible en el **Anexo 3 B** (94).

2.3.5. Estimación de la asimilación neta de CO₂.

Se tomaron en cuenta los siguientes criterios de selección para las hojas: estas debían estar completamente desarrolladas, ubicadas en el séptimo nodo desde el ápice de

la rama (95), en el estrato medio del dosel (dos tercios centrales de la altura total del árbol) y con orientación este-oeste; de este modo, se garantizó la máxima recepción fotónica durante el monitoreo (96).

De acuerdo con dichos criterios, se seleccionaron tres hojas, en las que se efectuaron cinco repeticiones por horario, a las 8:00, 10:00, 12:00, 14:00 y 16:00 horas. Las mediciones se realizaron por bloques y en duplicado durante los meses de junio y julio de 2025; para ello, se monitorizaron las mismas hojas o aledañas en caso de que las primeras sufrieran daño de algún tipo.

Las mediciones se llevaron a cabo con el equipo LI-6800 de LICOR® bajo condiciones estandarizadas: Flujo de aire en la cámara de $400 \mu\text{mol s}^{-1}$, ΔP de la válvula de 0.2 kPa, presión de vapor de agua de 1.0 kPa, humedad relativa entre 50-60%, concentración de CO_2 de $1600 \mu\text{mol mol}^{-1}$, velocidad del ventilador de 10,000 rpm, temperatura de la cámara de 25 °C y una cámara de medición de 6 mm^2 (97). Tales parámetros aseguraron la consistencia y precisión de los datos obtenidos.

El ensamblaje del equipo se llevó a cabo 20 minutos previos a la primera medición. Los sustratos de medición se reemplazaron únicamente al inicio de cada mes con el fin de prevenir su saturación. No obstante, en cada salida a campo se verificó, como parte del protocolo, que el sustrato no haya realizado cambio de coloración tanto en Drierite® (azul a rosa) desecante como a Soda Lime (crema a púrpura) depurador de CO_2 . Si se verificaba que cumplía con este criterio, se proseguía con el montaje donde correspondió. A continuación, se llenaba la columna central “Humidifier” con agua destilada hasta la marca. En los tres casos se verificó que estén herméticamente cerradas para ser montadas. Seguidamente se introdujo el cartucho sellado en la cabina de CO_2 y se enroscó esta última rápidamente para evitar fugas del gas presurizado. Una vez completado el montaje de columnas y cabina. Se conectaron los cables de unión entre la pinza y la consola.

Finalmente, se encendió el equipo, se configuraron los *sets points* descritos previamente y se creó una nueva carpeta de datos identificada con la fecha y las iniciales del tesista (por ejemplo 2025_05_06 APSC) donde las mediciones se fueron guardadas. Paralelamente en un cuaderno de campo se anotó el intervalo de medición correspondiente a cada árbol, horario y observaciones relevantes, tanto la VPD, como gsw, gtc, entre otros, forman parte de los datos tomados por el equipo.

Las determinaciones se realizaron una vez todos los sets points fueron alcanzados. Se realizaron bloques de tres o cuatro árboles por día, agrupados según proximidad

geográfica. Entre horarios cuando no se medía, el equipo se colocaba en modo “sleep” para optimizar el consumo de batería (59). El workflow expuesto de manera gráfica se puede visualizar en la (Figura 4).

Al concluir cada jornada, los datos se transfirieron a una memoria USB como respaldo. Con el equipo apagado, se retiraron las columnas de sustratos y el agua destilada; se vació el agua restante y se abrió la cabina de CO₂. Si aún quedaba gas presurizado, se dejó escapar completamente antes de volver a cerrar la cabina, desconectar el equipo y guardarlo.

Workflow determinación de asimilación neta de dióxido de carbono en *N. calderensis*

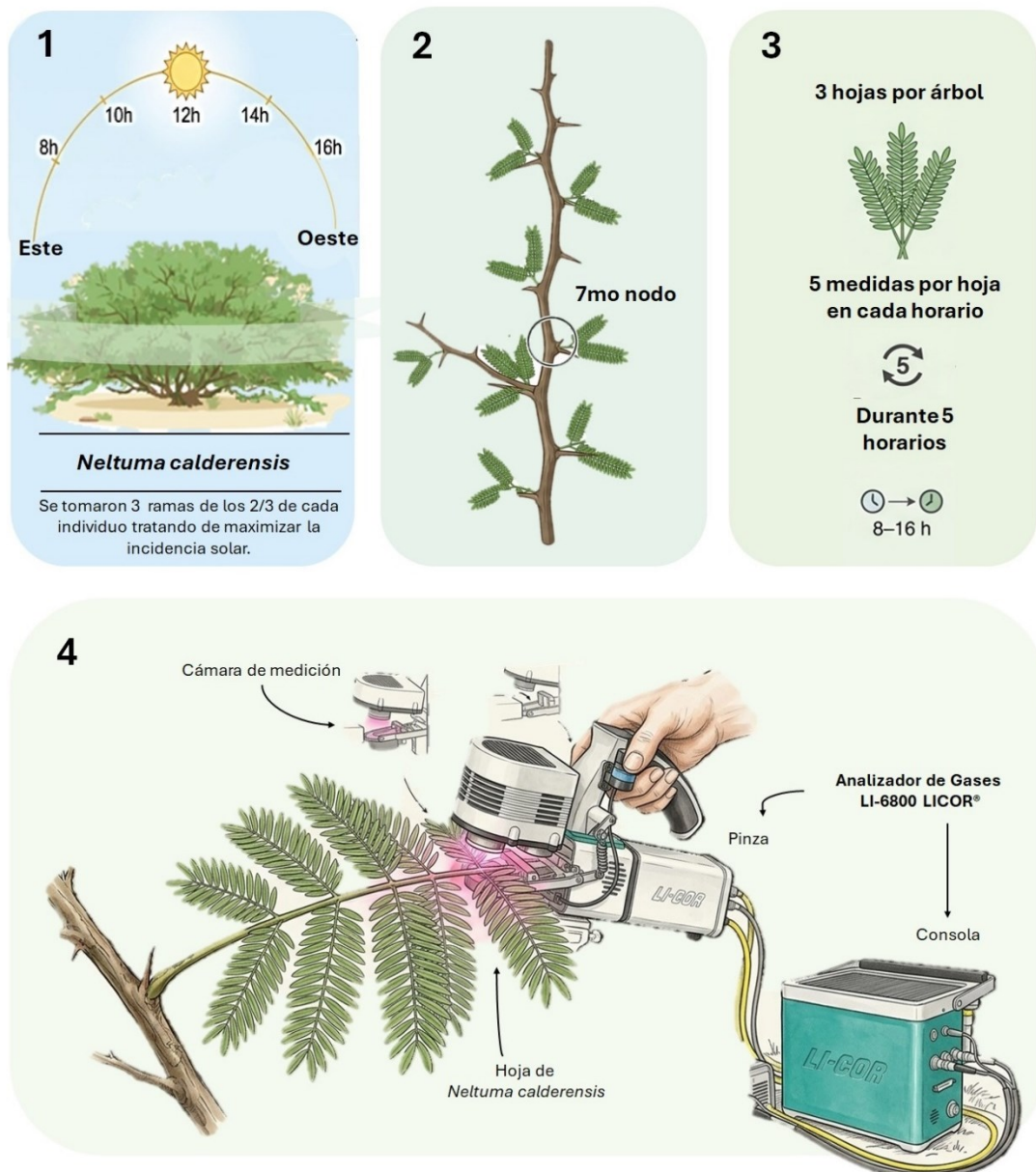


Figura 4. Workflow para medición de A_n

La figura anteriormente mostrada fue realizada empleando el programa de ilustración científica profesional Illustrae.co, Paint y Power Point.

2.3.6. *Determinación de área foliar*

Para evaluar el área foliar (A_f), se seleccionaron cinco hojas por árbol, tomando en cuenta los mismos criterios de establecidos en el apartado de asimilación neta de dióxido de carbono. Las hojas se extrajeron cuidadosamente para evitar daños y se colocaron entre las páginas de un cuaderno, con el propósito de mantener su forma y prevenir que se cerraran, dado que esta es una de las características de la especie cuando enfrenta estrés.

Al día siguiente de la recolección, las hojas se dispusieron sobre una hoja de papel blanco formato A4, donde se rotuló la identificación del árbol correspondiente en la parte inferior izquierda. A su lado, se posicionó una regla para facilitar la calibración en el software ImageJ, donde se midieron área, perímetro, largo y ancho.

Una vez capturadas las fotografías, se procesaron en el software ImageJ. Se seleccionó la imagen mediante la opción “Open” y se empleó la herramienta “Straight” para trazar una línea de 1cm sobre la regla. Posteriormente, en la pestaña “Analyze” se hizo clic en “Set Scale”, en el cuadro de diálogo que se abrió se ingresó 1 en “Known distance” y cm en “Unit of length”, se confirmó con “OK”. En la pestaña “Image”, se presionó “Type” y se configuró en “16 bit”. A continuación, en la misma pestaña se accedió a “Adjust” y luego “Threshold”, ajustando los controles deslizantes para asegurar que el umbral cubriera únicamente el área total de la hoja. Finalmente, se utilizó la herramienta “Wand” para seleccionar un punto dentro del área foliar, verificando que se reconociera la hoja y no los espacios intercalares; a continuación, en “Analyze”, se presionó “Measure”, lo que generó una tabulación que indicaba el número de medición correspondiente a la hoja, junto con los valores de área, perímetro, mayor (altura) y menor (ancho). Estos datos se registraron en una hoja auxiliar de Excel y, como medida de respaldo, se guardaron mediante la opción que ofrece el programa. Este procedimiento se aplicó en todas las hojas analizadas.

2.3.7. Medición de características estomáticas en el software ImageJ.

Se empleó el método reportado por Sandoval-Zepotitla et al. (98), quien estandarizó este método en *Lupinus L.* perteneciente a la familia *Fabaceae* tal como *N. calderensis*, se empleó este método debido a las similitudes foliares y el parentesco de la especie.

Se inició con la limpieza cuidadosa de los folíolos, aún en la hoja, utilizando un pincel delgado. Posteriormente, se seleccionaron tres folíolos (dos centrales y uno basal) de cada hoja (98), se evaluaron cinco hojas por árbol. En la epidermis de cada folíolo se aplicó barniz transparente. Una vez seco, se colocó una cinta adhesiva transparente sobre la superficie tratada y se repitió el procedimiento en la cara opuesta. Los folíolos se retiraron y se fijaron las láminas a los portaobjetos para su observación (99).

El registro fotográfico de las láminas se realizó empleando un microscopio marca ZEISS modelo Primo Star iLED (M60-2-0011), utilizando un objetivo 40x (100). De cada folíolo se examinaron tres campos (base, centro y ápice) lo que generó un total de nueve observaciones por folíolo, esto se hizo con la finalidad de determinar si existía variación de resultados dependiendo del campo del folíolo que se observaba.

Para el cálculo de la densidad e índice estomáticos, fue necesario determinar el área del campo visual. Considerando un número de campo ocular con FN= 20 y un aumento total de 800x (objetivo 40x), se obtuvo un diámetro de 500um (0.5 mm). El área del campo visual se calculó aplicando (**Ver Ec. 8**) (71):

$$\text{Área de campo visual} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0.196349541 \text{ mm}^2 \quad (\text{Ec. 8})$$

La densidad estomática (DE, estomas/ mm²) se calculó dividiendo el número de estomas por campo visual entre área del campo visual.

El índice estomático (IE%) se determinó dividiendo el número de estomas por campo visual entre la suma de estomas y células epidérmicas, multiplicado por 100:

Para el cálculo de las variables mencionadas se realizó el conteo de células estomáticas y epidérmicas. Que se realizó en el software ImageJ, donde se seleccionó la opción “File” y luego “Open”, para abrir la imagen a procesar. Luego, se empleó la herramienta “Multipoint”, configurada con los siguientes parámetros: tipo “dot”, color “light gray” y tamaño “large”(71).

Los resultados del conteo se registraron en una hoja de cálculo de Excel, ordenada por árbol, hoja y folíolo, separando las observaciones de células estomáticas y epidérmicas en haz y envés para cada campo visual.

2.3.8. Registro de condiciones meteorológicas.

Se extrajeron los datos climatológicos (temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación UV y dirección del viento) tomados por la estación más cercana al punto de muestreo para luego ser analizadas estadísticamente y describir su relación lineal con la A_n .

2.4. Diagrama de flujo de actividades

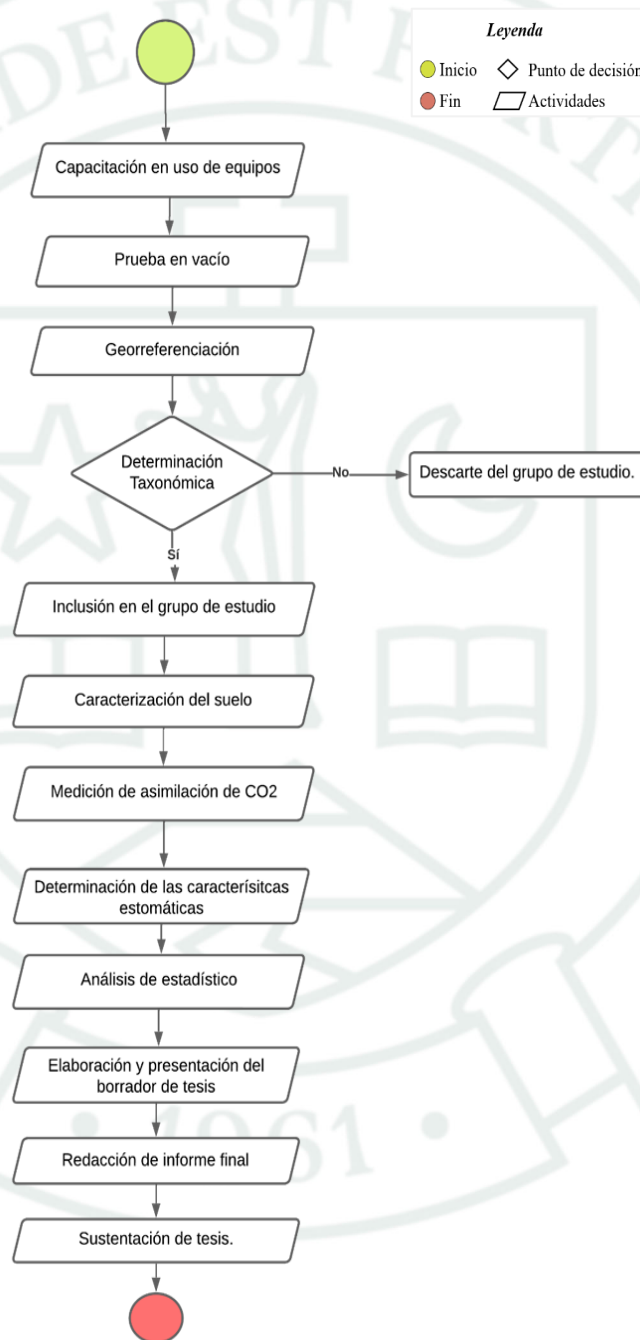


Figura 5. Diagrama de flujo de actividades

El presente diagrama fue realizado en el programa online Lucidchart.

CAPÍTULO III:

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación de las características del suelo

El área de estudio era homogénea, ya que la geomorfología es similar, conserva un tipo de cobertura vegetal y no tiene cambios abruptos de pendiente. Se realizaron tres calicatas (C1, C2 y C3), estratégicamente distribuidas para cubrir el perímetro de muestreo de los árboles (Y1-Y20). En la localidad de Quebrada honda, distrito de Mollebaya, provincia y departamento de Arequipa el día 19 de agosto de 2025. Se situaron 3 puntos geográficos representativos en el terreno que responden a las siguientes coordenadas (**Tabla 1**).

Tabla 1. Puntos geográficos de las calicatas

<i>P. M.</i>	<i>Zona</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Coordenadas UTM</i>	
			<i>Este</i>	<i>Norte</i>
<i>P1</i>	<i>19K</i>	<i>2454</i>	<i>235372.58</i>	<i>8171961.18</i>
<i>P2</i>	<i>19K</i>	<i>2444</i>	<i>235206.56</i>	<i>8171958.23</i>
<i>P3</i>	<i>19K</i>	<i>2446</i>	<i>235267.53</i>	<i>8171882.50</i>

En la **Figura 6** el polígono en blanco es el área representa la cercanía a los silos, mientras que el área que marcada con un círculo amarillo fue la considerada para la toma de muestra en suelos.



Figura 6. Distribución espacial de las calicatas imagen satelital Google Earth Pro

Como se señala en la **Figura 6** los puntos de Y16 a Y20, se encuentran cercanos a silos, debido al riesgo sanitario que representaba el realizar un análisis de ese tipo de suelo, se optó por descartar el área para el análisis. En el **Anexo 1 B (Figura 31 y Figura 32)**, se observa la presencia de silos y residuos biocontaminantes. En cada calicata se observaron tres horizontes (H1, H2, H3). Obteniéndose un total de nueve muestras individuales (C1H1 a C3H3). Las fotografías de las calicatas y horizontes respectivos se encuentran en **Anexo 1 E** mientras que la tabla de anotaciones con observaciones del muestreo se encuentra en **Anexo 4 B**.

3.1.1. Textura y condiciones fisicoquímicas del suelo:

El informe completo de laboratorio se encuentra en **Anexo 2 C** En todas las calicatas se removieron de 5 a 10 cm de materia orgánica, para evitar su intromisión en la calicata y posterior estudio de los horizontes. Por lo tanto, se hace referencia al 0 en altura, sin considerar materia orgánica ya retirada (101). En el **Anexo 1 A Figura 29**. Se puede visualizar el estado natural del suelo antes de remover la materia orgánica.

El suelo muestreado en las tres calicatas, fue clasificado texturalmente como franco-arenoso en todos los horizontes analizados, lo que indica un perfil con alto drenaje, por lo tanto, limitada retención hídrica. El pH promedio calculado para los nueve horizontes fue 7.68 ± 0.84 , dentro de un rango neutro a ligeramente básico, con horizontes puntuales más alcalinos.

Un estudio realizado en el norte del país, en la especie reportada como *Neltuma pallida*, reporta una textura arenosa dominante en un 84.7 %, una electroconductividad alta de hasta 966 mS/ cm, materia orgánica de 4.6 % y bases intercambiables (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , K^{+}), P y K disponibles y alta concentración de Fe, Ca, Al, As, Cr, Cu y Zn. Se evidenciaron correlaciones significativas entre las propiedades edáficas y calidad nutricional (53).

Esto es coherente con lo reportado en bibliografía acerca del entorno árido y semiárido reportado tanto en *Neltuma calderensis* (1) como en árboles fenotípicamente similares como *Prosopis strombulifera* (Desierto de Atacama y Pampa del Tamarugal) (102), *Prosopis tamarugo* (Desierto de Atacama) (103), *Neltuma alba* (Yanura del Chaco) (104) *Prosopis juliflora* (Desierto del Sahara)

(105), entre otras. Que incluso habitan en desiertos donde sumado al estrés térmico, tienen estrés salino e hídrico.

3.1.2. Conductividad eléctrica y materia orgánica

El informe completo de laboratorio se encuentra en **Anexo 2 C** En cuanto a conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO) reportadas señalan condiciones de moderada salinidad (82.04 mS/m) y baja cantidad de materia orgánica ($2.16 \pm 1.02\%$), coherente con lo ya reportado en pH y textura franco-arenosa. En estudios realizados en cultivos de aceitunas en el sureste de Tunes se ha demostrado que la adición de residuos de palma y hojarasca al suelo, aumenta la disponibilidad de fósforo, mejora la retención de humedad y las variables nutricionales del suelo (106).

El mulch, la capa que se forma en la superficie del suelo, formada por hojas, ramas y frutos de *N. calderensis* (14) puede también tener un efecto positivo en el entorno edáfico gracias a sus interacciones microbianas (107).

3.1.3. Bases intercambiables y P disponible

El informe completo de laboratorio se encuentra en **Anexo 2 C** Los ensayos de bases intercambiables (Ca, Mg, K, Na) y de fósforo disponibles indican heterogeneidad vertical, los horizontes más profundos mostraron mayores contenidos de Ca y Mg lo que puede mostrar un marco más homogéneo de todo el terreno, mientras que en horizontes superficiales se presentó suministro limitado de K y P disponible.

Esta distribución es congruente en ecosistemas áridos derivados de materiales volcánicos, donde especies como *Prosopis flexuosa* acumula nutrientes en capas superficiales a través de la descomposición de hojarasca (108). Similar a observaciones en *N. juliflora* quien a través de la defoliación incrementa el carbono orgánico superficial del suelo (pasando de 0.54 a 4.49 t C ha⁻¹) y mediante exudados radicales microbianos incrementa la biodisponibilidad de P y K en la rizosfera. A su vez mejora la retención de nutrientes en suelos arenosos incluso para otras plantas (109).

Especies de los géneros *Prosopis sp.* y *Neltuma sp.* que exhiben una notable capacidad para mejorar la fertilidad del suelo (mediante fijación de nitrógeno

atmosférico) (105), no es un factor preocupante, ya que se han adaptado para sobrevivir en suelos poco nutritivos.

Estudios como el realizado en *Prosopis juliflora* donde los suelos bajo el dosel presentan mayores concentraciones de N, P, K y carbono orgánico disponible, evidencian la capacidad de la planta no solo de sobrevivir a entornos complicados, sino que también promueven la recuperación de ecosistemas degradados y aportan diversos servicios ecosistémicos para la flora y fauna local (110). En la misma especie se han reportado también la generación de “islas de recursos” debido a la presencia de bacterias que cumplen un rol importante en la disponibilidad de nutrientes, productividad de vegetación y diversidad de microorganismos (107).

3.1.4. Metales Totales

Las concrescencias observadas se evaluaron mediante ICP-MS, los metales como As (10.49 ± 3.05 mg/Kg), Pb (6.09 ± 0.94 mg/Kg) y Cd (0.25 ± 0.11 mg/Kg), que son de atención toxicológica se encuentran muy por debajo de los valores de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) peruanos para uso agrícola que son de As (50 mg/Kg, Pb (70 mg/Kg) y Cd (1.4 mg/kg) indicando ausencia de riesgo toxicológico (111). Se puede observar el reporte completo del laboratorio en el **Anexo 2 B**. Esta baja concentración es similar a suelos áridos donde crece *Prosopis glandulosa* en EE.UU., donde los metales traza no limitan el crecimiento vegetal ni la fijación de N (112).

No obstante, el Cu, mostró una media de 71.9 mg/kg ligeramente superior a valores de referencia en la normativa peruana (111). Aunque este metal es prevalente en suelos del sur de Perú derivados de actividad volcánica y minera como lo es Arequipa. En comparación, *N. juliflora* y *Prosopis pallida* (anterior denominación de *Neltuma calderensis*) en Emiratos Árabes Unidos, tolera concentraciones elevadas de metales como Cu, mejorando su capacidad de nodulación y el crecimiento a pesar del estrés salino, esto podría sugerir que *Neltuma calderensis* también tiene una adaptación similar que le permite mantener la asimilación de CO₂ (113).

La predominancia homogénea de Si (170.99 ± 0.02 g/Kg), Al (44.99 ± 6.51 g/Kg) y Fe (26.12 ± 1.07 g/Kg), es característica de suelos volcánicos, alineándose con perfiles como el de Arequipa, por otro lado, en suelos como el de *Prosopis cineraria*

se ha evidenciado que altos contenidos ferruginosos y silíceos pueden tener un efecto limitante en la disponibilidad de P (113).

Parámetros básicos físicos: Todas las muestras poseen una textura franco-arenosa (arena 68-76%, limo 14-28%, arcilla 4-12%), lo que indica suelos poco compactos y drenantes. Esta baja a moderada retención de agua en común en suelos de la región y se asemeja a perfiles de *Prosopis sp.* en Irán donde la textura arenosa mejora el drenaje, pero también incrementa el estrés hídrico y afecta la conductancia estomática (114). Difiere de suelos arcillosos como el de *P. glandulosa* que prefiere este tipo de suelos que le permiten mantener tasas fotosintéticas sostenidas (112).

Bajo el dosel de *P. juliflora* se ha reportado la existencia de varios grupos taxonómicos con alta tolerancia a metales pesados (Cr, Zn, Pb, Cu y Ni) y salinidad como *Brevibacillus sp.*, *Pantoea stewartii*, *Microbacterium arborescens*, *Enterobacters sp.* con alta tolerancia a Cr y Zn, *Rhizobium* con alta tolerancia a As, Zn y Cu y otras que cuentan con mecanismos de oxidoreducción, metaloproteasas, hidrolasas, bombas de flujo, transportadores iónicos de membrana, etc (107). Se encontraron genes de resistencia en un 60.4% de las bacterias dentro de los que están *copa*, *ctpA*, *ATP7(Cu)*, *yagR (Mo)*, *chrA (Cr)*, *arsB (As)*. Genes de tolerancia en 39.6% dentro de los cuales están *pqqL (Zn, metalopeptidasa)*, *ABC transportes (Zn)*, *czcA, cusA, cnrA (Co, Zn, Cd)*. Algunos de los microorganismos cultivables encontrados en el estudio fueron *Bacillus velezensis* y *Cytobacillus gottheilli* muestran resistencia a Cd, Co, Mn y Ni y podrían representar una alternativa comercial para problemas como la biorremediación de suelos contaminados (107).

Otros estudios atribuyen detoxificación de metales pasados, respuesta a salinidad elevada y restauración ecosistémica a la capacidad propia del individuo vegetal, como el caso de *Prosopis alba*, en quien se han reportado genes clave como *ASR3* (tolerancia a la sequía), *kinasas U-box* (respuesta al estrés), *SCaBPB/CBL10* (vía de emergencia ante la tolerancia salina), *HAK/KUP/KT* (homeostasis de potasio) y factores de transcripción con participación directa en la detoxificación de metales pesados (115).

3.2. Composición del entorno vegetal de *Neltuma calderensis*

3.2.1. Determinación taxonómica

El Laboratorio de botánica del Herbarium Arequipense (HUSA) perteneciente a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (HUSA) empleando la clasificación APG IV determinó taxonómicamente que, en su totalidad, las muestras enviadas pertenecen al reino *Plantae*, división *Angiospermae*, clase *Eudicotyledoneae*, orden *Fabales*, familia *Fabaceae*, género *Neltuma* y especie *Neltuma calderensis* cuyo nombre común es **Yaro Anexo 2 A.**

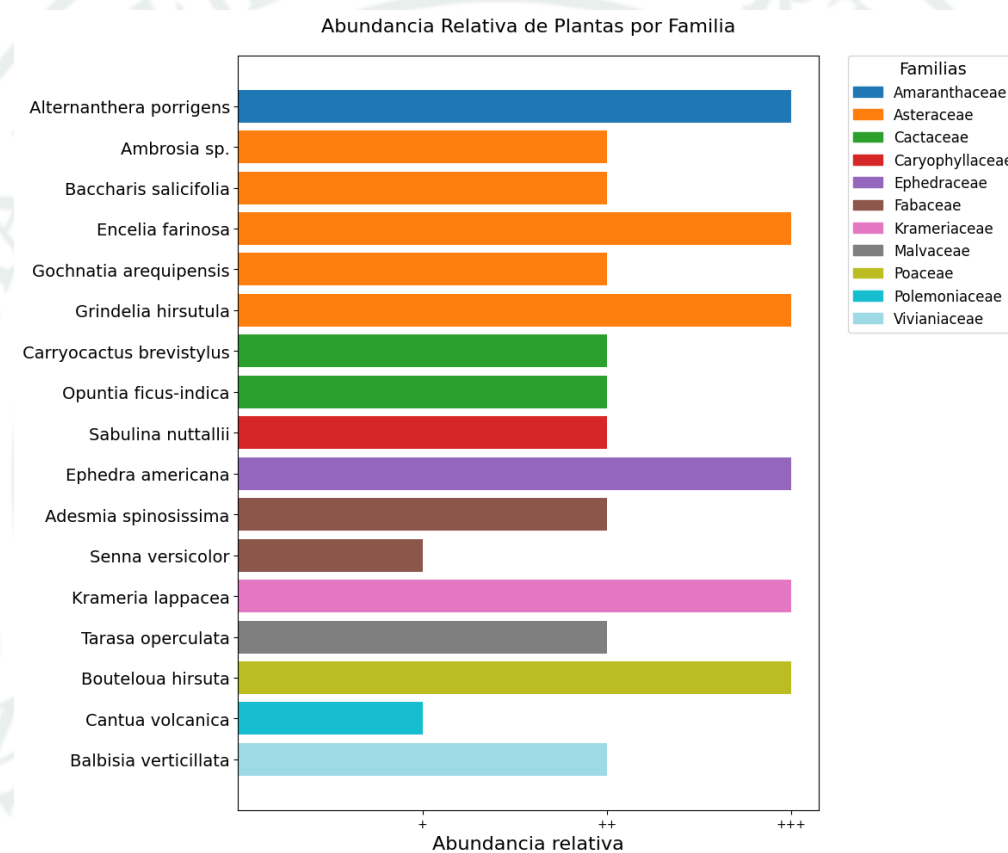


Figura 7. Gráfico de abundancia relativa y familias del entorno vegetal de *Neltuma calderensis*.

Se registró un total de 18 especies pertenecientes a 11 familias botánicas en el entorno inmediato de *Neltuma calderensis* (**Figura 7**). El registro fotográfico de las especies encontradas en el área de muestreo en temporada seca se encuentra en el **Anexo 1 E**, la familia *Asteraceae* fue la más prevalente, con el 29.4% del total, seguida por la familia *Fabaceae* y *Cactaceae* con el 11.8% y las familias restantes aparecieron solo una vez.

La **Figura 7** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Python y las librerías “numpy as np” y “matplotlib.pyplot as plt”.

Las especies con mayor abundancia relativa (*Encelia farinosa*, *Grindelia hirsutula*, *Ephedra americana*, *Krameria lappacea*, *Bouteloua hirsuta* y *Alternanthera porrigenes*), concentran la mayor parte de la cobertura vegetal. Este rasgo es típico de comunidades xerófilas andinas, en este contexto la selección natural favorece especies con fuertes adaptaciones a la sequía prolongada, alta radiación solar y baja disponibilidad de nutrientes (116,117).

La familia *Asteraceae*, muestra prevalencia en número de especies registradas como en abundancia relativa total. En los matorrales xerófilos y zonas desérticas del oeste sudamericano, este patrón de predominio se repite de manera constante. De hecho, se ha reportado que esta familia llega a representar entre el 30% y el 50% de la abundancia general, alcanzando una proporción de cobertura vegetal todavía más alta. El éxito de este despliegue radica directamente en sus adaptaciones morfo-fisiológicas: sistemas radiculares extensos, hojas de tamaño reducido y una elevada síntesis de metabolitos secundarios (118).

La configuración de estos matorrales abiertos, caracterizados por estratos arbustivos y herbáceo graminosos adquiere un valor funcional crítico gracias a componentes específicos. Especies leñosas perennes de alta abundancia como *Ephedra americana*, *Encelia farinosa* y *Grindelia hirsutula*, en coexistencia con gramíneas cespitosas de alta frecuencia como *Bouteloua hirsuta*, operan como moduladores del microclima. Su presencia combinada no solo provee sombra parcial y mitiga la evaporación directa del suelo, sino que actúa como una trampa física para sedimentos. Las gramíneas, por su parte, aportan un beneficio estructural indispensable: fijan el sustrato y frenan la erosión eólica, un factor de vulnerabilidad severo durante la temporada seca (119,120).

En especies medianamente abundantes destacan especies de la familia *Fabaceae* (*Adesmia spinosissima* y *Senna versicolor*) pertenecen a un grupo taxonómico con antecedentes de tener altas capacidades de ejercer simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno, ese rasgo es clave en su supervivencia ya que contribuye al ciclo de nutrientes en suelos pobres (121).

Ephedra americana (Ephedraceae), se registra como una de las especies más abundantes en entornos rocosos y arenosos, lo que constituye el componente estructural clave del ecosistema en zonas desérticas de Perú y Chile, con mecanismos de supervivencia como rápida recuperación de la fotosíntesis y relaciones hídricas tras periodos de sequía y rehidratación (122).

Krameria lappacea (Krameriaceae) especie hemiparásita obligada, distribuída ampliamente en ecosistemas áridos y semiáridos en Sudamérica occidental, aparece con alta frecuencia y se asocia a diversos hospederos (leñosos, cactáceos, leguminosos, etc.) hasta 18 especies de 12 familias, permitiendo el acceso a recursos hídricos y nutricionales en suelos pobres y durante sequías prolongadas (123).

Por el contrario, las especies como *Cantua volcanica*, es un arbusto endémico que se encuentra considerado como casi amenazado debido a que requieren microhábitats con mayor humedad edáfica, esto explica sus escasas en el ecosistema muestreado (124).

En conjunto la estructura y composición de la comunidad vegetal asociada a *Neltuma calderensis* refleja un ecosistema xerófilo maduro con una evidente especialización funcional, pero también marcada por la dependencia de un conjunto reducido de especies dominantes, lo que amplifica la fragilidad del ecosistema (118). Simultáneamente, la presencia de especies con capacidades de fijación de nitrógeno y hemiparasitismo sugiere mecanismos de resiliencia edáfica que se presume amortiguan parcialmente las limitaciones nutricionales características de estos ambientes (125).

3.2.2. Bioindicadores (Líquenes y hongos)

Se registró la presencia de hasta dos tipos de líquenes epífitos *Physcia* sp (126). en el 85% de los individuos del estudio. Lo que es un excelente indicador de calidad de aire, integridad de microclima local y de estabilidad ecológica. Dado que los líquenes necesitan humedad relativa constante, lo que sugiere que puede que *N. calderensis* genere microclimas diferentes bajo su copa. Esto reafirma el papel de *N. calderensis* como un restaurador ecosistémico en la región. En el **Anexo 1 F (Figura 67 y Figura 68)** Se pueden observar fotografías de los líquenes del lugar de muestreo.

Desde el punto de vista biotecnológico, los líquenes constituyen una de las formas más económicas y precisas de mapear contaminación aérea de las cuales se ha estudiado ya sus propiedades como antibióticos, tintes, antioxidantes, nanomateriales, etc (127).

Por otro lado, se observó la presencia de *Peniophora albobadia* que actúa como bioindicador del ciclo de descomposición de materia orgánica en particular, madera muerta. Su presencia en ecosistemas áridos donde la descomposición lignocelulósica es bastante lenta, tiene un rol fundamental como proveedor indirecto de materia orgánica disponible para el ecosistema. Desde la óptica de la biotecnología, destaca por su capacidad de revalorizar desechos agroindustriales contaminantes de la industria vinícola, ya que elimina el contenido fenólico tras fermentación mediante enzimas lignocelulolíticas (128). De la misma manera, en el Anexo 1 F (Figura 64 y Figura 65), se pueden observar fotografías de este hongo.

3.3. Caracterización de individuos de *Neltuma calderensis* en el área de muestreo.

Tras aplicar los criterios de selección antes mencionados en los 20 individuos, se georreferenciaron y etiquetaron. En la **Figura 8** se puede observar un Mapa de relieve en 2D que representa el área de muestreo, los individuos muestreados (Y1-Y20), las alturas y otros agentes como cuerpos de agua (afluente mayor y menor), casa y hornos.

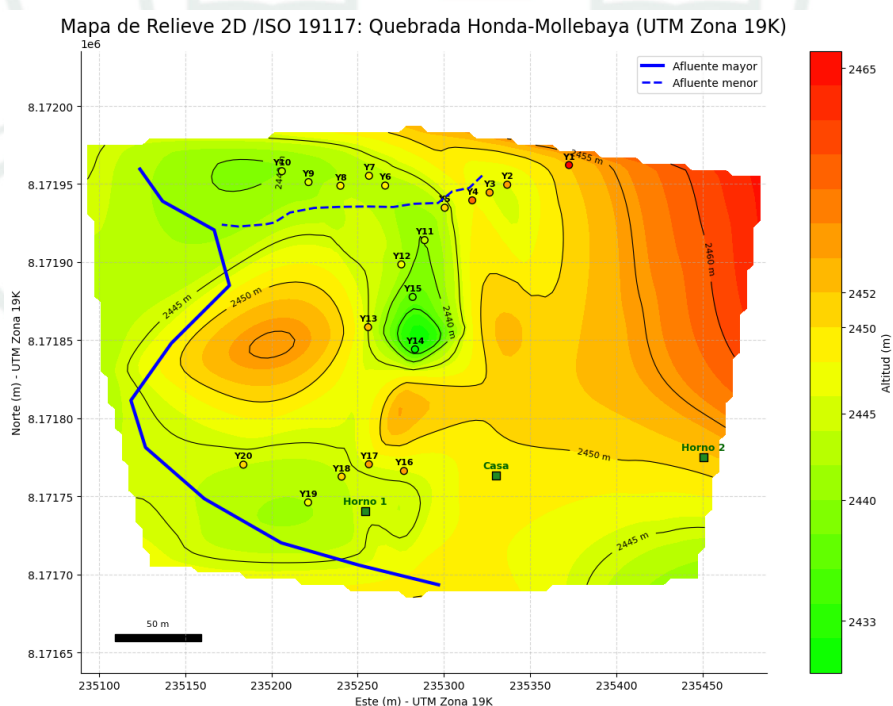


Figura 8. Mapa de relieve 2D del área de muestreo ISO 19117

La **Figura 8** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Python y las librerías “numpy as np” y “matplotlib.pyplot as plt” a su vez griddata, linearsegmentedcolormap, path y KDTree dentro de estas.

Se registró una altitud homogénea en el hábitat de los 20 individuos, con una media de 2443.25 m. s. n. m, enclavado por cerros. Se distinguieron dos cuerpos de agua principales: un afluente mayor adyacente a Y16-Y20 y otro de menor contiguo a Y2-Y10. El 35% de los individuos presentó una inclinación positiva hacia estos cauces, cuya dinámica hidrológica se intensifica en temporada húmeda (diciembre-febrero) por escorrentía y se reduce en temporada seca (junio-septiembre), dejando únicamente los cursos a nivel superficial.

Dicha disposición evidencia el comportamiento freatofítico característico del género *Neltuma*, que facilita el acceso a acuíferos freáticos especialmente en periodos de sequía. Esta estrategia se encuentra ampliamente documentada en taxones relacionados a zonas áridas o desérticas (103). Sin embargo, en el análisis de suelo realizado se encontraron raíces principales en el segundo horizonte de 30 a 40 cm aprox de profundidad, por lo que probablemente los individuos de la zona de muestreo no empleen esta estrategia de adaptación con predilección, sean muy jóvenes o tengan estrategias de adaptación diferentes. Esta característica concuerda con la exposición solar media-alta: 60% en condiciones medias y 40% altas, determinadas por aislamiento o cobertura vegetal pobre en un radio de 5 m. Sumado a esto, otra variable importante en la caracterización fue la densidad foliar que fue baja en un 15% de individuos, media en un 20% y alta en un 65% a pesar de encontrarse en temporada seca, lo que es un indicio significativo en la asimilación de CO₂.

Pese a que el área presenta un estado de conservación relativamente bueno, es de los pocos remanentes boscosos de yaro (*N.calderensis*) en la región, se identificaron presiones antropogénicas preponderantes (Evidencia fotográfica disponible en el **Anexo 1 B** (i) hornos de ladrillo, fuente importante de contaminación atmosférica (**Figura 30**), (ii) silos expuestos con potencial biocontaminante para fauna endémica como las vizcacha (**Figura 31 y Figura 32**), (iii) construcciones aledañas con disposición inadecuada de escombros y (iv) disputas tenenciales entre propietarios legítimos e invasores.

Esta configuración edáfica y antrópica agrava la vulnerabilidad de *N. calderensis*. Su estatus como propiedad privada es en sí mismo un riesgo, ya que supone transiciones en uso de suelo o titularidad, propiciando tala indiscriminada, urbanización no planificada y finalmente desaparición del bosque de yaro, la periurbanización ha contraído progresivamente el bosque remanente e incluso ha desaparecido vestigios (líticos y andenes) de culturas preincas (Churajón, Cabana, Chimbab, Wari) (129). Evidencia de índole satelital disponible en Anexo 1 C (Figura 33 y Figura 35).

Distribución espacial de individuos de *Neltuma calderensis* (Quebrada Honda-Mollebaya, 2025)
Edad estimada por detección satelital

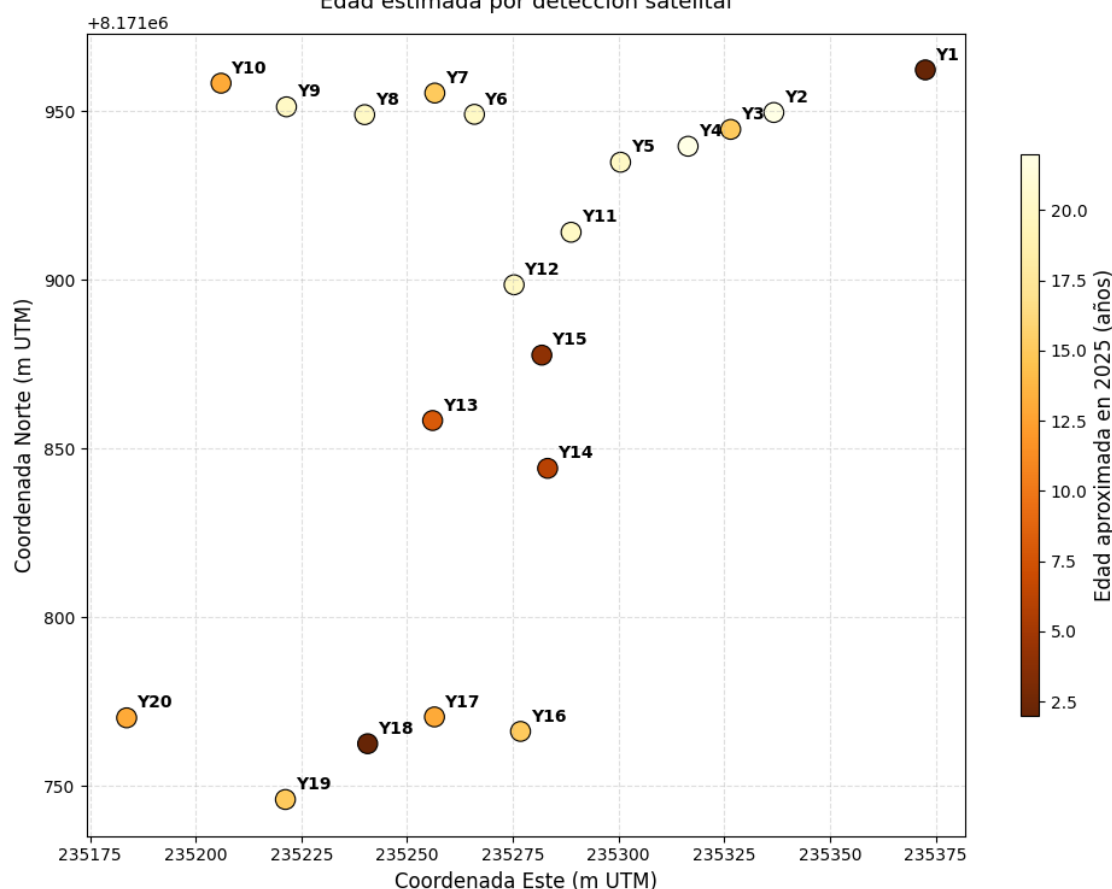


Figura 9. Edad satelital y distribución espacial de los 20 individuos *Neltuma calderensis*.

La **Figura 9** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phytón con la librería “matplotlib.pyplot as plt.

Hallazgo corroborado mientras se realizaba la estimación referencial de la edad de los individuos mediante análisis satelital en Google Earth Pro.

La **Figura 9** representa la distribución espacial, derivada del análisis de visual multitemporal en Google Earth Pro. La edad se infirió de la detección inicial del dosel o

sombra proyectada; estimación referencial, no cronológica, sujeta a limitaciones metodológicas.

El patrón espacial no resulta aleatorio: el 75% de individuos se concentra próximo a afluentes. Los de mayor edad (Y2, Y4, Y5, Y6, Y8, Y9, Y11 y Y12) dominan la franja central norte, contrastando con los juveniles (Y1, Y13, Y14, Y15 y Y18) localizados en central-sur.

3.4. Asimilación neta de CO₂ en *Neltuma calderensis* en función de la hora del día (8:00. A 16:00 h)

Para establecer el horario de máxima asimilación, se analizó el promedio de A_n todos los árboles (n=20) en los cinco horarios (8:00 – 16:00 h).

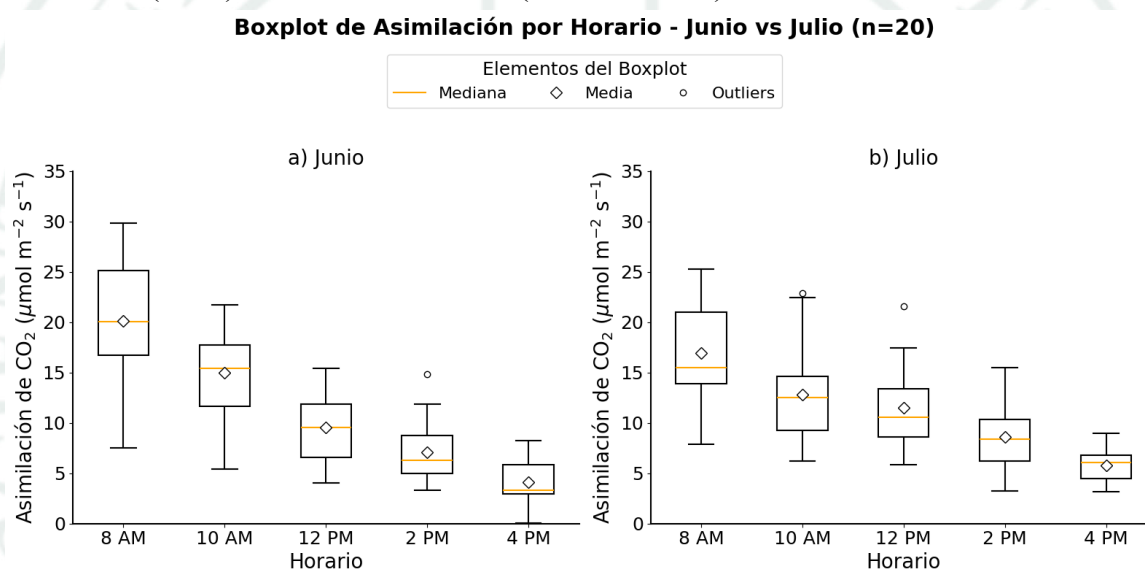


Figura 10. Asimilación de CO₂ por horario en junio y julio-2025.

La **Figura 10** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton, en las librerías “matplotlib.pyplot as plt”, “seaborn as sns”, “pandas as pd” y “Line 2D”.

La **Figura 10** evidencia un patrón diurno en la asimilación neta de CO₂ de *N. calderensis* durante los meses más representativos de la temporada seca. Presentan valores máximos a las 8:00 h. seguidos de una disminución progresiva hasta alcanzar mínimos a las 16:00 h (junio-julio 2025, n=20). En junio, la dispersión fue mayor en las horas iniciales que en julio y esta fue atenuándose al transcurrir el día.

Esta observación es atribuible al cierre estomático inducido por estrés térmico-hídrico, reportado también en *Neltuma alba* (especie emparentada), quien ante estrés térmico (ya sea por altas o bajas temperaturas), conduce al cierre estomático, con el fin de eficiencia

energética (104). En julio, el declive fue más moderado, con medianas elevadas al medio día, pero outliers variables, sugiriendo heterogeneidad intraespecífica por aclimatación eficiente.

El gradiente general revela depresión vespertina aproximadamente del 60%, congruente con *P. pallida* y *P. velutina* (2). Bajo condiciones de estrés hídrico severo *P. tamarugo* responde con cierre estomático parcial, disminución de la fracción del dosel verde mediante defoliación y en etapas avanzadas, cierre estomático permanente que se inicia prioritariamente a partir de mediodía (103). Este comportamiento en alguna medida podría explicar la disminución drástica de A_n en *N. calderensis* partir de mediodía.

A pesar de la homogeneidad general del terreno y de las condiciones ambientales compartidas entre los individuos. Se observó que, en los árboles aislados, sin sombra de individuos adyacentes o vegetación perenne reducida (8 de los 20 ejemplares: Y1, Y2, Y5, Y7, Y9, Y14, Y15 y Y19), se registraron dos estrategias de crecimiento diferenciadas: (a) *incremento de altura con baja densidad foliar* y (b) *alta densidad foliar con comportamiento arbustivo* (Ver Figura 11).

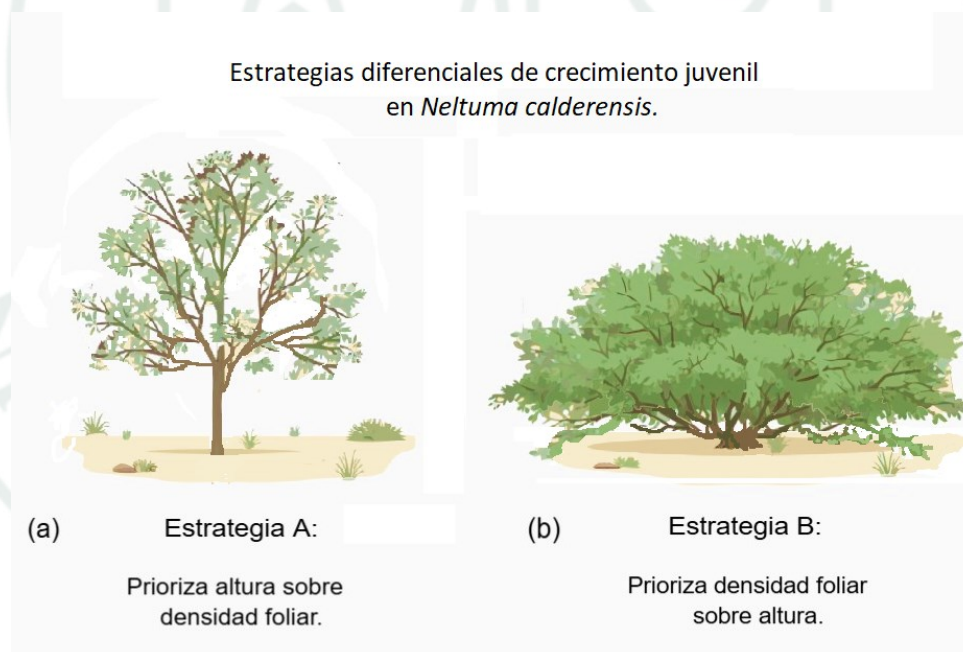


Figura 11. Estrategias de crecimiento en individuos juveniles de *Neltuma calderensis*.

La **Figura 11** fue realizada empleando el programa de ilustración científica profesional Illustrae.co, Paint y Power Point.

La estrategia (a) se observó en los individuos Y1, Y5, Y15, Y19, mientras que la (b) se manifestó en Y2, Y7, Y9, Y14. Los árboles que optaron por la estrategia de crecimiento (a) presentaron mayor defoliación, densidad estomática más baja y mayor fluctuación en los valores. En contraste, los individuos de (b) mostraron comportamientos similares a los del resto de población a pesar de ser mucho más jóvenes. Este fenómeno fue reportado por estudios recientes (130,131) donde se demostró que 10 especies pertenecientes al desierto de Sonora priorizaron recursos energéticos en hojas que, en lugar de altura, debido principalmente a que en estos entornos no hay competencia por foto recepción, concluyendo que la densidad foliar alta es la mejor estrategia en árboles desérticos en detrimento de un crecimiento en altura.

A las 8:00 h, la mayor asimilación de CO₂ registrada fue de 29.85 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ (Y14) y el menor fue de 7.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ (Y15), este caso es particularmente interesante. Dado que ambos árboles pertenecen al grupo de los más jóvenes y se encuentran próximos, por lo cual están expuestos a condiciones ambientales y de vegetación circundante idénticas, diferenciándose únicamente por la estrategia elegida para hacer frente al estrés hídrico.

Donde Y14 emplea la estrategia de crecimiento (b) que prioriza la densidad foliar sobre altura, muestra la mejor asimilación de CO₂. Y en contraste Y15, la asimilación menor coherente con el patrón de crecimiento (a).

La radiación solar constituye un requisito indispensable para la fotosíntesis; pero, cuando su intensidad supera el umbral de tolerancia de la planta, induce daño fotooxidativo y fotoinhibición, causando estrés severo que desembocando en muerte celular, manifestada frecuentemente mediante a través de la defoliación (132).

Neltuma calderensis, tal como *Prosopis tamarugo*, exhibe un comportamiento anhisohídrico (no cierra sus estomas inmediatamente ante la ausencia de agua) y muestra elevada tolerancia a la radiación fotosintéticamente activa (103). Esta tolerancia se sustenta en la activación de múltiples mecanismos de respuesta que mitigan el daño fotooxidativo: la neutralización de ROs cloroplásticas, movimiento de cloroplastos y estomas, producción de antioxidantes, disipación de energía térmica mediante quenching no fotoquímico (NPQ), regulación transcripcional de proteínas fotosintéticas, entre otros (133) (134).

Estos mecanismos ocurren predominantemente a nivel foliar. En consecuencia, la estrategia de crecimiento (a), al reducir drásticamente la densidad foliar, la capacidad de

respuesta del árbol se ve limitada. Este hecho contribuye a explicar la mayor frecuencia y aparente ventaja adaptativa de crecimiento (b), que prioriza la densidad foliar sobre el crecimiento en altura en ambientes de alta irradiancia.

La estrategia (a) se observó en los individuos Y1, Y5, Y15, Y19, mientras que la estrategia (b) se manifestó en Y2, Y7, Y9, Y14. Los árboles con la estrategia (a) presentaron mayor defoliación, densidad estomática más baja y mayor fluctuación en los valores. En contraste, los individuos con la estrategia (b) mostraron comportamientos similares a los del resto de población.

Asimilación neta de CO₂ por horario, estrategia de crecimiento y mes
Neltuma calderensis (Estrategia A: n=4 | Estrategia B: n=4 | General: n=20)

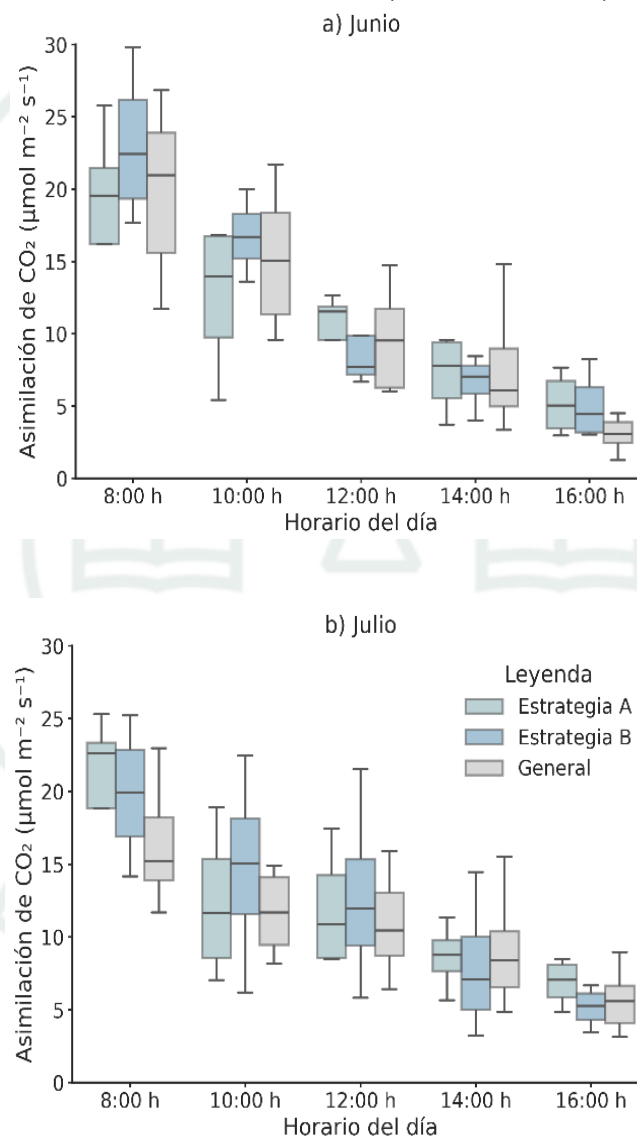


Figura 12. Box plot de asimilación neta de CO₂ por estrategia en *Neltuma calderensis* a) Junio y b) Julio.

Tanto en la **Figura 12 a** como **b** se observa un comportamiento parecido al registrado en el conjunto general de todos los árboles, con una asimilación neta de CO₂ que alcanza valores máximos entre las 8:00 h y las 10:00 h. Sin embargo, cuando se comparó en particular el desempeño de las estrategias de crecimiento a y b se observó una tendencia particular, en los últimos horarios 2:00 h a 4:00 h. En promedio la estrategia b, presenta mayor A_n a lo largo del día en ambos meses. Sin embargo, en los dos últimos horarios, se invierte la tendencia. Siendo la estrategia a la que muestra mayor asimilación.

En el **Anexo 5 B (Figura 71 y Figura 72)** se encuentra disponible un gráfico lineal para visualización alternativa. Este comportamiento se puede explicar debido a las diferencias de microclimáticas generadas bajo el dosel (135).

La estrategia a, al tener un dosel de menor densidad, favorece la mejor ventilación y un intercambio de temperatura más eficiente entre las hojas y el medio. Ello reduce la temperatura foliar y el déficit de presión de vapor local, retrasando el cierre estomático y permitiendo que la asimilación de CO₂ continúe aun cuando la radiación recibida era moderada.

En contraste, la estrategia b, al tener un dosel compacto y denso, genera un efecto domo que retiene calor en la capa interna del follaje. Esto incrementa la transpiración y provoca un cierre estomático más temprano y abrupto con el objetivo de conservar agua.

Durante la monitorización, se midió de igual forma la temperatura foliar en cada medición. Al observar estos datos, se confirma lo ya antes mencionado acerca del comportamiento térmico de ambas estrategias de crecimiento, donde la estrategia b muestra una mayor temperatura durante todo el monitoreo (**Ver Anexo 5 B Figura 73**)

Estos resultados concuerdan con estudios donde se analiza el efecto de la arquitectura del dosel (abierto o denso) sobre la ventilación, temperatura foliar y regulación estomática. En un estudio ejecutado por *Banerjee T. et al. (2018)* se demostró que en doseles más abiertos hay una marcada disminución de la capa límite de la hoja, lo que mejora la ventilación y reduce la temperatura foliar. Permitiendo así mantener mayor conductancia estomática durante la tarde. Por el contrario, los doseles densos acumulan calor, subiendo la VPD y favoreciendo el cierre estomático prematuro y la fotoinhibición (135).

Por otro lado, *Prieto J. et al. (2019)* confirmaron en modelos estructurales de vid, que la arquitectura foliar genera diferentes respuestas, donde los doseles más abiertos mejoran

la ventilación y reducen el estrés acumulado en la tarde, mientras que los doseles densos generan mayor sobrecalentamiento y un declive más marcado de la fotosíntesis (136).

Entender estos comportamientos es particularmente relevante en climas áridos y semiáridos como el de Arequipa. Pues el efecto de la radiación UV (IUV 6-8) (137) durante la temporada seca exacerba la respuesta en cualquiera de los escenarios o estrategias de crecimiento.

Esto, aunque relevante, no altera de forma significativa el resultado final del estudio, dado que los últimos horarios son en los que se reporta menos A_n .

La **Figura 12** fue realizada en el entorno Google Colab con el lenguaje de programación Python y las librerías “numpy as np”, “matplotlib.pyplot as plt”, “pandas as pd”.

3.5. Asimilación neta de CO₂ por individuo

La **Figura 13** presenta la distribución radial de las tasas de asimilación de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en *Neltuma calderensis* durante la temporada seca (junio-julio 2025) para los veinte individuos muestreados (Y1-Y20). Adicionalmente el **Anexo 5 A** presenta una gráfica alternativa para visualización de datos.

Radar de Sectores: Promedio de Asimilación de CO₂ por Árbol
($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Junio y Julio)

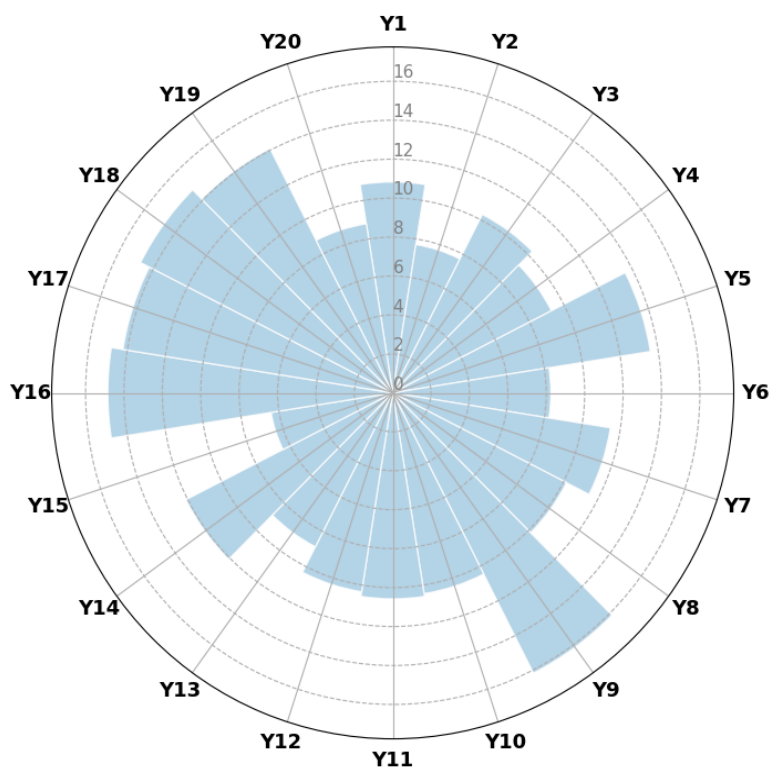


Figura 13. Radar de sectores asimilación de CO₂ por árbol en los meses de junio y julio

La asimilación neta de CO₂ promedio por individuo varió entre 6.41 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Y15) hasta 16.15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Y9), en su totalidad los individuos muestran una media general de 10.92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una mediana de 10.51 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

La **Figura 13** muestra la distribución espacial de los individuos, coloreada en función de la asimilación neta de CO₂, donde las tonalidades cercanas a la púrpura son las más bajas y las cercanas al amarillo son las más altas o sobresalientes.

Distribución espacial de individuos coloreada por asimilación de CO₂

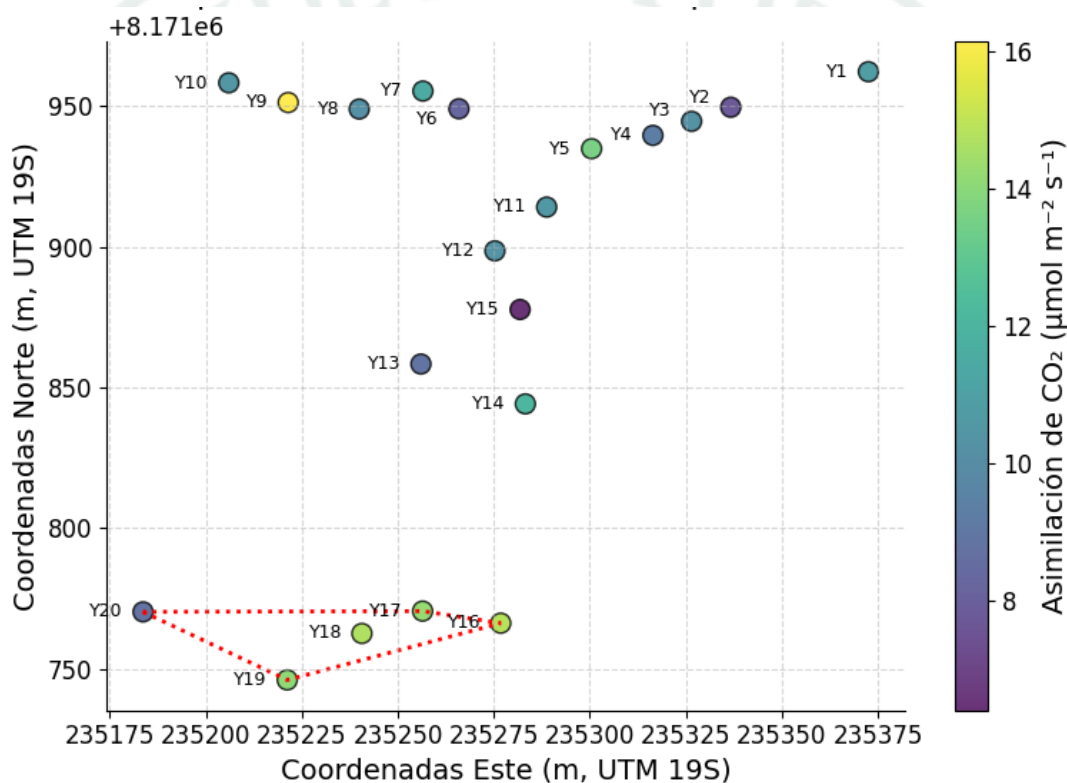


Figura 14. Gráfica de distribución espacial coloreada por asimilación de CO₂.

La **Figura 13** y **Figura 14** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton en las librerías “numpy as np”, “matplotlib.pyplot as plt”, “matplotlib as mpl”, “sklearn.cluster, DBSCAN”, “sklearn.preprocessing, StandardScaler”, “matplotlib.patches, Polygon”, “scipy.spatial, ConvexHull”.

En el sector norte (Y1-Y12) la media fue de $10.46 \pm 2.21 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, especialmente con picos en Y5 (13.59) y Y9 (16.15). En el sector sur (Y13-Y20) la media aumentó a $11.53 \pm 3.01 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, destacando Y16 (14.84), Y17 (14.23), Y18 (14.74) y Y19 (14.08). Árboles cercanos a los silos (Y16 -Y20) (remarcados por un polígono de líneas

punteadas) mostraron una media de $11.45 \pm 2.97 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ superior a la del resto ($10.69 \pm 2.36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

El análisis espacial muestra que los individuos Y9, Y16, Y17 y Y18 son los que más asimilan de la muestra. Estos árboles sostienen promedios superiores a $12 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Es probable que en los individuos Y16, Y17, Y18 y Y19 haya cierta influencia mixta entre la presencia de materia orgánica de los silos y la disponibilidad de agua subterránea (afluente de mayor tamaño) dado que muestran las asimilaciones más altas.

La capacidad del suelo para sostener tasas de A_n significativamente altas depende, en gran medida, de la retención de nutrientes y la fertilidad edáfica que aporta la materia orgánica de los silos cercanos. Un comportamiento análogo se reportó en los suelos áridos de huertos de olivo al sur de Túnez. En dicha investigación, la aplicación de residuos orgánicos locales, específicamente una mezcla de estiércol y restos de palma datilera, incrementó de forma sustancial el carbono, el nitrógeno, el fósforo disponible y la materia orgánica general. Este manejo mejoró las propiedades del sustrato por un periodo mínimo de dos años. Trasladado a escenarios con marcado estrés hídrico, el uso de estas enmiendas representa, para los árboles leñosos, una ventana de oportunidad hacia un potencial productivo que resulta verdaderamente sostenible en el tiempo (106).

De forma complementaria un estudio realizado en bosques de pino en el suroeste de EE.UU. donde se mantienen condiciones áridas la mayor parte del año; ha demostrado que la materia orgánica en el suelo tiene un efecto amortiguador que incrementa la tasa de supervivencia a la sequía, ya que mejora la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes (138).

De la misma manera la cercanía al afluente de mayor tamaño brinda humedad estacional. Esto también ocurre en los wadis (cuerpo de agua) grandes del desierto de Israel, donde los árboles de *Acacia sp.* ubicados próximos a los canales evidenciaron menor mortalidad y tasas de crecimiento más altas ya que al igual que *N. calderensis* dependen de lluvias temporales (139).

3.6. Determinación de área foliar.

De manera adicional se determinó el área foliar (A_f) de los individuos estudiados. Se evaluaron 5 hojas por individuo, teniendo en cuenta los mismos criterios de selección tomados para la medición de A_n . El A_f expresada en cm^2 por hoja, presentó una media de 7.77 cm^2 , con una desviación estándar de 2.06 cm^2 y un coeficiente de variación del 30.10 %. Los valores registrados variaron entre 3.49 cm^2 y 14.81 cm^2 , lo que responde a un rango de 11.32 cm^2 . Estos resultados muestran una heterogeneidad relativamente moderada en los veinte individuos evaluados.

Lejos de constituir una respuesta atípica, este comportamiento encuentra su explicación en variables como la diferencia de edad entre los individuos evaluados. Este factor cronológico condiciona de forma directa la plasticidad morfológica foliar; es decir, la capacidad del taxón para modificar su expresión fenotípica; ya sea en términos de forma, tamaño, grosor o estructura de la hoja, como mecanismo de adaptación frente a las fluctuaciones del entorno (140,141).

La plasticidad fenotípica foliar, está ligada a la activación y expresión de genes como SRK, CRK2, LAS, FAD/SLD, ASN, etc. que están relacionados con vías metabólicas como: biosíntesis de esteroides, respuesta al estrés oxidativo (ROS), biosíntesis de ácidos grasos y metabolismo del nitrógeno (142). Puesto que todo cambio fenotípico tiene origen en variaciones genotípicas, es preciso aclarar que aún no se han realizado estudios en *N. calderensis* de este tipo, lo que apertura una línea de investigación promisorio en el campo, desde donde la biotecnología podría aportar grandemente.

Aunque hay variación, se muestra la misma tendencia al analizar el área foliar, el promedio global de los 20 árboles es 7.77 ± 2.06 . El promedio de los árboles situados cerca de los silos es 10.17 ± 1.55 .

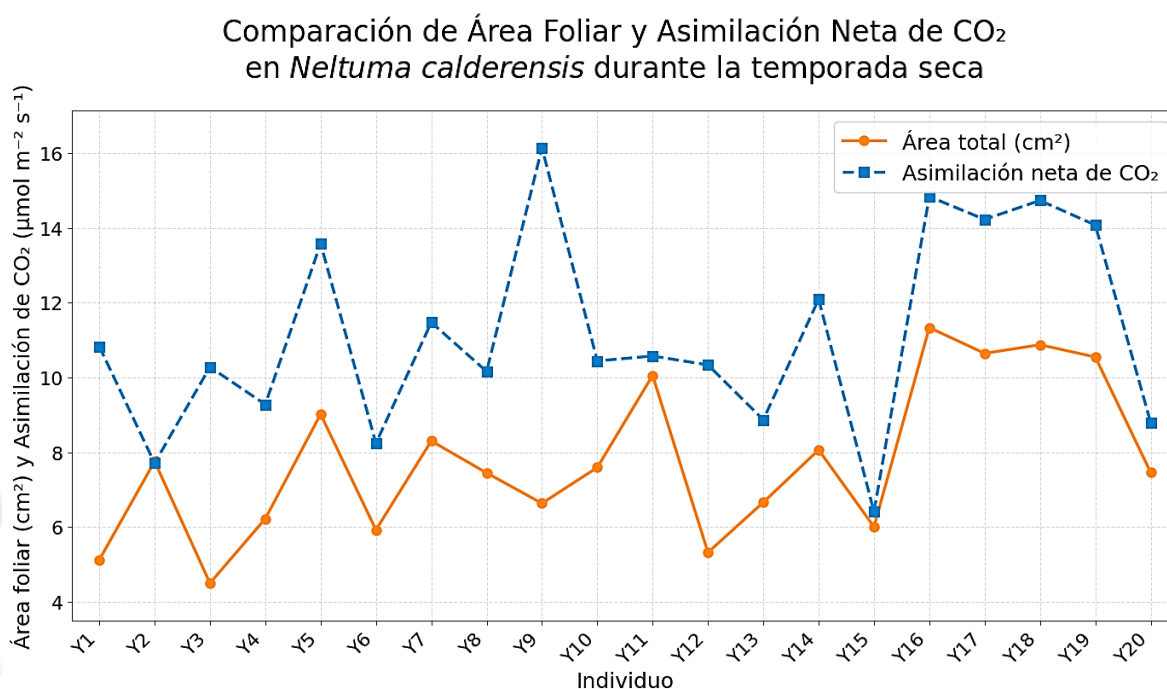


Figura 15. Tendencias entre área y asimilación por árbol (n=20)

Como se puede apreciar en **Figura 15**, el 75 % de los individuos tienen un comportamiento similar en área foliar y asimilación de CO₂, pero no se ha podido demostrar una correlación significativa.

En la **Figura 16** se ve como el individuo Y15 exhibe la tasa más baja de asimilación neta de CO₂ entre los muestreados, con variabilidad mínima a lo largo del día, combinado con uno de los promedios más bajos de área foliar (6 cm²).

Distribución espacial de individuos coloreada por área foliar

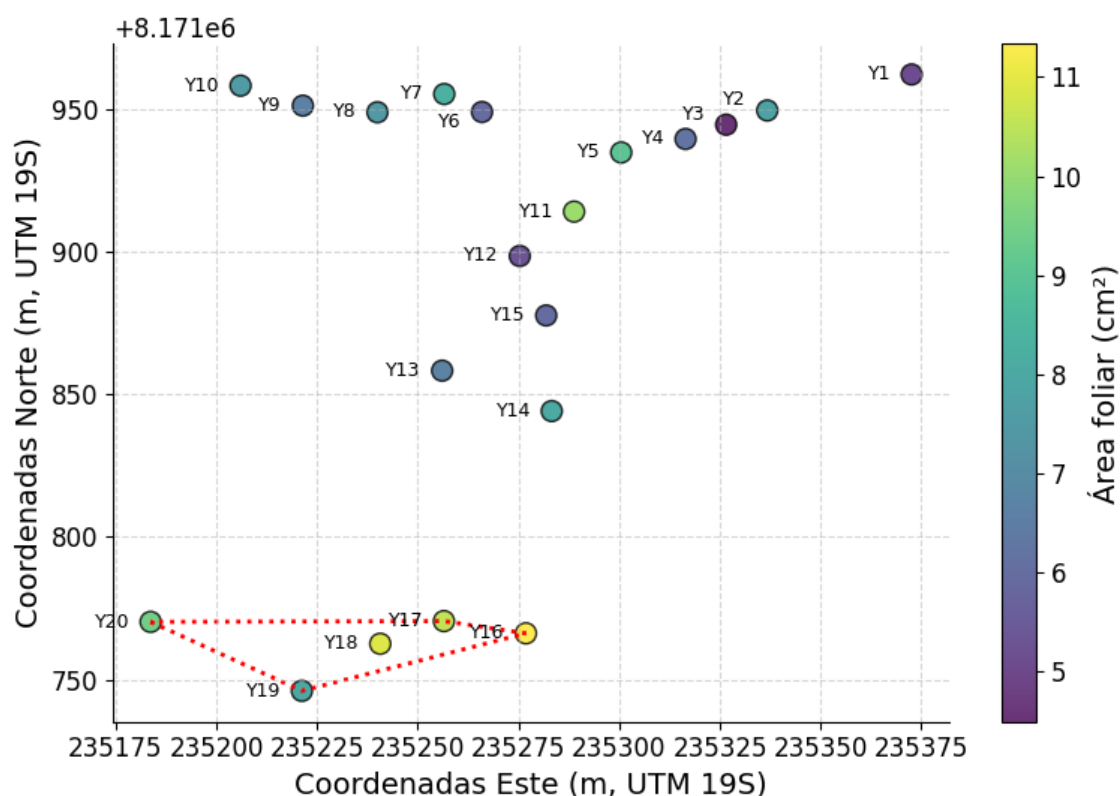


Figura 16. Gráfica de distribución espacial coloreada por área foliar

La **Figura 15** y la **Figura 16** fueron realizadas en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton con las librerías “numpy as np”, “matplotlib.pyplot as plt”.

Este árbol es uno de los más jóvenes y de los que tomaron la estrategia de crecimiento (b), presenta además un IE adaxial notablemente reducido en comparación con el promedio global. Estos rasgos convergen en un patrón que sugiere mayor vulnerabilidad en individuos que invierten en elongación vertical en detrimento de la densidad foliar, sobre todo en temporada seca.

Esta observación es coherente con reportes sobre un congénere *N. alba* (104,143), quien, como principal estrategia de mitigación ante el estrés hídrico, opta por la senescencia foliar temprana.

Esto aporta una perspectiva interesante en la selección genética, dado que se han realizado estudios en *N. alba* que relacionan mediciones morfométricas simples en hojas con indicadores de tolerancia a la sequía (senescencia retardada y la supervivencia al final del periodo crítico). Las hojas más grandes demostraron posponer la senescencia,

pero se asociaban a menor supervivencia y viceversa. Lo que confirma lo planteado a cerca de las estrategias de crecimiento (a) y (b) como mecanismos de supervivencia compensatorios. Es intuitivo pues en condiciones altamente estresantes el individuo debe aplicar mecanismos fisiológicos que le permitan redireccionar sus recursos (agua o energía) (141,142).

En *Prosopis tamarugo*, especie que habita en el desierto de Atacama se ha reportado que realiza un ajuste del ángulo foliar para reducir o aumentar la irradiación directa y con ello mitigar la fotoinhibición (103). Esta adaptación, aunque no fue abordada en profundidad en el presente estudio, fue observada también en *N. calderensis*.

3.7. Determinación de densidad e índice estomático

En la **Figura 17** se pueden observar dos fotografías a 40x de campos tanto en la superficie abaxial (a) como en la adaxial (b) donde de forma visual se puede percibir la diferencia clara en el número de estomas en ambas superficies.

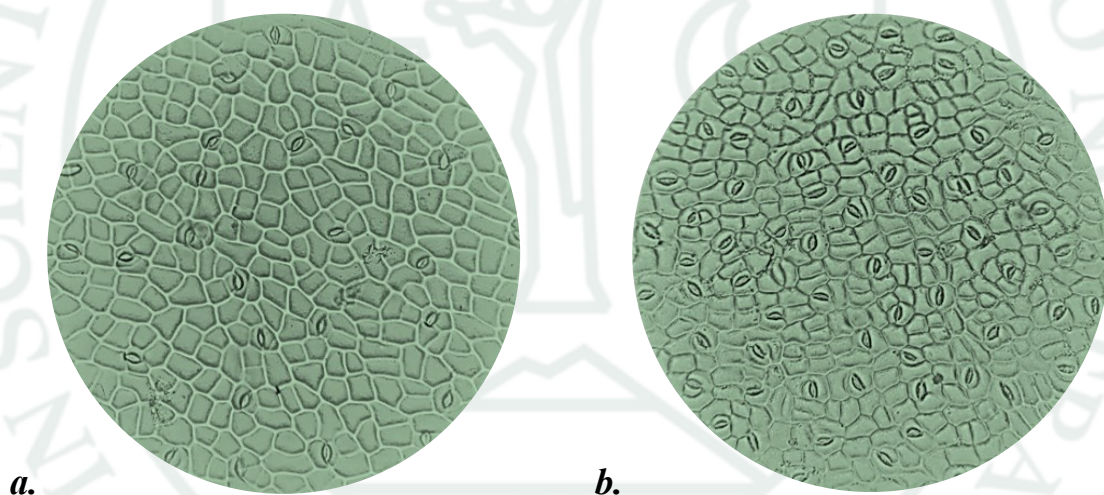


Figura 17. Fotografía de las superficies foliares (a) Envés (b) Haz

Se empleó el método de conteo descrito por Sandoval-Zepotitla et al (98). Quienes optaron por analizar dos folíolos centrales y uno basal en *Lupino L.* también de la familia *Fabaceae*, por lo que comparte similitud morfológica en las hojas, esta elección también se puede amparar en otro estudio por Hernández et al (144), quienes emplearon la misma metodología en *Acacia aroma* también de la familia *Fabaceae*.

Sin embargo, no existían antecedentes sobre variabilidad entre campos por folíolo, por lo que se evaluaron tres campos (base, centro y ápice del folíolo). Las diferencias entre campos fueron despreciables, lo que indica que, al menos en *Neltuma calderensis*, la

elección del campo evaluado en folíolos centrales y basales no afecta de manera significativa los resultados. Se evaluaron un total de 45 campos por individuo (5 hojas por individuo, 3 folíolos por hoja y 3 campos por folíolo).

A continuación, se presenta la **Tabla 2**, donde se pueden visualizar los estadísticos descriptivos tanto de DE como de IE.

Tabla 2. Densidad e índice estomático en la superficie abaxial y adaxial (n=20)

Estadísticos descriptivos	Densidad Estomática (estomas/mm ²)		Índice estomático (%)	
	S. Abaxial	S. Adaxial	S. Abaxial	S. Adaxial
Media	152.17	280.47	8.55	16.40
Mediana	153.41	283.85	8.68	16.48
Desviación estándar	26.48	43.26	1.4	1.66
Coefficiente de variación (%)	17.40	15.42	16.40	10.14
Mínimo	99.9	163.2	5.05	10.33
Máximo	1998.4	358.1	11.85	19.07
Rango	98.46	194.89	6.8	8.7

En la **Tabla 2. Densidad e índice estomático en la superficie abaxial y adaxial (n=20)** podemos ver que todos los árboles exhibieron un patrón anfiestomático, con densidad estomática (DE) marcadamente superior en la superficie adaxial (hiperestomía adaxial), que se mostró 1.84 veces superior a la superficie abaxial. El coeficiente de variación refleja una dispersión moderada propia de variables biológicas.

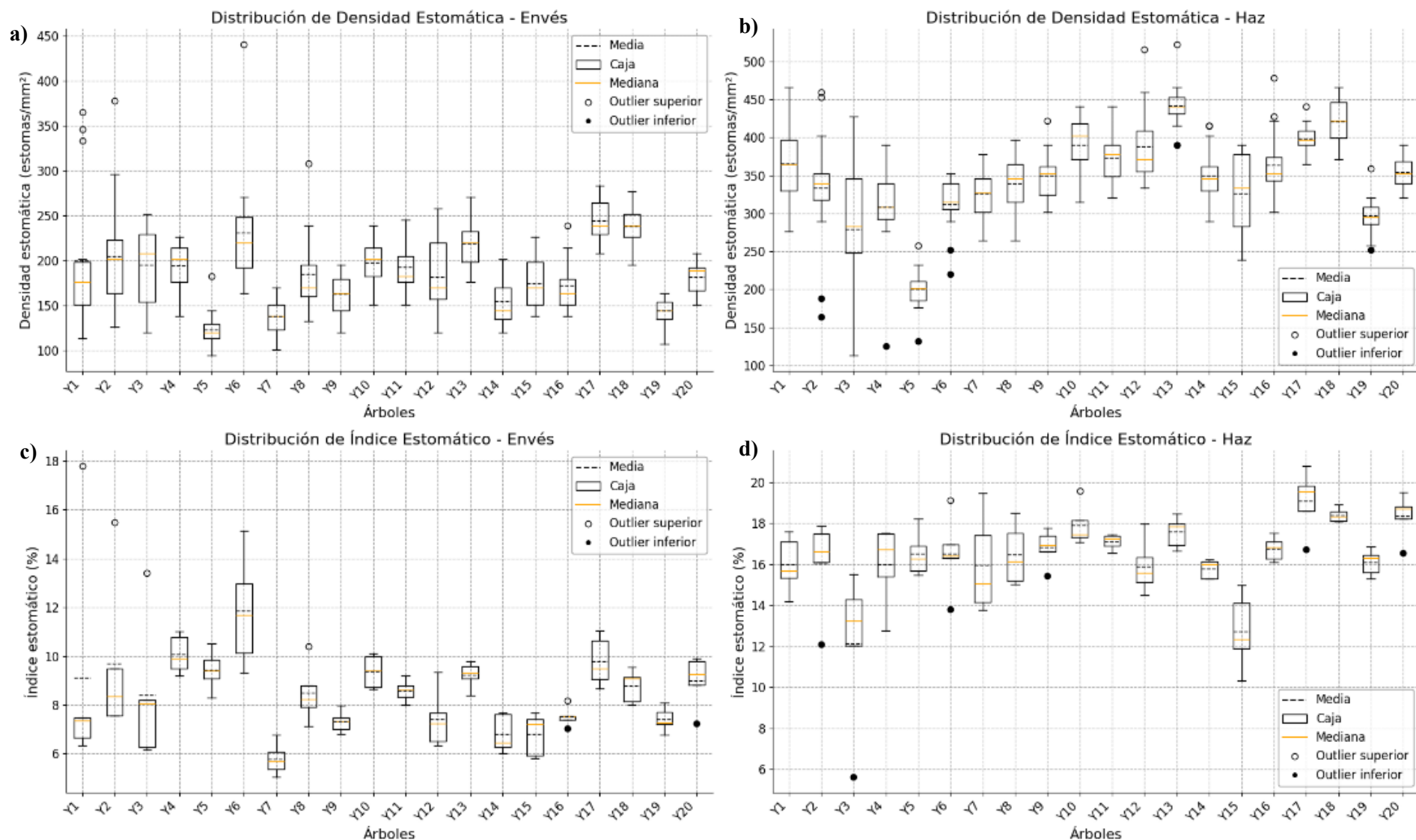


Figura 18 presenta cuatro boxes plot (a) DE en abaxial, (b) DE en adaxial, (c) IE en abaxial y (d) IE en adaxial. Es importante señalar que tanto DE como IE no reflejan directamente la regulación estomática funcional (apertura o cierre), sino que constituyen un carácter morfológico fijo definido durante la formación de las hojas (145)

La **Figura 18** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton, con las librerías “matplotlib.pyplot as plt”, “numpy as np”, “matplotlib as mpl”, “matplotlib.lines, Line2D”, “matplotlib.patches rectangle”

3.7.1. *Densidad e índice estomático abaxiales*

La densidad estomática abaxial (en **Figura 18a**), muestra una mediana ligeramente inferior en la mayoría de los individuos. La variabilidad intraindividuo es baja ya que la mayoría de las cajas son estrechas. El individuo Y5 (99.9 estomas/mm²) muestra la media más baja, mientras que Y17, Y13 y Y6 muestran valores superiores a la media (≈ 180 estomas/mm²). Outliers superiores se observan en Y1, Y2, Y6, Y8 muestran que hay variación microespacial en la epidermis abaxial, esto puede ser atribuido plasticidad fenotípica (mecanismo de adaptación). Sin embargo, la distribución general es simétrica, con un rango interindividual de aproximadamente 100 estomas/mm².

El IE abaxial (En **Figura 18c**) muestra cajas estrechas en la mayoría de los árboles, lo que indica baja variabilidad interindividual. Los valores más bajos se reportan en Y7 y Y14, mientras que los más altos son Y4 y Y6. La distribución es compacta, lo que sugiere que la proporción de células estomáticas en la epidermis abaxial es relativamente estable entre individuos bajo condiciones de estrés hídrico.

3.7.2. *Densidad e índice estomático adaxial*

La densidad adaxial (En **Figura 18 b**) es marcadamente superior que la abaxial, lo que confirma la hiperestomía adaxial. Las cajas largas en varios individuos indican que hay mayor variabilidad interindividual. Y5 continúa teniendo el DE más bajo (163.2 estomas/mm²), mientras que el individuo Y13 mostró la mayor DE 358.1 estomas/mm² (Y13). Los individuos que presentan outliers superiores (Y2, Y12, Y13, Y17) pueden responder a exposición lumínica alta. En este caso, la variación interindividual fue más amplia (160-360 estomas/mm²), con menor CV que en la superficie abaxial.

El comportamiento en la IE adaxial (En **Figura 18d**), tiene mucha similaridad con DE lo que sugiere una adaptación morfológica que favorece la eficiencia fotosintética bajo condiciones de sequía, al incrementar la capacidad de intercambio

gaseoso por unidad de superficie foliar sin requerir un aumento excesivo en la DE absoluta (134).

3.7.3. Comportamiento en individuos con alta exposición solar

En el subgrupo de árboles con alta exposición solar (Y1, Y2, Y5, Y7, Y9, Y14, Y15, Y19), presentó una DE abaxial media de 133 ± 24.6 estomas/mm², valor inferior al promedio general de la población. Al evaluar esta respuesta según el tipo de desarrollo, surgen divergencias claras. Los ejemplares con patrón de crecimiento (a) arrojaron un DE abaxial de 132 ± 30 y adaxial de 258.89 ± 75 . En contraposición, el patrón (b) concentró valores de 134 ± 22.43 a nivel abaxial y 275.70 ± 9.5 a nivel adaxial. Por su parte, el IE abaxial se situó en un 7.8 ± 2.84 %, valor inferior al promedio general, mientras que el IE adaxial alcanzó 15.71 ± 1.85 %. Nuevamente, el hábito de crecimiento fragmentó estos promedios. Para el patrón (a), los índices fijaron marcas de 8.68 ± 0.88 % y adaxial de 16.7 ± 1.12 %. Estos rangos variaron sutilmente en el patrón (b), donde el IE abaxial descendió a 7.4 ± 1.65 % a nivel abaxial y 16.15 ± 0.45 % a nivel adaxial.

En otras especies emparentadas como en *Prosopis strombulifera*, originaria de zonas áridas entre Argentina y Chile se simulaban condiciones de estrés salino donde se observó que el IE aumenta en el haz en condiciones de salinidad baja, pero disminuye en concentraciones altas de sal, reflejando plasticidad para optimizar tamaño estomático y densidad celular epidérmica (146).

En *Prosopis strombulifera*, los cambios inducidos por la salinidad (NaCl y Na₂SO₄) tienen efecto en la densidad estomática (mayor NaCl, menor DE, mayor área estomática), (moderada a alta Na₂SO₄, mayor DE, menor área estomática) (147).

En el Sahel, situado al sur del desierto del Sahara, especies como *Prosopis juliflora* y *Prosopis africana* mostraron que un mayor contenido de nitrógeno por unidad de área foliar, se asocia con una regulación estomática más estricta. Esto permite reducir la conductancia estomática media y mejorar la eficiencia intrínseca en el uso del agua (WUEi). Lo que permite mantener tasas fotosintéticas comparables con una menor apertura estomática, favoreciendo así la supervivencia en ambientes con limitación simultánea de agua y nutrientes (105).

No existe información sobre genes específicos en *N. calderensis*, pero se sabe que en monocotiledóneas y dicotiledóneas los genes que participan en el desarrollo estomático son los siguientes:

Tabla 3. Principales genes en el desarrollo y formación de estomas

Gen	Función	Efecto sobre las estomas	Impacto en aridez	Especies	Ref.
ER, ERL1 Y ERL2	Receptores tipo quinasa (LRR-RLK) activados en sequía percibe EPF	Inhiben la señalización produciendo mayor DE	Su sobreexpresión mejora capacidad fotosintética, pero varía dependiendo de la tolerancia a la sequía del árbol	<i>Populus balsamifera</i> y <i>Arabidopsis thaliana</i>	(24,148)
EPF1 y EPF2	Ligandos negativos que modulan el receptor ER.	Inhibe la formación de estomas.	Al reducir la DE mejora la eficiencia en el WUE y la tolerancia a la sequía.	<i>Oryza sativa</i> y <i>Arabidopsis thaliana</i>	(148,149)
EPFL9/STOMAGEN/PagSTOMAGEN	Modulador positivo de ER (antagonista de EPF1 y 2).	Promueve la formación de estomas.	Aumenta la DE, aumenta la fotosíntesis y se regula con la disponibilidad de agua.	<i>Populus alba</i> y <i>Populus glandulosa</i>	(150)
TMM	Proteína coreceptora (-like protein) modula el complejo de ER.	Modulador principal positivo y negativo de la señalización	Regula plasticidad estomática en base a las condiciones ambientales.	<i>Arabidopsis thaliana</i>	(148,151)
SPCH	Participa en la dinámica transcripcional de bHLH	Inicia directamente la formación de estomas	Estabilizado por KIN10 (respuesta ambiental y recuperación ante estrés prolongado)	<i>Arabidopsis thaliana</i>	(148,151)
SDD1	Proteasa que procesa precursores de péptidos	Participa en la distribución estomática y como modulador negativo de DE.	Baja su expresión y contribuye a evitar la pérdida de agua	<i>Populus balsamifera</i>	(24)

FAMA	Factor de transcripción de bHLH	Diferenciación celular estomática	Varía en condiciones de sequía.	<i>Populus balsamifera</i>	(24)
YDA	Parte de la cascada MAPK	Modulador negativo del desarrollo estomático	Mas estable bajo sequía	<i>Arabidopsis thaliana</i>	(152)
MYC2	Factor de transcripción de bHLH	Reduce la DE activando la EPF2, EPFL4 e inhibe la EPFL9	Mejora resistencia a la sequía pues integra señales hormonales y abióticas	<i>Populus tomentosa</i> y <i>Arabidopsis thaliana</i>	(150)
KIN10 subunidad alfa de SnRK1	Sensor energético que fosforila y estabiliza SPCH	Promueve el desarrollo estomático (aumenta DE e IE)	Participa en la recuperación estomática tras estrés hídrico y energético por falta de glucosa o energía.	<i>Arabidopsis thaliana</i>	(151)

En la **Tabla 3** se observan los genes involucrados en la dinámica estomática y formación de estomas. Desde la perspectiva en biotecnología, la descripción de estas características estomáticas y su vínculo con la eficiencia en el uso de agua y el contenido de nitrógeno foliar abre vías prometedoras hacia la mejora genética dirigida. Contribuyendo al desarrollo de genotipos mejorados de algunas *Fabaceas* adaptadas a climas áridos con aplicaciones en la restauración ecológica y la producción sostenible en zonas de escasez hídrica.

Un estudio realizado en *Prosopis pallida* (denominación anterior de *Neltuma calderensis*) muestra que tiene un alto valor nutricional. La harina de la vaina contiene aproximadamente 23.6 g de proteína/ 100 g, aporta aminoácidos esenciales como la isoleucina y valina, lo que confiere un notable potencial para su uso en aditivos alimentarios proteicos y suplementos nutricionales (10).

El perfil mineral de las vainas resulta igualmente relevante: potasio (618), calcio (363) y magnesio (1420) mg/100g, valores que permiten su aprovechamiento en el desarrollo de alimentos fortificados o como sustratos en medios de cultivo microbiano (10).

Por otra parte, tienen un alto contenido fenólico, entre ellos C-glicósidos, glucósidos de quercetina, catequina y taninos, responsables de una marcada actividad antioxidante y antiinflamatoria. Estos metabolitos abren perspectivas para su empleo como antioxidantes naturales, nutraceuticos o precursores en la síntesis de nanomateriales poliméricos. Finalmente, los polisacáridos presentes confieren alta viscosidad y propiedades funcionales como emulsionantes, espumantes, estabilizadores biodegradables, matrices de encapsulación y recubrimiento comestible (10).

3.7.4. Evaluación de DE e IE vs A_n

Se evaluó la asociación entre la A_n a las 8:00 a.m., (el horario más fotosintéticamente estable) y características estomáticas: densidad estomática (DE, estomas/mm²) e índice estomático (IE, %) tanto del haz como del envés (**Ver Figura 19**). En el **Anexo 5 D** se observa el Pair Plot de estas variables. Los coeficientes de correlación de Pearson (r) y los valores p asociados fueron:

Envés DE: $r = -0.33$, $p\text{-value} = 0.1582$

Envés IE: $r = -0.18$, $p\text{-value} = 0.4380$

Haz DE: $r = -0.10$, $p\text{-value} = 0.6855$

Haz IE: $r = 0.33$, $p\text{-value} = 0.1539$

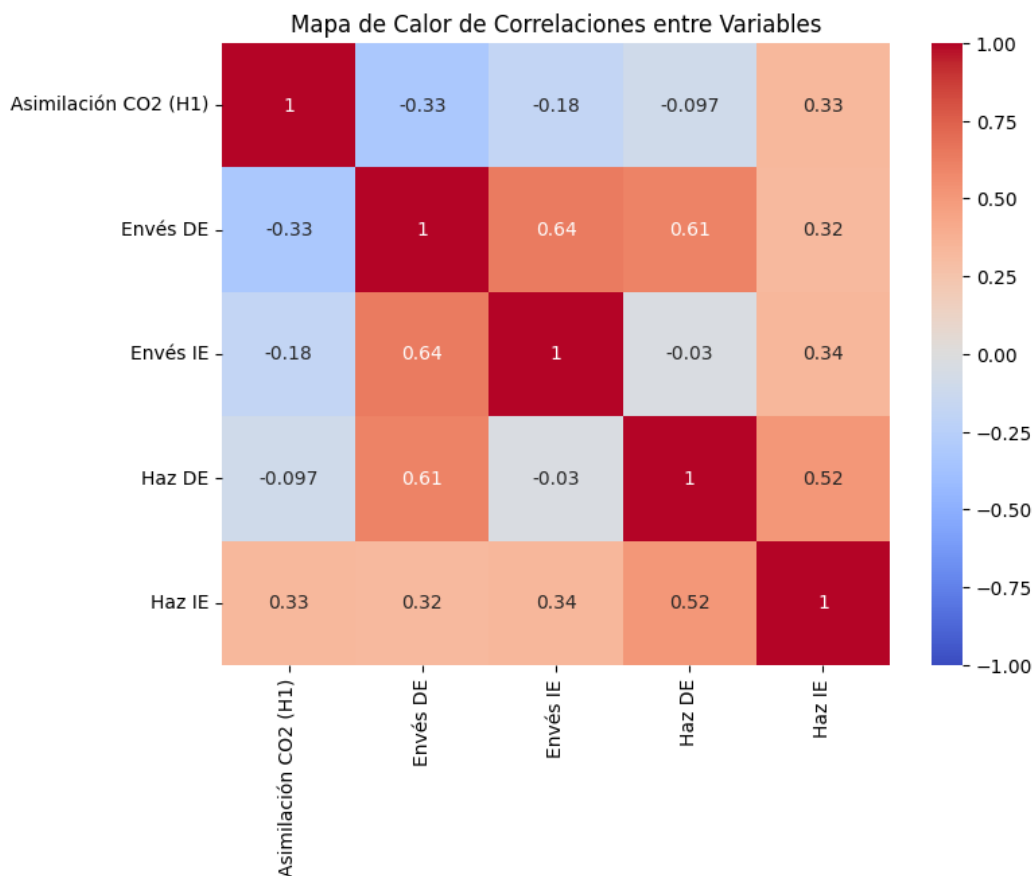


Figura 19. Mapa de calor de la relación de Asimilación CO₂ y características estomáticas

La **Figura 19** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton, con las librerías “matplotlib.pyplot as plt”, “seaborn as sns”, “pandas as pd”, “numpy as np”, “scipy.stats, Pearsonr”.

Como se puede observar el mapa de calor en la **Figura 19**, ninguna de las correlaciones resultó estadísticamente significativa, (todos los valores de $p > 0.05$) lo que indica que no se detectaron relaciones lineales consistentes entre características estomáticas.

Esto, aunque contradictorio en primera instancia, resulta siendo concluyente pues indica que la presencia de estomas (expresados a través de DE e IE), no constituye el principal determinante en el desempeño fotosintético en *Neltuma calderensis*.

Ya que evidencia, que en especies adaptadas a ambientes áridos o semiáridos de los géneros *Prosopis* y *Neltuma*, la tasa de asimilación de CO₂ está más ligada a mecanismos de control dinámico que a rasgos estáticos como la DE o IE (153,154).

Esto no quiere decir que la DE o IE, no sean relevantes en la asimilación de CO₂, sino que señala que mecanismos de control en cierre y apertura estomática son mucho más determinantes, sobre todo en entornos donde predomina el estrés hídrico y térmico (155).

En el género *Prosopis*, se ha documentado una estrategia anhisohídrica que permite mantener el intercambio gaseoso y conductancia estomática durante periodos de estrés hídrico, mediante la apertura y cierre estomático moduladas por señales osmóticas y químicas, más que cambios en índice o densidad estomático (146,153). *Prosopis tamarugo* exhibe una notable capacidad para mantener conductancia estomática relativamente alta incluso a potenciales hídricos foliares bajos (155).

En *Prosopis strombulifera*, los cambios inducidos por la salinidad (NaCl y Na₂SO₄) en la densidad estomática muestran también que en tratamientos con Na₂SO₄ acompañado de niveles elevados de ácido abscísico (ABA), hay reducción de hasta el 60% de área foliar, mayores tasas de transpiración (pérdida de agua) y posterior cierre estomático, afectando directamente la conductancia estomática y con ello la supervivencia de la planta (147).

En *Neltuma alba* las adaptaciones a la sequía se manifiestan principalmente mediante la plasticidad fenotípica foliar, expresado en la variabilidad en el momento de la senescencia foliar y la supervivencia bajo estrés, más que en la densidad estomática (que permanece inmutable) (143).

3.7.5. Conductancia estomática.

Dado que no se observó relación significativa entre DE e IE de haz y de envés con la A_n, se evaluó la relación de las conductancias difusivas (*g_{sw}* y *g_{tc}*) con A_n, ya que tienden a capturar las limitaciones funcionales sobre las estructurales.

Pero antes, se debe entender lo siguiente:

La conductancia estomática mide el grado de apertura de los estomas que a su vez regula el proceso de intercambio gaseoso. Es válido aclarar que la salida de vapor de agua no restringe la entrada de CO₂ y viceversa, pues la difusión ocurre en simultáneo en ambas direcciones (96,156).

Es así que, ambas variables están relacionadas, más no son iguales, puesto que la velocidad de difusión del CO₂ es mucho más lenta (aproximadamente 1.6 veces) que la del vapor de agua (96).

Relación entre Conductancia Estomática y Asimilación de CO₂
(Junio vs Julio)

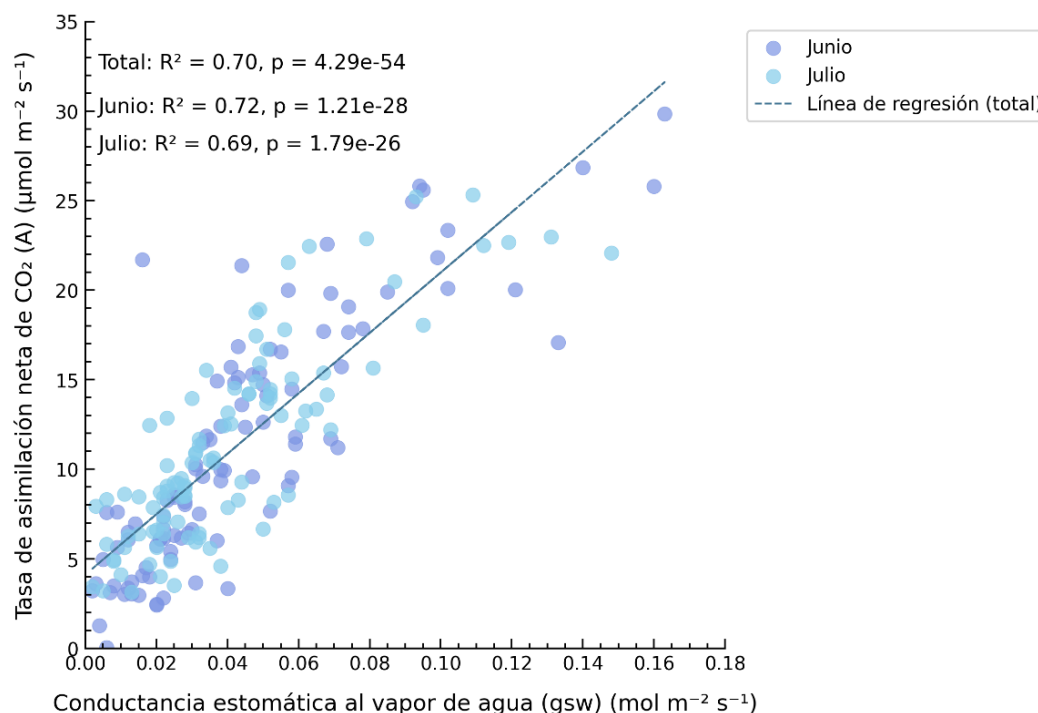


Figura 20. Gráfica de correlación lineal entre conductancia estomática y asimilación neta de CO₂

En la **Figura 20** se puede observar que existe una correlación lineal positiva y significativa en ambos meses (junio R²=0.72 y p=0.00 y julio R²=0.69 y p=0.00) entre la conductancia estomática al vapor de agua (gs) y la A_n. Al combinar los datos de ambos meses la correlación sigue siendo fuerte.

En plantas C3 (*Trifolium repens*, *Lolium perenne* y *Triticum aestivum*) bajo estrés hídrico la gs se encuentra entre 0.01 y 0.02 mol/ m²s (156).

Por otro lado, en un estudio realizado en *Prosopis tamarugo*, mucho más próxima a *N. calderensis*, se expuso a la planta a tres condiciones de estrés hídrico) y se midieron sus conductancias estomáticas en mañana y tarde. Las cuales fueron en promedio: Sin déficit (0.35 mol m⁻² s⁻¹), déficit medio (0.21 mol m⁻² s⁻¹) y déficit alto (0.16 mol m⁻² s⁻¹) (155). Sin embargo, se debe considerar que el tipo de suelo varió y que con el fin de evaluar solo el efecto de una variable se controlaron las

demás, a diferencia de los individuos monitorizados en este estudio donde se vieron expuestos a condiciones ambientales reales.

El promedio global de gsw para junio fue de $0.044 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mientras que para julio fue de $0.040 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Esto es particularmente positivo ya que quiere decir que los mecanismos de adaptación de *N. calderensis* son eficientes y reflejan menor sensibilidad al estrés salino en comparación a otras plantas C3 e incluso en plantas similares como *P. tamarugo*.

Esta relación revela a la conductancia estomática como uno de los factores limitantes más importantes en la A_n .

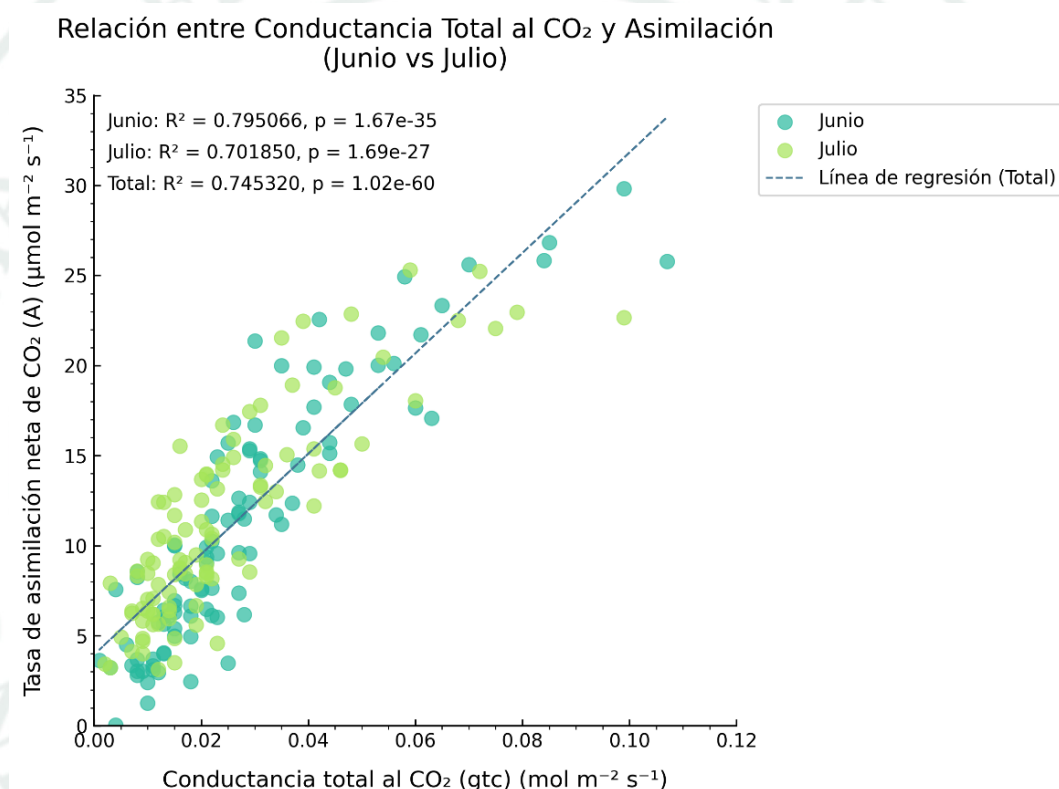


Figura 21. Gráfica de correlación lineal entre conductancia total al CO_2 y Asimilación

Por otro lado, como se observa en la **Figura 21** que representa la correlación lineal entre la Asimilación de CO_2 y la conductancia total al CO_2 (gtc), que cuantifica la difusión total de CO_2 , integra conductancia mesofílica (gm) y conductancia estomática (gsw). Muestra si existen limitaciones en las estomas (externas) o en cloroplastos (internas). Se ha reportado que las plantas adaptadas a condiciones de sequía muestran un gs inferior a $0.10 \text{ mol/m}^2 \text{ s}$ (157,158) mientras que el promedio general de *N. calderensis* evaluada durante los dos meses de muestreo fue $0.026 \text{ mol/m}^2 \text{ s}$.

Esta al derivar directamente de la gsw también muestra el mismo comportamiento. Se observó una correlación lineal alta tanto en gtc como en gsw, por lo que refuerza lo antes mencionado. En *Neltuma calderensis* la dinámica estomática tiene un rol trascendental en la A_n incluso más que en variables como DE e IE.

La **Figura 20** y la **Figura 21** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton, con las librerías “numpy as np”, “matplotlib.pyplot as plt”, “scipy.stats, pearsonr, linregress”

3.7.6. *Diferencia de presión de vapor de agua en la hoja (VPDleaf)*

Los valores registrados oscilaron entre 1.4 y 3.2 kPa, el promedio mensual para el mes de junio fue de 2.07 ± 0.35 kPa y para el mes de julio 2.14 ± 0.33 kPa. La mayoría de las mediciones se categorizan como moderada a alto, estas condiciones generalmente inducen el cierre estomático en la mayoría de las especies. A pesar de ello, *N. calderensis* mantuvo tasas fotosintéticas positivas, lo que evidencia una buena tolerancia a la alta demanda evaporativa.

3.8. Análisis de la relación entre variables ambientales y la asimilación de CO₂ en *Neltuma calderensis*.

3.8.1. Datos meteorológicos

Los datos se extrajeron de la estación meteorológica de Huasacache, la más cercana al punto de muestreo. A continuación, se presentan los datos meteorológicos en horarios de (8:00 a 17:00 h) de los días de muestreo tanto en junio como en julio. En estos se observan condiciones ambientales consistentes con los de ecosistemas semiáridos andinos. Los datos evaluados fueron: Temperatura (°C), Humedad relativa (%), presión atmosférica (hPa), velocidad (m/s) y dirección del viento (°).

Gráfico de variables meteorológicas medidas promedio ($\pm$ DE) en Junio 2025

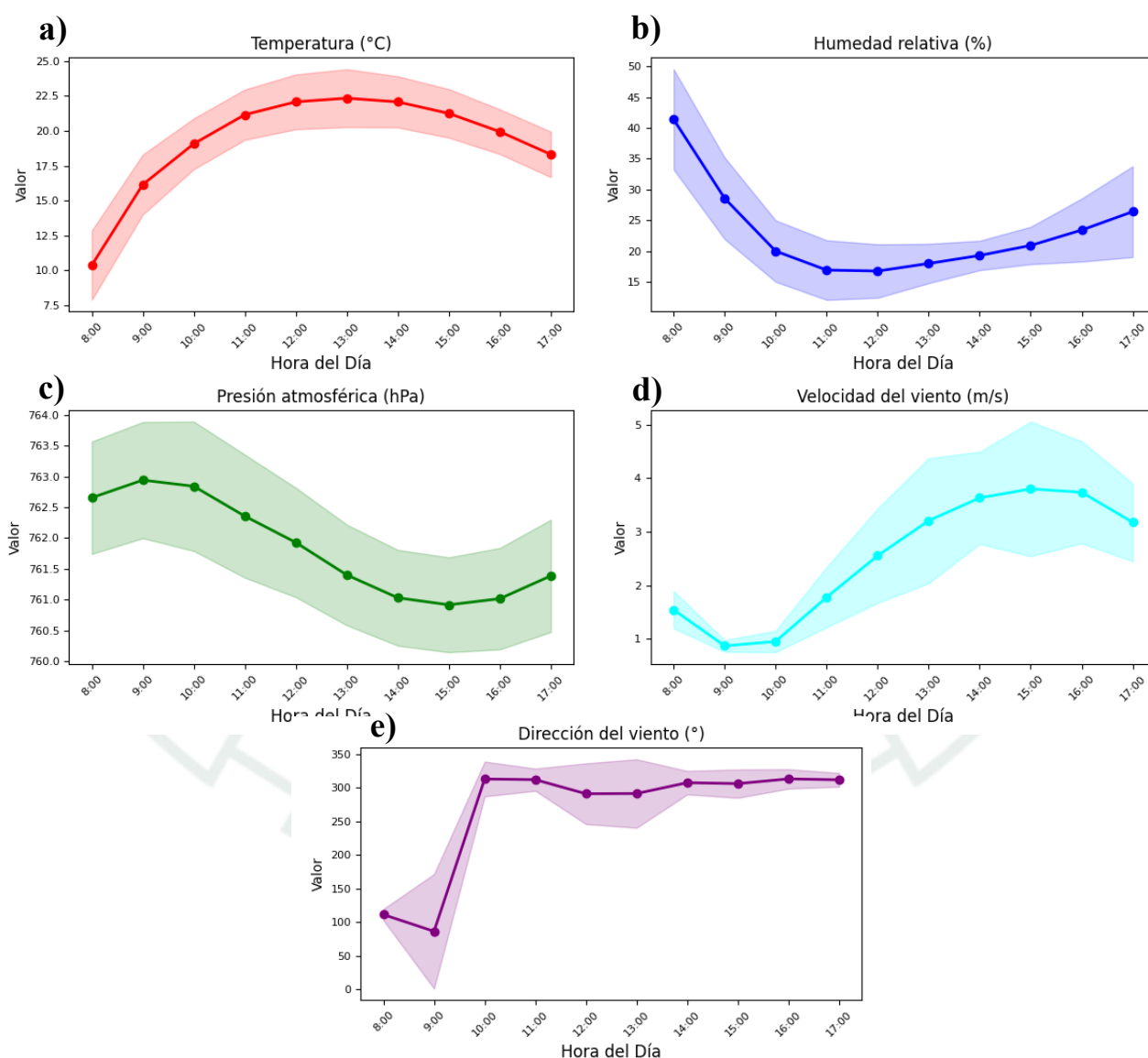


Figura 22. Gráfico de variables meteorológicas promedio y desviación estándar en junio-2025. a. Temperatura (°C), b. Humedad Relativa (%), c. Presión atmosférica (hPa), d. Velocidad del viento (m/s), e. Dirección del viento (°)

El monitoreo diario muestra un régimen térmico moderado (**Figura 22a**) La temperatura diurna comenzó con una media de 10.4 ± 2.5 °C (a las 8:00 h) ascendiendo de forma progresiva bajo la influencia de la radiación solar hasta registrar un pico de 22.0 ± 2.0 °C (entre las 12:00 y las 14:00 h), seguida de una bajada a 18.4 ± 1.7 °C (a las 17:00 h). Esto sugiere que se trata de un régimen térmico moderado con variaciones entre días debidas a diferencias en la radiación solar.

De manera inversa, la humedad relativa (**Figura 22b**) experimentó una fuerte contracción matutina al pasar de 41.4 ± 9.3 % (8:00 h) a su punto más bajo de 16.3 ± 4.3 % (12:00 h). Hacia la tarde, este indicador inició una recuperación que alcanzó el 26.5 ± 8.1 %, una oscilación que responde a los procesos locales de evaporación matinal y posterior condensación vespertina. Por otro lado, la presión atmosférica y la dinámica de los vientos reflejan el acoplamiento con el calentamiento del aire:

El descenso de la presión atmosférica (**Figura 22c**) fue paulatino: bajó de 762.7 ± 0.9 hPa (8:00 h) a 760.8 ± 0.8 hPa (14:00-15:00 h), lo cual es coherente con el calentamiento del aire durante el día.

La velocidad del viento (**Figura 22d**) se incrementó desde su valor inicial de 1.5 ± 0.4 m/s (8:00 h) a 3.8 ± 1.2 m/s (15:00 h), después descendió a 3.2 ± 0.6 m/s (17:00 h), lo cual indica la presencia de brisas locales por la tarde.

La dirección del viento (**Figura 22e**) Mostró una marcada inversión al rotar desde los pasó de 111.2 ± 8.5 ° (sureste, a las 8:00 h) a 310.3 ± 13.2 ° (noroeste, a las 17:00 h), lo que confirma el control topográfico sobre los flujos de aire locales.

Finalmente se mostró una nula incidencia de precipitación en los meses de muestreo.

Gráfico de variables meteorológicas medidas promedio ($\pm$ DE) en julio 2025

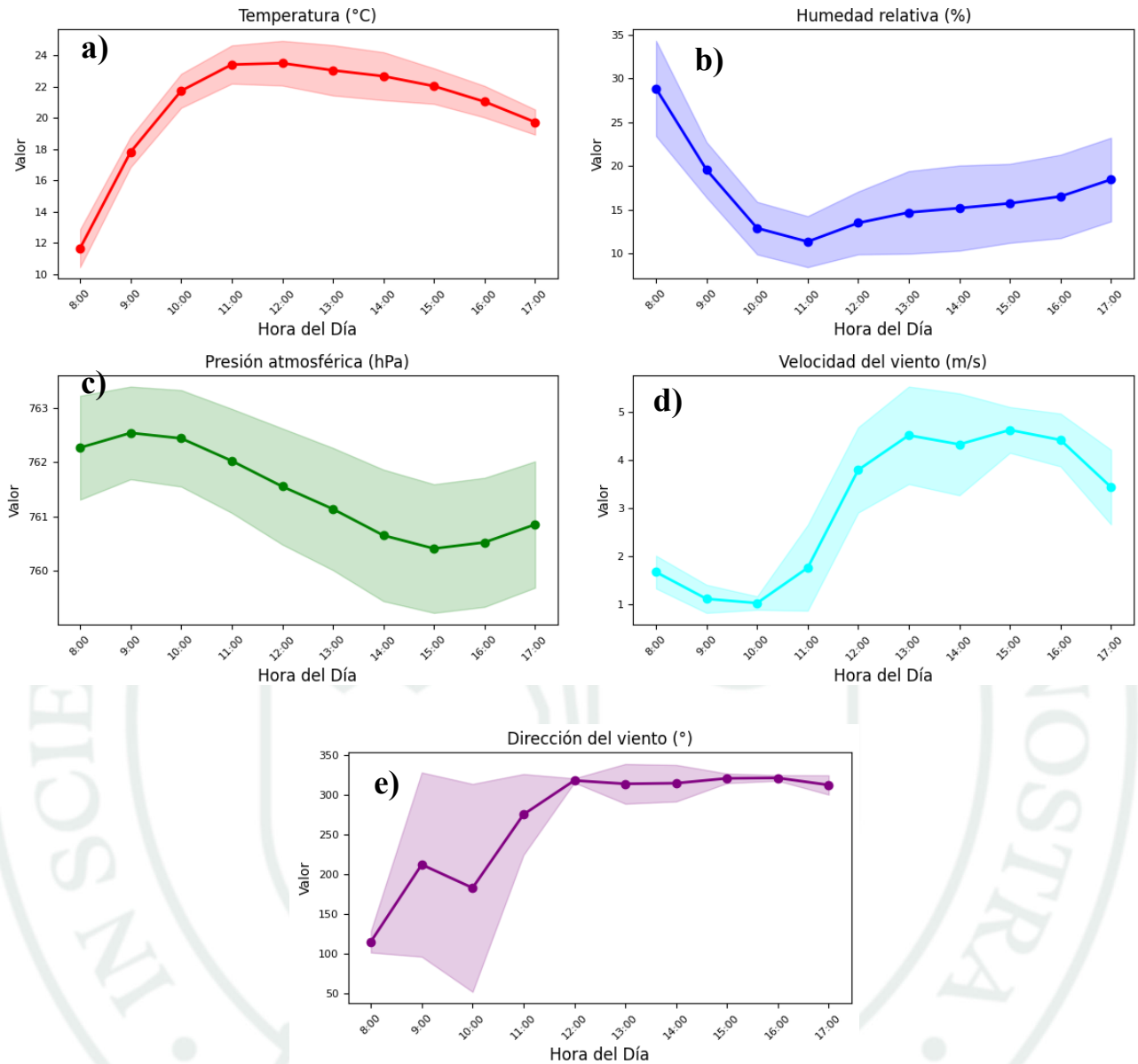


Figura 23 Gráfico de variables meteorológicas promedio y desviación estándar en julio-2025 a. Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), b. Humedad Relativa (%) c. Presión atmosférica (hPa) d. Velocidad del viento (m/s) e. Dirección del viento ($^{\circ}$)

La temperatura (**Figura 23 a**) pasó de 11.7 ± 1.2 $^{\circ}\text{C}$ (8:00 h) a 23.5 ± 1.5 $^{\circ}\text{C}$ (12:00-13:00 h), y luego bajó a 19.7 ± 0.9 $^{\circ}\text{C}$ (17:00 h). La DE fue más baja que en junio, lo que indica una mayor estabilidad térmica. La humedad relativa (**Figura 23 b**) bajó de 28.9 ± 6.2 % (8:00 h) a 11.8 ± 3.7 % (al medio día), y luego aumentó a 18.4

$\pm 5.1 \%$ en la tarde, por debajo de los niveles de junio, lo que indica condiciones más áridas.

La presión atmosférica (**Figura 23 b**) bajó de 762.4 ± 0.9 hPa (por la mañana) a 760.2 ± 1.4 hPa (al mediodía), con una desviación estándar un poco más alta. La velocidad del viento (**Figura 23 d**) aumentó de 1.7 ± 0.3 m/s (8:00 h) a 4.5 ± 1.2 m/s (13:00-15:00 h), para luego bajar a 3.4 ± 0.8 m/s (17:00 h); los picos fueron más altos que en junio. Al igual que en junio, la dirección del viento (**Figura 23 e**) varió de $115.1 \pm 14.2^\circ$ (sureste, por la mañana) a $312.7 \pm 13.5^\circ$ (noroeste, por la tarde). No hubo precipitación (DE = 0).

Estos patrones muestran un ciclo diario predecible: la temperatura sube y la humedad disminuye debido al calentamiento matutino, mientras que el viento de la tarde regula el intercambio gaseoso. La transición de junio a julio presenta condiciones un poco más secas y con más viento, lo que podría incrementar el estrés hídrico de los individuos.

Los datos meteorológicos fueron extraídos de la estación Huasacache, ubicada en el distrito Jacobo Hunter, que fue la más cercana, se encuentra a 12 Km aproximadamente con una diferencia de altura de 241 m (**Ver Anexo 1 G**).

No hay relación lineal entre la temperatura medida por el equipo y la asimilación de CO₂ (**Ver Anexo 5 C**) dado que la línea de regresión es prácticamente horizontal a lo largo de los cinco horarios y hay árboles que presentan la misma temperatura y la asimilación varía significativamente. Por lo que se podría decir que la temperatura en sí misma no explica la asimilación de CO₂ en *N. calderensis*.

Del mismo Anexo, se ve claramente la dispersión purpura corresponde al “Horario 1” donde se presenta la mayor asimilación de CO₂ (aprox 21.5) y la temperatura es entre 27-30 °C. Mientras “Horario 5” en verde limón, donde se presenta la menor asimilación de CO₂ (aprox 5) aunque las temperaturas siguen siendo altas entre 27°C.

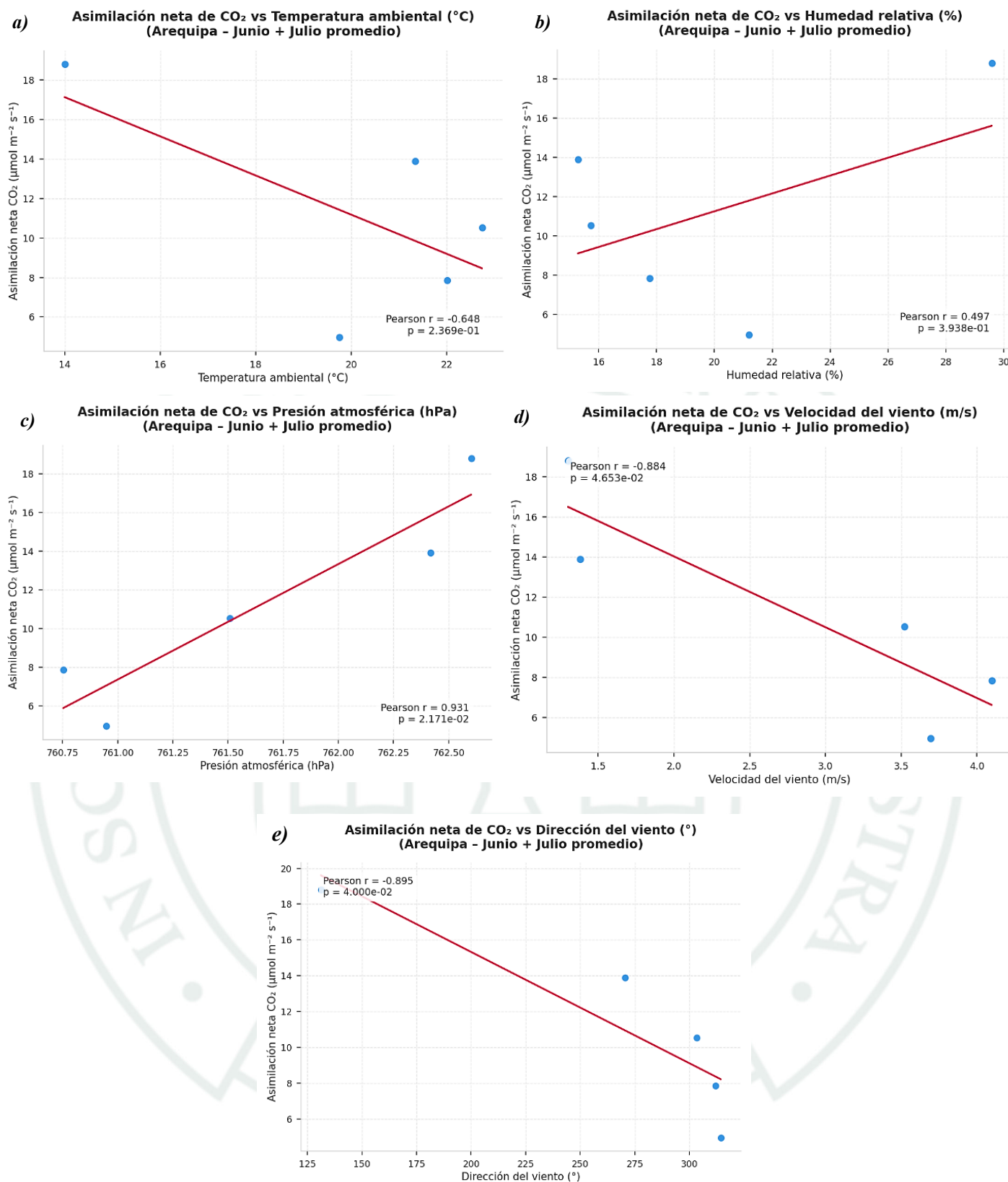


Figura 24. Asimilación neta de CO₂ vs. Temperatura ambiental (a), Humedad relativa (b), Presión atmosférica (c), Velocidad de viento (d) y Dirección del viento (e).

3.8.1.1. Temperatura ambiental (°C).

La temperatura ambiental **Figura 24 (a)** en ambos meses exhibe un comportamiento tipo campana. Iniciando en aprox. 11.01 °C, con un pico máximo de temperatura a medio día de aprox. 22.79 °C y cerrando el día en aprox. 19.02 °C. Muestra una tendencia negativa moderada ($r = -0.648$, $p = 0.24$).

En arboles perennifolios (mismo clado que *N. calderensis*) muestran que el óptimo fotosintético (T_{opt}) sube en promedio 0.34 °C por cada °C de calentamiento. Pero la fotosíntesis neta, baja significativamente una vez que se superan los 22 °C (159). En el sitio de muestreo se evidenció una diferencia de 11.68 °C del primer horario al tercero y al quinto 8.01 °C, lo que reafirma el estrés térmico que enfrenta *N. calderensis* y respalda la máxima asimilación en el primer horario (8:00 h).

Ligado a la temperatura está el índice de radiación ultravioleta, en los reportes del SENAMHI de la estación de radiación UV en Arequipa, en los valores registrados entre las 13:00 a las 14:00 h. en los días de muestreo el promedio del índice de radiación en junio fue 8 y en julio fue 7. Clasificados como muy alta y alta respectivamente (160).

3.8.1.2. Humedad relativa (%).

En la **Figura 24 (b)** se observa como en ambos meses exhibe un comportamiento descendente de en promedio 35% en el primer horario, 15.11% al medio día y finalmente un leve ascenso a 22.42 en el último horario. Muestra una tendencia positiva moderada ($r = 0.50$, $p = 0.39$).

La mayor humedad relativa se reporta en el primer horario, horario en el que también hay mayor asimilación, esto es coherente dado que la humedad propicia la apertura estomática durante mayor tiempo, favoreciendo así la entrada de CO₂ sin experimentar deshidratación, mientras que baja humedad (H2-H4) tiene efecto contrario.

En especies C₃ se ha reportado que a mayor HR aumenta la conductancia estomática y la asimilación neta de CO₂ (75).

3.8.1.3. Presión atmosférica (hPa).

En la **Figura 24 (c)** en ambos meses se exhibe un comportamiento marcadamente descendente de en promedio 762.46 hPa en el primer horario, 761.74 hPa a medio día y finalmente 760.66hPa en el último horario. Muestra la tendencia positiva más marcada ($r= 0.93$, $p= 0.022$)

A mayor presión, mayor presión parcial de CO₂ (pCO₂) que se traduce a mayor disponibilidad de CO₂, lo que aumenta el gradiente de difusión hacia las estomas y la tasa de carboxilación de la RuBisCO (161).

Se realizó un experimento donde se varió únicamente la presión total manteniendo la presión parcial de CO₂, la fotosíntesis neta sube hasta 1.6 veces (161). En árboles como *N. calderensis* que se encuentran a una altura elevada de aproximadamente 2443.25 m, el efecto se amplifica porque la presión base ya es bastante baja. Esto hace que la presión sea el factor ambiental más favorable y limitante a la vez.

3.8.1.4. Velocidad viento (m/s) y Dirección viento (°).

En **Figura 24 (d y e)** se observa que tanto velocidad como dirección del viento tienen correlaciones fuertes negativas ($r=-0.88$, $p=0.047$) y ($r=-0.90$, $p=0.040$) respectivamente. A mayor velocidad, adelgaza la capa límite foliar, aumentando la transpiración y el estrés hídrico, cerrando estomas y reduciendo la asimilación. Esto sumado a que en los últimos horarios el viento proviene del noroeste trayendo aire seco y con mayor turbulencia, lo que aumenta la VPD y contribuye al cierre estomático.

Se ha demostrado que la dirección del viento puede alterar la distribución de luz y el movimiento del dosel teniendo un efecto directo en la disminución del intercambio gaseoso (162). Por lo que, en conjunto la dirección y la velocidad del viento son inhibidores de la asimilación neta de CO₂ en *N.calderensis*.

La **Figura 24** fue realizada en el entorno colaborativo de programación Google Collab empleando el lenguaje de programación Phyton, con las librerías “numpy as np”, “matplotlib.pyplot as plt”, “scipy.stats, Pearsonr, linregress”.

CONCLUSIONES

- Primero, se logró determinar las características del suelo y el entorno vegetal del ecosistema de *Neltuma calderensis* en Quebrada Honda en el distrito de Mollebaya, Arequipa, demostrando que el suelo presenta textura arenosa, pH ligeramente alcalino, moderada conductividad eléctrica, bases intercambiables moderadas (Ca, K, Mg) y fósforo disponible limitado, con niveles de metales totales por debajo de umbrales tóxicos. La presencia de bioindicadores como líquenes pueden llegar a sugerir buena calidad de aire. La flora circundante mostró mayor abundancia en la familia *Asteraceae*, seguida de *Cactaceae* y *Fabaceae* esta genera factores microclimáticos que modulan la eficiencia fotosintética de la especie. Estos resultados aportan información clave para entender el entorno de *N. calderensis*
- Segundo, se determinó la asimilación neta de CO₂ (A_n) en *Neltuma calderensis* durante la temporada seca (junio-julio 2025) en función de la hora del día (8:00 a.m. a 4:00 p.m.) demostrando que la especie mantiene valores positivos de A_n a pesar de las condiciones semiáridas del entorno. Mostrando un pico máximo a las 8:00 h y un declive progresivo hacia la tarde, los individuos que asimilaron más CO₂ fueron Y9, Y16-Y20. Estos últimos, debido a la cercanía de materia orgánica cercana procedente de los silos, esto tuvo también una relación con el incremento del área foliar. Así mismo, se identificaron dos estrategias de crecimiento en individuos jóvenes donde la flora circundante es reducida se ve altamente favorecida la estrategia de crecimiento (b), donde se opta por el incremento de densidad foliar sobre altura, mostrando A_n mayores que aquellos que emplearon la (a).
- Tercero, se logró determinar la densidad e índice estomático foliar en *Neltuma calderensis*, evidenciándose que es de carácter anfiestomático e hiperstomático adaxial. dichas características estomáticas no presentan relación significativa con la A_n . Sin embargo, la dinámica estomática expresada en conductancia estomática al vapor de agua y al dióxido de carbono, sí están relacionadas. este factor es crítico ya que regula la apertura y cierre estomático y con ello la capacidad de asimilación de CO₂.
- Cuarto, se logró analizar la relación entre las variables ambientales y la asimilación neta de CO₂ en *N. calderensis*, demostrando que la presión atmosférica es la variable con mayor correlación positiva sobre A_n , mientras que

la velocidad y dirección del viento actúan como principales inhibidores. La A_n exhibió un patrón diurno con un pico matutino a las 8:00h y un declive progresivo hacia la tarde, atribuible a cierre estomático debido al incremento de temperatura, disminución de presión atmosférica, disminución de humedad relativa, velocidad (incrementada) y dirección del viento (vientos noroeste). Aunque se reporta una disminución significativa, esta se mantiene positiva. Esta dinámica confirma mantenimiento de fotosíntesis durante el día.



RECOMENDACIONES

En primer lugar, hacer identificación filogénica en las especies del sur peruano para saber hasta dónde se distribuye verdaderamente la especie estudiada. Realizar un estudio hidrogeológico de los afluentes y régimen hídrico en el distrito de Mollebaya, Socabaya y Yarabamba con el fin de complementar el análisis edafológico y entender mejor la disponibilidad de agua en el ecosistema de *Neltuma calderensis*.

Realizar un análisis metagenómico de los consorcios microbianos en el entorno radicular de *N. calderensis*, ya que es probable que estos tengan influencia directa en la tasa de supervivencia de la especie a través de la segregación de metabolitos y exudados bacterianos. Evaluar el potencial de aislamiento y cultivo de estos microorganismos para el desarrollo de biofertilizantes que permitan la subsistencia de otras especies no adaptadas a entornos áridos. Comprobar además la presencia de microorganismos tolerantes a metales pesados y su posible empleo en procesos de biorremediación.

Aislar a *Peniophora albobadia* presente en la zona de muestreo y exponerlo a diferentes tratamientos de residuos agroindustriales lignocelulósicos o con compuestos fenólicos, con el fin de contribuir a la disminución de contaminación generada especialmente en la industria alimentaria.

En segundo lugar, comparar la capacidad de asimilación de CO₂ y la eficiencia fotosintética entre árboles de *N. calderensis* cultivados en viveros y ejemplares silvestres, examinando su reacción ante desafíos como variaciones de temperatura, salinidad en suelo y sequía prolongada. Evaluar la resistencia específica a agentes salinos (NaCl y Na₂SO₄) y emplear métricas como las tasas de recuperación post-estrés para determinar la resiliencia de los cultivos en vivero, aspecto fundamental para ampliar su aplicación en reforestación.

Estimar la tolerancia de *N. calderensis* a concentraciones elevadas de smog (ozono, SO₂ y NO_x) mediante la medición de sus efectos sobre la asimilación de CO₂ y la fotosíntesis. Debido a los altos niveles de contaminación en Arequipa, verificar si sus hojas funcionan como filtros naturales, comparándolas con especies tolerantes como árboles de hoja perenne y coníferas.

En tercer lugar, evaluar la plasticidad fenotípica de la densidad estomática (DE) y el índice estomático (IE) en diferentes temporadas (húmeda y seca), con el fin de verificar

si existen variaciones significativas en la expresión foliar y como estas influyen en la asimilación neta de CO₂.

En cuarto lugar, hacer investigaciones moleculares para examinar la activación de proteínas que están vinculadas con el *quenching* fotoquímico y medir su expresión en épocas de sequía severa. Aplicando qPCR para determinar cómo *Neltuma calderensis* mejora la fotosíntesis cuando hay escasez de agua, ampliando así el enfoque.

Secuenciar el genoma completo de *Neltuma calderensis* para identificar variaciones genéticas locales asociadas a la tolerancia a sequía, establecer un mapeo genético comparativo para verificar si en *Neltuma calderensis* se manifiestan genes que suelen activarse en especies resistentes a la sequía. Si no, examinar nuevos caminos metabólicos o mecanismos de activación estratégica que pueden aportar al área de la modificación genómica, ya que estas son tendencias globales para adaptarse al estrés hídrico.

Emplear genomas de referencia de especies vinculadas, por ejemplo, *Prosopis alba*, con el fin de agilizar el análisis. Investigar si al igual que otras especies similares muestra patrones de mayor resistencia a la sequía genotípicamente expresados en morfología foliar para hacer más fácil la identificación y selección de ejemplares superiores.

Finalmente, incorporar mediciones de deposición de contaminantes en hojas, con el fin de calcular el impacto real en la reducción de la calidad del aire en Arequipa, realizando comparaciones con *Salix humboldtiana* o *Schinus molle*.

Realizar estudios socioeconómicos sobre el uso de *Neltuma calderensis* en comunidades locales (madera, forraje, etc) e indagar sobre los posibles usos del fruto, su capacidad antioxidante y su valor nutricional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pauca-Tanco A. El árbol de yaro: un potencial sostenible [Internet]. Universidad Nacional de San Agustín, Universidad Católica San Pablo, Instituto Científico Michael Owen Dillon, editores. 2022 [citado el 1 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://www.unsa.edu.pe/iciga/el-yaro/>
2. Salazar Zarzosa P, Mendieta-Leiva G, Navarro-Cerrillo RM, Cruz G, Grados N, Villar R. An ecological overview of *Prosopis pallida*, one of the most adapted dryland species to extreme climate events. *J Arid Environ*. 2021;193:104576. doi:10.1016/j.jaridenv.2021.104576
3. Guzman Ramirez SL, Ramos Vilcahuaman EM. Caracterización fitoquímica, bromatológica y poder antioxidante del fruto de *Neltuma calderensis* (yaro) para uso como alimento funcional [Internet]. 2024 [citado el 26 de febrero de 2026]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12773/19152>
4. Hughes CE, Ringelberg JJ, Lewis GP, Catalano SA. Disintegration of the genus *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, mimosoid clade). *PhytoKeys*. 2022;205:147. doi:10.3897/PHYTOKEYS.205.75379 PubMed PMID: 36762004.
5. ONU. Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible [Internet]. [citado el 18 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
6. Chibani K, Fan M, Ali HE, Al-Kharusi L. Unraveling the invasiveness of *Prosopis juliflora* (*Neltuma juliflora*): seed traits and ecological implications. *Front Plant Sci*. el 27 de enero de 2026;16:1721722. doi:10.3389/fpls.2025.1721722
7. Kong W, Liu M, Felker P, Ewens M, Bessega C, Pometti C, et al. Genome and evolution of *Prosopis alba* Griseb., a drought and salinity tolerant tree legume crop for arid climates. *Plants People Planet*. el 1 de noviembre de 2023;5(6):933–47. doi:10.1002/ppp3.10404
8. Quipuscoa Víctor, Balvin Margarita, Treviño Italo, Sinca Felipe, Bedoya Maricruz, Rosado Geraldine, et al. Plantas vasculares endémicas de Arequipa-Perú [Internet]. UNSA. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.; 2022 [citado el 1 de marzo de 2026]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12773/15739>
9. De Mera AG, Perea EL, Quino JM, Orellana JAV. *Prosopis andicola* (Algarobia, caesalpinioideae, leguminosae), a new combination and rank, and *p. calderensis*, a new species for mesquite populations from Southern Peru. *Phytotaxa*. el 6 de agosto de 2019;414(1):48–54. doi:10.11646/phytotaxa.414.1.6
10. Grados N, Cruz G, Albán L, Felker P. Peruvian *Prosopis pallida*: Its potential to provide human and livestock food for tropical arid lands of the world. *Prosopis as a Heat Tolerant Nitrogen Fixing Desert Food Legume: Prospects for Economic Development in Arid Lands*. el 1 de enero de 2022;241–51. doi:10.1016/B978-0-12-823320-7.00018-3

11. Saleh IA, BiBi A, Bibi S, Abu-Dieych M, Al-Ghouti MA. Waste-to-value: Guidelines for the potential applications of *Prosopis juliflora*. *Bioresour Technol Rep*. el 1 de diciembre de 2023;24:101678. doi:10.1016/j.biteb.2023.101678
12. Zhong J, Lu P, Wu H, Liu Z, Sharifi-Rad J, Setzer WN, et al. Current Insights into Phytochemistry, Nutritional, and Pharmacological Properties of *Prosopis* Plants. *Evid Based Complement Alternat Med*. 2022;2022:2218029. doi:10.1155/2022/2218029 PubMed PMID: 35310031.
13. A.Galán, E.Linares, J.Montoya, Vicente Orell. SERFOR [Internet]. 2024 [citado el 27 de febrero de 2026]. Guía de árboles nativos de la región Arequipa-Neltuma calderensis. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/serfor/informes-publicaciones/5971521-guia-de-arboles-nativos-de-la-region-arequipa>
14. El Peruano. Decreto Supremo N° 043-2006-AG-Categorización de Especies amenazadas de Flora Silvestre [Internet]. 2006 [citado el 1 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/osinfor/normas-legales/792195-043-2006-ag-aprueban-categorizacion-de-especies-amenazadas-de-flora-silvestre>
15. Rosas Lusett MA, Bartorila MÁ, Rosas Lusett MA, Bartorila MÁ. Aportaciones de la forestación a la sostenibilidad urbana en ciudades tropicales. *Humedal Nuevo Amanecer, Ciudad Madero, México*. *Nova scientia*. el 6 de septiembre de 2017;9(19):528–50. doi:10.21640/NS.V9I19.980
16. MINAM, Dirección General de Evaluación valoración y financiamiento del patrimonio nacional. Conceptos Generales de Servicios Ecosistémicos: Énfasis en los Lineamientos de formulación [Internet]. 2016 [citado el 1 de abril de 2026]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sial-sialtrujillo/archivos/public/docs/ssee_trujillo.pdf
17. Lehninger A., Nelson D., Cox M. Principios de Bioquímica. 7ma ed. 1970.
18. Walker AP, De Kauwe MG, Bastos A, Belmecheri S, Georgiou K, Keeling RF, et al. Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂. *New Phytologist*. el 1 de marzo de 2021;229(5):2413–45. doi:10.1111/NPH.16866;WGROU:STRING:PUBLICATION PubMed PMID: 32789857.
19. Niinemets Ulo. Photosynthesis and resource distribution through plant canopies. *Plant Cell Environ*. el 15 de septiembre de 2007;30(9):1052–71. doi:10.1111/j.1365-3040.2007.01683.x
20. Garcia A, Gaju O, Bowerman AF, Buck SA, Evans JR, Furbank RT, et al. Enhancing crop yields through improvements in the efficiency of photosynthesis and respiration. *New Phytologist*. el 1 de enero de 2023;237(1):60–77. doi:10.1111/NPH.18545;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER PubMed PMID: 36251512.
21. Poorter H, Knopf O, Wright IJ, Temme AA, Hogewoning SW, Graf A, et al. A meta-analysis of responses of C3 plants to atmospheric CO₂: dose–response curves for 85 traits ranging from the molecular to the whole-plant level. *New Phytologist*. el 1 de febrero de 2022;233(4):1560–96. doi:10.1111/nph.17802 PubMed PMID: 34657301.

22. Sage RF, Sage TL, Kocacinar F. Photorespiration and the evolution of C4 photosynthesis. *Annu Rev Plant Biol.* junio de 2012;63:19–47. doi:10.1146/annurev-arplant-042811-105511 PubMed PMID: 22404472.
23. Asargew MF, Masutomi Y, Kobayashi K, Aono M. Water stress changes the relationship between photosynthesis and stomatal conductance. *Science of The Total Environment.* el 10 de enero de 2024;907(1):167886. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.167886 PubMed PMID: 37858817.
24. Gago J, Daloso D de M, Figueroa CM, Flexas J, Fernie AR, Nikoloski Z. Relationships of Leaf Net Photosynthesis, Stomatal Conductance, and Mesophyll Conductance to Primary Metabolism: A Multispecies Meta-Analysis Approach. *Plant Physiol.* el 1 de mayo de 2016;171(1):265–79. doi:10.1104/pp.15.01660 PubMed PMID: 26977088.
25. Hamanishi ET, Thomas BR, Campbell MM. Drought induces alterations in the stomatal development program in *Populus*. *J Exp Bot.* el 1 de agosto de 2012;63(13):4959–71. doi:10.1093/jxb/ers177 PubMed PMID: 22760471.
26. Zait Y, Schwartz A. Climate-Related Limitations on Photosynthesis and Drought-Resistance Strategies of *Ziziphus spina-christi*. *Frontiers in Forests and Global Change.* el 28 de septiembre de 2018;1(3):415258. doi:10.3389/FFGC.2018.00003/BIBTEX
27. Gardner F., Brent Pearce R., Mitchel R. Physiology of crop plants. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press [Internet]. 1985 [citado el 27 de abril de 2025]. 31–57 p. Disponible en: <https://biblioteca.espam.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-search.pl>
28. Filio-Hernández E, González-Rodríguez H, Cantú-Silva I, Domínguez-Gómez TG, Marmolejo-Monsivais JG, Gómez-Meza MV, et al. Comparación anatómica de la lámina foliar de cinco especies leñosas nativas del noreste de México durante la época húmeda y seca. *Polibotanica.* el 15 de julio de 2022;0(54):171–83. doi:10.18387/POLIBOTANICA.54.11
29. Shu Y, Huang G, Zhang Q, Peng S, Li Y. Reduction of photosynthesis under P deficiency is mainly caused by the decreased CO₂ diffusional capacities in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry.* el 1 de mayo de 2023;198:107680. doi:10.1016/J.PLAPHY.2023.107680 PubMed PMID: 37031546.
30. Gonzáles J., Chueca A. C4 y CAM Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas [Internet]. 2010 [citado el 30 de abril de 2025]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=770965>
31. Tulva I, Koolmeister K, Hōrak H. Low relative air humidity and increased stomatal density independently hamper growth in young *Arabidopsis*. *Plant Journal.* el 1 de septiembre de 2024;119(6). doi:10.1111/TPJ.16944,
32. Pernicová N, Urban O, Čáslavský J, Kolář T, Rybníček M, Sochová I, et al. Impacts of elevated CO₂ levels and temperature on photosynthesis and stomatal closure along an altitudinal gradient are counteracted by the rising atmospheric vapor pressure deficit. *Science of The Total*

- Environment. el 15 de abril de 2024;921(5):171173. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.171173 PubMed PMID: 38401718.
33. Ye Z, An T, Yang X, Kang H, Wang F. Novel Model for Stomatal Conductance: Enhanced Accuracy Under Variable Irradiance and CO₂ in C₃ Plant Species. *Biology (Basel)*. el 1 de noviembre de 2025;14(11):1501. doi:10.3390/biology14111501
 34. Zhong Z, He B, Wang YP, Chen HW, Chen D, Fu YH, et al. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity. *Sci Adv*. el 1 de agosto de 2023;9(32). doi:10.1126/SCIADV.ADF3166;WEBSITE:WEBSITE:AAAS-SITE;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:SCIADV;WGROU:STRING:PUBLICATION PubMed PMID: 37556542.
 35. Tentes O. Z. *Geophys*. 1930. p. 297–309. Über einige meteorologische Begriffe.
 36. FAO. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).
 37. Devi MJ, Taliencio EW, Sinclair TR. Leaf expansion of soybean subjected to high and low atmospheric vapour pressure deficits. *J Exp Bot*. el 1 de abril de 2015;66(7):1845–50. doi:10.1093/JXB/ERU520 PubMed PMID: 25618144.
 38. Grossiord C, Buckley TN, Cernusak LA, Novick KA, Poulter B, Siegwolf RTW, et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytol*. el 1 de junio de 2020;226(6):1550–66. doi:10.1111/NPH.16485 PubMed PMID: 32064613.
 39. Zomer RJ, Xu J, Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database. *Scientific Data* 2022 9:1. el 15 de julio de 2022;9(1):409-. doi:10.1038/s41597-022-01493-1 PubMed PMID: 35840601.
 40. United Nations Convention to Combat Desertification. Three-quarters of Earth's land became permanently drier in last three decades: UN [Internet]. 2024 [citado el 24 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.unccd.int/news-stories/press-releases/three-quarters-earths-land-became-permanently-drier-last-three-decades>
 41. Evans RD, Koyama A, Sonderegger DL, Charlet TN, Newingham BA, Fenstermaker LF, et al. Greater ecosystem carbon in the Mojave Desert after ten years exposure to elevated CO₂. *Nat Clim Chang*. el 6 de abril de 2014;4(5):394–7. doi:10.1038/NCLIMATE2184;SUBJMETA=158,2445,47,631,704;KWRD=BIOGEOCHEMISTRY,ECOSYSTEM+ECOLOGY
 42. PLAN REGIONAL DE REFORESTACIÓN Y ARBORIZACIÓN. 2009.
 43. CENEPRED. Escenarios de Riesgo por sequías meteorológicas del departamento de Arequipa [Internet]. 2025 [citado el 28 de mayo de 2026]. Disponible en: https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//19749_escenarios-de-riesgo-por-sequias-meteorologicas-del-departamento-de-arequipa.pdf

44. SENAMHI. Informe técnico: Condiciones actuales de precipitación y perspectivas climáticas, hidrológicas y agrometeorológicas en la región andina [Internet]. 2024 [citado el 28 de mayo de 2026]. Disponible en: <http://www.bom.gov.au/climate/enso/#tabs=Overview>
45. Li X, Wang S, Zhu L, Zhang P, Qi H, Zhang K, et al. Leaf hydraulic decline coordinates stomatal and photosynthetic limitations through anatomical adjustments under drought stress in cotton. *Front Plant Sci.* el 10 de julio de 2025;16:1622308. doi:10.3389/FPLS.2025.1622308/TEXT
46. Zahra N, Hafeez MB, Kausar A, Al Zeidi M, Asekova S, Siddique KHM, et al. Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. *J Agron Crop Sci.* el 1 de octubre de 2023;209(5):651–72. doi:10.1111/JAC.12652;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
47. Frost MDT, Trimas GE, Johnston KA, Bunch ZLT, Jolin AD, Koerner SE. Native plant species exhibit consistent drought advantage over introduced species until additional global change drivers are included: A grassland meta-analysis. *Journal of Ecology.* el 1 de septiembre de 2025;113(9):2698–711. doi:10.1111/1365-2745.70123;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:13652745;WEBSITE:WEBSITE:BESJOURNALS;WGROUPE:STRING:PUBLICATION
48. Tierras secas: mucho más de lo que su nombre sugiere [Internet]. [citado el 24 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://www.fao.org/newsroom/story/Drylands-much-more-than-their-name-suggests/es>
49. Organización de las Naciones Unidas. Convenio sobre la Biodiversidad Biológica [Internet]. 1992 [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.cbd.int/>
50. FAO. Tratado internacional sobre los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura [Internet]. 2009 [citado el 17 de mayo de 2026]. Disponible en: <https://www.fao.org/plant-treaty/es/>
51. Nacional U, Gallo PR, Antonio J, Baldera C, Dennie P, Rojas S, et al. ¿Por qué debemos preservar el medio ambiente? Un análisis desde el enfoque sostenible. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar.* el 20 de agosto de 2025;9(3):11330–8. doi:10.37811/CL_RCM.V9I3.18900
52. FAO. Integrating Peru's Megadiversity into Sustainable Food Systems: Scaling up successes from food processing industries [Internet]. 2025 [citado el 17 de mayo de 2026]. Disponible en: <https://www.fao.org/plant-treaty/news/news-detail/integrating-peru-s-megadiversity-into-sustainable-food-systems---scaling-up-successes-from-food-processing-industries/en>
53. UNCCD. Drylands Global Land Outlook [Internet]. 2018 [citado el 10 de mayo de 2026]. Disponible en: https://www.unccd.int/sites/default/files/2018-06/GLO%20English_Ch12.pdf
54. Salazar W, Cruz-Grimaldo C, Lastra S, Rengifo R, Vargas-de-la-Cruz C, Godoy-Padilla D, et al. Nutritional Quality of the “Algarrobo” *Neltuma pallida* Fruit and Its Relationship with Soil Properties and Vegetation Indices in the Dry Forests of Northern Peru. *Sustainability* 2025, Vol 17, el 15 de septiembre de 2025;17(18). doi:10.3390/su17188296

55. Busch FA, Ainsworth EA, Amtmann A, Cavanagh AP, Driever SM, Ferguson JN, et al. A guide to photosynthetic gas exchange measurements: Fundamental principles, best practice and potential pitfalls. *Plant Cell Environ.* el 1 de septiembre de 2024;47(9):3344–64. doi:10.1111/PCE.14815 PubMed PMID: 38321805.
56. Moon YH, Woo UJ, Sim HS, Lee TY, Shin HR, Jo JS, et al. Development of a semi-open chamber system for the gas exchange measurement of whole-canopy under steady and unsteady states in cucumber seedlings. *Plant Methods* 2023 19:1. el 7 de agosto de 2023;19(1):79-. doi:10.1186/S13007-023-01059-1
57. Valcke R. Can chlorophyll fluorescence imaging make the invisible visible? *Photosynthetica*. 2021;59(S1):381–98. doi:10.32615/PS.2021.017
58. Moustaka J, Moustakas M. Early-Stage Detection of Biotic and Abiotic Stress on Plants by Chlorophyll Fluorescence Imaging Analysis. *Biosensors (Basel)*. el 1 de agosto de 2023;13(8):796. doi:10.3390/BIOS13080796/S1 PubMed PMID: 37622882.
59. Adireddy RG, Anapalli SS, Delhom CD, Puppala N, Reddy KN. Investigating photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses to light in peanut acclimated to elevated CO₂ and temperature. *Photosynthesis Research* 2025 163:3. el 14 de mayo de 2025;163(3):29-. doi:10.1007/S11120-025-01151-8 PubMed PMID: 40366484.
60. LI-6800 | Manual/ Instrucciones de funcionamiento [Internet]. [citado el 4 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.licor.com/support/LI-6800/manuals.html>
61. LI-6800 Sistema Portátil de Fotosíntesis | Guíalab [Internet]. [citado el 30 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.guialab.com.ar/notas-tecnicas/li-6800-sistema-portatil-de-fotosintesis/>
62. Portable De Fotosíntesis S. LI-6800.
63. Useche-Carrillo NV, Ayala-Arreola J, Campos-Rojas E, Barrientos-Priego AF. Relationships between stomatal and gas exchange characteristics of the leaf blade in ‘Colín V-33’ avocado seedlings. *Rev Chapingo Ser Hortic.* el 1 de septiembre de 2022;28(3):133–44. doi:10.5154/R.RCHSH.2021.05.008
64. Reyes A, Álvarez-Herrera J, Fernández J. Papel del calcio en la apertura y el cierre estomático y sus interacciones con solutos compatibles. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 2013;7(1):111–22. doi:DOI:10.17584/rcch.2013v7i1.2040
65. Daszkowska-Golec A, Szarejko I. Open or Close the Gate – Stomata Action Under the Control of Phytohormones in Drought Stress Conditions. *Front Plant Sci.* el 13 de mayo de 2013;4(MAY):138. doi:10.3389/FPLS.2013.00138 PubMed PMID: 23717320.
66. Hughes C, Ringelberg J, Lewis G, Catalano S. Disintegration of the genus *Prosopis* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae, mimosoid clade). *PhytoKeys*. el 22 de agosto de 2022;205:147–89. doi:10.3897/phytokeys.205.75379

67. Jezek M, Blatt MR. The Membrane Transport System of the Guard Cell and Its Integration for Stomatal Dynamics. *Plant Physiol.* el 1 de junio de 2017;174(2):487–519. doi:10.1104/PP.16.01949 PubMed PMID: 28408539.
68. Kim TH, Böhmer M, Hu H, Nishimura N, Schroeder JI. Guard cell signal transduction network: advances in understanding abscisic acid, CO₂, and Ca²⁺ signaling. *Annu Rev Plant Biol.* el 2 de junio de 2010;61:561–91. doi:10.1146/ANNUREV-ARPLANT-042809-112226 PubMed PMID: 20192751.
69. Kinoshita T, Shimazaki KI. Blue light activates the plasma membrane H⁽⁺⁾-ATPase by phosphorylation of the C-terminus in stomatal guard cells. *EMBO J.* el 15 de octubre de 1999;18(20):5548. doi:10.1093/EMBOJ/18.20.5548 PubMed PMID: 10523299.
70. Grondin A, Rodrigues O, Verdoucq L, Merlot S, Leonhardt N, Maurel C. Aquaporins Contribute to ABA-Trigged Stomatal Closure through OST1-Mediated Phosphorylation. *Plant Cell.* el 12 de agosto de 2015;27(7):1945–54. doi:10.1105/TPC.15.00421 PubMed PMID: 26163575.
71. Alvarado G, Jáuregui D, García M. Anatomía Foliar en dos Poblaciones de *Notopleura agostinii* (Steyerf.) C.M. Taylor (Rubiaceae) del Parque Nacional Henri Pittier, Maracay-Venezuela. El ambiente físico, ecología general y anatomía vegetal. 2020. doi:http://dx.doi.org/10.31095/investigatio.2020.13.5
72. Tulva I, Koolmeister K, Hõrak H. Low relative air humidity and increased stomatal density independently hamper growth in young *Arabidopsis*. *The Plant Journal.* el 1 de septiembre de 2024;119(6):2718–36. doi:10.1111/TPJ.16944 PubMed PMID: 39072887.
73. Hasan R, Nurzaman M, Setiawati T, Mutaqin AZ, Biologi PS, Matematika F, et al. Characteristics of Stomata and Leaf Thickness in Several Liliales Plants. *Florea: Jurnal Biologi dan Pembelajarannya.* el 30 de noviembre de 2024;11(2):40–6. doi:10.25273/FLOREA.V11I2.21297
74. Poorter H, Pons TL, Reichgelt T, Flexas Sans J. Stomatal Density and Index Are More Responsive to Light Intensity than to [CO₂]: A Meta-Analysis and Implications for Paleo-CO₂ Reconstruction [Internet]. 2025. doi:10.53941/plantecophys.2025.100001
75. Liu C, Sack L, Li Y, Zhang J, Yu K, Zhang Q, et al. Relationships of stomatal morphology to the environment across plant communities. *Nature Communications* 2023 14:1. el 19 de octubre de 2023;14(1):6629-. doi:10.1038/s41467-023-42136-2 PubMed PMID: 37857672.
76. Driesen E, Van den Ende W, De Proft M, Saeys W. Influence of Environmental Factors Light, CO₂, Temperature, and Relative Humidity on Stomatal Opening and Development: A Review. *Agronomy* 2020, Vol 10,. el 14 de diciembre de 2020;10(12). doi:10.3390/agronomy10121975
77. Millstead L, Jayakody H, Patel H, Kaura V, Petrie PR, Tomasetig F, et al. Accelerating Automated Stomata Analysis Through Simplified Sample Collection and Imaging Techniques. *Front Plant Sci.* el 25 de septiembre de 2020;11:580389. doi:10.3389/fpls.2020.580389

78. Stein RA, Sheldon ND, Smith SY. Comparing Methodologies for Stomatal Analyses in the Context of Elevated Modern CO₂. *Life* (Basel). el 1 de enero de 2024;14(1). doi:10.3390/life14010078 PubMed PMID: 38255693.
79. Matthaeus WJ, Schmidt J, White JD, Zechmann B. Novel perspectives on stomatal impressions: Rapid and non-invasive surface characterization of plant leaves by scanning electron microscopy. *PLoS One*. el 1 de septiembre de 2020;15(9):e0238589. doi:10.1371/journal.pone.0238589 PubMed PMID: 32881951.
80. Yuan J, Wang X, Zhou H, Li Y, Zhang J, Yu S, et al. Comparison of Sample Preparation Techniques for Inspection of Leaf Epidermises Using Light Microscopy and Scanning Electronic Microscopy. *Front Plant Sci*. el 25 de febrero de 2020;11:492104. doi:10.3389/fpls.2020.00133
81. Organización de las Naciones Unidas-Secretaría del Convenio de la Diversidad Biológica. Protocolo de Cartagena sobre la seguridad de la Biotecnología. 2000.
82. Organización de las Naciones Unidas- Secretaría del CDB. Protocolo de Nagoya [Internet]. 2011 [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: www.cbd.int
83. Organización de las Naciones Unidas. El Acuerdo de París [Internet]. 2015 [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
84. UNESCO. Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los [Internet]. [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.unesco.org/es/ecosystems-restoration-decade>
85. Estado Peruano. Ley N° 26839 sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica. 1997.
86. Estado Peruano. Ley N° 29763 Ley Forestal y de Fauna Silvestre [Internet]. 2015 [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-29763.pdf>
87. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR - Plataforma del Estado Peruano [Internet]. [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.gob.pe/serfor>
88. Kunberger JM, Colón MR, Long AM. Using Google Earth Engine to develop interactive mapping tools for conservation planning. *J Nat Conserv*. el 1 de septiembre de 2025;87:126997. doi:10.1016/J.JNC.2025.126997
89. Sales Dávila B, Samaniego Vivanco TD, Durand Pasco KA, Norabuena Segovia ÁA, Calderón Espinoza RJ, Ortega Vega JM, et al. Manual para el análisis de suelos agrícolas y agua para riego [Internet]. el 18 de marzo de 2024 [citado el 16 de noviembre de 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12955/2473>
90. Carter MR, Gregorich EG. Soil sampling and methods of analysis- AGRIS International System for Agricultural Science and Technology -FAO. Soil Sampling and Methods of Analysis [Internet].

- 2a ed. CRC Press Taylor & Francis Group; 2008 [citado el 28 de septiembre de 2025]. 823 p. Disponible en: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/sampling-and-laboratory-techniques/en/>
91. FAO. Guidelines for soil description [Internet]. Cuarta Edición. Roma; 2006 [citado el 28 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/a0541e/a0541e.pdf>
92. USDA. Soil Survey Manual - Natural Resources Conservation Service [Internet]. 2017 [citado el 28 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-survey-manual>
93. MINAGRI, SERFOR, MINAM, FAO, Ministerio de Relaciones Exteriores de Finlandia. Marco Metodológico del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - Perú [Internet]. 2016 [citado el 3 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/per161159anx.pdf>
94. MINAM. Cobertura vegetal del Departamento de Arequipa- GEOSERVIDOR [Internet]. 2018 [citado el 4 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/arequipa/>
95. Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre - OSINFOR. Protocolo para la herborización: colección y preservado de ejemplares botánicos en procesos de supervisión forestal [Internet]. julio de 2013 [citado el 1 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/osinfor/informes-publicaciones/832416-protocolo-para-la-herborizacion-coleccion-y-preservado-de-ejemplares-botanicos-en-procesos-de-supervision-forestal>
96. Bortolami G, de Werk TA, Larter M, Thonglim A, Mueller-Roeber B, Balazadeh S, et al. Integrating gene expression analysis and ecophysiological responses to water deficit in leaves of tomato plants. *Sci Rep.* el 1 de diciembre de 2024;14(1):1–18. doi:10.1038/S41598-024-80261-0;SUBJMETA PubMed PMID: 39578554.
97. Lv YG, Linhui Man, Runze Liu, Xiaoyin Xu, Junzeng. Response of stomatal conductance, transpiration, and photosynthesis to light and CO₂ for rice leaves with different appearance days. *Front Plant Sci.* 2024;15. doi:10.3389/fpls.2024.1397948 PubMed PMID: 39148618.
98. Riches M, Lee D, Farmer DK. Simultaneous leaf-level measurement of trace gas emissions and photosynthesis with a portable photosynthesis system. *Atmos Meas Tech.* el 4 de agosto de 2020;13(8):4123–39. doi:10.5194/AMT-13-4123-2020
99. Sandoval-Zapotitla E, Guzmán Ramos MC, Espinoza RV, Tapia WV, Cantor del Ángel AI, Zamora AV, et al. Anatomical-foliar diversity in three species of *Lupinus* L. (Fabaceae) from central Mexico and its taxonomic implications. *Flora.* el 1 de agosto de 2025;329:152758. doi:10.1016/J.FLORA.2025.152758
100. Wang J, Renninger HJ, Ma Q, Jin S. Measuring stomatal and guard cell metrics for plant physiology and growth using StoManager1. *Plant Physiol.* el 30 de abril de 2024;195(1):378–94. doi:10.1093/PLPHYS/KIAE049 PubMed PMID: 38298139.

101. Chatterjee J, Thakur V, Nepomuceno R, Coe RA, Dionora J, Elmido-Mabilangan A, et al. Natural Diversity in Stomatal Features of Cultivated and Wild *Oryza* Species. *Rice*. el 1 de diciembre de 2020;13(1):58. doi:10.1186/S12284-020-00417-0 PubMed PMID: 32816163.
102. MINAM. Guía para el muestreo de suelos. En el marco de Decreto Supremo N°002-2013-MINAM. Estándares de calidad Ambiental (ECA) para suelo [Internet]. 2014 [citado el 28 de enero de 2026]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>
103. Reginato M, Cenzano AM, Arslan I, Furlán A, Varela C, Cavallin V, et al. Na₂SO₄ and NaCl salts differentially modulate the antioxidant systems in the highly stress tolerant halophyte *Prosopis strombulifera*. *Plant Physiology and Biochemistry*. el 1 de octubre de 2021;167:748–62. doi:10.1016/j.plaphy.2021.09.003
104. Calderon G, Garrido M, Acevedo E. *Prosopis tamarugo* Phil.: a native tree from the Atacama Desert groundwater table depth thresholds for conservation. *Revista Chilena de Historia Natural* 2015 88:1. el 2 de diciembre de 2015;88(1):18-. doi:10.1186/S40693-015-0048-0
105. López Lauenstein D, Vega C, Verga A, Lascano HR, Marchelli P. Local adaptative strategies for coping with drought stress in *Neltuma alba* (Leguminosae, Caesalpinioideae) are associated with the timing of leaf senescence. *New Forests* 2025 56:3. el 26 de marzo de 2025;56(3):28-. doi:10.1007/S11056-025-10096-8
106. Querejeta JI, Prieto I, Armas C, Casanoves F, Diémé JS, Diouf M, et al. Higher leaf nitrogen content is linked to tighter stomatal regulation of transpiration and more efficient water use across dryland trees. *New Phytologist*. el 1 de agosto de 2022;235(4):1351–64. doi:10.1111/NPH.18254 PubMed PMID: 35582952.
107. Chniguir N, Bouajila A, Prieto-Fernández Á, Omar Z, Mahmoudi S, Trasar-Cepeda C. Improving Soil Health Using Date Palm Residues in Southern Tunisian Olive Orchards. *Land* 2025, Vol 14., el 4 de julio de 2025;14(7). doi:10.3390/land14071414
108. Herrera-Calderon AC, Leal L, Suárez-Bautista JD, Manotas-Viloria HS, Muñoz-García A, Franco D, et al. Metagenomic and genomic analysis of heavy metal-tolerant and -resistant bacteria in resource islands in a semi-arid zone of the Colombian Caribbean. *Environmental Science and Pollution Research* 2023 31:4. el 21 de diciembre de 2023;31(4):5596–609. doi:10.1007/s11356-023-30253-w PubMed PMID: 38127234.
109. Rossi BE, Villagra PE. Effects of *Prosopis flexuosa* on soil properties and the spatial pattern of understory species in arid Argentina. *Journal of Vegetation Science*. el 1 de agosto de 2003;14(4):543–50. doi:10.1111/J.1654-1103.2003.TB02181.X
110. Moradi M, Imani F, Naji HR, Behbahani SM, Ahmadi MT. Variation in soil carbon stock and nutrient content in sand dunes after afforestation by *Prosopis juliflora* in the Khuzestan province (Iran). *IForest*. el 1 de junio de 2017;10(3):585. doi:10.3832/IFOR2137-010 PubMed PMID: ifor2137-010.

111. Akil Prasath R V., Mohanraj R, Balaramdas KR, Jhony Kumar Tagore A, Raja P, Rajasekaran A. Characterization of carbon fluxes, stock and nutrients in the sacred forest groves and invasive vegetation stands within the human dominated landscapes of a tropical semi-arid region. *Sci Rep.* el 1 de diciembre de 2024;14(1):4513. doi:10.1038/S41598-024-55294-0 PubMed PMID: 38402350.
112. Estándares de Calidad Ambiental de Suelo (ECA). El Peruano [Internet]. 2017 [citado el 28 de enero de 2026]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3693-011-2017-minam>
113. Geesing D, Felker P, Bingham RL. Influence of mesquite (*Prosopis glandulosa*) on soil nitrogen and carbon development: Implications for global carbon sequestration. *J Arid Environ.* el 1 de octubre de 2000;46(2):157–80. doi:10.1006/JARE.2000.0661
114. El Kenany ET, El-Keblawy A, Shaltout SK. Effects of soil salinity on nodulation and growth of non-native (*Neltuma Juliflora* and *Prosopis pallida*) and native (*Prosopis cineraria*) seedlings in the arid deserts of the United Arab Emirates. *Plant Ecol.* el 1 de agosto de 2025;226(8):957–68. doi:10.1007/S11258-025-01543-9
115. Moslehi Jouybari M, Bijani A, Parvaresh H, Shackleton R, Ahmadi A. Effects of native and invasive *Prosopis* species on topsoil physiochemical properties in an arid riparian forest of Hormozgan Province, Iran. *Journal of Arid Land* 2022 14:10. el 18 de octubre de 2022;14(10):1099–108. doi:10.1007/S40333-022-0104-Y
116. Kong W, Liu M, Felker P, Ewens M, Bessega C, Pometti C, et al. Genome and evolution of *Prosopis alba* Griseb., a drought and salinity tolerant tree legume crop for arid climates. *Plants People Planet.* el 1 de noviembre de 2023;5(6):933–47. doi:10.1002/ppp3.10404
117. Montesinos-Tubée DB, Cleef AM, Sýkora K V. The Subnival Vegetation of Moquegua, South Peru: Chasmophytes, Grasslands and Cushion Communities. *Ecologies* 2021, Vol 2, Pages 71-111. el 20 de enero de 2021;2(1):71–111. doi:10.3390/ecologies2010005
118. Galán-de-Mera A, Linares-Perea E, Beltrán H. The Influence of Volcanism, Soils, and Climate in the Endemicity Levels of Asteraceae in the Arequipa Region (Southern Peru). *Diversity (Basel).* el 1 de enero de 2023;15(1):33. doi:10.3390/d15010033
119. Domic AI, de Porras ME, Capriles JM, Zamora-Allendes A, Ivory SJ, Maldonado A. Precipitation variability, vegetation turnover, and anthropogenic disturbance over the last millennium in the Atacama highlands of northern Chile (19°S). *Holocene.* el 1 de mayo de 2023;33(5):536–49. doi:10.1177/09596836231151834
120. Ochoa D, Carré M, Montenegro JF, DeVries TJ, Caballero-Rodríguez D, Rodríguez-Reyes O, et al. Late Miocene greening of the Peruvian Desert. *Communications Earth & Environment* 2025 6:1. el 20 de mayo de 2025;6(1):391-. doi:10.1038/s43247-025-02322-0

121. Coaguila L, Mataix-Solera J, Nina S, García-Carmona M, Salazar ET. Soil Degradation Evidence Following a Wildfire in Arequipa's Andean Region, Peru. *Spanish Journal of Soil Science* . el 20 de enero de 2025;15:13983. doi:10.3389/sjss.2025.13983
122. Sabagh A El, Hossain A, Sohikul Islam M, Fahad S, Ratnasekera D, Meena RS, et al. Nitrogen Fixation of Legumes Under the Family Fabaceae: Adverse Effect of Abiotic Stresses and Mitigation Strategies. *The Plant Family Fabaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses*. el 1 de enero de 2020;75–111. doi:10.1007/978-981-15-4752-2_4
123. Gorai M, Laajili W, Santiago LS, Neffati M. Rapid recovery of photosynthesis and water relations following soil drying and re-watering is related to the adaptation of desert shrub *Ephedra alata* subsp. *alenda* (Ephedraceae) to arid environments. *Environ Exp Bot*. el 1 de enero de 2015;109:113–21. doi:10.1016/j.envexpbot.2014.08.011
124. Brokamp G, Dostert N, Cáceres-H F, Weigend M. Parasitism and haustorium anatomy of *Krameria lappacea* (Dombey) Burdet & B.B. Simpson (Krameriaceae), an endangered medicinal plant from the Andean deserts. *J Arid Environ*. el 1 de agosto de 2012;83:94–100. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.03.004
125. Medina Medina F, Lazo Rodríguez H. Establishment of an in vitro micropropagation protocol for *Cantua volcánica* (Polemoniaceae): a potential ornamental plant of Peru. *Establecimiento de un protocolo de micropropagación in vitro de Cantua volcánica (Polemoniaceae): una planta con potencial ...* [Internet]. Vol. 36. 2018;36. doi:10.4067/S0718-34292018005000501
126. Maestre FT, Quero JL, Gotelli NJ, Escudero A, Ochoa V, Delgado-Baquerizo M, et al. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science* (1979). el 13 de enero de 2012;335(6065):214–8. doi:10.1126/science.1215442 PubMed PMID: 22246775.
127. Pérez-Pérez RE, Silva-Espejo R, Figueroa-Castro DM, Castañeda-Posadas C, Pérez-Pérez RE, Silva-Espejo R, et al. Riqueza y composición de líquenes de los pueblos mágicos de Cuetzalan y Tlatlauquitepec, Puebla, México. *Polibotanica*. el 15 de julio de 2024;0(58):31–47. doi:10.18387/polibotanica.58.3
128. Álvarez-Mejía C, Morales-Vargas AT, López-Ramírez V. Potencial biotecnológico de los líquenes: una ventana metabó-lica para su análisis y aprovechamiento. *REIA*. 2022;6(4):28–39.
129. Troncozo MI, Figoli CB, Franco MEE, Mirífico M V., Bosch A, Rajchenberg M, et al. Biotransformation of grape pomace from *Vitis labrusca* by *Peniophora albobadia* LPSC # 285 (Basidiomycota). *An Acad Bras Cienc*. 2020;92(1). doi:10.1590/0001-3765202020181174 PubMed PMID: 32187277.
130. Portal Oficial de la Municipalidad Distrital y Villa de Yarabamba. *Reseña Histórica de Yarabamba* [Internet]. [citado el 4 de marzo de 2026]. Disponible en: <https://www.muniyarabamba.gob.pe/nuestro-distrito/5-historia>

131. González-Rebeles G, Terrazas T, Méndez-Alonzo R, Paz H, Brodribb TJ, Tinoco-Ojanguren C. Leaf water relations reflect canopy phenology rather than leaf life span in Sonoran Desert trees. *Tree Physiol.* el 10 de septiembre de 2021;41(9):1627–40. doi:10.1093/treephys/tpab032 PubMed PMID: 33611521.
132. Gonzalez-Rebeles G, Terrazas T, Mendez-Alonzo R, Tinoco-Ojanguren C. Coordination of hydraulic and functional traits in ten species of trees of the Sonoran Desert. *Trees* 2023 37:6. el 26 de octubre de 2023;37(6):1743–56. doi:10.1007/s00468-023-02456-8
133. Caine RS, Harrison EL, Sloan J, Flis PM, Fischer S, Khan MS, et al. The influences of stomatal size and density on rice abiotic stress resilience. *New Phytologist.* el 1 de marzo de 2023;237(6):2180–95. doi:10.1111/NPH.18704;WGROU:STRING:PUBLICATION PubMed PMID: 36630602.
134. Gajardo HA, Morales M, Larama G, Luengo-Escobar A, López D, Machado M, et al. Physiological, transcriptomic and metabolomic insights of three extremophyte woody species living in the multi-stress environment of the Atacama Desert. *Planta* 2024 260:3. el 17 de julio de 2024;260(3):55-. doi:10.1007/S00425-024-04484-1 PubMed PMID: 39020000.
135. Sharma N, Nagar S, Thakur M, Suriyakumar P, Kataria S, Shanker AK, et al. Photosystems under high light stress: throwing light on mechanism and adaptation. *Photosynthetica.* 2023;61(2):250. doi:10.32615/PS.2023.021 PubMed PMID: 39650670.
136. Banerjee T, Linn R. Effect of Vertical Canopy Architecture on Transpiration, Thermoregulation and Carbon Assimilation. *Forests* 2018, Vol 9,. el 10 de abril de 2018;9(4). doi:10.3390/F9040198
137. Prieto JA, Louarn G, Perez Peña J, Ojeda H, Simonneau T, Lebon E. A functional–structural plant model that simulates whole- canopy gas exchange of grapevine plants (*Vitis vinifera* L.) under different training systems. *Ann Bot.* el 14 de septiembre de 2019;126(4):647. doi:10.1093/AOB/MCZ203 PubMed PMID: 31837221.
138. SENHAMI. Vigilancia de la Radiación UV en la ciudad de Arequipa - Junio y Julio 2025 - Informes y publicaciones - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Plataforma del Estado Peruano. 2025.
139. Rodman KC, Wilkerson KJ, Wion AP, Huffman DW, Antoninka AJ, Barrera M, et al. Positive Drought Feedbacks Increase Tree Mortality Risk in Dry Woodlands of the US Southwest. *Ecol Evol.* el 1 de diciembre de 2025;15(12):e72667. doi:10.1002/ece3.72667 PubMed PMID: 41394198.
140. Isaacson S, Ephrath JE, Rachmilevitch S, Blumberg DG, Shalmon B, Katz O, et al. Long-Term Monitoring of Tree Population Dynamics in Desert Ecosystems: Integrating Field and Satellite Data. *Land* 2023, Vol 12,. el 20 de agosto de 2023;12(8). doi:10.3390/land12081640

141. Ruiz-Santiago RR, Ballina-Gómez HS, Ruiz-Sánchez E. Características morfológicas foliares y su relación con la defoliación en tres especies de plantas forrajeras. *Acta Biolo Colomb.* el 5 de enero de 2023;28(1):12–22. doi:10.15446/abc.v28n1.88402
142. Lawrence-Paul EH, Poethig RS, Lasky JR. Vegetative phase change causes age-dependent changes in phenotypic plasticity. *New Phytol.* el 1 de octubre de 2023;240(2):613. doi:10.1111/nph.19174 PubMed PMID: 37571856.
143. Zhang M, Liu B, Fei Y, Yang X, Zhao L, Shi C, et al. Genetic architecture of leaf morphology revealed by integrated trait module in *Catalpa bungei*. *Hortic Res.* el 1 de abril de 2023;10(4):uhad032. doi:10.1093/hr/uhad032 PubMed PMID: 37090097.
144. López Lauenstein D, Vega C, Verga AR, Lascano HR, Marchelli P. Different Local Adaptative Strategies to Cope with Drought Stress in Neltuma Alba are Associated with Leaf Senescence Timing [Internet]. 2023. doi:10.2139/ssrn.4575525
145. Hernández MP, Arambarri AM. Distribución y densidad estomática y movimiento diario de la hoja en *Acacia aroma* (Leguminosae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* [Internet]. 2010 [citado el 30 de marzo de 2026];45(3–4):273–84. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722010000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=en
146. Haworth M, Marino G, Loreto F, Centritto M. Integrating stomatal physiology and morphology: evolution of stomatal control and development of future crops. *Oecologia.* el 1 de diciembre de 2021;197(4):867. doi:10.1007/S00442-021-04857-3 PubMed PMID: 33515295.
147. Reginato MA, Reinoso H, Llanes AS, Luna MV, Reginato MA, Reinoso H, et al. Stomatal Abundance and Distribution in *Prosopis strombulifera* Plants Growing under Different Iso-Osmotic Salt Treatments. *Am J Plant Sci.* el 25 de diciembre de 2013;4(12):80–90. doi:10.4236/AJPS.2013.412A3010
148. Reginato MA, Reinoso H, Llanes AS, Luna MV, Reginato MA, Reinoso H, et al. Stomatal Abundance and Distribution in *Prosopis strombulifera* Plants Growing under Different Iso-Osmotic Salt Treatments. *Am J Plant Sci.* el 25 de diciembre de 2013;4(12):80–90. doi:10.4236/ajps.2013.412a3010
149. Zhou W, Wang W, Zhao M, Li Y, He H, Zhou Y. Regulation of stomatal development by receptor-like kinases and receptor-like proteins in *Arabidopsis* and grasses. *Front Plant Sci.* 2026;17:1770946. doi:10.3389/fpls.2026.1770946 PubMed PMID: 41835261.
150. Rathnasamy SA, Kambale R, Elangovan A, Mohanavel W, Shanmugavel P, Ramasamy G, et al. Altering Stomatal Density for Manipulating Transpiration and Photosynthetic Traits in Rice through CRISPR/Cas9 Mutagenesis. *Current Issues in Molecular Biology* 2023, Vol 45, Pages 3801–3814. el 29 de abril de 2023;45(5):3801–14. doi:10.3390/cimb45050245

151. Xia Y, Du K, Ling A, Wu W, Li J, Kang X. Overexpression of PagSTOMAGEN, a Positive Regulator of Stomatal Density, Promotes Vegetative Growth in Poplar. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol 23,. el 4 de septiembre de 2022;23(17). doi:10.3390/ijms231710165 PubMed PMID: 36077563.
152. Han C, Liu Y, Shi W, Qiao Y, Wang L, Tian Y, et al. KIN10 promotes stomatal development through stabilization of the SPEECHLESS transcription factor. *Nature Communications* 2020 11:1. el 25 de agosto de 2020;11(1):4214-. doi:10.1038/s41467-020-18048-w PubMed PMID: 32843632.
153. Chowdhury MR, Ahamed MS, Mas-ud MA, Islam H, Fatamatuzzohora M, Hossain MF, et al. Stomatal development and genetic expression in *Arabidopsis thaliana* L. *Heliyon*. el 1 de agosto de 2021;7(8):e07889. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e07889
154. Haworth M, Marino G, Materassi A, Raschi A, Scutt CP, Centritto M. The functional significance of the stomatal size to density relationship: Interaction with atmospheric [CO₂] and role in plant physiological behaviour. *Science of The Total Environment*. el 10 de marzo de 2023;863(4):160908. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160908 PubMed PMID: 36535478.
155. Yahya RY, Sukri H, Nirawati, Djarot IND. Responses of Stomatal Characteristics to Environmental Factors in Fabaceae Trees of the Urban Forest in Maros Regency. *Jurnal Wasian*. el 22 de marzo de 2025;12(01):01–9. doi:10.62142/xx0wes03
156. Time A, Acevedo E. Effects of Water Deficits on *Prosopis tamarugo* Growth, Water Status and Stomata Functioning. *Plants* 2021, Vol 10, Page 53. el 29 de diciembre de 2020;10(1):53. doi:10.3390/plants10010053
157. Ye Z, An T, Yang X, Kang H, Wang F. Novel Model for Stomatal Conductance: Enhanced Accuracy Under Variable Irradiance and CO₂ in C3 Plant Species. *Biology (Basel)*. el 1 de noviembre de 2025;14(11):1501. doi:10.3390/biology14111501
158. Liu J, Zhang K, Bi J, Yu X, Luo L, Hu L. Mesophyll conductance and N allocation co-explained the variation in photosynthesis in two canola genotypes under contrasting nitrogen supply. *Front Plant Sci*. el 8 de mayo de 2023;14:1171331. doi:10.3389/fpls.2023.1171331
159. Franks PJ, Beerling DJ. Maximum leaf conductance driven by CO₂ effects on stomatal size and density over geologic time. *Proc Natl Acad Sci U S A*. el 23 de junio de 2009;106(25):10343. doi:10.1073/pnas.0904209106 PubMed PMID: 19506250.
160. Crous KY, Uddling J, De Kauwe MG. Temperature responses of photosynthesis and respiration in evergreen trees from boreal to tropical latitudes. *New Phytol*. el 1 de abril de 2022;234(2):353–74. doi:10.1111/nph.17951 PubMed PMID: 35007351.
161. SENHAMI. Vigilancia de la Radiación UV en la ciudad de Arequipa - Junio y Julio 2025 [Internet]. [citado el 6 de abril de 2026]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/6971244-vigilancia-de-la-radiacion-uv-en-la-ciudad-de-arequipa-julio-2025>

162. Takeishi H, Hayashi J, Okazawa A, Harada K, Hirata K, Kobayashi A, et al. Effects of elevated pressure on rate of photosynthesis during plant growth. *J Biotechnol.* el 20 de octubre de 2013;168(2):135–41. doi:10.1016/j.jbiotec.2013.08.012 PubMed PMID: 23994480.
163. Burgess AJ, Retkute R, Preston SP, Jensen OE, Pound MP, Pridmore TP, et al. The 4-dimensional plant: Effects of wind-induced canopy movement on light fluctuations and photosynthesis. *Front Plant Sci.* el 21 de septiembre de 2016;7(September):217696. doi:10.3389/fpls.2016.01392



ANEXOS

Anexo 1. Registros fotográficos

Anexo 1 A. Registro fotográfico de hojas, inflorescencia y frutos.



Figura 25. Hojas de N.calderensis. (Fotografía de Ing. Elio Ponce)



Figura 26. Inflorescencia de N. calderensis (Fotografía de Ing. Elio Ponce)



Figura 27. Vainas inmaduras de *N.calderensis* (Fotografía de Ing. Elio Ponce)



Figura 28. Fruto maduro de *N.calderensis* (Fotografía de Ing. Elio Ponce)



Figura 29. La materia orgánica de *Neltuma calderensis* mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, incrementando la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Anexo 1 B. Contaminación humana en el ecosistema (hornos y silos)



Figura 30. Presencia de hornos de ladrillo sumamente cercanos a la zona de muestreo Y16-Y19



Figura 31. Presencia de papel higiénico usado cercano a los silos y zona de muestreo



Figura 32. Presencia de papel higiénico usado cerca a los silos y zona de muestreo
Anexo 1 C. Imágenes satelitales de periurbanismo en la zona

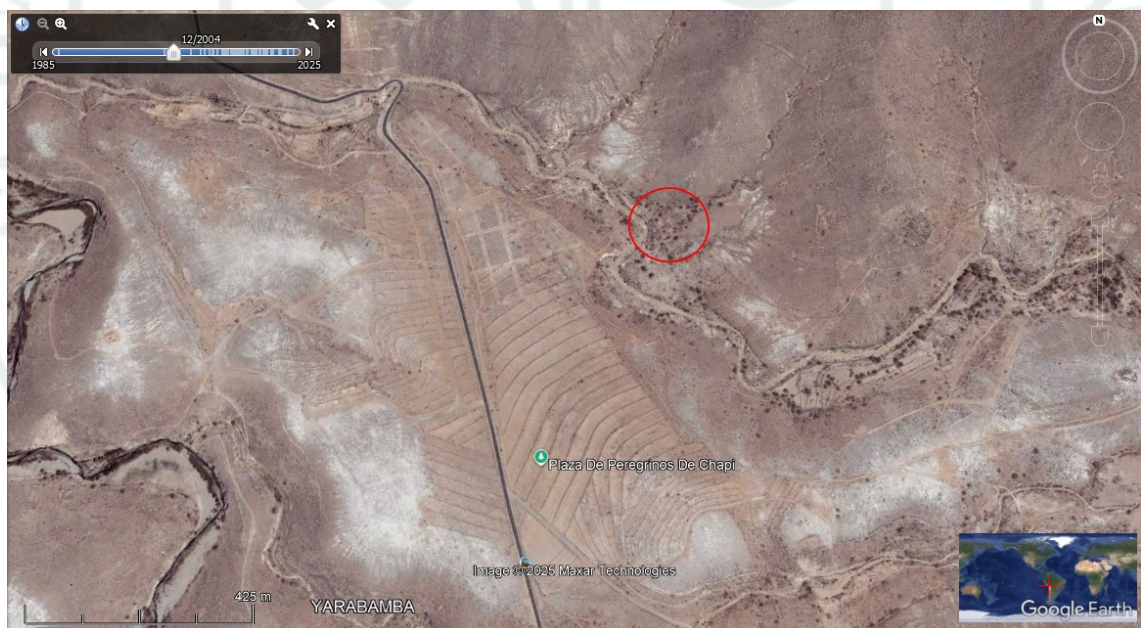


Figura 33. Imagen Satelital (2004) aún se observan andenes y zonas no pobladas el círculo rojo representa la zona de muestreo.

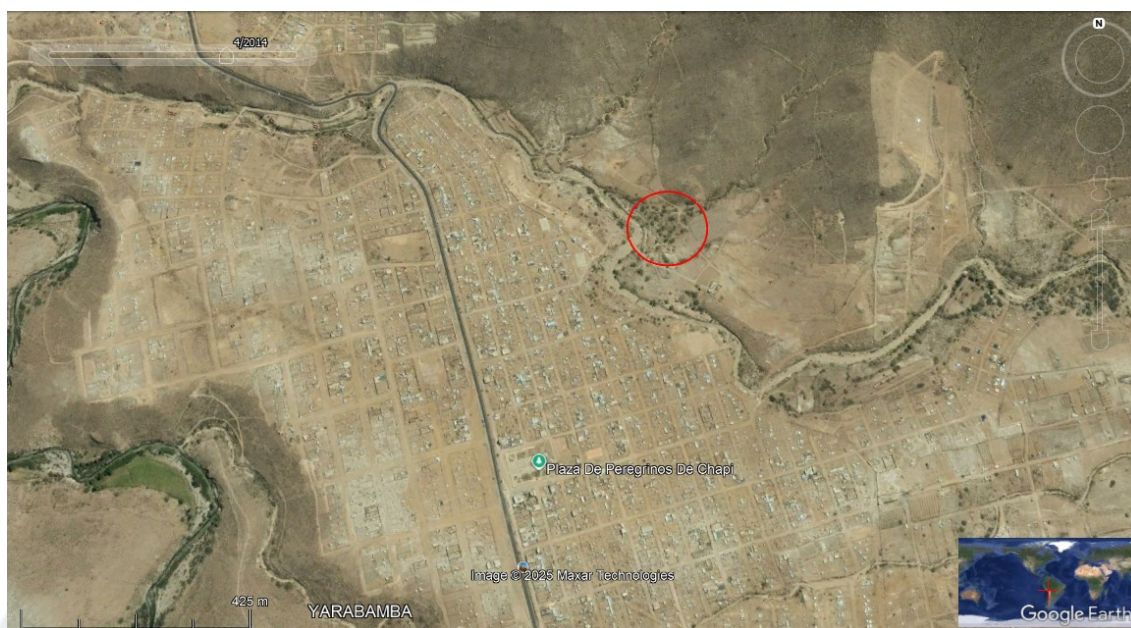


Figura 34. Imagen satelital (2014), el terreno ya estaba lotizado y ya no existían andenes.

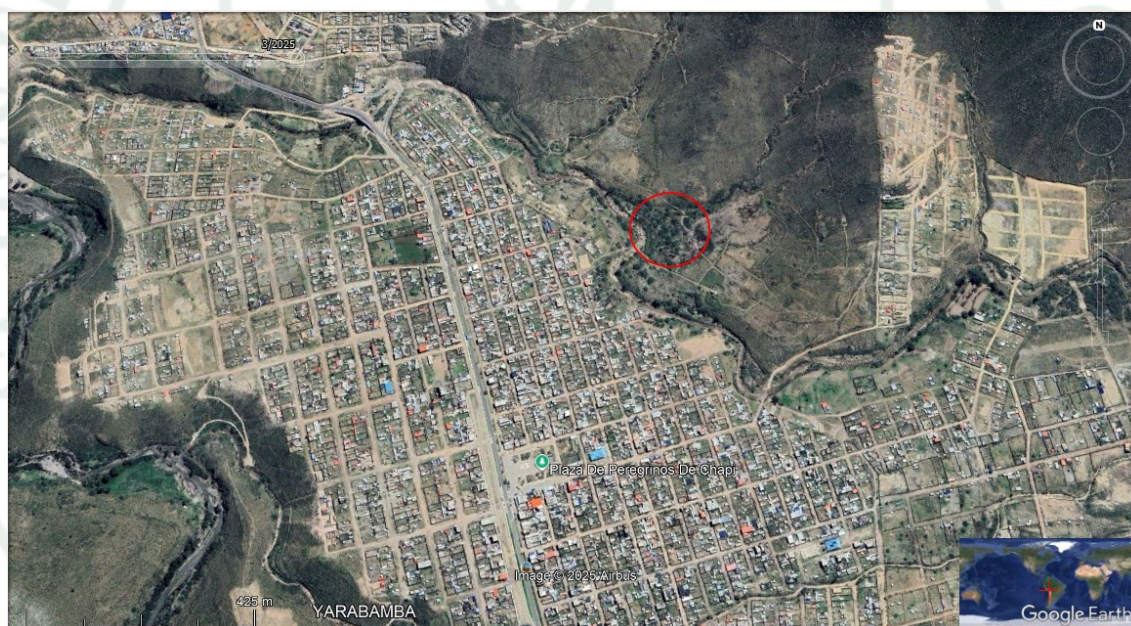


Figura 35. Imagen satelital (2025) Pérdida de vegetación arbórea en el flanco superior izquierdo

Anexo 1 D. Fotografía de las calicatas y horizontes



Figura 36. Primera calicata (Horizontes 1-2)



Figura 37. Calicata 1 Horizontes 1-3



Figura 38. Concrecencia rojiza en calicata 1



Figura 39. Concrecencia blanca en calicata 1



Figura 40. Calicata 2 horizonte 1



Figura 41. Calicata 2 horizonte 2 y 3 (concrecencia gris)



Figura 42. Abundantes raices en calicata pero poco profundas



Figura 43. Calicata 3 Horizonte 1



Figura 44. Calicata 3 Horizonte 2



Figura 45. Calicata 3 Horizonte 3

Anexo 1 E. Entorno vegetal de Neltuma calderensis



Figura 46. Especie: Cantua volcanica Familia Polemoniaceae



Figura 47. Especie: Grindelia hirsutula Familia: Asteraceae

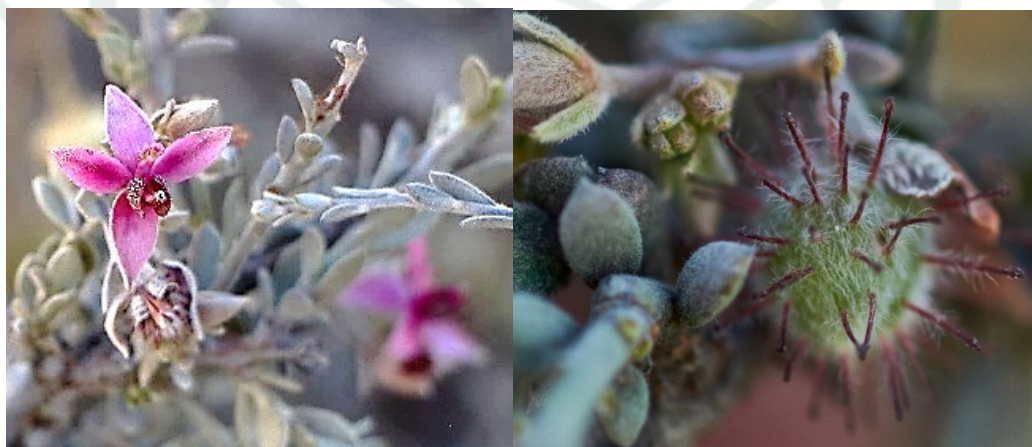


Figura 48. Especie Krameria lappacea Familia: Krameriaceae



Figura 49. Especie: *Ephedra americana* Familia: *Ephedraceae*

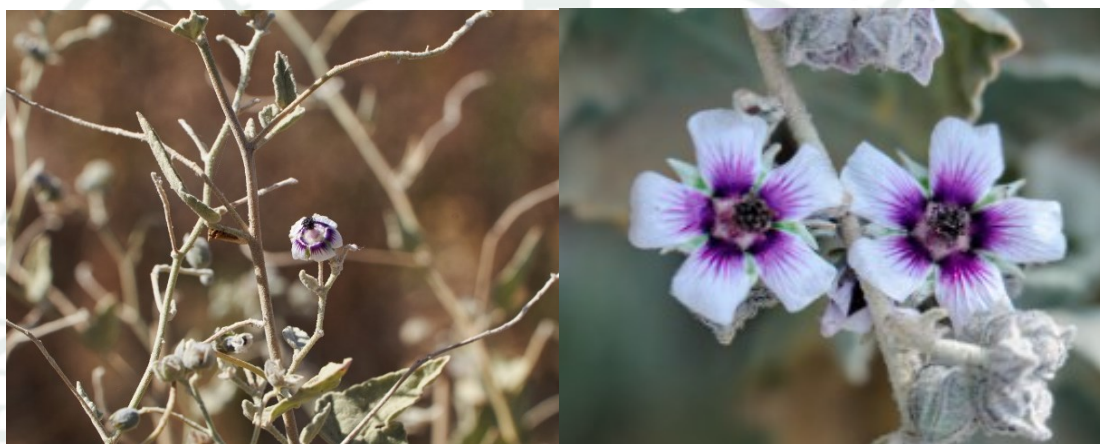


Figura 50 Especie: *Tarasa operculata* Familia: *Malvaceae*



Figura 51 Especie: *Ambrosia* sp. Familia: *Asteraceae*



Figura 52. Especie. *Adesmia spinosissima* Familia. Fabaceae



Figura 53. Especie: *Encelia farinose* Familia: Asteraceae

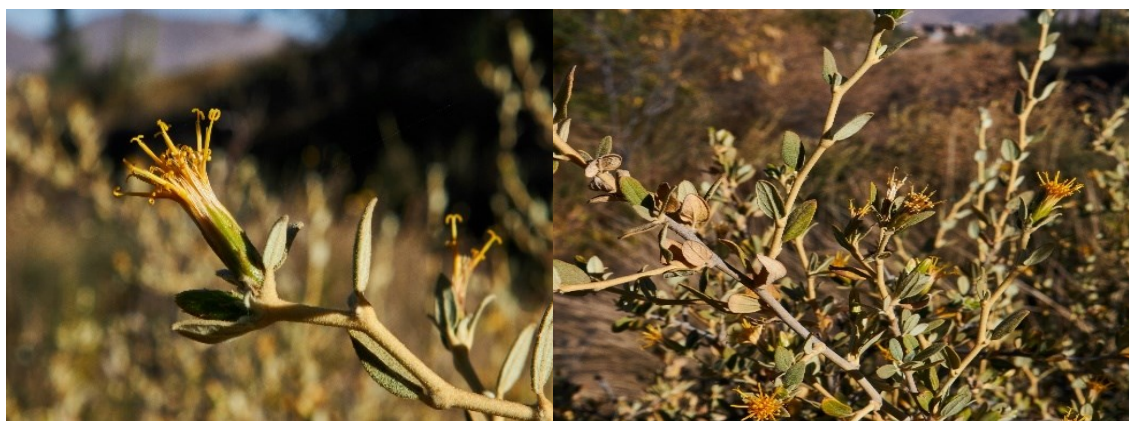


Figura 54. Especie: *Gochnatia arequipensis* Familia Asteraceae



Figura 55. Especie: *Senna versicolor* Familia: Fabaceae



Figura 56. Especie: *Balvisia verticillata* Familia: Vivianiaceae



Figura 57. Especie Baccharia salicifolia Familia:Asteraceae



Figura 58. Especie. Carrycactus brevistylus Familia Cactaceae

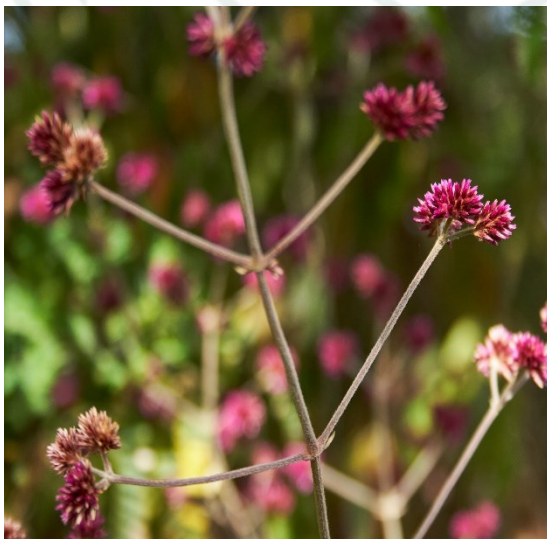


Figura 59. Especie: Alternanthera porrigens Familia. Amaranthaceae



Figura 60. Especie *Opuntia ficus* Familia Cactaceae



Figura 61. Especie *Sparganium angustifolium* Familia Caryophyllaceae



Figura 62. Especies/ Familia *Borteloua hirsuta*/ Poaceae y *Sabulina nuttallii*/ Caryophyllaceae

Anexo 1 F. Líquenes y moho en los troncos de los árboles

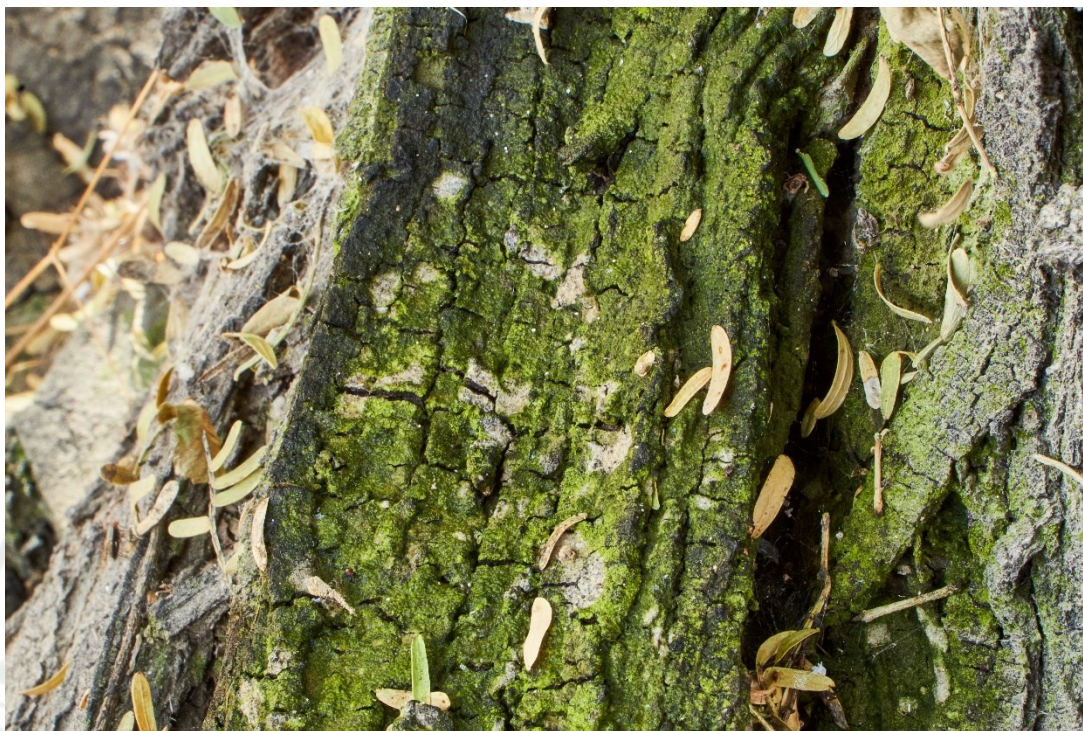


Figura 63. Moho en troncos, Fotografía de Ing. Elio Ponce



Figura 64. Hongo - Peniophora albobadia Fotografía de Ing. Elio Ponce(a)



Figura 65. Hongo - *Peniophora albobadia* Fotografía de Ing. Elio Ponce(b)



Figura 66 Hongo - *Peniophora albobadia* Fotografía de Ing. Elio Ponce(c)



Figura 67. Líquenes *Physcia* sp. Fotografía de Ing. Elio Ponce(a)



Figura 68. Líquenes *Physcia* sp. Fotografía de Ing. Elio Ponce(b)

Anexo 1 G. Referencia visual de la ubicación de la estación meteorológica

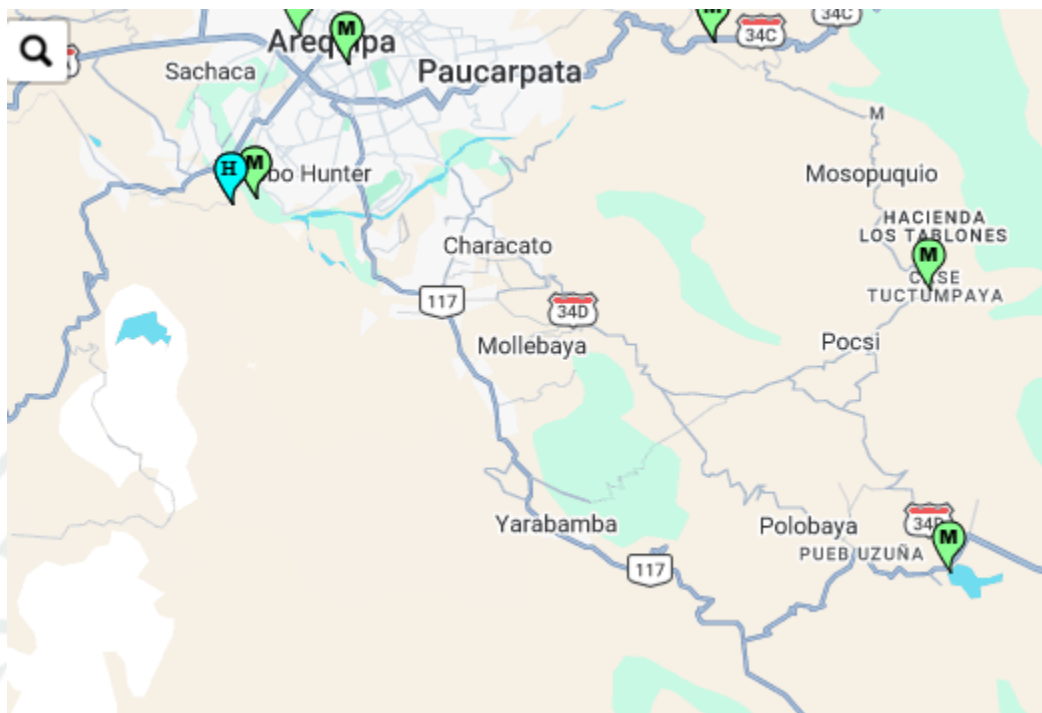


Figura 69. Imagen referencial de posición de la estación meteorológica

Anexo 2. Informes y constancias

Anexo 2 A..Constancia de determinación taxonómica del Herbarium Arequipense (HUSA) de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa



UNSA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE BIOLOGÍA
HERBARIUM AREQUIPENSE (HUSA)

CONSTANCIA N° 018-2025-HUSA

El director del *Herbarium Arequipense* (HUSA) de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

HACE CONSTAR:

Que la muestra biológica fue presentada por **SALAZAR CORRALES ANA PAULA**, bachiller de la escuela Profesional de Ingeniería Biotecnológica de la Universidad Católica de Santa María, quien viene realizando su tesis: **Estimación de la asimilación de dióxido de carbono en Yara (*Neltuma calderensis*) en temporada seca en el distrito de Mollebaya-2025**. La muestra fue traída al Laboratorio del Botánica en estado fresco. Fue determinada taxonómicamente en el *Herbarium Arequipense* (HUSA) mediante la clasificación APG IV y corresponde a la siguiente especie:

Reino	Plantae
División	Angiospermae
Clase	Eudicotyledoneae
Orden	Fabales
Familia	Fabaceae
Género	<i>Neltuma</i>
Especie	<i>Neltuma calderensis</i> (A. Galán, E. Linares, J. Montoya & Vicente Orell.) C. E. Hughes & G. P. Lewis
Nombre común	"Yaro"

Se le expide la presente a solicitud de la interesada para los fines que estime conveniente.

Arequipa, 14 de octubre del 2025.



Dr. Leoncio Mariño Herrera
DIRECTOR
Herbarium Arequipense (HUSA)



Reconocido como Centro Depositario con RESOLUCION DE DIRECCION GENERAL N° 147-2016-SERFOR/DGGSPFFS

Avenida Daniel Alcides Carrión s/n cercado

Anexo 2 B. Informes de metales totales por ICP-MS

- Calicata 1

INFORME DE ENSAYOS N° 7368-2025-B PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	SUELO FORESTAL Metales C1	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0.0001	0.0006	0.4911	mg/Kg
FQ	Al (Aluminio)	0.0030	0.1000	49597.5571	mg/Kg
FQ	As (Arsénico)	0.0000	0.0002	7.15816	mg/Kg
FQ	B (Boro)	0.0017	0.0500	29.202	mg/Kg
FQ	Ba (Bario)	0.0002	0.0040	60.59965	mg/Kg
FQ	Be (Berilio)	0.0000	0.0002	0.72013	mg/Kg
FQ	Bi (Bismuto)	0.0000	0.0020	0.08102	mg/Kg
FQ	Ca (Calcio)	0.0305	0.5000	16619.97	mg/Kg
FQ	Cd (Cadmio)	0.0000	0.0001	0.30506	mg/Kg
FQ	Ce (Cerio)	0.0000	0.0002	33.34837	mg/Kg
FQ	Co (Cobalto)	0.0000	0.0001	9.68561	mg/Kg
FQ	Cr (Cromo)	0.0000	0.0005	10.8445	mg/Kg
FQ	Cs (Cesio)	0.0000	0.0001	4.23997	mg/Kg
FQ	Cu (Cobre)	0.0003	0.0100	57.872	mg/Kg
FQ	Fe (Hierro)	0.0018	0.1000	26870.4774	mg/Kg
FQ	Hg (Mercurio)	0.0002	0.0008	0.0653	mg/Kg
FQ	K (Potasio)	0.0143	0.2000	20235.33	mg/Kg
FQ	Li (Litio)	0.0000	0.0020	5.1499	mg/Kg
FQ	Mg (Magnesio)	0.0038	0.2000	5406.51	mg/Kg
FQ	Mn (Manganeso)	0.0001	0.0020	776.8997	mg/Kg
FQ	Mo (Molibdeno)	0.0000	0.0010	0.4067	mg/Kg
FQ	Na (Sodio)	0.0076	0.2000	21350.41	mg/Kg
FQ	Ni (Níquel)	0.0001	0.0010	7.9036	mg/Kg
FQ	P (Fósforo)	0.0079	0.2000	378.683	mg/Kg
FQ	Pb (Plomo)	0.0001	0.0020	6.1057	mg/Kg
FQ	Sb (Antimonio)	0.0000	0.0010	1.95328	mg/Kg
FQ	Se (Selenio)	0.0002	0.0020	1.5569	mg/Kg
FQ	Si (Silicio)	0.0754	1.0000	155254.822	mg/Kg
FQ	Sn (Estaño)	0.0001	0.0020	1.4037	mg/Kg
FQ	Sr (Estroncio)	0.0001	0.0040	233.6509	mg/Kg
FQ	Ti (Titanio)	0.0004	0.0020	2226.4287	mg/Kg
FQ	Tl (Talio)	0.0000	0.0002	0.21160	mg/Kg
FQ	U (Uranio)	0.0000	0.0002	0.61924	mg/Kg
FQ	V (Vanadio)	0.0001	0.0040	91.3905	mg/Kg
FQ	Zn (Zinc)	0.0020	0.0600	103.2825	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg

: Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : Digestion + EPA METHOD 6020 B, Rev. 2 2014 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

LD: Límite de detección del método / LC: Límite de cuantificación del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 09/09/2025 al 20/09/2025

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 22/09/2025



Contraseña: IXjsRD

Fin del Informe

- Calicata 2

INFORME DE ENSAYOS N° 7369-2025-B
PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	SUELO FORESTAL Metales C2	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0.0001	0.0006	0.3556	mg/Kg
FQ	Al (Aluminio)	0.0030	0.1000	40374.0229	mg/Kg
FQ	As (Arsénico)	0.0000	0.0002	11.17541	mg/Kg
FQ	B (Boro)	0.0017	0.0500	49.527	mg/Kg
FQ	Ba (Bario)	0.0002	0.0040	41.40423	mg/Kg
FQ	Be (Berilio)	0.0000	0.0002	0.64129	mg/Kg
FQ	Bi (Bismuto)	0.0000	0.0020	0.05181	mg/Kg
FQ	Ca (Calcio)	0.0305	0.5000	34840.31	mg/Kg
FQ	Cd (Cadmio)	0.0000	0.0001	0.32804	mg/Kg
FQ	Ce (Cerio)	0.0000	0.0002	35.39956	mg/Kg
FQ	Co (Cobalto)	0.0000	0.0001	10.70843	mg/Kg
FQ	Cr (Cromo)	0.0000	0.0005	19.5794	mg/Kg
FQ	Cs (Cesio)	0.0000	0.0001	3.65101	mg/Kg
FQ	Cu (Cobre)	0.0003	0.0100	64.982	mg/Kg
FQ	Fe (Hierro)	0.0018	0.1000	25364.7179	mg/Kg
FQ	Hg (Mercurio)	0.0002	0.0008	0.0725	mg/Kg
FQ	K (Potasio)	0.0143	0.2000	15353.73	mg/Kg
FQ	Li (Litio)	0.0000	0.0020	6.3213	mg/Kg
FQ	Mg (Magnesio)	0.0038	0.2000	9247.52	mg/Kg
FQ	Mn (Manganeso)	0.0001	0.0020	826.3541	mg/Kg
FQ	Mo (Molibdeno)	0.0000	0.0010	1.0384	mg/Kg
FQ	Na (Sodio)	0.0076	0.2000	20750.92	mg/Kg
FQ	Ni (Níquel)	0.0001	0.0010	13.0132	mg/Kg
FQ	P (Fósforo)	0.0079	0.2000	594.672	mg/Kg
FQ	Pb (Plomo)	0.0001	0.0020	7.0237	mg/Kg
FQ	Sb (Antimonio)	0.0000	0.0010	1.14558	mg/Kg
FQ	Se (Selenio)	0.0002	0.0020	1.4551	mg/Kg
FQ	Si (Silicio)	0.0754	1.0000	186534.317	mg/Kg
FQ	Sn (Estañio)	0.0001	0.0020	1.1838	mg/Kg
FQ	Sr (Estroncio)	0.0001	0.0040	406.4275	mg/Kg
FQ	Ti (Titanio)	0.0004	0.0020	2594.1988	mg/Kg
FQ	Tl (Talio)	0.0000	0.0002	0.16986	mg/Kg
FQ	U (Uranio)	0.0000	0.0002	0.65207	mg/Kg
FQ	V (Vanadio)	0.0001	0.0040	108.9185	mg/Kg
FQ	Zn (Zinc)	0.0020	0.0600	99.6041	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg

: Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS

: Digestion + EPA METHOD 6020 B, Rev. 2 2014 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

LD: Límite de detección del método / LC: Límite de cuantificación del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 09/09/2025 al 20/09/2025

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 22/09/2025



Contraseña: 6K0dJU

Fin del Informe

- Calicata 3

INFORME DE ENSAYOS N° 7370-2025-B
PÁGINA 2 DE 2

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	SUELO FORESTAL Metales C3	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	0.0001	0.0006	0.3208	mg/Kg
FQ	Al (Aluminio)	0.0030	0.1000	49826.7447	mg/Kg
FQ	As (Arsénico)	0.0000	0.0002	13.14265	mg/Kg
FQ	B (Boro)	0.0017	0.0500	19.838	mg/Kg
FQ	Ba (Bario)	0.0002	0.0040	138.29027	mg/Kg
FQ	Be (Berilio)	0.0000	0.0002	0.78565	mg/Kg
FQ	Bi (Bismuto)	0.0000	0.0020	0.07211	mg/Kg
FQ	Ca (Calcio)	0.0305	0.5000	153.19.53	mg/Kg
FQ	Cd (Cadmio)	0.0000	0.0001	0.12890	mg/Kg
FQ	Ce (Cerio)	0.0000	0.0002	46.17992	mg/Kg
FQ	Co (Cobalto)	0.0000	0.0001	17.26390	mg/Kg
FQ	Cr (Cromo)	0.0000	0.0005	16.3913	mg/Kg
FQ	Cs (Cesio)	0.0000	0.0001	7.19020	mg/Kg
FQ	Cu (Cobre)	0.0003	0.0100	92.685	mg/Kg
FQ	Fe (Hierro)	0.0018	0.1000	48921.1767	mg/Kg
FQ	Hg (Mercurio)	0.0002	0.0008	0.0616	mg/Kg
FQ	K (Potasio)	0.0143	0.2000	23123.70	mg/Kg
FQ	Li (Litio)	0.0000	0.0020	9.3424	mg/Kg
FQ	Mg (Magnesio)	0.0038	0.2000	5243.18	mg/Kg
FQ	Mn (Manganeso)	0.0001	0.0020	740.9539	mg/Kg
FQ	Mo (Molibdeno)	0.0000	0.0010	0.4267	mg/Kg
FQ	Na (Sodio)	0.0076	0.2000	21561.96	mg/Kg
FQ	Ni (Níquel)	0.0001	0.0010	11.1931	mg/Kg
FQ	P (Fosforo)	0.0079	0.2000	349.078	mg/Kg
FQ	Pb (Plomo)	0.0001	0.0020	5.1512	mg/Kg
FQ	Sb (Antimonio)	0.0000	0.0010	2.98187	mg/Kg
FQ	Se (Selenio)	0.0002	0.0020	2.1432	mg/Kg
FQ	Si (Silicio)	0.0754	1.0000	196123.764	mg/Kg
FQ	Sn (Estaño)	0.0001	0.0020	1.9319	mg/Kg
FQ	Sr (Estroncio)	0.0001	0.0040	211.3545	mg/Kg
FQ	Ti (Titanio)	0.0004	0.0020	3122.5678	mg/Kg
FQ	Tl (Talio)	0.0000	0.0002	0.18384	mg/Kg
FQ	U (Uranio)	0.0000	0.0002	0.46738	mg/Kg
FQ	V (Vanadio)	0.0001	0.0040	161.0115	mg/Kg
FQ	Zn (Zinc)	0.0020	0.0600	97.8323	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg

: Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS

: Digestion + EPA METHOD 6020 B, Rev. 2 2014 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

OBSERVACIONES :

LD: Límite de detección del método / LC: Límite de cuantificación del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 09/09/2025 al 20/09/2025

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 22/09/2025



Contraseña: RnL7mo

Fin del Informe

Anexo 2 C. Informe de calidad de suelo y características edáficas (INIA)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



INFORME DE ENSAYO LABSAF AREQUIPA N° 093392-25 / SU / AQP



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : CONEXXA PERU SRL
 Propietario / Productor : ANA PAULA SALAZAR CORRALES
 Dirección del cliente : Arequipa
 Solicitado por : CONEXXA PERU SRL
 Muestreado por : Cliente
 Referencia del muestreo : Reservado por el cliente
 Procedencia de muestra(s) (***) : MOLLEBAYA, AREQUIPA, AREQUIPA
 Fecha(s) de muestreo (***) : 2025-08-19
 Fecha de recepción de muestra(s) : 2025-08-29
 Lugar de ensayo : LABSAF AREQUIPA
 Fecha(s) de análisis : Del 2025-08-29 al 2025-09-11
 Cotización del servicio : 2072-25-AQP
 Fecha de emisión : 2025-09-15

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6		
Código de Laboratorio	SU2957-AQP-25	SU2958-AQP-25	SU2959-AQP-25	SU2960-AQP-25	SU2961-AQP-25	SU2962-AQP-25		
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo		
Fecha de Muestreo (***)	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19		
Hora de Inicio de Muestreo (h) (****)	8:30	8:35	8:40	8:45	8:50	8:55		
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	C1-H1	C1-H2	C1-H3	C2-H1	C2-H2	C2-H3		
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
pH	unid. pH	0,1	7,9	8,9	8,6	6,9	8,1	8,1
Conductividad Eléctrica	mS/m	1,0	10,2	106,8	132,2	10,7	102,9	354,0
Materia Orgánica	%	0,5	0,9	0,7	3,1	2,4	3,1	2,0
Fósforo Disponible	mg/kg	0,8	12,6	16,5	32,5	16,7	12,3	5,5
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0,5	1,0	2,6	1,3	0,6	3,3	15,9
Textura	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	%	-	74	70	70	72	72	68
Arcilla	%	-	6	6	8	8	4	4
Limo	%	-	20	24	22	20	24	28
Clase Textural	-	-	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliaves

Acreditado con la Norma

NTP-ISO/IEC 17025:2017

LABSAF AREQUIPA

Dirección: Calle Saco Oliveros N° 402 Cerro Juli - José L.B. y R. - Arequipa
Email: labsafarequipa@inia.gob.pe

F-46 / Ver.06
www.inia.gob.pe

INFORME DE ENSAYO
LABSAF AREQUIPA
N° 093392-25 / SU / AQP



ITEM	7	8	9	10	11	12
Código de Laboratorio	SU2963-AQP-25	SU2964-AQP-25	SU2965-AQP-25	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	9:00	9:05	9:10	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	C3-H1	C3-H2	C3-H3	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH	unid. pH	0,1	6,5	6,8	7,3	-
Conductividad Eléctrica	mS/m	1,0	9,7	6,3	5,6	-
Materia Orgánica	%	0,5	3,1	1,1	3,0	-
Fósforo Disponible	mg/kg	0,8	26,8	7,3	2,0	-
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0,5	0,5	0,8	1,4	-
Textura	-	-	-	-	-	-
Arena	%	-	70	76	72	-
Arcilla	%	-	8	10	12	-
Limo	%	-	22	14	16	-
Clase Textural	-	-	Franco Arenoso	Franco Arenoso	Franco Arenoso	-

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA Method 9045 D Rev. 4 2004 Soil and waste pH.
Conductividad Eléctrica	ISO 11265:1994 / Cor 1:1996 1994 Soil quality -- Determination of the specific electrical conductivity
Carbono Orgánico Total / Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7, AS-07 2002 Determinación de materia orgánica del suelo (AS-07 Método de Walkley y Black).
Fósforo Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.10, AS-10 2002 Determinación de fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos (AS-10 Método de Olsen y colaboradores).
Carbonato De Calcio Equivalente	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.3.25, AS-29 2002 Determinación de los carbonatos de calcio equivalente (AS-29 Método de neutralización ácida).
Textura	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.9, AS-09 2002 Determinación de la textura del suelo (AS-09 Método de Bouyoucos).

IV. CONSIDERACIONES

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Eléctrica realizada a 25 °C.

(***) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

INFORME DE ENSAYO
LABSAF AREQUIPA
N° 093392-25 / SU / AQP



V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Nancy Calla Cornejo - Responsable del LABSAF - AREQUIPA

Firma



Pro Suelos y Aguas
FIN DE INFORME DE ENSAYO

LABSAF



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO

LABSAF AREQUIPA

N° 093392-25NA / SU / AQP

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: CONEXXA PERU SRL
Propietario / Productor	: ANA PAULA SALAZAR CORRALES
Dirección del cliente	: Arequipa
Solicitado por	: CONEXXA PERU SRL
Muestreado por	: Cliente
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: MOLLEBAYA; AREQUIPA; AREQUIPA
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-08-19
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-08-29
Lugar de ensayo	: LABSAF AREQUIPA
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-08-29 al 2025-09-11
Cotización del servicio	: 2072-25-AQP
Fecha de emisión	: 2025-09-15

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	SU2957-AQP-25	SU2958-AQP-25	SU2959-AQP-25	SU2960-AQP-25	SU2961-AQP-25	SU2962-AQP-25
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo
Fecha de Muestreo (***)	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	8:30	8:35	8:40	8:45	8:50	8:55
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	C1-H1	C1-H2	C1-H3	C2-H1	C2-H2	C2-H3
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Potasio Disponible	mg/kg	-	198,63	96,37	95,59	290,28
Calcio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	10,19	14,83	7,08	6,06
Magnesio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	1,84	3,67	3,83	0,67
Potasio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	0,52	0,25	0,26	0,73
Sodio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	0,51	6,86	8,08	0,50

ITEM	7	8	9	10	11	12
Código de Laboratorio	SU2963-AQP-25	SU2964-AQP-25	SU2965-AQP-25	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo	Suelo	Suelo	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)	2025-08-19	2025-08-19	2025-08-19	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	9:00	9:05	9:10	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	C3-H1	C3-H2	C3-H3	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
Potasio Disponible	mg/kg	-	245,92	299,41	127,54	-
Calcio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	7,76	5,98	8,20	-
Magnesio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	0,77	1,18	3,85	-
Potasio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	0,64	0,71	0,36	-
Sodio Intercambiable	cmol (+)/Kg	-	0,50	0,45	0,52	-



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares

Acreditado con la Norma

NTP-ISO/IEC 17025:2017

LABSAF AREQUIPA

Dirección: Calle Saco Oliveros N° 402 - Cerro Juli - José L. B. y R. - Arequipa

Email: labsafarequipa@inia.gob.pe

F-46 / Ver.06
www.inia.gob.pe



Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO

LABSAF AREQUIPA

N° 093392-25NA / SU / AQP

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Potasio Disponible	Determinación de Potasio disponible en suelos con saturación de acetato de amonio 1N - Espectrometría MP - AES
Calcio Intercambiable	Determinación de Bases Intercambiables en Suelos - Espectrometría MP-AES
Magnesio Intercambiable	Determinación de Bases Intercambiables en Suelos - Espectrometría MP-AES
Potasio Intercambiable	Determinación de Bases Intercambiables en Suelos - Espectrometría MP-AES
Sodio Intercambiable	Determinación de Bases Intercambiables en Suelos - Espectrometría MP-AES

IV. CONSIDERACIONES

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Eléctrica realizada a 25 °C.

(***) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Nancy Calla Comejo - Responsable del LABSAF - AREQUIPA



Firmado digitalmente por:
CALLA CORNEJO Nancy
Vanessa FAU 20131305904 soft
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 18/09/2025 11:00:01-0500

Firma

FIN DE INFORME DE ENSAYO



Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017

LABSAF AREQUIPA

Dirección: Calle Saco Oliveros N° 402 - Cerro Juli - José L. B. y R. - Arequipa
Email: labsafarequipa@inia.gob.pe

Anexo 3. Informes y constancias

Anexo 3 A. Formato para etiqueta de Identificación del individuo

ETIQUETA DE IDENTIFICACIÓN DEL INDIVIDUO

PROYECTO: Asimilación de Dióxido Carbono
CO2 CV-UCSM.

RESPONSABLE: Ana Paula Salazar Corrales.

ID ÁRBOL: _____

PUNTO GPS:

_____ m E

_____ m S

ALTITUD: _____ m.s.n.m.

FECHA: / /

***NO RETIRAR
MONITOREO DE CARBONO.***

Anexo 3 B. Ficha técnica para identificación taxonómica

FICHA TÉCNICA PARA IDENTIFICACIÓN TAXONÓMICA	
Código de colecta:	
Fecha:	
Colector:	
Proyecto:	
País / Dpto / Pcia / Localidad	
Coordenadas:	
Altitud:	
Ecosistema: (Arenoso, arcilloso, pedregoso)	
Exposición de Luz: (Alta, media, baja)	
Especies asociadas:	
Hábito: (Árbol, arbusto, hierba, liana)	
Altura	
Diámetro del Tallo	
Hojas (Color, textura, disposición)	
Flores (Color, textura disposición)	
Frutos (Color y tipo)	
Abundancia (Raro, frecuente, alto, muy alto)	
Observaciones:	

Anexo 3 C.Ficha Herbario Universidad Nacional de San Agustín Arequipa-Perú

HERBARIO HUSA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN AREQUIPA-PERÚ N. común: N. científico: Familia y género: Hábito: Hábitat: Procedencia: Coordenadas: Altitud: Fecha: Colector: N°:.....
HERBARIO HUSA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN AREQUIPA-PERÚ N. común: N. científico: Familia y género: Hábito: Hábitat: Procedencia: Coordenadas: Altitud: Fecha: Colector: N°:.....

Anexo 3 D. Formato para toma de muestras en campo (OSINFOR)

 FICHA TÉCNICA PARA INVENTARIO DE ÁRBOLES DE PARQUES, AVENIDAS, BERMAS Y ÁREAS VERDES																		
MUNICIPALIDAD:		UNIDAD RESPONSABLE:										FECHA:						
PARQUE/AVENIDA/BERMA, ETC:		ÁREA TOTAL										ÁREA VERDE						
N°	NOMBRE COMÚN	PUNTO GPS (*)	FUSTE (CAP) (m.)	ALTURA TOTAL (m)	DIÁMETRO O COPA (m)	ESTADO			PODA		IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS						DIST ENTRE ÁRBOLES	OBSERVACIONES
						B	R	M	SI	NO	PER	SUE	CAB	POS	VIV	OTR		
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		

(*) SOLO EN AVENIDAS SE VA TOMAR ARBOL POR ARBOL EL PUNTO GPS// BERMAS, PARQUE, COMPLEJOS EL MISMO PUNTO GPS PARA TODA EL ÁREA VERDE.

CAP=CIRCUNFERENCIA A LA ALTURA DEL PECHO B=BUENO, R=REGULAR, M=MALO, PER=PERSONA, SUE=SUELO, CAB=CABLE, POS=POSTE, VIV=VIVIENDA Y OTR=OTRO.

REQUERIMIENTO DE ÁRBOLES POR PARQUE	Especie:								Cantidad:		Observ.				
	Especie:								Cantidad:		Observ.				
CERCO VIVO	Especie:								Cantidad:		Observ.				
	Especie:								Cantidad:		Observ.				
RIEGO:	Tipo:								Observ.						
INFRAESTRUCTURA	Bancas				Observ.						Presencia de rejas	SI		NO	
	Juegos Rec.				Cantidad				Estado				Observ.		

Anexo 4. Tablas de información complementaria

Anexo 4 A. Tabla 4. Características adicionales de los individuos y criterios de inclusión (desglosados)

Árbol	Altitud(m)	Coordenadas		ALTURA TOTAL (m)	DIÁMETRO COPA(m)	Nº DE EJES	INCLINACIÓN O PENDIENTE A QUEBRADA	PRESENCIA DE BROTES	DENSIDAD FOLIAR	LÍQUENES	EXPOSICIÓN AL SOL
		Este m E	Norte m S								
Y1	2452	235372.58	8171962.18	3.30	4.15	3	no	sí	baja	no	alta
Y2	2446	235336.74	8171949.56	2.50	3.30	4	sí	sí	alta	sí	alta
Y3	2446	235326.54	8171944.56	6.00	8.67	6	sí	sí	media	sí	media
Y4	2448	235316.46	8171939.56	5.75	7.42	5	sí	sí	alta	sí	media
Y5	2444	235300.49	8171934.83	5.20	8.30	3	no	sí	alta	sí	alta
Y6	2443	235265.93	8171949.02	4.50	8.35	3	no	sí	media	sí	media
Y7	2443	235256.56	8171955.32	2.57	7.10	5	sí	sí	alta	no	alta
Y8	2443	235239.97	8171948.92	5.10	7.60	3	sí	sí	alta	sí	media
Y9	2441	235221.47	8171951.24	3.43	6.49	5	no	sí	alta	sí	alta
Y10	2440	235206	8171958.24	4.10	7.00	5	no	sí	alta	sí	media
Y11	2440	235288.79	8171914.09	3.65	7.69	6	no	sí	baja	sí	media
Y12	2442	235275.31	8171898.53	5.50	9.94	4	no	sí	alta	sí	alta
Y13	2445	235256.04	8171858.32	4.05	7.53	2	no	sí	alta	no	media
Y14	2433	235283.24	8171844.15	3.66	6.15	5	sí	sí	media	sí	alta
Y15	2437	235281.87	8171877.69	3.83	5.20	6	no	sí	alta	sí	alta
Y16	2446	235276.83	8171766.23	7.00	8.85	5	no	sí	alta	sí	baja
Y17	2446	235256.48	8171770.52	2.50	5.20	5	no	sí	alta	sí	baja
Y18	2444	235240.67	8171762.58	3.45	5.40	6	no	sí	media	sí	media
Y19	2442	235221.22	8171746.06	3.00	7.85	6	sí	sí	baja	sí	media
Y20	2444	235183.67	8171770.25	4.00	9.87	3	no	sí	alta	sí	media

Anexo 4 B. Tabla 5. Caracterización inicial de las calicatas por horizonte

	<i>Horizonte (H)</i>	<i>Altura (cm)</i>	<i>Color de Concrecencias</i>	<i>Raíces</i>	<i>Piedras</i>	<i>Observaciones</i>
C1	<i>H1</i>	<i>0-45</i>	<i>-</i>	<i>No</i>	<i>No</i>	<i>Suelo arenoso</i>
	<i>H2</i>	<i>46-58</i>	<i>Amarillo y rojo</i>	<i>10 r.sec</i>	<i>No</i>	<i>Suelo muy compacto</i>
	<i>H3</i>	<i>60-100</i>	<i>Blanca</i>	<i>2 r. prim</i>	<i>No</i>	<i>Suelo con sensación de humedad</i>
C2	<i>H1</i>	<i>0-30</i>	<i>-</i>	<i>3 r.sec 11 r. ter</i>	<i>No</i>	<i>Suelo arenoso</i>
	<i>H2</i>	<i>40-77</i>	<i>-</i>	<i>1 r. prim 6 r.sec 23 r.ter</i>	<i>Sí pocas</i>	
	<i>H3</i>	<i>80-100</i>	<i>Plomo brillante</i>	<i>Pelos radicales</i>	<i>No</i>	
	<i>H1</i>	<i>0-20</i>	<i>-</i>	<i>1 r. sec 12 r.ter</i>	<i>Sí</i>	<i>Suelo altamente rocoso</i>
C3	<i>H2</i>	<i>25-75</i>	<i>-</i>	<i>12 r. sec 3 r.ter</i>	<i>Sí</i>	<i>Hongos en suelo</i>
	<i>H3</i>	<i>80-100</i>	<i>Amarilla</i>	<i>2 r. sec 5 r.ter</i>	<i>Sí</i>	<i>Greda</i>

Anexo 5. Gráficas para visualización alternativa

Anexo 5 A. Gráfica Box Plot de Asimilación de CO₂ (datos combinados junio y julio) n=20

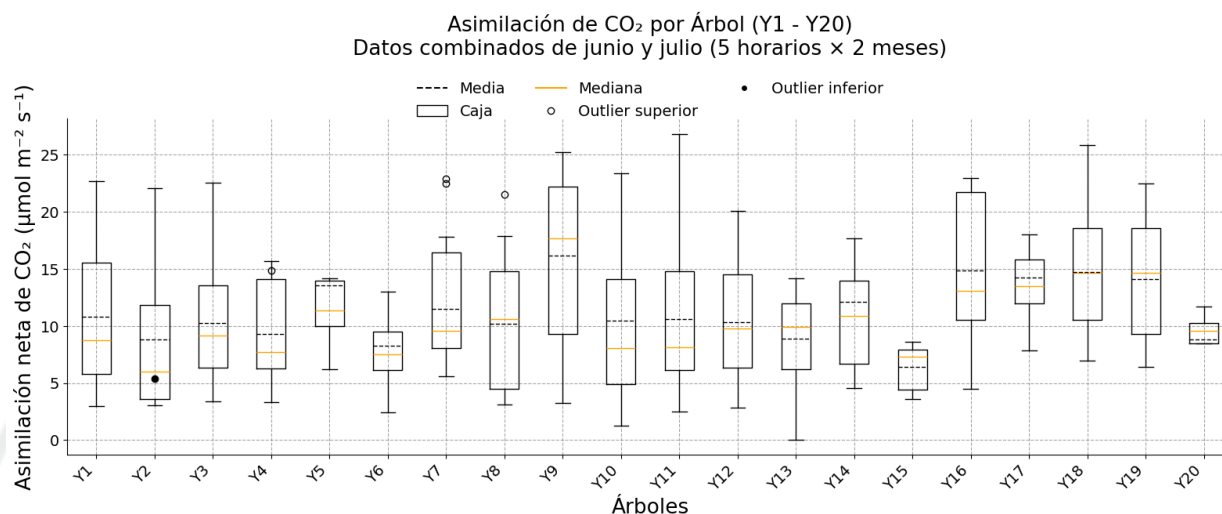


Figura 70. Asimilación de CO₂ por individuo (Y1-Y20) en ambos meses

Anexo 5 B. Estrategias de asimilación de CO₂ en árboles con alta exposición solar en comparación

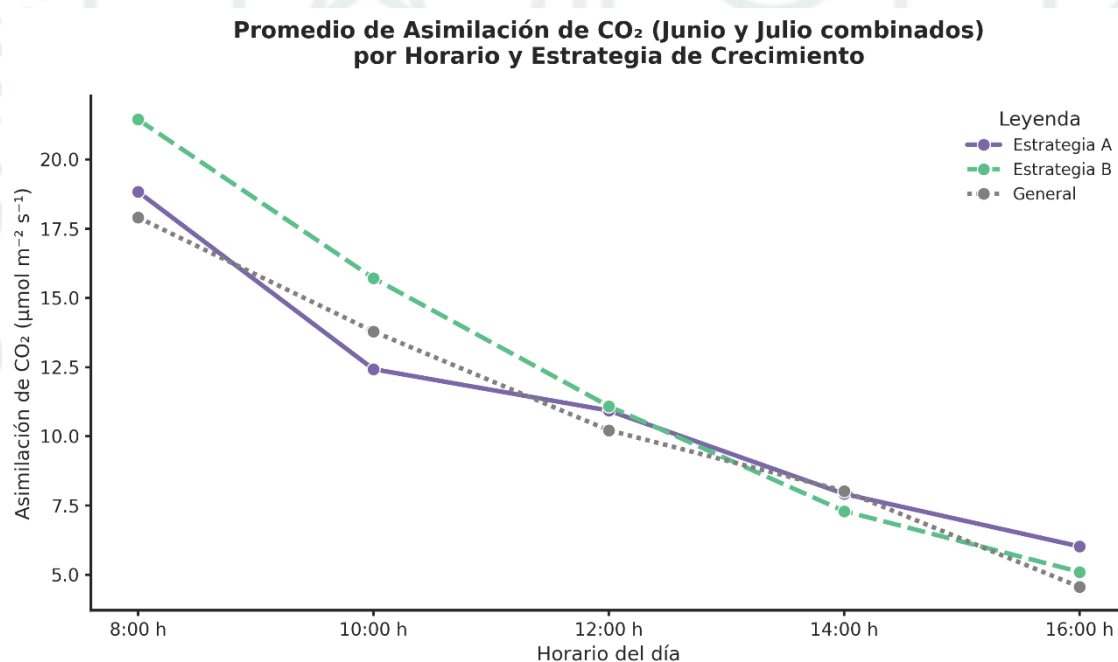


Figura 71. Estrategia de crecimiento a y b en individuos con alta exposición solar respecto a la A_n.

Temperatura foliar por horario, estrategia de crecimiento y mes
Neltuma calderensis (Estrategia A: n=4 | Estrategia B: n=4 | General: n=20)

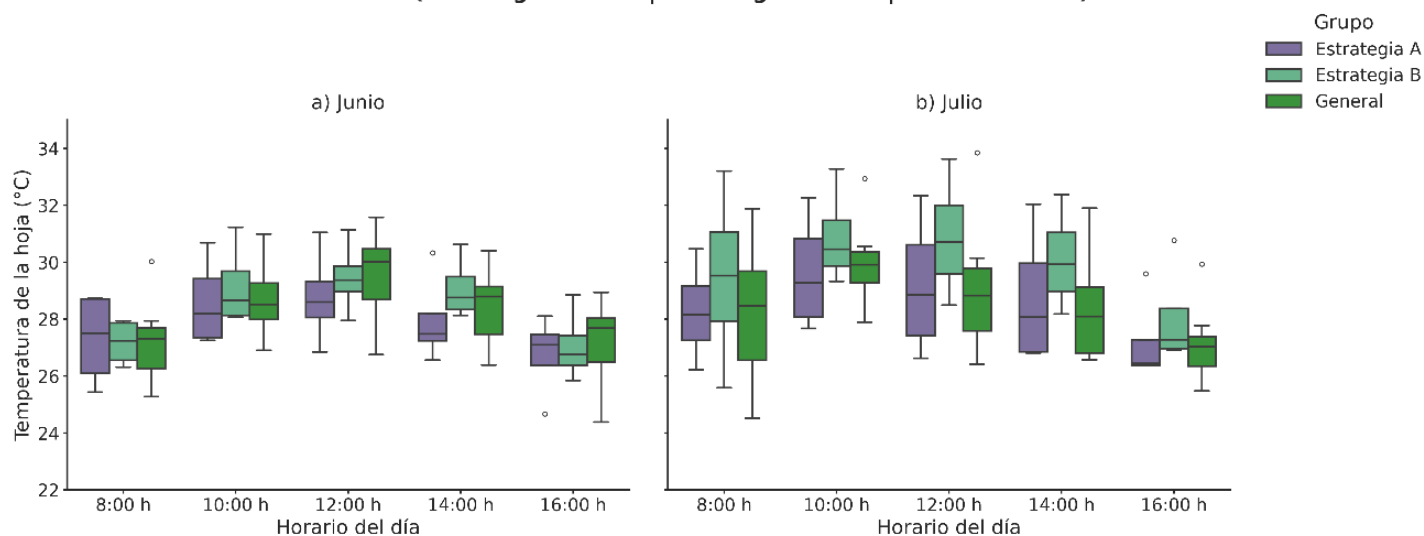


Figura 72. Box Plot temperatura conforme a las estrategias a y b.

Variación diurna de temperatura foliar
Neltuma calderensis (Promedio)

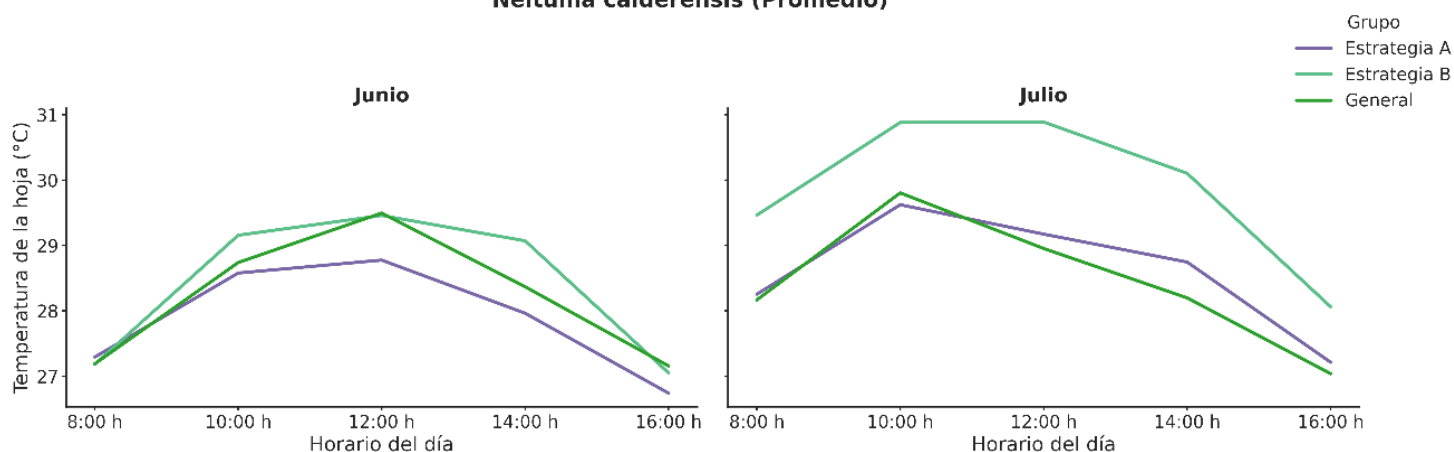


Figura 73. Variación de temperatura foliar y acumulación de temperatura por estrategia

Anexo 5 C. Relación Temperatura medida por el equipo y horario de asimilación

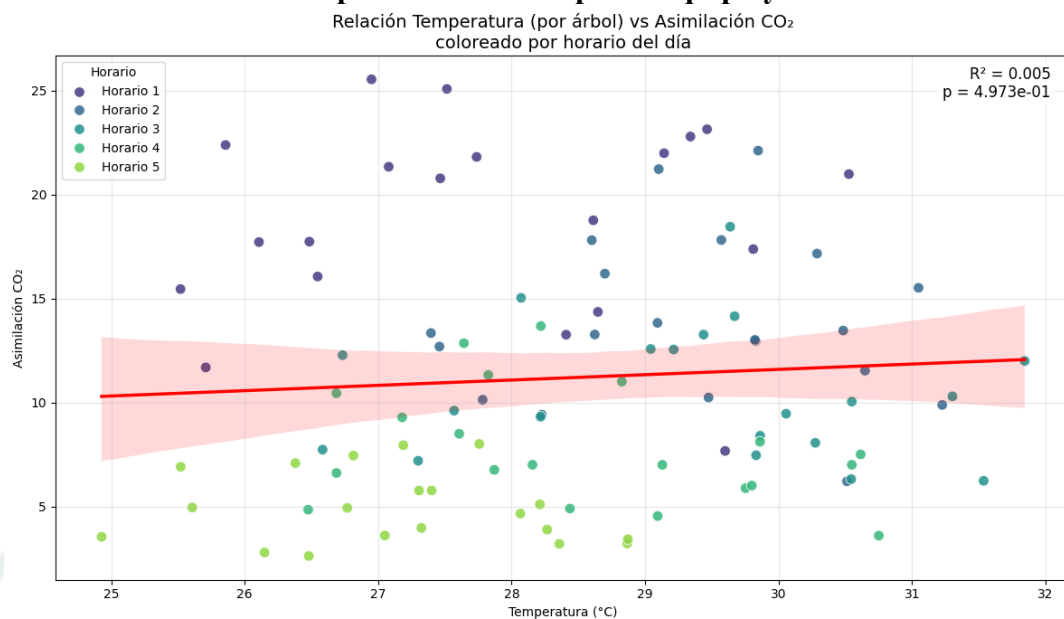


Figura 74. Relación temperatura vs An coloreada por horario

Anexo 5 D. Pairplot de Variables: An vs DE e IE

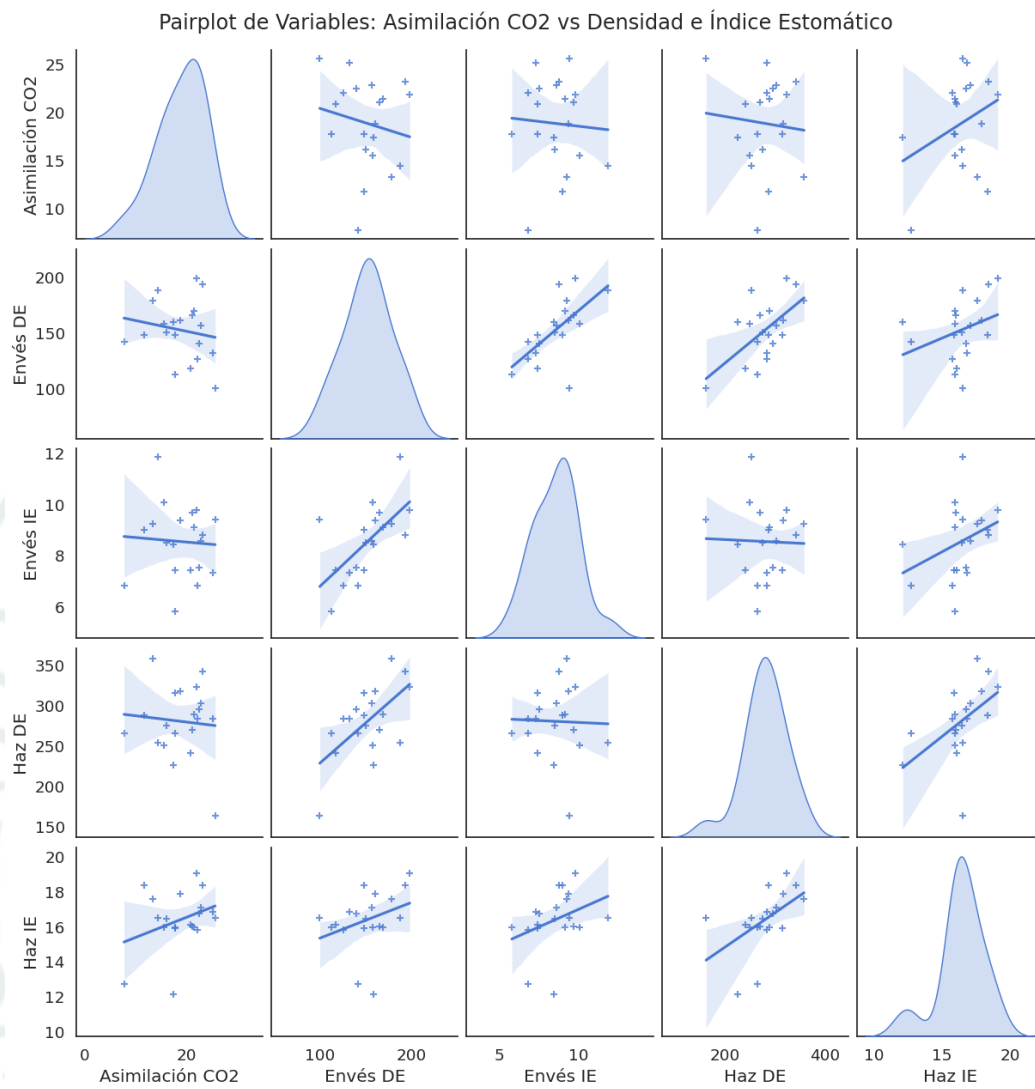


Figura 75. Relación entre promedio general de asimilación de CO₂ y características estomáticas (DE – IE)