



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO
AMBIENTE



TESIS

**INFLUENCIA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN EL ANALISIS DE 3
VARIEDADES Y 23 ACCESIONES DE CAÑIHUA (*Chenopodium
pallidicaule* Aellen)**

PRESENTADA POR:

JUAN PABLO VELASQUEZ BARBACHAN

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

TESIS

**INFLUENCIA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO EN EL ANALISIS DE 3
VARIEDADES Y 23 ACCESIONES DE CAÑIHUA (*Chenopodium pallidicaule*
Aellem)**



PRESENTADA POR:

JUAN PABLO VELASQUEZ BARBACHAN

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA, TECNOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE


.....
GERMAN BELIZARIO QUISPE

PRIMER MIEMBRO


.....
ERNESTO JAVIER CHURA YUPANQUI

SEGUNDO MIEMBRO


.....
VICENTE ALANOCA-AROCUTIPA

ASESOR DE TESIS


.....
WENCESLAO TEDDY MEDINA ESPINOZA

Puno, 12 de Julio de 2022

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería
LÍNEA: Manejo Agronómico de Cultivos
TEMA: Análisis de Imagen y Fertilidad de Suelos



DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo incondicional, animo incansable y ejemplo de vida.

A mis hermanos por su aliento, fortaleza y ayuda en la realización de esta tesis.

A Malu, por su comprensión, apoyo y compañía durante la investigación.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a la escuela de Posgrado en el programa de doctorado en Ciencia, tecnología y medio ambiente.

Al Proyecto Concytec – Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia (contrato número 01-2018-FONDECYT/BM-Programas de Doctorados en Áreas Estratégicas y Generales).

Al Dr. Wenceslao Teddy Medina Espinoza, asesor de la presente tesis, por su apoyo durante todo el proceso de investigación.

Al Dr. Ángel Canales, coordinador del doctorado por el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

A los docentes locales, nacionales e internacionales que participaron del programa, así como los amigos profesionales del doctorado.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ÍNDICE DE ACRONIMOS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico	2
1.1.1. La cañihua	2
1.1.2. Fenología del cultivo	4
1.1.3. Requerimientos del cultivo	5
1.1.4. Variedades y accesiones de cañihua	6
1.1.5. Métodos de identificación de especies	7
1.1.6. El análisis de imágenes y su aplicación en las plantas	9
1.1.7. Principales técnicas de análisis de imágenes en hojas	10
1.1.8. Importancia del suelo para el crecimiento de plantas	14
1.1.9. La materia orgánica y el humus	15
1.1.10. Las micorrizas y los Hongos Micorrizóticos Arbusculares (HMA)	16
1.2 Antecedentes	17

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema	22
2.2 Enunciados del problema	23



2.2.1 Enunciado general	23
2.2.2 Enunciados específicos	23
2.3 Justificación	23
2.4 Objetivos	24
2.4.1 Objetivo general	24
2.4.2 Objetivos específicos	24
2.5 Hipótesis	24
2.5.1 Hipótesis general	24
2.5.2 Hipótesis específicas	25

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio	26
3.2 Población	26
3.3 Muestra	26
3.4 Método de investigación	27
3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	28
3.5.1. Caracterizar y evaluar las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma de las hojas en las variedades y accesiones de cañihua.	28
3.5.2. Analizar la respuesta de las variedades y accesiones de cañihua a la fertilidad del suelo	32

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterizar y evaluar las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma de las hojas en las variedades y accesiones de cañihua.	35
4.1.1. Análisis de componentes principales del haz de la hoja	38
4.1.2. Análisis de componentes principales del envés de la hoja	43
4.2. Analizar la respuesta de las variedades y accesiones de cañihua a la fertilidad del suelo	48



4.2.1. Altura de planta	50
4.2.2. Diámetro de tallo principal	51
4.2.3. Porcentaje de clorofila	52
4.2.4. Análisis de agua	53
4.2.5. Análisis de suelo	54
4.2.6. Análisis de material vegetal	58
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	74



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Composición de aminoácidos en cañihua y quinua	3
2. Principales características de las variedades de cañihua	7
3. Principales características geométricas en hojas	11
4. Acciones y variedades de cañihua utilizadas en la investigación	27
5. Valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar del haz y envés de la hoja	37
6. Autovalor y autovector de componentes asociados al haz de las hojas de cañihua	39
7. Autovalor y autovector de componentes asociados al envés de la hoja de cañihua	45
8. Altura de planta, diámetro de tallo principal y contenido de clorofila	49
9. Análisis del agua de riego	53
10. Análisis foliar del material vegetal de la planta de cañihua	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Planta de cañihua	3
2. Fases fenológicas de cañihua	5
3. Dimensión fractal en hojas de vid	12
4. Factores de color RGB-HSL-HSV	14
5. Sistema de adquisición de imágenes	30
6. Esquema de captura de fotos de hojas de cañihua	31
7. Altura de planta (h) y diámetro de tallo (d)	32
8. Medidor de clorofila AtLeaf CHL PLUS	33
9. Sedimentación de la varianza para el haz de la hoja	40
10. Cargas principales para el primer componente principal	41
11. Cargas principales para el segundo componente principal	42
12. Cargas principales para el tercer componente principal	42
13. Clúster de componentes para el haz de la hoja	43
14. Sedimentación de la varianza para el envés de la hoja	44
15. Cargas principales para el primer componente principal	46
16. Cargas principales para el segundo componente principal	46
17. Cargas principales para el tercer componente principal	47
18. Clúster de componentes para el envés de la hoja	48
19. Altura de planta de variedades y accesiones de cañihua	50
20. Diámetro de tallo central de variedades y accesiones de cañihua	51
21. Porcentaje de clorofila en variedades y accesiones de cañihua	52
22. Fósforo disponible en el suelo	55
23. Boro disponible en suelo	56
24. Manganeso disponible en el suelo	56
25. Capacidad de intercambio catiónico efectivo en suelo	57



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Galería fotográfica	74
2. Análisis de agua	77
3. Análisis de suelos inicial y al final del experimento	78
4. Análisis foliar	79



ÍNDICE DE ACRONIMOS

Ar:	Área
P:	Perímetro
M:	Eje mayor
Me:	Eje menor
R:	Rojo
G:	Verde
B:	Azul
CH:	Matiz
CS:	Saturación
CV:	Valor
H:	Tono
S:	Saturación
L:	Luminosidad
Sh1-Sh10:	Factores de forma

RESUMEN

La cañihua es un cultivo ancestral, poco valorado, con potencial agroalimentario, que tolera el cambio climático y que posee la mayor biodiversidad de variedades y accesiones las cuales se ubican en Puno. Sin embargo, su identificación es aún difícil de realizar por la similitud de sus características. Los métodos empleados actualmente son por su taxonomía y el análisis genético, pero demandan tiempo y son costosos; además, la expresión de su potencial agronómico se ve limitado por la fertilidad del suelo en los que se cultiva. El objetivo de esta investigación fue evaluar las características geométricas, dimensión fractal, factores de color y forma de las hojas, y analizar la respuesta de la planta a la fertilidad del suelo en cuanto a altura, diámetro de tallo principal y contenido de clorofila. El experimento se realizó durante la campaña 2021-2022 en condiciones de invernadero, bajo un diseño tipo láctice con un testigo, un tratamiento con micorrizas y 5 repeticiones con un total de 156 plantas. Para la captura de imágenes de hojas se utilizó una cámara EO-2323, con un lente telecéntrico y se aplicó un análisis multivariado (PCA). Se concluye que las variedades y accesiones de cañihua pueden diferenciarse entre sí, agrupándose según sus características originarias propias, además que tres componentes principales aportan el 76% y 77% de varianza al haz y envés de las hojas. La diferencia del tratamiento frente al testigo fue 11.68 cm en altura de planta, 0.98 mm en diámetro de tallo principal y 7.86% de contenido de clorofila.

Palabras clave: Accesiones, análisis de imágenes, cañihua, fotografía, hoja, PCA

ABSTRACT

Cañihua is an ancestral crop, undervalued, with agro-food potential, tolerant to climate change and with the greatest biodiversity of varieties and accessions located in Puno. However, their identification is still difficult due to the similarity of their characteristics. The methods currently used are taxonomy and genetic analysis, but they are time consuming and costly; in addition, the expression of its agronomic potential is limited by the fertility of the soil in which it is grown. The objective of this research was to evaluate geometric characteristics, fractal dimension, color factors, leaf shape and to analyze plant response to soil fertility in terms of height, main stem diameter and chlorophyll content. The experiment was conducted during the 2021-2022 season under greenhouse conditions, under a lattice design with a control, a treatment with mycorrhizae and 5 replicates with a total of 156 plants. An EO-2323 camera with a telecentric lens was used to capture leaf images and a multivariate analysis (PCA) was applied. It is concluded that cañihua varieties and accessions can be differentiated from each other, grouped according to their own original characteristics, and that three principal components contribute 76% and 77% of variance to the upper and lower side of the leaves. The difference between the treatment and the control was 11.68 cm in plant height, 0.98 mm in main stem diameter and 7.86% in chlorophyll content.

Keywords: Accessions, cañihua, image analysis, leaf, photography, multivariate analysis (PCA)

INTRODUCCIÓN

La cañihua es un grano andino del altiplano de Perú y Bolivia que se la confundió como variedad de quinua hasta 1929 en la que fue clasificada como una especie diferente (Gade, 1970). Se remonta a más de 7000 años cuando era un cultivo básico de las sociedades preincas e incas, sin embargo, a pesar de la creciente popularidad de su pariente cercano la quinua, su uso como alimento es aún incipiente y es muy poco valorado (Mangelson et al., 2019).

El valor nutricional de sus granos tiene un consumo importante en el departamento de Puno. Se le considera como un alimento nutraceutico, con compuestos bioactivos que mejoran la salud humana y evitan las enfermedades; además presenta elevado contenido de proteínas, aminoácidos esenciales, carbohidratos, aceites vegetales, grasas no saturadas, vitaminas, minerales, fibra cruda y es libre de gluten (Perez y Antezana, 2018; Campos et al., 2018).

Existen tres variedades definidas pero además cuenta con 380 accesiones en los bancos de germoplasma (Apaza, 2010; Pérez et al., 2016), que resultan de gran interés para su desarrollo agroindustrial y agroalimentario. Sin embargo, la diferenciación de las accesiones es compleja de realizar por la similitud de sus características fenotípicas durante en el ciclo vegetativo de la planta y la expresión de su potencial agronómico se ve limitado por la fertilidad del suelo en los que se cultiva.

Por tanto, se busca un método preciso, económico y de fácil aplicación para el estudio de hojas, para diferenciar las especies vegetales según sea variedad o accesión. Por consecuencia, el objetivo de esta investigación fue evaluar las características geométricas, dimensión fractal, factores de color y forma de las hojas, y analizar la respuesta de la planta a la fertilidad del suelo en cuanto a altura de planta, diámetro de tallo principal y contenido de clorofila.

El trabajo de investigación se encuentra dividido por cuatro capítulos: Capítulo I, referido a la cañihua; en el capítulo II, se detalla el planteamiento del problema de investigación, objetivos e hipótesis. En el capítulo III, el lugar de estudio, la muestra y la metodología por cada objetivo y en el capítulo IV, está dedicado a los resultados y discusión de la investigación. La investigación culmina con las conclusiones, recomendaciones, referencias y anexos.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1. La cañihua

La cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) es un cultivo nativo del Altiplano de Perú y Bolivia que tolera condiciones climáticas adversas como las heladas, la sequía, el granizo y el viento (Bruno et al., 2018), así como condiciones no idóneas de suelo, salinidad, cambio climático y presencia de plagas (Bonifacio, 2019), mostrando una variación intraespecífica con cambios en su morfología (Meldrum et al., 2018).

Es reconocido como una planta rústica doméstica porque mantiene varias características silvestres como la auto siembra y maduración diferencial (Bruno et al., 2018). Tolerar pH de 4,8 a 8,5 en el suelo y resiste temperaturas bajas. Respecto a la germinación se inicia desde los 5°C, la floración desde los 10°C y la maduración de semillas desde los 15°C (Chirinos et al., 2018; Luna y Repo, 2020).

Es considerado un alimento funcional, nutraceutico, con compuestos bioactivos debido a la calidad de proteínas como las albuminas y globulinas, así como los aminoácidos esenciales como la lisina necesaria para el cerebro (Tabla 1). Además, no contiene gluten por lo que puede ser consumida por personas celiacas y alérgicas al trigo (Perez y Antezana, 2018; Campos et al., 2018; Quiroga, 2020).

Tabla 1

Composición de aminoácidos en cañihua y quinua

Aminoácido	Proteína en cañihua mg/g	Proteína en quinua mg/g
Glicina	63.5	60.9
Treonina	37.2	34.9
Arginina	87.4	84.3
Lisina	58.3	45.8

Fuente: Villa et al. (2014)

La cañihua es una planta herbácea con periodo vegetativo de hasta 150 días, con tres hábitos de crecimiento: erguido, semi erguido y tendido. Tiene una raíz pivotante con escasa ramificación y presenta un tallo hueco ramificado desde la base. Su inflorescencia es axial o terminal, con flores hermafroditas y el grano es un aquenio (Figura 1) (Apaza, 2010; Maertens y Vande, 2017).



Figura 1. Planta de cañihua

Fuente: Bartolo (2013)

Las hojas son tribuladas alternas con peciolo cortos, con forma romboidal, triangular o ancho ovado, con bordes dentados o enteros y nervaduras bien marcadas en el envés; además, las hojas contienen vesículas con cristales de oxalato de calcio higroscópicos

que controlan la excesiva transpiración en condiciones muy secas, presentando en algunas variedades silvestres casos de deformación de la lámina de la hoja y el pecíolo por un carácter mutante (Tapia, et al., 2019).

1.1.2. Fenología del cultivo

Se refiere a las actividades de crecimiento del cultivo de cañihua (Figura 2) realizado por ciclos desde la siembra a la cosecha (Choque, 2005; Mujica et al., 2002; Lescano, 1994).

- a) **Emergencia:** Es la aparición de los cotiledones sobre la superficie del suelo, antes que las axilas se alarguen, siendo susceptible al ataque de plagas.
- b) **Dos hojas verdaderas:** son las primeras hojas que realizan la fotosíntesis y se inicia el crecimiento de la planta.
- c) **Ramificación:** se inicia el desarrollo de las ramas secundarias o laterales que aparecen en lados opuestos
- d) **Formación de inflorescencia:** con la aparición de las primeras inflorescencias de la rama principal de la planta.
- e) **Floración:** cuando se tiene un 50% de apertura de las flores en la rama principal. La duración de la floración por inflorescencia es de 9 a 14 días, siendo la apertura de la flor de 1 a 3 días.
- f) **Grano lechoso:** cuando al ser presionado entre las uñas, el grano deja escapar un líquido lechoso. Esta etapa es la más susceptible a heladas
- g) **Grano pastoso:** cuando los granos al ser presionados entre las uñas se aplastan y muestra una consistencia pastosa de color blanco.
- h) **Madurez fisiológica:** se da cuando los primeros granos inicien o estén por desgranarse, iniciándose la cosecha debido a que las plantas son muy susceptibles al desgrane y llegan a desgranarse hasta en un 50%.

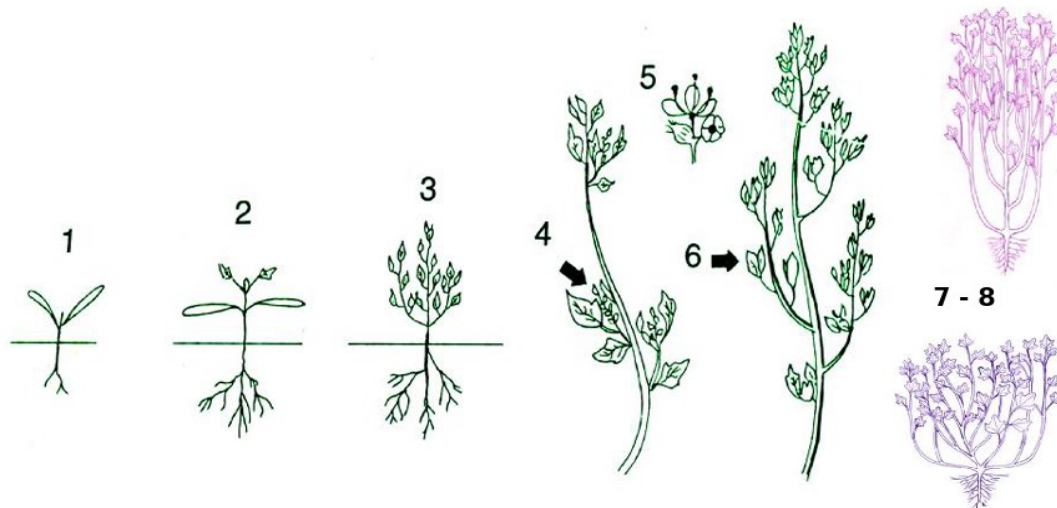


Figura 2. Fases fenológicas de cañihua

Fuente: Lescano (1994) y Choque (2005)

1.1.3. Requerimientos del cultivo

Se refiere a las actividades previas al establecimiento del cultivo en campo definitivo y su mantenimiento hasta la postcosecha.

- a) **Preparación del terreno:** se realiza después de la cosecha del cultivo anterior a una profundidad entre 20 a 30 cm, con el uso de maquinaria agrícola o yunta; con el objetivo de nivelar, oxigenar y mullir el suelo, el cual requiere un buen desterronado para una emergencia uniforme de las plántulas (Apaza, 2010).
- b) **Abonamiento y fertilización:** el cultivo responde bien a la incorporación de materia orgánica descompuesto (4-6 toneladas/ha). Así mismo antes de la siembra, se recomienda realizar análisis de suelos y complementar fertilización química a fondo de surco a nivel de 120-60-0 de NPK. Sin embargo, en la realidad poca cantidad de agricultores realizan esta labor (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola-FIDA, 2010).
- c) **Siembra:** depende del tipo de variedad, densidad de siembra y frecuencia de lluvias. La época de siembra varía según el tipo de variedad, siendo las variedades tardías sembradas en septiembre, las intermedias en octubre y las precoces en noviembre. La densidad de siembra varía de 8kg/hectárea en siembras superficiales al voleo y de 4-8kg/hectárea. La emergencia se da luego de ocho días, dependiendo de la a frecuencia de lluvias (Alexis, 2011).

- d) **Aporque y deshierbes:** son actividades poco realizadas por los agricultores de la zona sin embargo permite la aireación del suelo y disminuir la competencia con el cultivo, mejorando por ende la calidad del grano (Alexis, 2011; Apaza, 2010).
- e) **Control de plagas y enfermedades:** depende de las condiciones de clima. Las principales plagas son los gusanos de tierra (*Copitarsia turbata*), los pulgones (*Myzuis persicae*) y entre las enfermedades más comunes son el mildiu (*Peronospora farinosa*) (Alexis, 2011; Apaza, 2010).
- f) **Cosecha:** el periodo de cosecha varía de marzo abril y puede verse afectado por las granizadas que ocurren en esta temporada. La cosecha consiste en el corte de las plantas a 5 cm del suelo antes de la maduración de los granos y/o también se efectúa el arranque de las plantas con raíz para dejarlos secar en gavillas por 15 días para luego proceder a la trilla (Alexis, 2011; Apaza, 2010).
- g) **Postcosecha:** la trilla se efectúa por el método de golpeo de las plantas con palos curvados en el extremo y se realiza conforme maduran los granos. Luego se realiza el venteo para eliminar restos de tallos y hojas y se procede con el tamizado para la clasificación de granos (Alexis, 2011; Apaza, 2010).

1.1.4. Variedades y accesiones de cañihua

a) Variedades de cañihua

Las variedades agrupan a un conjunto de individuos con características similares hereditarias las cuales son homogéneas, provocadas por una distribución geográfica y ecológica, siendo subordinadas a una especie (Machaca, 2015; Chahua, 2020). En Puno, producto del programa de mejoramiento se han desarrollado tres variedades con características propias, pero distintas entre sí (Tabla 2).

b) Accesiones de cañihua

Las accesiones son muestras de germoplasma representativa de uno o varios individuos de la población, que se utiliza para investigación de líneas de promisorias en grano o follaje. Así mismo, la cantidad de accesiones reportadas en la región de Puno varían desde 380 a 430 accesiones con más del 50% proveniente de la provincia de Melgar y Puno (Machaca, 2015; Pérez et al., 2016; Chahua, 2020), de las cuales para la investigación se han seleccionado 23 (Tabla 4).

Tabla 2

Principales características de las variedades de cañihua

	Cupi	Ramis	Illpa Inia
Habito de crecimiento	Erguido	Erguido	Erguido
Altura de planta	60 cm	52 cm	67 cm
Diámetro de tallo central medido en la parte media del tercio inferior de la planta en madurez fisiológica	4 mm	4.5 mm	5.0 mm
Número de ramas primarias desde la base hasta el segundo tercio de la planta	9	15	33
Forma de la lámina foliar	Ancha ovada	Ancha ovada	Ancha ovada
Numero de dientes de la lámina foliar del tercio medio de la planta en plena floración	5 a 6	3 a 5	5 a 7
Longitud del peciolo	7 mm	8 mm	12 mm
Longitud máxima de la lámina foliar del tercio medio de la planta en plena floración	1.62 cm	2.03 cm	2.40 cm
Ancho máximo de la lámina foliar del tercio medio de la planta en plena floración	1.40 cm	1.70 cm	1.73 cm
Color de la hoja a la madurez fisiológica	Purpura pálido	Purpura pálido	Anaranjado
Peso de 1000 gramos	0.5510 g	0.5511 g	0.5511 g

Fuente: Apaza (2010)

1.1.5. Métodos de identificación de especies

a) Análisis taxonómico

Bennett y Balick (2014) indican que es importante conocer la taxonomía y sus reglas por ello propusieron ocho consejos: proporcionar el binomio actualmente aceptado y la cita completa del autor, indicar la fuente del binomio, proporcionar los sinónimos

pertinentes, escribir los nombres científicos en mayúsculas y en cursiva de forma adecuada, proporcionar el nombre de la familia, proporcionar los nombres comunes y así como nombres subespecíficos o varietales en los cultivares y en caso de duda, consulte a un taxónomo de plantas.

IPGRI et al. (2005) recomendó el uso de descriptores o atributos que se observaron en las accesiones de cañihua dentro de una colección de germoplasma. Los principales descriptores reportados son: de pasaporte (recolección), manejo (multiplicación), sitio y ambiente (recolección de germoplasma), de caracterización (discriminar fenotipos) y evaluación (con métodos experiencial en campo), todos utilizados para recabar información fenotípica.

Simpson (2006) indico que la taxonomía es una parte importante de la sistemática o historia evolutiva de la vida que incluye cuatro componentes: descripción, que es la asignación de características a un taxón; identificación, que es la asociación de un taxon desconocido a uno conocido; nomenclatura, es la denominación formal de los taxones por un sistema estandarizado; y clasificación que permite proporcionar un sistema para catalogar y expresar las relaciones entre estas entidades.

b) Análisis genético

Mamani (2013) evaluó la variabilidad genética de 26 accesiones de cañihua, con el objetivo de caracterizar a nivel molecular y construir un dendrograma para establecer el grado de asociación de distancias genéticas entre las accesiones de cañihua y detectar la presencia o no posibles duplicados. Se utilizaron 16 combinaciones de marcadores moleculares y la extracción de ADN por accesión. Los resultados muestran que se obtuvieron 188 fragmentos amplificados de ADN con ausencia de duplicados.

Vargas et al. (2011) evaluó el polimorfismo de un conjunto de 43 genotipos silvestres y cultivados de cañihua utilizando 192 marcadores microsatélites derivados del ADN genómico de la cañihua. A través de un análisis de conglomerados la cañihua cultivada es una única rama dominante claramente separada de los genotipos de la cañihua silvestre, existiendo correlaciones significativas entre la distancia genética y los rasgos morfológicos.

Núñez (2011) se realizó un estudio preliminar sobre el análisis molecular intra accesimal mediante marcadores AFLP's de 20 muestras de quinua y cañihua, mediante 5 diferentes combinaciones de primers para Quinua y 4 combinaciones diferentes de primers para Cañihua que efectivamente existe diversidad intra accesimal en estos dos cultivos, evidenciándose cierto porcentaje de alogamia en las especies.

1.1.6. El análisis de imágenes y su aplicación en las plantas

El análisis de imágenes es una herramienta cómoda, rápida y económica (An et al., 2016), que permite reconocer, diferenciar y cuantificar diversos tipos de imagen, (Mendoza y Lu, 2015), para extraer información útil (Glowinski, *et al.*, 2019), que pueden ser adquiridas por cámaras digitales, escáneres, microscopios y teléfonos inteligentes (Patrício y Rieder, 2018; Li et al., 2020; Bambil et al., 2020).

Existen tres pasos previos para el análisis de imágenes de un objeto biológico: la adquisición de imagen, en la que se distingue el fondo distinto de la imagen e intensidad de luz; preprocesamiento de la imagen, con la corrección de brillo, color y distorsión de la imagen; y la selección de los píxeles de interés para la extracción de rasgos característicos para su posterior análisis (Gupta y Ibaraki, 2015)

La imagen digital obtenida está compuesta por tres características básicas: la resolución espacial, que es la frecuencia de píxeles para capturar los matices de una imagen; la profundidad de bits de los píxeles, que es el número de tonos que pueden representar la cantidad de información por cada pixel; y el color en los sistemas operativos que indica el significado de los valores de color que utiliza como RGB, CMYK, HSV (Sitts, 2000).

La principal ventaja del análisis de imágenes es su potencial para el análisis objetivo, que incluye la medición, la evaluación de la calidad y la visualización. Además, permite el análisis de características morfológicas, fenología de crecimiento, estado fisiológico, gestión de cultivos y la teledetección de copas de árboles como los principales (Rehman et al., 2019). Los principales análisis de imagen en plantas son:

- a) **Análisis de color:** se utiliza para evaluar el estado de la planta con el fin de apoyar las prácticas de gestión, detectando incidencia de enfermedades, plagas, niveles de fertilización, pigmentación de hojas y diagnóstico general de la planta (Sun et al.,

2018). El sistema de colores usado comúnmente es RGB, aunque puede ser convertidos a otros modelos de color para mayor diferenciación (Guo, 2018).

- b) Análisis de forma:** proporciona información valiosa para las fases de desarrollo de la planta, ya que los órganos como las hojas, flores y frutos al poseer formas diferentes, cambian con el tiempo; además, la información morfológica de las hojas con la información de color hace posible la identificación de las especies de plantas (Bambil et al., 2020). El análisis de forma se inicia con la extracción de las características geométricas de la zona objetivo, que incluyen la longitud del eje mayor, longitud del eje menor, perímetro, área, centroide, así como derivados de estas características los cuales pueden ser evaluados con el Análisis de Componentes Principales o PCA (Saleem et al., 2019).
- c) Análisis de partículas:** se utiliza para la detección de lesiones en una hoja infectada por una enfermedad o plaga (Kurmi et al., 2021). La distribución del tamaño o número de lesiones representados como el área y la forma de la partícula formada, suele verse muy afectados por procesos de segmentación o ruido de la imagen (Xiong et al., 2020).
- d) Análisis de crecimiento:** las imágenes pueden utilizarse para estimar el tamaño de un objeto o medir la longitud de la línea o el área proyectada como número de píxeles, los cuales son atribuibles al crecimiento del objeto (Li et al., 2020). La adquisición del área foliar de una planta entera permite el análisis de la tasa de crecimiento (Walter et al., 2015).
- e) Análisis de textura:** analiza regiones enteras de la imagen y extrae rasgos característicos relacionados con la textura de la imagen es decir del patrón macroscópico de la intensidad de la luz (Montalvo et al., 2016). Se basa en el análisis de la textura de los objetos biológicos como las hojas, en la teledetección y copas de los árboles en zonas boscosas (Vizcarra et al., 2021).

1.1.7. Principales técnicas de análisis de imágenes en hojas





Los principales análisis en imágenes de hojas son las características geométricas, la dimensión fractal, factores de color RGB, HSV, HSL y factores de forma, los cuales se explican a continuación:

a) Características geométricas

Son los descriptores morfológicos de hojas (Tabla 3), es decir, las propiedades geométricas básicas de la forma de la hoja como: área, perímetro, eje mayor y eje menor, diámetro y centroide (Wäldchen y Mäder, 2017).

Tabla 3

Principales características geométricas en hojas

Descriptor	Explicación	Pictograma
Área	Número de píxeles en la región del órgano	
Perímetro	Suma de las distancias entre cada par de píxeles contiguos alrededor del borde del órgano	
Eje mayor	Segmento de línea que une la base y la punta de la hoja menor	
Eje menor	Anchura máxima perpendicular al eje mayor	

Fuente: Wäldchen y Mäder (2017)

b) Dimensión fractal

Son una herramienta para el modelado y análisis de objetos naturales e imágenes, que permite describir objetos con alto grado de complejidad a diferentes escalas y está relacionado con parámetros físicos como la rugosidad y la luminancia (Taraschi y Florindo, 2019). La complejidad de las formas de las hojas basada en la irregularidad o su patrón fragmentado puede describirse mediante el análisis fractal para caracterizar estructuras biológicas complejas (Xue et al., 2019).

La dimensión fractal es considerado como un parámetro robusto de clasificación, sin embargo, hay pocos estudios que han utilizado las dimensiones fractales para

analizar la hoja. Esta área necesita más investigación, ya que teóricamente las dimensiones fractales pueden clasificar plantas morfológicamente complejas como las hojas de vid (Figura 3.). Incluso pueden combinarse con otros descriptores para mejorar el rendimiento (Sachar y Kumar, 2021).

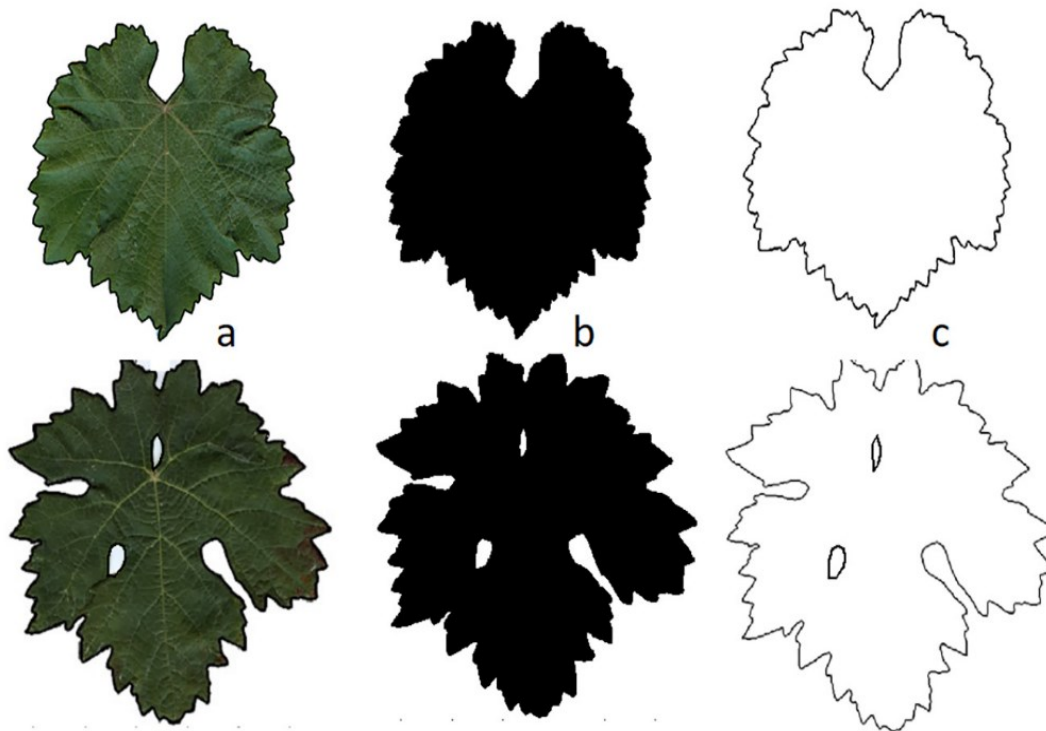


Figura 3. Dimensión fractal en hojas de vid

Donde: a: reconocimiento de borde, b: obtención de imágenes binarias, c: reconocimiento de dimensión fractal.

Fuente: Fuentes et al. (2018).

c) Factores de color

❖ Factor Color RGB

El espacio de color RGB divide cada píxel en tres colores, que representan los tres componentes primarios del color, el rojo, el verde y el azul (Figura 4). El color negro se encuentra donde los valores RGB son (0, 0, 0), mientras que el blanco se encuentra, con valores RGB de (255, 255, 255). El formato RGB es popular porque coincide con la estructura de los píxeles en los monitores y otras pantallas. Sin

embargo, el principal inconveniente es que combina el color y el brillo en el mismo espacio (Gupta y Ibaraki, 2015).

❖ Factor Color HSV

El espacio de color HSV representa los componentes separados de tono, saturación y componentes de valor de un píxel (Figura 4). El matiz representa el color del píxel, y normalmente un valor en grados de 0 a 360. A 0°, el color del matiz es rojo; al girar sobre la rueda de matiz los colores pasarán por el azul y luego por el verde, y finalmente volverán al rojo.

La saturación representa la intensidad del color, desde fuerte hasta a la escala de grises. Cuanto más cerca del centro de la sección transversal del cilindro se encuentre el valor de saturación, menos se expresará el valor del tono. Por último, la posición hacia arriba y hacia abajo del cilindro representa el valor, o la luminosidad (Gupta y Ibaraki, 2015).

Hacia la parte inferior habrá píxeles más oscuros, con píxeles más claros por encima. Cualquier posición en el cilindro HSV puede coincidir con un píxel en RGB, y la conversión entre los dos espacios de color es sencilla. Como HSV separa el color (H + S) de la intensidad (V), el espacio de color HSV separa los componentes de color de un píxel del componente de la escala de grises de una manera que el RGB no lo hace.

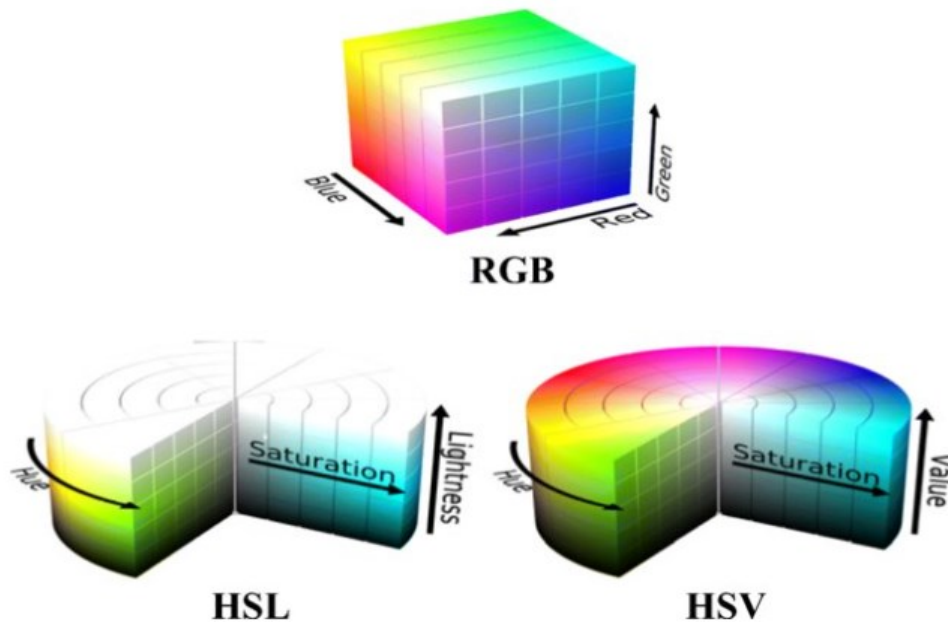
HSV es, por lo tanto, más estable durante los cambios en las condiciones de iluminación, que pueden producirse al analizar imágenes a lo largo del tiempo. Además, ofrece un enfoque más completo y práctico para el análisis de imágenes, porque separa la información sobre el color de la información sobre la intensidad (Kumar et al., 2017)

❖ Factor Color HSL

Al igual que el HSV, el espacio de color de tono, saturación y luminosidad (HSL) convierte RGB en distintos componentes de color y luminosidad (Figura 4). Aunque el valor de saturación sigue influyendo en si un color vibrante o descolorido, el valor de luminosidad asigna ahora la negrura y la blancura de un color. Para el análisis de imágenes, HSV y HSL son similares. Sin embargo, a menudo se piensa que HSL es

el espacio más intuitivo, ya que un valor alto de luminosidad producirá un píxel blanco, en lugar de un píxel cuya blancura depende de la variable adicional de saturación (Gupta y Ibaraki, 2015).

Figura 4. Factores de color RGB-HSL-HSV



Fuente: N'guessan y Ling (2018)

d) Factores de forma

La forma ha sido un área ampliamente estudiada en el campo de la identificación de hojas, ya que proporciona un gran número de características diferenciadoras. La característica de forma seleccionada debe ser invariable a la traslación, rotación, escalado y ocultación, además debe ser fiable y resistente al ruido. El conjunto de números utilizados para describir una determinada característica de forma se denomina descriptor de forma (Suchowilska y Wiwart, 2006; Zapotoczny et al., 2008).

1.1.8. Importancia del suelo para el crecimiento de plantas

Los suelos son ecosistemas complejos que realizan funciones de almacenar, transformar y reciclar los elementos esenciales para ser transferidos a las plantas. Este almacenamiento y transferencia de nutrientes es posible gracias a los intrincados procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen en la transformación de fuentes

inaccesibles de nutrientes a formas disponibles, proporcionando el entorno químico y biológico para el flujo de nutrientes a las raíces (FAO, 2022).

Además, el suelo es un recurso natural complejo que está constituido por cuatro componentes: mineral, orgánica, líquida y gaseosa que inciden en la fertilidad del suelo. El componente mineral, está dispuesta por su naturaleza y composición del suelo; la orgánica dispuesta por los microorganismos y la materia orgánica; la líquida, formada por el transporte del agua y la gaseosa por el intercambio de oxígeno.

La interacción de todos estos procesos permite que el suelo adapte una determinada fertilidad, es decir, una capacidad inherente del suelo para suministrar nutrientes y a la capacidad de la planta para utilizarlos de forma eficiente (McGrath et al., 2014). Sin embargo, factores como pH, la humedad, la salinidad, las condiciones físicas y factores abióticos pueden limitar esta fertilidad.

Por ello, para conocer el estado real del suelo es necesario realizar el análisis de laboratorio respectivo para evaluar el estado de los nutrientes del suelo, cuantificar los nutrientes disponibles para el uso de las plantas; valorar la respuesta potencial de las plantas y determinar una recomendación para el manejo adecuado de la fertilidad y crecimiento de cultivos (Fertilab, 2012).

Además, se puede complementar con el análisis químico del agua, para determinar la calidad para el riego de las plantas, la tolerancia del contenido de sales para los cultivos y los aportes de elementos nutritivos; y del análisis del material vegetal, para confirmar las deficiencias de nutrientes observadas visualmente o por instrumentos portátiles como el medidor de clorofila de la hoja.

1.1.9. La materia orgánica y el humus

La materia orgánica es el conjunto de restos vegetales, animales y microorganismos contenidos en el suelo o incorporados al él, los cuales están sometidos a procesos de constante transformación rápida como la mineralización o lenta como la humificación, en las cual hay descomposición de residuos orgánicas en formas inorgánicas simples y disponibles para las plantas.

La materia orgánica impacta sobre las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo. Mejora la estructura, la permeabilidad, aireación, retención de humedad y de

radiación solar. Favorece proliferación de organismos aeróbicos, mejora la fauna y la respiración de raíces. Aporta fósforo y micronutrientes, retiene nutrientes con la CIC, forma quelatos y favorece la absorción de fósforo (Fuentes, 2000).

Por otra parte, el humus es producto de la resíntesis de los microorganismos estables en una parte del suelo con una lenta transformación. Sus principales ventajas son capacidad de intercambio catiónico, absorción de Ca, Mg y K, limitando su lixiviación, como una reserva de nutrientes. Además, forma compuestos orgánicos minerales relacionados a las propiedades físicas y físico químicas de los suelos. Mejora la presencia de microelementos como Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo y la absorción de agua (Cerisola, 2015).

1.1.10. Las micorrizas y los Hongos Micorrizóticos Arbusculares (HMA)

Las micorrizas son resultado de simbiosis mutualistas entre hongos y las plantas que se da en la mayoría de las especies vegetales. Se forman en una fase temprana del desarrollo de la planta, colonizan las raíces y ayudan a las plantas con la absorción de nutrientes entre ellos el fósforo y micronutrientes. Sin embargo, existe un grupo particular de hongos conocidos como Hongos Micorrizóticos Arbusculares (HMA), que taxonómicamente están separados de todos demás, denominado Glomeromycota.

Las micorrizas arbusculares son el tipo de micorriza más común. El nombre "arbuscular" deriva de unas estructuras características, los arbusculos que se encuentran en las células corticales de muchas raíces de plantas. Una micorriza arbuscular tiene tres componentes importantes: la propia raíz, los hongos estructuras fúngicas dentro y entre las células de la raíz y un micelio extrarradical en el suelo (Smith y Read, 2008).

Los HMA son organismos biotróficos obligados más extendidos que están formados por el 80-90% de las especies de plantas terrestres, que incluye numerosos cultivos hortícolas importantes entre las solanáceas, las aliáceas, frutales, ornamentales y herbáceas, que pueden colonizar dos tercios de todas las plantas terrestres. Sin embargo, se han reducido las poblaciones autóctonas de HMA en el suelo por prácticas agrícolas como el monocultivo o uso excesivo de pesticidas en suelo (Parray et al., 2019).

Para que los inóculos de HMA tengan éxito en el suelo es imprescindible que se incluya: mezclas de especies de micorrizas, alto número de propágulos infecciosos, ausencia de patógenos y plagas de las plantas, presencia de bacterias beneficiosas con aditivos que

promuevan la colonización junto con la actividad de las micorrizas de las raíces y un inóculo sólido y seco de larga vida útil. Además, su propagación puede darse en las en campo abierto o en invernaderos (Rouphael et al., 2015).

La especie *Glomus iranicum* var. *tennuihypharum*, es un HMA aislado con altas concentraciones de Ca^{+2} , Na^{+} y Mg^{+2} , una baja relación C/N, bajo nivel de materia orgánica, tolera condiciones de pH y salinidad del suelo (Fernandez et al., 2017), permite una mayor absorción de nutrientes y agua por parte de las plantas, probablemente a través del aumento de la conductividad hidráulica (Kapoor et al., 2008), se adapta en diversas condiciones edafoclimáticas (Gómez-Bellot et al., 2015) y su efecto en las plantas radica en el crecimiento radicular, absorción de agua, nutrientes, vigor y el rendimiento de cultivos (Conesa et al., 2021).

1.2 Antecedentes

Rzanny et al. (2022) realizó la identificación automática de 31 especies de Poáceas desde imágenes de partes vegetativas de la planta, recolectadas durante dos años en Alemania. Se recogieron 80 observaciones con 6 imágenes cada una adquiridas por un smartphone, utilizándose cuatro algoritmos de última generación para su clasificación. Los resultados indican que la precisión en la clasificación asciende a 90.3% con imágenes adecuadas, siendo una información útil para propósitos de monitoreo.

Wang et al. (2022) estudió el reconocimiento de cultivos de soya basado en patrones de imágenes de hojas. Se realizó la fusión de características de aprendizaje profundo de las hojas de diferentes partes de la planta, es decir, de la parte inferior, media y superior. La muestra constó de 6000 hojas provenientes de 200 cultivares de soya. Los resultados indican una clasificación de 83.55% que proporciona una información discriminativa para identificar con precisión los cultivares de soya.

Islam et al. (2022) utilizó un método de aprendizaje profundo para identificar automáticamente espinacas. El experimento se realizó con 5 especies de espinacas con 3785 imágenes de ellas. Se realizó un preprocesamiento de las imágenes para luego aplicar cuatro modelos de redes neuronales para clasificar las espinacas, además, fue necesario la conversión a colores RGB, cambio de tamaño y cambio de escala junto con una categorización. Los resultados indican una precisión en la clasificación del 98%.

G. y Gopi (2021) propuso un enfoque jerárquico basado en un clasificador el análisis discriminante lineal del núcleo y uso de la regresión. Los pasos seguidos son la detección de las superficies de la hoja objetivo y la detección de los bordes de la hoja objetivo. el método propuesto usó 200 imágenes de hojas de 4 variedades diferentes de girasol. Los resultados indican una mayor precisión de la segmentación en el cultivo de girasol.

Vizcarra et al. (2021) realizó un censo forestal en la Amazonía peruana de 59 441 muestras de hojas diez de las especies de árboles maderables en peligro de extinción, con el objetivo de clasificarlas automáticamente. Se evaluó utilizó métodos de aprendizaje profundo con el uso comparativo de cuatro modelos de clasificación de hojas por algoritmos específicos. Los resultados muestran una precisión del 96.64% y sugieren que las venas junto con la forma de las hojas son las características morfológicas más fiables.

Tavakoli et al. (2021) propuso un método automático de discriminación basado en redes neuronales convolucionales para clasificar 12 cultivares diferentes de vainitas (4 blancas, 4 rojas, 4 pintas) en Irán. Todas se evaluaron por la clasificación de especies, por cultivares de la misma especie y con cultivares de diferentes especies a partir de imágenes del haz y envés de las hojas. Los resultados indican que el algoritmo de clasificación en el envés de la hoja es superior con una precisión media de 90%.

Min et al. (2018) utilizó el análisis morfométrico digital para estudiar la variabilidad morfológica de las hojas de 59 accesiones de uva silvestres chinas. Se evaluó 600 hojas maduras provenientes de 19 países chinos, realizando un análisis global de los contornos de las hojas y la posición de los lóbulos para describir las diferencias. Las hojas fueron escaneadas y analizadas utilizando descriptores y análisis de componentes principales. Los resultados aportan información suficiente para la selección de acciones más adecuadas para programas de mejora genética.

Gao y Lin (2018) propuso un método para segmentar las imágenes de hojas de plantas medicinales con fondos complejos. Se tomó fotos directamente de las hojas en las ramas con el fin de identificarlas con la máquina y proteger a la planta de la recolección manual de las hojas, sin embargo, en las imágenes se presentó dificultades con ramas cruzadas. Se usó 440 imágenes de hojas de 88 especies de plantas recolectadas durante un año en China. El algoritmo desarrollado ayudó a superar los obstáculos segmentando las imágenes con fondos complejos, no limitándose a las hojas sino a otro tipo de imágenes.

De Luna et al. (2017) realizó el procesamiento de imágenes para extraer características relevantes relacionadas con las hojas a través de redes neuronales artificiales en Filipinas. Se recolectó 12 hojas de plantas medicinales de las cuales se extrajo sus principales características morfológicas durante el procesamiento de imágenes. Se utilizó 600 imágenes procedentes de 50 imágenes por planta herbácea. Los resultados indican una precisión del 98.16% para todo el conjunto de datos.

Ferreira et al. (2016) presentó una automatización en la clasificación de germoplasma de Capsicum en Brasil para una gestión eficiente de las colecciones. Su objetivo fue verificar el potencial de clasificación de accesiones de Capsicum con respecto a la especie basándose en descriptores morfológicos como la forma de las hojas. Se evaluó 564 plantas de 47 accesiones de ajíes. Los resultados indican una precisión del 100% en la clasificación del germoplasma.

Zhang et al. (2016) utilizó las nervaduras principales de las hojas para estimar las ubicaciones y direcciones de estas. Utilizó las características lumínicas, así como un algoritmo de segmentación basado en la dirección tangencial similar, es decir, la dirección de las hojas para calcular su distribución. Los resultados a partir de 12 tipos de hojas demostraron la identificación automática de hojas individuales. Este sistema es útil para la distinción de malas hierbas de los cultivos y en el análisis de hojas para combatir plagas y enfermedades.

Dyrmann et al. (2016) presenta un método para reconocer especies vegetales en imágenes en color mediante una red neuronal convolucional. Se utilizaron 10,413 imágenes de 22 especies de plantas diferentes en las primeras etapas de crecimiento, que provienen de variaciones respecto a iluminación y tipo de suelo. Las imágenes fueron tomadas en condiciones controladas. Las imágenes de berro, remolacha azucarera y cebada fueron clasificadas correctamente. Los resultados indican una precisión en la clasificación del 86.2%

Oncevay et al. (2015) planteó un procedimiento para la identificación de plantas mediante atributos visuales o patrones extraídos de imágenes digitales. El método combina tres atributos visuales de las hojas: forma de límite, la textura y el color. Se utilizaron redes complejas y técnicas de dimensión fractal multiescala para caracterizar los límites de las hojas, descriptores de Haralick para la textura y se calcularon los momentos de color. Los

experimentos se realizaron con las hojas de 115 especies, provenientes del conjunto de datos ImageCLEF 2012. Los resultados indicaron una precisión del 90.41% en la clasificación de hojas.

Larese et al. (2014) propuso un procedimiento automático de bajo costo para clasificar especies de tres variedades de soya basados en la caracterización y análisis de la red de venación de las hojas. El objetivo fue reconocer las 3 leguminosas y distinguir los cultivares de soya. Se analizaron 866 imágenes de hojas en color adquiridas con un escáner plano estándar. Se implementó 3 clasificadores automáticos los cuales resaltan los patrones de características de las venas para cada especie y cultivar.

Pandolfi et al. (2009) evaluó la diversidad de 17 accesiones de té pertenecientes a cultivares comerciales con futuro prometedor en Vietnam. Se analizó 14 parámetros morfológicos de hojas mediante el análisis de imágenes digital. Los resultados fueron el reconocimiento de la diversidad de los morfo tipos de té sobre la base de una selección morfológica de las hojas, además, se indica que el análisis de imágenes es una técnica económica frente a los métodos genéticos para la discriminación de cultivares.

Respecto al uso de hongos micorrizóticos arbusculares (HMA); Toubali et al. (2022) utilizó hongos micorrizóticos arbusculares (HMA) solos, en consorcio y en combinación con compost bajo dos tratamientos de agua (riego normal y estrés por sequía) para el cultivo de quinua. Los resultados indican que la aplicación HMA revirtió las actividades fisiológicas a niveles normales y reforzó la adaptabilidad de la quinua a la escasez de agua en comparación con las plantas no tratadas. La fertilidad del suelo después de la cosecha obtuvo aumento significativo en el contenido de fósforo total (47%) y de materia orgánica (200%).

Alarcón et al. (2020) evaluó el efecto de la inoculación con el hongo micorriza arbuscular *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* sobre el desarrollo radicular y el rendimiento de plantas de melón cultivadas en suelo bajo agricultura intensiva durante cuatro meses. Los resultados indican que las plantas de melón inoculadas tuvieron un mayor porcentaje de colonización, que alcanzó el 75% al final del experimento; además de un mayor volumen de raíces y una mayor proliferación de raíces laterales.

Ortuño et al. (2018) evaluó un sustrato alternativo, de estiércol compostado, para producir plantas ornamentales en macetas y lo complementó con la inoculación de *Glomus*



iranicum var. *tenuihypharum* sp. *Nova*. Los resultados indican que las micorrizas redujeron el Na y aumentaron el fósforo, especialmente cuando el sustrato estaba bien regado. Además, las plantas en compost tuvieron los mayores contenidos de Cl, K, Na, P y Zn en hoja.

Rouphael et al. (2015) realizó una revisión sobre las funciones bioestimulantes de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA), concluyendo los máximos beneficios sólo se conseguirán mediante la adopción de prácticas beneficiosas de gestión agrícola (por ejemplo, el uso de fertilizantes orgánicos o la exclusión de algunos biocidas), mediante la inoculación con cepas eficientes de HMA y también mediante una selección precisa de las combinaciones huésped/hongo.

Vicente-Sánchez et al. (2014) evaluó el efecto de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* sp. *nova* sobre el rendimiento fisiológico y la producción de plantas de lechuga en condiciones de invernadero. Sus resultados destacan por el efecto de *Glomus* en el alivio del estrés sobre el crecimiento de la planta, la productividad, fotosíntesis neta y la eficiencia en el uso del agua frente a las plantas no micorrizadas, Además, la micorrización redujo significativamente la absorción de Na por las plantas.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

El planeta alberga cerca de trescientas cincuenta mil especies de plantas descritas que se concentran en áreas específicas de riqueza inusual. Los científicos han determinado que en el mundo la biodiversidad está distribuida de manera des uniforme, donde solo un número reducido de países cuenta con áreas de concentración excepcional de especies vegetales de alto endemismo pero que están amenazadas de destrucción por las actividades antropogénicas como la degradación de los hábitats.

En la actualidad existen 17 países megadiversos, entre ellos el Perú, y 36 áreas calientes que albergan cerca del 50% de especies vegetales del mundo que se conservan en bancos de germoplasma. La conservación del germoplasma puede adoptar muchas formas, pero generalmente es “in situ” en zonas naturales o gestionadas, o “ex situ” en bancos de semillas, depósitos de tejidos o jardines botánicos. Estos bancos permiten preservar una especie, una población, un híbrido, un cultivar o una variedad autóctona.

El Perú cuenta con 46 bancos de germoplasma distribuidos al largo del país con 15 000 accesiones de plantas que aún no han sido estudiadas en su totalidad. De otro lado, la región Puno cuenta con la mayor biodiversidad de accesiones y variedades, de las cuales solo 26 accesiones poseen diferencias genéticas corroboradas. Las accesiones representan individuos autóctonos de una población, mientras que las variedades muestran características similares y hereditarias.

El mantenimiento del material depositado en los bancos de germoplasma es continuo, es decir, se siembran y cosechan las especies para mantener sus características propias. En

algunos casos las semillas se preservan por periodos cortos de 5 años y otros por periodos largos mayores a 15 años. Por eso, es indispensable contar con suelos de buena fertilidad para que las plantas puedan expresar todo el potencial de todas sus características fenológicas, que redundara sobre su productividad.

Para diferenciar las variedades y accesiones se emplean métodos visuales, taxonómicos y de análisis genético, pero el reconocimiento visual resulta difícil por las semejanzas fenotípicas entre accesiones, la caracterización taxonómica requiere el empleo de descriptores complejos, tomando mucho tiempo y la identificación genética demanda condiciones especiales de equipamiento y laboratorios, por ello es de interés buscar métodos que permitan una rápida, precisa y menos costosa diferenciación del cultivo.

Por tanto, la aplicación del análisis de imágenes permitiría reconocer, diferenciar y cuantificar diversos tipos de imagen con el objetivo de establecer diferencias o similitudes con precisión, utilizando para su estudio diverso órganos de la planta, siendo las hojas, los preferidos debido a su presencia durante todo el ciclo vegetativo de la planta. Además, el análisis de imágenes es un tipo de datos utilizados por los científicos de las plantas que se almacenan en bases de datos especializadas.

2.2 Enunciados del problema

2.2.1 Enunciado general

¿Será que a través de las características de la hoja se diferencien las variedades y accesiones de cañihua y que la fertilidad del suelo afecte a la planta?

2.2.2 Enunciados específicos

- a) ¿Qué características presentan las hojas en las variedades y accesiones de cañihua respecto a características geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma?
- b) ¿Existirán diferencias en las variedades y accesiones de cañihua por la influencia de la fertilidad del suelo?

2.3 Justificación

Recientemente los cultivos andinos como la cañihua, han tomado mucha importancia debido a las propiedades nutricionales que posee el grano sobre todo en contenido de

proteína y presencia de aminoácidos. Sin embargo, su cultivo y biodiversidad no es muy conocida ni valorada. La gran cantidad de accesiones que presenta la región Puno permite contar con bancos de germoplasma especializados con la finalidad de proteger y preservar esta biodiversidad y promover el desarrollo de nuevos cultivares adaptados al cambio climático en los programas de fitomejoramiento.

El estudio de la biodiversidad de las accesiones permite disponer de un método económico, rápido y preciso de reconocimiento de patrones específicos en las hojas del cultivo, aplicado a laboratorio con el objetivo de diferenciarlas entre sí que permitiría a corto plazo una automatización confiable del proceso. Además, se promovería la diferenciación de las accesiones en campo, la revaloración del potencial agronómico e industrial de la cañihua, la preservación de la biodiversidad regional y una cultura de investigación en el banco de germoplasma para los estudiantes y académicos del país.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Evaluar las características geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma de las hojas y analizar la respuesta de la planta a la fertilidad del suelo.

2.4.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar y evaluar las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma de las hojas en las variedades y accesiones de cañihua.
- b) Analizar la respuesta de las variedades y accesiones de cañihua a la fertilidad del suelo.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

Las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y forma de las hojas de cañihua permite el agrupamiento de variedades y accesiones, y las plantas responden a la fertilidad del suelo.



2.5.2 Hipótesis específicas

- a) Las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma diferencian a las variedades y accesiones de cañihua.
- b) La fertilidad del suelo influye a nivel vegetativo y radicular en las variedades y accesiones de cañihua.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

El experimento se realizó en el vivero de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional del Altiplano (latitud 15°41'4.59"S, longitud 70° 4'32.95"O y altitud 3815 m), provincia y departamento de Puno, con una temperatura mínima anual de -4 °C, máxima anual de 18 °C y una temperatura media anual de 8.4°C. Además, tiene un promedio 696 mm de agua de lluvia y humedad relativa es 40-55%.

3.2 Población

La población está conformada por 380 accesiones y tres variedades de cañihua (Pérez, et al., 2016; DGPA, 2018).

3.3 Muestra

La muestra está compuesta por tres variedades comerciales y 23 accesiones de cañihua; procedentes del Banco de germoplasma “José Luis Lescano” Camacani durante la campaña agrícola 2021-2022, las cuales fueron seleccionadas por el criterio de conveniencia y por la disponibilidad de semillas; además que representa el 10% de la población (Tabla 4). La siembra se realizó el 15 de noviembre del 2021 y continuo hasta el 15 de marzo del 2022.

Tabla 4

Accesiones y variedades de cañihua utilizadas en la investigación

N° de accesión	Código	N° de accesión	Código
1	03-21-02	14	03-21-204
2	03-21-03	15	03-21-215
3	03-21-07	16	03-21-218
4	03-21-23	17	03-21-231
5	03-21-26	18	03-21-246
6	03-21-37	19	03-21-267
7	03-21-64	20	03-21-296
8	03-21-117	21	03-21-301
9	03-21-124	22	03-21-315
10	03-21-140	23	Puka
11	03-21-146	Variedad 1	Inia-Illpa
12	03-21-156	Variedad 2	Cupi
13	03-21-196	Variedad 3	Ramis

3.4 Método de investigación

La metodología de investigación comprendió dos fases: descriptiva y experimental. La siembra se realizó bajo condiciones de vivero con diseño tipo látice, con tres variedades y 23 accesiones de cañihua, constituido por un testigo y un tratamiento con 5 repeticiones, haciendo un total de 156 unidades experimentales. Para la parte descriptiva, se recolectaron 20 hojas al azar por planta donde se evaluaron las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y forma del haz y envés de las hojas. Para la parte experimental se aplicó 100 ml de micorriza comercial Mycoup® por maceta y se midió la altura de planta, diámetro del cuello de la planta y contenido de clorofila. Para completar el estudio se realizaron análisis de suelo al inicio y final del experimento, junto con análisis de agua y material vegetal al final del experimento.

3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1. Caracterizar y evaluar las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma de las hojas en las variedades y accesiones de cañihua.

La metodología utilizada para caracterizar las variedades y accesiones de cañihua por el análisis de imagen en hojas fue descriptiva, en base a la adquisición, preprocesamiento y la segmentación de variables de interés de las imágenes.

a) Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos

Características geométricas: son los descriptores morfológicos de hojas referido al área (A), es el número de píxeles en la región del órgano; perímetro (P), es la suma de las distancias entre cada par de píxeles contiguos alrededor del borde del órgano; eje mayor (M), es el segmento de línea que une la base y la punta de la hoja; y eje menor (Me), es la anchura máxima perpendicular al eje mayor.

Dimensión fractal: permite describir objetos con alto grado de complejidad a diferentes escalas.

Color: representa el color en varias escalas: RGB con rojo, verde y azul; HSV que representa a matiz, saturación y valor; HSL simboliza a tono, saturación y luminosidad, propuesto por (Bettinger et al., 2020; Kalist et al., 2015; Chernov et al., 2015; Smith, 1978)

$$CH = \frac{1}{6} \left(\frac{\text{color } \bar{G} - \text{color } \bar{B}}{(R-G) - (R-B) - (G-B)} \right); CS = 1 - \frac{\text{minimo}(RGB)}{\text{media}(RGB)}; CL = \text{Media}(\bar{R}\bar{G}\bar{B})$$

$$H = \text{atand} \left(3^{\frac{0.5}{2}} (\text{color } \bar{G} - \text{color } \bar{B}) \right); V = \text{Media}(\bar{R}\bar{G}\bar{B})$$

$$S = 2 * \left[\left(\text{color } \bar{R} - \left(\frac{\text{color } \bar{G} - \text{color } \bar{B}}{2} \right) \right)^2 + \left(3^{\frac{0.5}{2}} * \text{color } \bar{G} - \text{color } \bar{B} \right)^2 \right]^{0.5}$$

Factores de forma: proporciona un gran número de características diferenciadoras, de la combinación de los descriptores morfológicos (área, perímetro, eje mayor y eje

menor); variando desde Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10, los cuales fueron propuestos por (Zapotoczny et al., 2008; Suchowilska y Wiwart, 2006)

$$Sh_1 = 2 \left(\sqrt{\frac{A}{\pi}} \right); Sh_2 = \frac{P}{\pi}; Sh_3 = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}; Sh_4 = \frac{4\pi A}{P^2}; Sh_5 = \frac{M}{A};$$

$$Sh_6 = \frac{A}{M^3}; Sh_7 = \frac{4A}{\pi M^2}; Sh_8 = \frac{4A}{\pi M m}; Sh_9 = \frac{P - P\sqrt{P^2 - 4\pi A}}{P + P\sqrt{P^2 - 4\pi A}}; Sh_{10} = \frac{P^2}{A}$$

b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros

En el vivero

Se seleccionó semillas viables de 23 accesiones y 3 variedades (Tabla 4), que fueron sembradas de forma directa el 15 de noviembre del 2021 en bolsas Protek vivero con dimensiones de 10 x12 x 3.5 pulgadas y un volumen de 4 L, que fueron etiquetadas. Se preparó un sustrato en relación 3:1 de humus con tierra de chacra solarizada dos meses antes, ubicándose luego al azar en el vivero de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial en un área de 30 m² en forma rectangular de 6 x 26, con un total 156 individuos.

Después de 7 días se inició la emergencia de las plántulas, sin embargo, los pájaros generaron comeduras de los brotes tiernos, por ello se cubrieron todas las plantas con malla rachel negra al 50% hasta cumplir los 20 días. Además, se realizó control preventivo de plagas con tierra de diatomeas a razón de 10 gr/30 m². Los riegos fueron de tres veces por semana, alargándose luego a dos veces por semana.

Los monitoreos de sanidad y vitalidad de las plantas fueron semanales. A los 30 días de la siembra se procedió a la selección y recolección de 20 hojas al azar con el uso de tijeras y pinzas por cada variedad y accesión. Cada una de las hojas fue limpiada y almacenadas en papel tisú envuelto con bolsas de papel para su adecuada conservación por 24 horas y su posterior procesamiento en el laboratorio.

En el laboratorio

Adquisición de imágenes

Se utilizó una cámara Edmund Optics-2323 Color USB 3.0 con una resolución de 1920 x 1200 píxeles y campo de visión de 9.22 x 5.76 mm. Se registró imágenes del haz y envés de las hojas de cañihua desde una vista superior, colocados en un portaobjetos de vidrio, manipuladas con pinzas. La cámara se montó en un soporte estable de brazo con movimiento horizontal y vertical fácil (Figura 5).

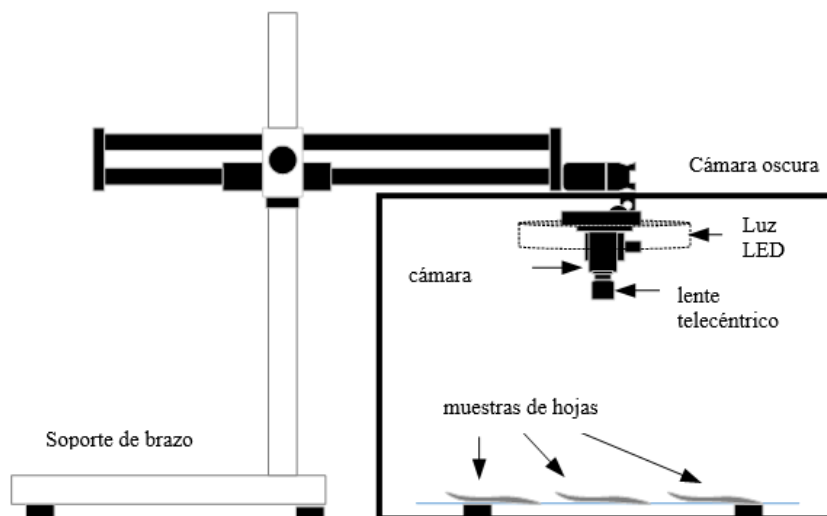


Figura 5. Sistema de adquisición de imágenes

Además, en la cámara se montó una lente de video parcialmente telecéntrica (55 mm, Edmund Optics, EE. UU.) y alrededor de ésta una fuente de iluminación circular Led, ambos cubiertos con un cubo oscuro, cubierto tela negra “pana” para reducir la influencia de la luz y crear contraste con la imagen. Antes de cada adquisición se realizó la calibración automática del color con el software uEye Cockpit.

Manejo de la cámara

El manejo de la cámara se realizó mediante el software IDS Camera Manager, conectado al puerto USB de la computadora, donde se monitoreo que la temperatura de trabajo sea menor a 50 °C. Las imágenes fueron capturadas a su máxima resolución de 1920 x 1200 píxeles con el modo colores óptimos del software uEyeCockpit, con una distancia focal de 40 mm. Las fotografías se obtuvieron en formato png en la escala de colores red (R), Green (G) y blue (RGB). El número de

fotografías por accesión y variedad fue de 40, captadas con fondo negro siendo en total 1040 imágenes obtenidas.

Segmentación de imágenes

Se extrajeron las características geométricas, dimensión fractal, escalas de color y factores de forma usando el software Matlab® 2021 con la caja de herramientas de procesamiento de imágenes (Figura 6). Las imágenes en color se transformaron de un formato RGB a un formato en blanco y negro. La distancia de separación del nivel de gris entre el fondo y los objetos facilitó la segmentación de la imagen. El valor umbral se genera de acuerdo con los resultados del análisis del histograma y fue constante para las mismas condiciones ambientales.

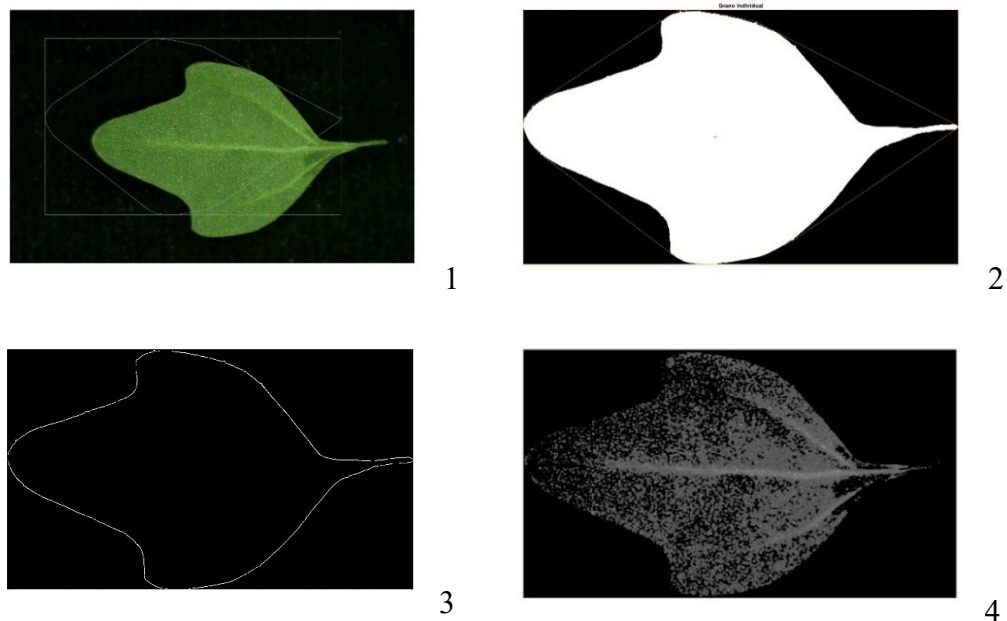


Figura 6. Esquema de captura de fotos de hojas de cañihua

Donde: 1 (imagen original), 2 (imagen segmentada en blanco y negro), 3 (perímetro de la imagen), 4 (imagen en la de grises).

c) Aplicación de análisis multivariado

Se utilizó el método de análisis de componentes principales (PCA) para analizar el conjunto de datos de 24 mediciones promedio obtenidas de tres variedades y 27 accesiones de cañihua, a través del software estadístico Statgraphics Centurion® 18. Las 24 medidas promediadas se componen de cuatro dimensiones geométricas, una

dimensión fractal, seis factores de color y diez factores de forma. Los datos se organizaron en una matriz multivariable de 26 por 24, en la cual se dividió el reconocimiento por haz y envés de las hojas.

3.5.2. Analizar la respuesta de las variedades y accesiones de cañihua a la fertilidad del suelo

La metodología utilizada para analizar la respuesta de las variedades y accesiones de cañihua fue de tipo experimental, con un testigo y un tratamiento. Se inoculó 100 ml de Mycoup® a plántulas de cañihua 30 días después de la siembra, evaluándose luego a los 60 días: altura de planta, diámetro tallo y contenido de clorofila; complementándose al final del experimento con análisis de suelo, agua y hojas.

a) Descripción de variables analizadas en los objetivos específicos

- Altura de planta: es la medida desde el cuello de la planta hasta la altura máxima, representada como la línea roja del lado derecho y con la letra h (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

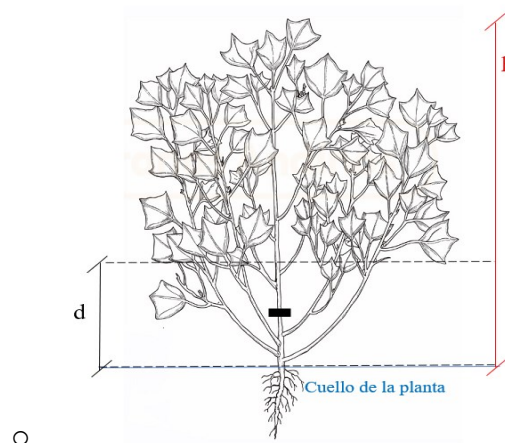


Figura 7. Altura de planta (h) y diámetro de tallo (d)

- Diámetro de tallo central: es la medida de la parte media del tercio inferior de la planta, representada por la línea punteada negra y la letra d (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
- Contenido de clorofila: es la medida tomada del haz de la hoja, siendo un indicador efectivo del nitrógeno como componente de la clorofila (Figura 8).

Además, se complementó con los siguientes análisis:

- Análisis de suelo: al inicio y al final del experimento para la detección de parámetros fisicoquímicos del suelo.
- Análisis de agua: al inicio del experimento para detectar los parámetros fisicoquímicos del agua.
- Análisis de material vegetal: al final del experimento para la detección de macro y microelementos del material vegetal.



Figura 8. Medidor de clorofila AtLeaf CHL PLUS

Fuente: <https://www.atleaf.com/>

b) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, instrumentos, insumos, entre otros

En vivero

A los 30 días después de la siembra se aplicó los hongos micorrizóticos arbusculares provenientes del laboratorio Symborg con su marca comercial Mycoup® a dosis de 3 kg/ha o 9g/m². Se diluyó 270 gr de producto comercial en 9 litros de agua, agregando a cada bolsa de vivero 100 ml. Luego, a los 60 días se inició con las evaluaciones con 10 plantas por cada accesión y variedad.

Para la evaluación de la altura de la planta se utilizó una regla, tomándose la medida de cada planta desde el cuello hasta su altura máxima. En el caso del diámetro del tallo se realizó la medición en la parte media del tercio inferior de la planta con un vernier digital Trupper y la evaluación de clorofila a través del medidor manual de clorofila atLEAF CHL PLUS, colocando una hoja en la ranura.

Antes del establecimiento del experimento, en la preparación del sustrato se seleccionó una muestra global de suelo. Luego a los 90 días de la siembra se procedió a seleccionar nueve submuestras de suelo por las variedades y accesiones sobresalientes. Una vez obtenidas las submuestras, se las mezcló, se realizó el cuarteo y se las etiquetó. Todas las muestras de suelo se enviaron al laboratorio para su análisis.

Las muestras del material vegetal dependieron de la edad fisiológica de la planta. Se seleccionó 50 g de hojas maduras por cada variedad y accesión, evitando las hojas tiernas y viejas, así como las dañadas por enfermedad o plagas; para evaluar el estado nutricional de las plantas. Se seleccionaron nueve submuestras que se enviaron al laboratorio para su análisis; así como una muestra de agua para evaluar sus características.

c) Aplicación de prueba estadística

Se utilizó una prueba correlacional de las mediciones de planta con los análisis del suelo, además de una Desviación del Óptimo Porcentual (DOP) para el análisis del material vegetal.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterizar y evaluar las mediciones geométricas, dimensión fractal, factores de color y factores de forma de las hojas en las variedades y accesiones de cañihua.

Se resumen el promedio de las cuatro medidas geométricas: área (A), perímetro (P), eje mayor (M), eje menor (Me); una dimensión fractal (DF); tres factores de color RGB, HSL, HSV: rojo(R), verde (G), azul (B); tono (CH), saturación (CS), luminosidad (CL), matiz (H), saturación (S) y valor (V); y diez factores de forma (Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10) de las tres variedades y 23 accesiones de hojas de cañihua (

Las mediciones geométricas Ar, P, M, Me muestran medidas menores a 0.04 en la media y 0.02 en la desviación estándar, apreciándose que la diferencias son minúsculas para el haz y envés de la hoja. El ancho y largo corresponde al eje mayor (M) y eje menor (Me) con 1.7 cm y 1.31 cm respectivamente. Estas mediciones difieren de Apaza (2010) quien obtuvo mediciones de 3.0 a 3.5 cm de largo y 2.5 a 2.8 de ancho; las cuales serían atribuibles a la edad de la planta, mientras que una correspondería a la etapa fenológica de ramificación, la otra pertenecería a la etapa de madurez de la planta. En ambos casos estas mediciones están relacionados con procesos fisiológicos de crecimiento de las plantas en condiciones de altitud (Flexas et al., 2022).

La dimensión fractal no mostró variaciones para el haz y envés de las hojas. Esto se explicaría porque los bordes de la hoja no presentan una complejidad como en otras especies vegetales (Fuentes et al., 2018), sino al contrario presenta las hojas con bordes regulares en forma romboidal, triangular y ancha ovada (Tapia, et al., 2019, Apaza, 2010). Al respecto Sachar y Kumar, (2021) y Du et al., (2013) creen que la dimensión fractal es

una medida útil para la complejidad de la forma de la hoja con características invariantes frente a la rotación de la hoja y es un parámetro robusto para el análisis de hojas.

En los factores de color RGB destaca el color G (verde), que estaría relacionado con el contenido de clorofila en las hojas. Para Zhou et al., (2019) la clorofila se ve afectada por el contenido de nitrógeno y el suministro de agua que son elementos que se restringen y promueven mutuamente. Niveles altos y bajos de Nitrógeno no pueden reconocerse, mientras que un nivel medio si es posible reconocerlo por datos de imagen. Además, la variación de la hidratación de la hoja puede afectar drásticamente los colores originales (Carranza-Rojas et al., 2017).

Respecto al factor color HSL destaca el parámetro CL (luminosidad), que se relacionaría con las condiciones ambientales del vivero protegidos de la luz solar directa y la variación del contenido de clorofila, por lo que el haz de la hoja tiende a ser más claro mientras que el envés a más oscuro. Para Gupta y Ibaraki, (2015) la luminosidad se relaciona a la claridad u oscuridad de un color y los métodos basados en el índice de color sufren las variaciones de sombra y de luz (Abdalla et al., 2019).

En relación con el factor HSV destaca el parámetro S (saturación), que correspondería a la intensidad del color, siendo mayor en el haz que en el envés de la hoja. El uso de este parámetro permite identificar el color tal como lo ve un ser humano por agrupación de tonalidades. Para Bargshady et al., (2020) el color HSV es más adecuado para la extracción de características, mientras que para Yanikoglu et al., (2014) y Caglayan et al, (2013) las hojas que pertenecen a la misma especie pueden presentar una amplia gama de colores.

En los factores de forma (Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10) existen minúsculas diferencias entre el haz y envés. Al respecto Waldchen et al., (2018) indica que los individuos de una misma especie comparten una combinación de características de identificación relevantes, pero que es necesario un cierto grado de generalización para asignar características a un individuo específico.

Tabla 5).

El área (Ar) varió entre 1.12 y 2.32 cm² con una media de 1.64 cm² y una desviación de 0.35 en el haz. Para el envés, el área media, fue entre 1.19 y 2.31 cm², con una media fue de 1.62 cm² y una desviación de 0.33. La media en el haz y envés de las variables eje mayor (M), eje menor (Me), perímetro (P) y dimensión fractal (DF) fue de 1.70, 1.31, 5.91 y 1.20 respectivamente; mientras que la desviación para las mismas variables fue 0.15, 0.15, 0.63 y 0.02.

En el factor de color RGB destaco el verde (G), con valores entre 129.22 y 144.08 con una media de 137.49 y una desviación de 3.71 para el haz: mientras que para el envés vario entre 127.61 y 144.64 con una media de 137.16 y una desviación de 4.41. Respecto al factor color HSL sobresalió la luminosidad (CL) con valores de 95.53 a 102.75 con una media de 98.71 y desviación de 2.08 en el haz; mientras que en el envés cambió de 94.84 a 104.51 con una media de 99.05 y una desviación de 2.50. Finalmente, en el factor color HSV resaltó la saturación (S) con valores de 108.75 a 157.34 con una media de 129.79 y desviación de 11.72 en el haz; mientras que en el envés cambió de 104.65 a 148.29 con una media de 127.00 y de 11.56 como desviación estándar.

En relación con los factores de forma (Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10) del haz y envés de la hoja existen diferencias entre los valores máximos y mínimos de cada uno de ellos, destacando el Sh10 con valores entre 19.70 a 24.21 para el haz y 19.76 a 24.16 para el envés. Sin embargo, respecto a la media y desviación estándar Sh3, Sh4, Sh7, Sh9 presentan valores iguales, en el caso de Sh1, Sh2, Sh5, Sh6, Sh8 presentan una diferencia de apenas 0.01, mientras que en Sh10 la media difiere en 0.07 y 0.03 en la desviación estándar.

Las mediciones geométricas Ar, P, M, Me muestran medidas menores a 0.04 en la media y 0.02 en la desviación estándar, apreciándose que la diferencias son minúsculas para el

haz y envés de la hoja. El ancho y largo corresponde al eje mayor (M) y eje menor (Me) con 1.7 cm y 1.31 cm respectivamente. Estas mediciones difieren de Apaza (2010) quien obtuvo mediciones de 3.0 a 3.5 cm de largo y 2.5 a 2.8 de ancho; las cuales serían atribuibles a la edad de la planta, mientras que una correspondería a la etapa fenológica de ramificación, la otra pertenecería a la etapa de madurez de la planta. En ambos casos estas mediciones están relacionados con procesos fisiológicos de crecimiento de las plantas en condiciones de altitud (Flexas et al., 2022).

La dimensión fractal no mostró variaciones para el haz y envés de las hojas. Esto se explicaría porque los bordes de la hoja no presentan una complejidad como en otras especies vegetales (Fuentes et al., 2018), sino al contrario presenta las hojas con bordes regulares en forma romboidal, triangular y ancha ovada (Tapia, et al., 2019, Apaza, 2010). Al respecto Sachar y Kumar, (2021) y Du et al., (2013) creen que la dimensión fractal es una medida útil para la complejidad de la forma de la hoja con características invariantes frente a la rotación de la hoja y es un parámetro robusto para el análisis de hojas.

En los factores de color RGB destaca el color G (verde), que estaría relacionado con el contenido de clorofila en las hojas. Para Zhou et al., (2019) la clorofila se ve afectada por el contenido de nitrógeno y el suministro de agua que son elementos que se restringen y promueven mutuamente. Niveles altos y bajos de Nitrógeno no pueden reconocerse, mientras que un nivel medio si es posible reconocerlo por datos de imagen. Además, la variación de la hidratación de la hoja puede afectar drásticamente los colores originales (Carranza-Rojas et al., 2017).

Respecto al factor color HSL destaca el parámetro CL (luminosidad), que se relacionaría con las condiciones ambientales del vivero protegidos de la luz solar directa y la variación del contenido de clorofila, por lo que el haz de la hoja tiende a ser más claro mientras que el envés a más oscuro. Para Gupta y Ibaraki, (2015) la luminosidad se relaciona a la claridad u oscuridad de un color y los métodos basados en el índice de color sufren las variaciones de sombra y de luz (Abdalla et al., 2019).

En relación con el factor HSV destaca el parámetro S (saturación), que correspondería a la intensidad del color, siendo mayor en el haz que en el envés de la hoja. El uso de este parámetro permite identificar el color tal como lo ve un ser humano por agrupación de tonalidades. Para Bargshady et al., (2020) el color HSV es más adecuado para la extracción

de características, mientras que para Yanikoglu et al., (2014) y Caglayan et al, (2013) las hojas que pertenecen a la misma especie pueden presentar una amplia gama de colores.

En los factores de forma (Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10) existen minúsculas diferencias entre el haz y envés. Al respecto Waldchen et al., (2018) indica que los individuos de una misma especie comparten una combinación de características de identificación relevantes, pero que es necesario un cierto grado de generalización para asignar características a un individuo específico.

Tabla 5

Valores mínimos, máximos, promedio y desviación estándar del haz y envés de la hoja

	Haz				Envés			
	Min	Max	Promedio	Desviación	Min	Max	Promedio	Desviación
Ar (cm²)	1,12	2,32	1,64	0,35	1,19	2,31	1,62	0,33
M (cm)	1,40	1,98	1,70	0,16	1,42	1,97	1,69	0,15
Me (cm)	1,09	1,63	1,31	0,16	1,08	1,63	1,31	0,15
P (cm)	4,86	7,11	5,95	0,64	4,83	7,12	5,91	0,63
DF	1,17	1,24	1,20	0,02	1,18	1,24	1,20	0,02
R	90,18	100,63	95,79	3,07	88,69	103,57	95,82	3,52
G	129,22	144,08	137,49	3,71	127,61	144,64	137,16	4,41
B	53,46	68,39	62,86	4,14	57,00	69,86	64,18	3,84
CH	90,23	97,99	93,81	2,07	90,21	99,57	94,25	2,41
CS	0,30	0,45	0,36	0,04	0,28	0,42	0,35	0,04
CL	95,53	102,75	98,71	2,08	94,84	104,51	99,05	2,50
H	-86,23	46,35	-61,25	36,99	-87,32	33,94	-67,44	33,21

S	108,75	157,34	129,79	11,72	104,65	148,29	127,00	11,56
V	95,53	102,75	98,71	2,08	94,84	104,51	99,05	2,50
sh1	1,19	1,71	1,43	0,15	1,22	1,70	1,42	0,14
sh2	1,55	2,26	1,89	0,20	1,54	2,27	1,88	0,20
sh3	1,25	1,39	1,33	0,04	1,25	1,38	1,33	0,04
sh4	0,52	0,65	0,57	0,03	0,53	0,65	0,57	0,03
sh5	0,87	1,33	1,10	0,14	0,87	1,34	1,11	0,13
sh6	0,27	0,42	0,33	0,04	0,27	0,42	0,34	0,03
sh7	0,62	0,77	0,71	0,05	0,62	0,78	0,71	0,05
sh8	0,89	0,94	0,91	0,01	0,90	0,94	0,92	0,01
sh9	-0,65	-0,47	-0,58	0,04	-0,65	-0,47	-0,58	0,04
sh10	19,70	24,21	22,28	1,23	19,76	24,16	22,21	1,26

Donde: Ar: área, P: perímetro, M: eje mayor, Me: eje menor; DF: dimensión fractal; R: rojo, G: verde, B: azul, CH: matiz, CS: saturación, CV: valor, H: tono, S: saturación, L: luminosidad; Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10 son factores de forma.

4.1.1. Análisis de componentes principales del haz de la hoja

Se constituyó una matriz de 24 por 26 compuesta por la media de 24 mediciones: 4 características geométricas (Ar, M, Me, P), 1 dimensión fractal (DF), 9 factores de color (RGB, HSL, HSV y 10 factores de forma (Sh1-Sh10) obtenidos a partir de 3 variedades y 23 accesiones de cañihua. Luego se llevó a cabo un análisis multivariado a través del análisis de componentes principales PCA (Tabla 6).

Tabla 6

Autovalor y autovector de componentes asociados al haz de las hojas de cañihua

	CP1	CP2	CP3
Autovalor (Eigenvalue)	9.32	5.15	3.82
% Varianza	38.84	21.48	15.93
% Acumulado	38.84	60.32	76.25
Autovector (Eigenvector)			
Ar	0.30	0.16	0.01
M	0.30	0.09	0.06
Me	0.29	0.16	-0.01
P	0.32	0.06	0.05
DF	-0.01	0.16	-0.07

R	-0.03	0.10	0.47
G	-0.13	0.18	0.32
B	0.22	-0.17	0.06
CH	0.16	-0.16	-0.32
CS	-0.22	0.20	0.10
CL	0.06	0.04	0.46
H	-0.09	0.15	0.10
S	-0.20	0.20	0.13
V	0.06	0.04	0.46
sh1	0.30	0.15	0.01
sh2	0.32	0.06	0.05
sh3	0.06	-0.38	0.14
sh4	-0.06	0.38	-0.14
sh5	-0.29	-0.19	0.02
sh6	-0.21	0.07	-0.10
sh7	0.11	0.24	-0.11
sh8	0.03	0.38	-0.10
sh9	-0.30	0.08	-0.07
sh10	0.06	-0.38	0.14

Con la finalidad de establecer el número indicado de componentes se realiza el cálculo del autovalor, que asocia la importancia de un componente con este valor y el gráfico indica la sedimentación de la varianza con la finalidad de seleccionar los componentes que representan mejor la varianza de los datos (Figura 9).

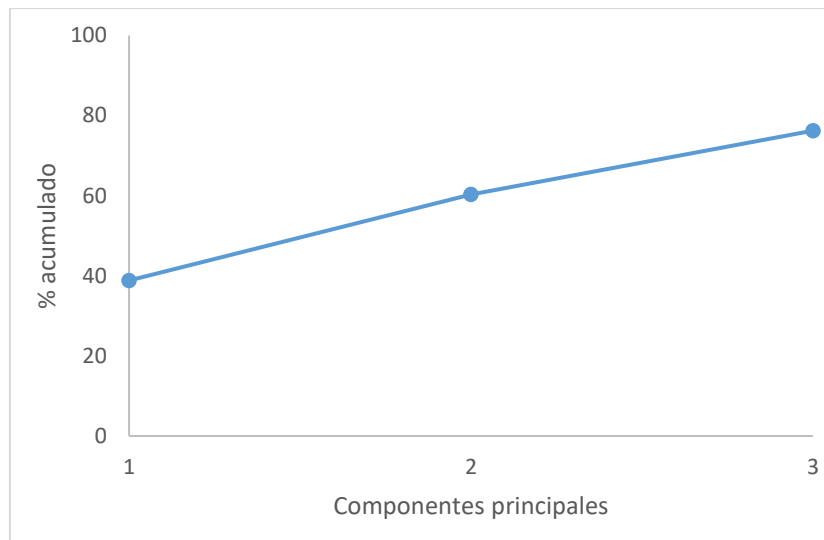


Figura 9. Sedimentación de la varianza para el haz de la hoja

En relación al análisis de componentes principales asociado al haz de la hoja, el primer componente (CP1) presentó un autovalor de 9.32 (Tabla 6), es decir, contribuyó con el 38.84% de la varianza total explicada (Figura 9), mientras que la distribución de los coeficientes del primer autovector fueron las características geométricas Ar, M, Me, P; factores de color G, B, CH, CS, S; y factores de forma Sh1, Sh2, Sh5, Sh6, Sh7 y Sh9 quienes contribuyeron en forma positiva a dicho componente considerando valores mayores a 0.10 (Figura 10).

El segundo componente principal (CP2) obtuvo un autovalor de 5.15, con una contribución de 21.48% (Tabla 6). De acuerdo con los coeficientes del segundo autovector, las variables que más contribuyeron en forma positiva fueron las mediciones geométricas Ar, Me; dimensión fractal DF, factores de color G, B, CH, CS, H, S; factores de forma Sh1, Sh3, Sh4, Sh5, Sh7, Sh8 y Sh10 (Figura 11).

El tercer componente (CP3), tiene un autovalor de 3.82 con una participación del 15.93%. Las variables contribuyeron fueron los factores de color R, G, CH, CL, S, V; factores de forma Sh3, Sh4, Sh7 y Sh10 (Figura 12).

La selección de un componente brinda la confiabilidad de que variables pueden emplearse para la identificación de las hojas de cañihua. En este marco para visualizar las variables contenidas en cada componente se emplean las cargas o loadings que

representan la cantidad de información con la que cada componente aporta a la interpretación de las variedades y accesiones.

Las cargas principales para el PC1 se presentan en la Figura 10. Son Ar (área), M (eje mayor), Me (eje menor), P (perímetro), B (azul), CH (matiz) Sh1, Sh2, Sh7 las cargas principales en forma directa y en forma inversa CS (saturación), S (saturación), sh5, Sh6, sh9.

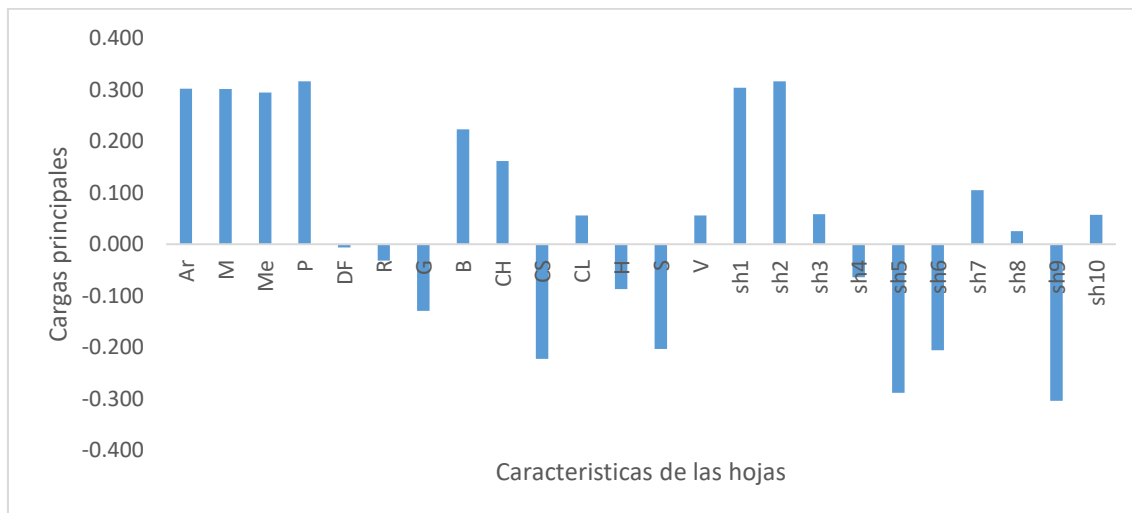


Figura 10. Cargas principales para el primer componente principal

Las cargas principales para el PC2 se presentan en la Figura 11. Son el Ar (área), Me (eje menor), DF (dimensión fractal), G (verde), CS (saturación), H (tono), S (saturación), Sh1, Sh4, Sh7 y Sh8 las cargas principales en forma directa y en forma inversa B (azul), CH (matiz), Sh3, Sh5 y sh10.

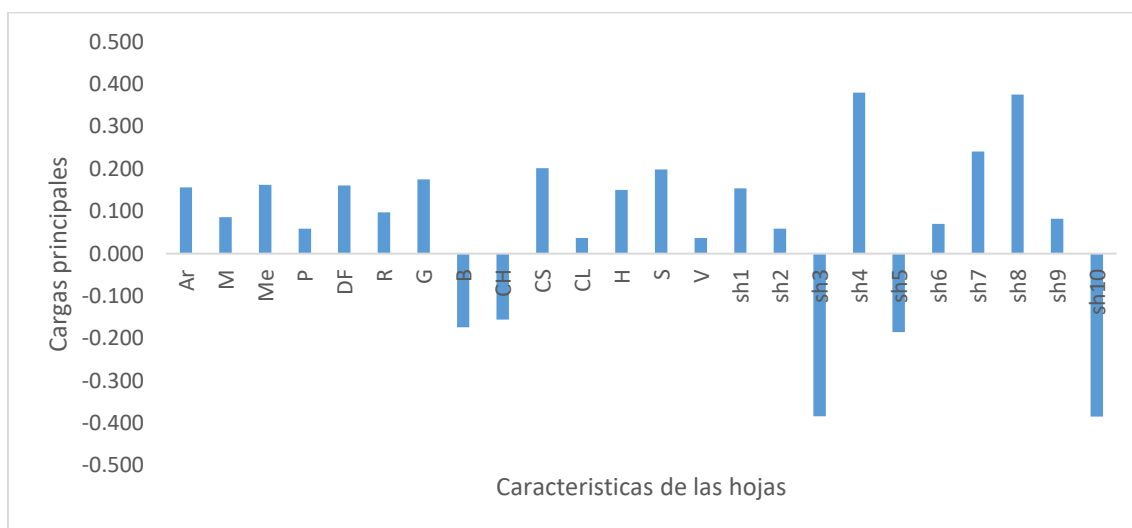


Figura 11. Cargas principales para el segundo componente principal

Las cargas principales para el PC3 se presentan en la Figura 12. Son los factores de color R (rojo), G (verde), CL (luminosidad), S (saturación), V (valor), Sh10 las cargas principales en forma directa y en forma inversa CH (tono) y Sh4.

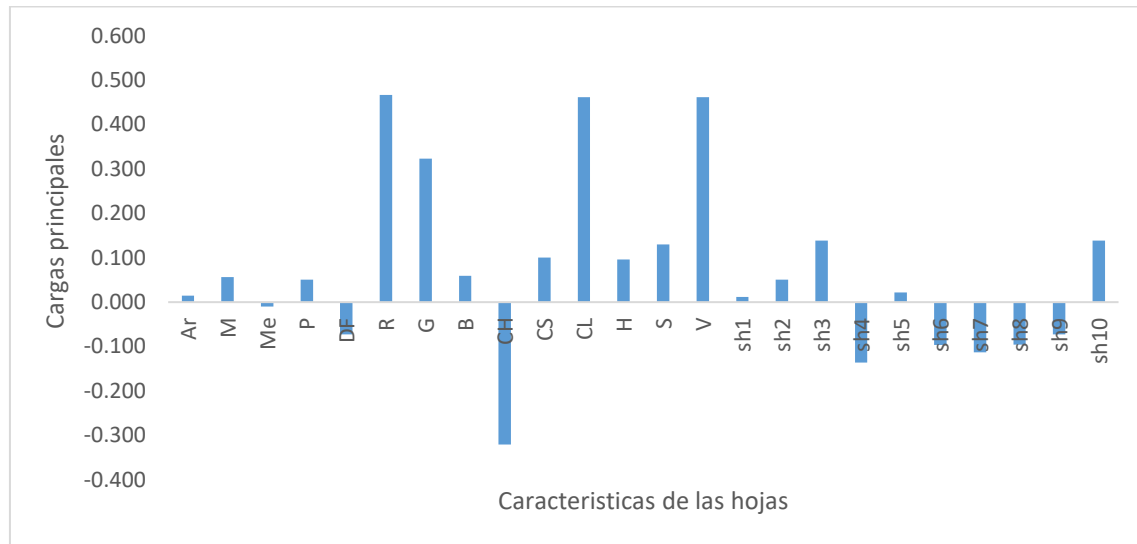


Figura 12. Cargas principales para el tercer componente principal

Para el análisis de componentes principales, se calculó los valores Eigen de la matriz, la cual explican el 38% del CP1 con características geométricas, 21% del CP2 con factores de forma y 15 % del CP3 con factores de color, con un acumulado de 76.25% de varianza para el haz de la hoja. Al respecto Qiao et al., (2022) y Min et al., (2018) consideran que la variación de la morfología de las hojas depende de su longitud y anchura (características geométricas). Mientras que para Xue et al., (2019) los factores de color con valores más altos (

Las mediciones geométricas Ar, P, M, Me muestran medidas menores a 0.04 en la media y 0.02 en la desviación estándar, apreciándose que la diferencias son minúsculas para el haz y envés de la hoja. El ancho y largo corresponde al eje mayor (M) y eje menor (Me) con 1.7 cm y 1.31 cm respectivamente. Estas mediciones difieren de Apaza (2010) quien obtuvo mediciones de 3.0 a 3.5 cm de largo y 2.5 a 2.8 de ancho; las cuales serían atribuibles a la edad de la planta, mientras que una correspondería a la etapa fenológica de ramificación, la otra pertenecería a la etapa de madurez de la planta. En ambos casos estas mediciones están relacionados con procesos fisiológicos de crecimiento de las plantas en condiciones de altitud (Flexas et al., 2022).

La dimensión fractal no mostró variaciones para el haz y envés de las hojas. Esto se explicaría porque los bordes de la hoja no presentan una complejidad como en otras especies vegetales (Fuentes et al., 2018), sino al contrario presenta las hojas con bordes regulares en forma romboidal, triangular y ancha ovada (Tapia, et al., 2019, Apaza, 2010). Al respecto Sachar y Kumar, (2021) y Du et al., (2013) creen que la dimensión fractal es una medida útil para la complejidad de la forma de la hoja con características invariantes frente a la rotación de la hoja y es un parámetro robusto para el análisis de hojas.

En los factores de color RGB destaca el color G (verde), que estaría relacionado con el contenido de clorofila en las hojas. Para Zhou et al., (2019) la clorofila se ve afectada por el contenido de nitrógeno y el suministro de agua que son elementos que se restringen y promueven mutuamente. Niveles altos y bajos de Nitrógeno no pueden reconocerse, mientras que un nivel medio si es posible reconocerlo por datos de imagen. Además, la variación de la hidratación de la hoja puede afectar drásticamente los colores originales (Carranza-Rojas et al., 2017).

Respecto al factor color HSL destaca el parámetro CL (luminosidad), que se relacionaría con las condiciones ambientales del vivero protegidos de la luz solar directa y la variación del contenido de clorofila, por lo que el haz de la hoja tiende a ser más claro mientras que el envés a más oscuro. Para Gupta y Ibaraki, (2015) la luminosidad se relaciona a la claridad u oscuridad de un color y los métodos basados en el índice de color sufren las variaciones de sombra y de luz (Abdalla et al., 2019).

En relación con el factor HSV destaca el parámetro S (saturación), que correspondería a la intensidad del color, siendo mayor en el haz que en el envés de la hoja. El uso de este parámetro permite identificar el color tal como lo ve un ser humano por agrupación de tonalidades. Para Bargshady et al., (2020) el color HSV es más adecuado para la extracción de características, mientras que para Yanikoglu et al., (2014) y Caglayan et al, (2013) las hojas que pertenecen a la misma especie pueden presentar una amplia gama de colores.

En los factores de forma (Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Sh5, Sh6, Sh7, Sh8, Sh9, Sh10) existen minúsculas diferencias entre el haz y envés. Al respecto Waldchen et al., (2018) indica que los individuos de una misma especie comparten una combinación de características de identificación relevantes, pero que es necesario un cierto grado de generalización para asignar características a un individuo específico.

Tabla 5) permiten la separación entre plantas.

Para encontrar que componente abarca la mayor interpretación de las variedades y accesiones se utiliza el método de clústeres. En la Figura 13, se encuentran los clústeres formados por las accesiones y variedades de cañihua según cuadrantes. En el cuadrante uno se ubica a la accesión Puka, en el cuadrante dos la variedad Ramis, en el cuadrante tres la variedad Inia Illpa y en el cuadrante cuatro la variedad Cupi.

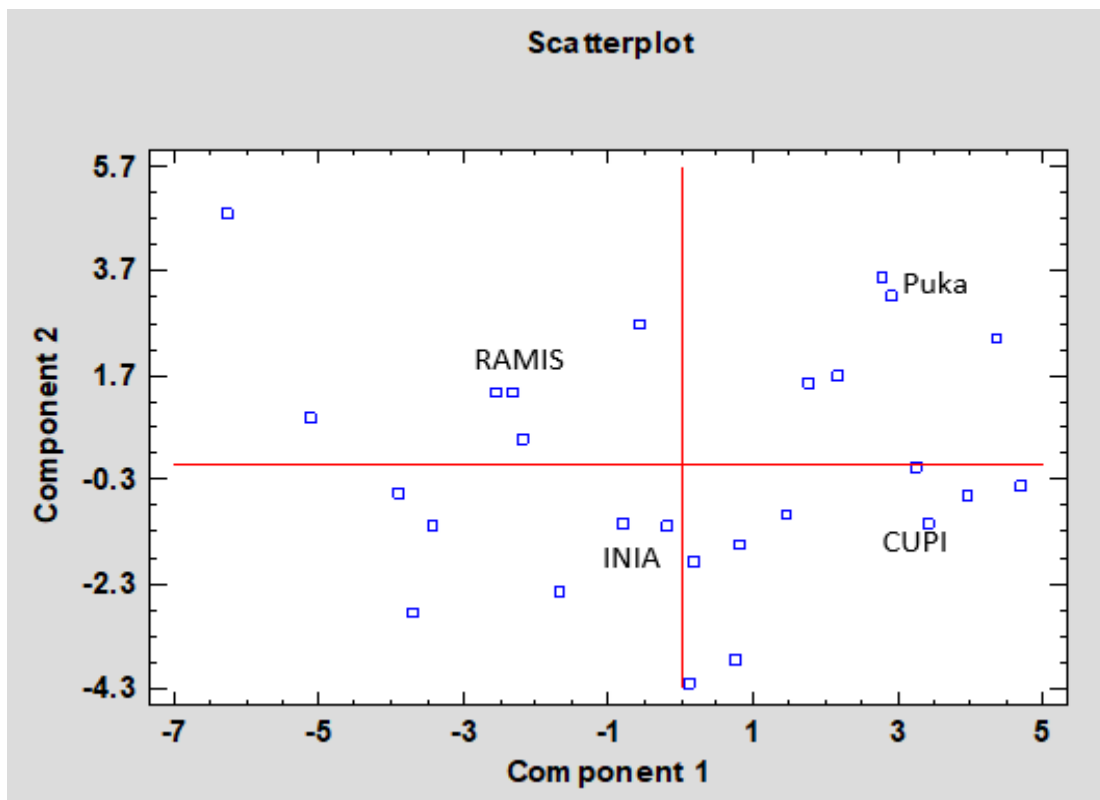


Figura 13. Clúster de componentes para el haz de la hoja

El análisis de clúster permite clasificar a los individuos con características homologas en grupos. En cada uno de los cuadrantes se ubican cada una de las variedades rodeado de un número determinado de accesiones. Al respecto Paul y Chowdhury, (2021) reconoce que El PCA permite correlacionar los diferentes atributos en estudio mediante agrupación de grupos y separar los atributos correlacionados de los no correlacionados tal como se observa en la Figura 13. Además,

4.1.2. Análisis de componentes principales del envés de la hoja

Respecto al análisis de componentes principales asociado al envés de la hoja, el primer componente (CP1) presentó un autovalor de 9.43 (

Con la finalidad de establecer el número indicado de componentes se realiza el cálculo del autovalor, que asocia la importancia de un componente con este valor y el gráfico indica la sedimentación de la varianza con la finalidad de seleccionar los componentes que representan mejor la varianza de los datos (Figura 14).

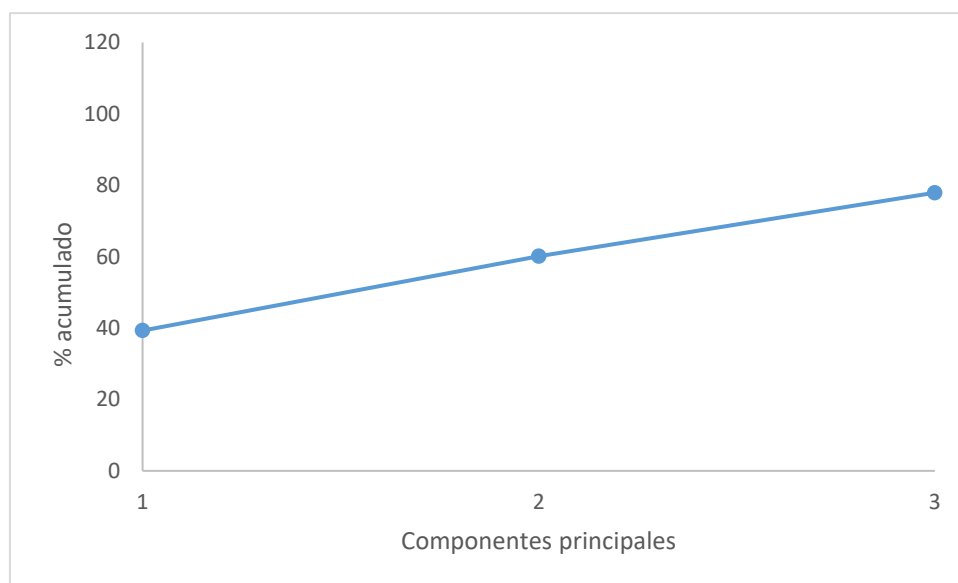


Figura 14. Sedimentación de la varianza para el envés de la hoja

La selección de un componente brinda la confiabilidad de que variables pueden emplearse para la identificación de las hojas de cañihua. En este marco para visualizar las variables contenidas en cada componente se emplean las cargas o loadings que representan la cantidad de información con la que cada componente aporta a la interpretación de las variedades y accesiones.

Tabla 7), es decir, contribuyó con más del 39.3% de la varianza total explicada (Figura 14), mientras que la distribución de los coeficientes del primer autovector fueron las características geométricas Ar, M, Me, P; factores de color G, CS,H, S; y los factores forma sh1, sh7, sh8 quienes contribuyeron en forma positiva a dicho componente, considerando valores de 0.10 (Figura 15).

El segundo componente principal mostro un autovalor de 5.0 con una contribución de 20.81 % (

Con la finalidad de establecer el número indicado de componentes se realiza el cálculo del autovalor, que asocia la importancia de un componente con este valor y el gráfico indica la sedimentación de la varianza con la finalidad de seleccionar los componentes que representan mejor la varianza de los datos (Figura 14).

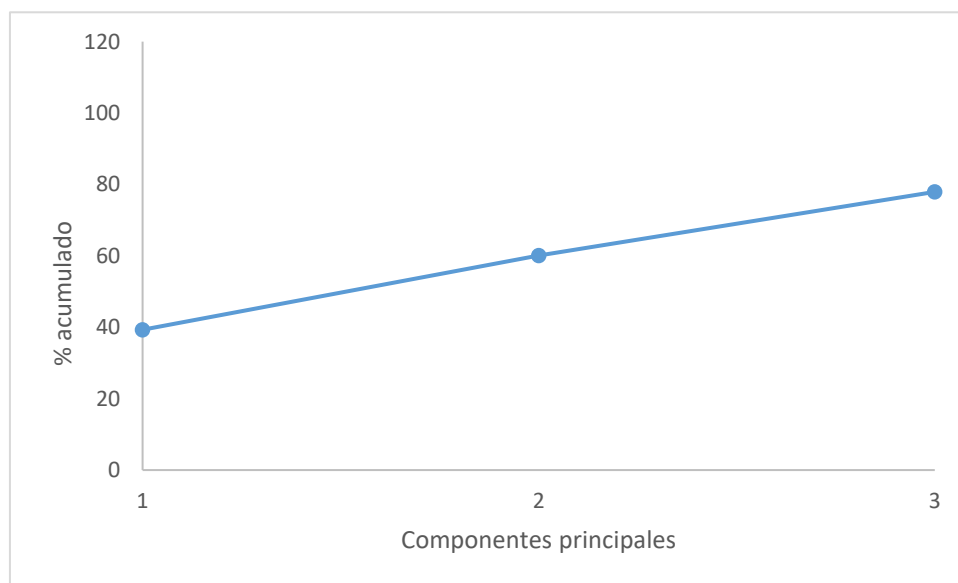


Figura 14. Sedimentación de la varianza para el envés de la hoja

La selección de un componente brinda la confiabilidad de que variables pueden emplearse para la identificación de las hojas de cañihua. En este marco para visualizar las variables contenidas en cada componente se emplean las cargas o loadings que representan la cantidad de información con la que cada componente aporta a la interpretación de las variedades y accesiones.

Tabla 7). De acuerdo con los coeficientes del segundo autovector aportaron dimensiones geométricas Ar, Me; dimensión fractal DF; factores de color G, CS, H, S; y factores de forma sh1, sh7 y sh8 en forma positiva (Figura 16). El tercer componente, tiene un autovalor de 4.27 con una participación del 17.81%. La distribución de los coeficientes del tercer vector fueron las variables los factores de color R, G, CL, S, V y factores de forma Sh3 y Sh10 (Figura 17).

Con la finalidad de establecer el número indicado de componentes se realiza el cálculo del autovalor, que asocia la importancia de un componente con este valor y el gráfico indica la sedimentación de la varianza con la finalidad de seleccionar los componentes que representan mejor la varianza de los datos (Figura 14).

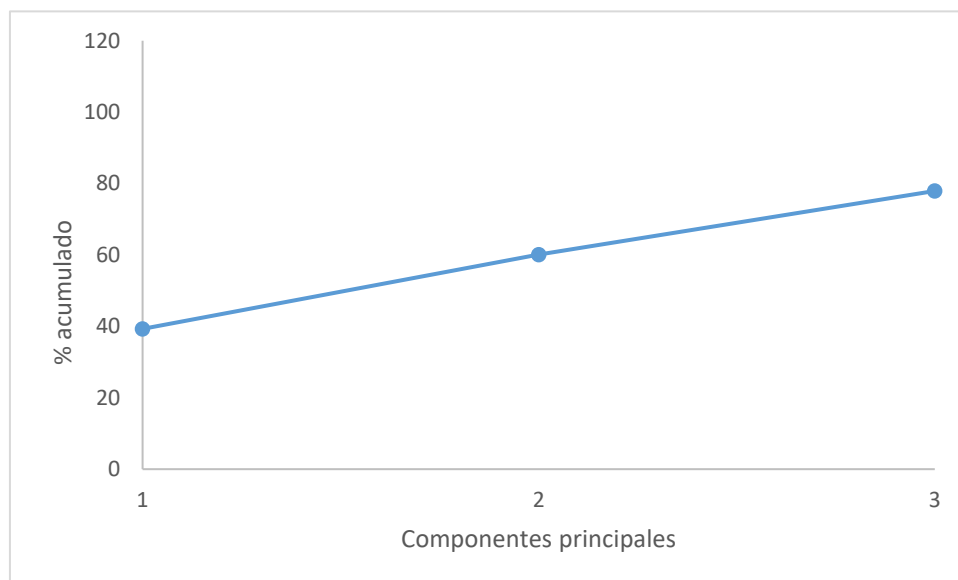


Figura 14. Sedimentación de la varianza para el envés de la hoja

La selección de un componente brinda la confiabilidad de que variables pueden emplearse para la identificación de las hojas de cañihua. En este marco para visualizar las variables contenidas en cada componente se emplean las cargas o loadings que representan la cantidad de información con la que cada componente aporta a la interpretación de las variedades y accesiones.

Tabla 7

Autovalor y autovector de componentes asociados al envés de la hoja de cañihua

	CP1	CP2	CP3
Autovalor (Eigenvalue)	9.43	5.00	4.27
% Varianza	39.30	20.81	17.81
% Acumulado	39.30	60.11	77.92
Autovector (Eigenvector)			
Ar	0.294	0.178	-0.049
M	0.303	0.090	0.014
Me	0.282	0.192	-0.075
P	0.314	0.095	0.029
DF	0.021	0.187	-0.042
R	-0.043	0.273	0.328
G	-0.092	0.289	0.277
B	0.218	-0.106	-0.011
CH	0.160	-0.229	-0.237
CS	-0.210	0.212	0.147
CL	0.037	0.244	0.312
H	-0.151	0.101	0.032
S	-0.181	0.244	0.179
V	0.037	0.244	0.312
sh1	0.296	0.170	-0.058
sh2	0.314	0.095	0.029
sh3	0.127	-0.253	0.324
sh4	-0.136	0.250	-0.318
sh5	-0.270	-0.204	0.120
sh6	-0.210	0.113	-0.124
sh7	0.084	0.272	-0.208
sh8	-0.062	0.257	-0.312
sh9	-0.308	0.016	-0.117
sh10	0.124	-0.254	0.325

Las cargas principales para el PC1 se presentan en la Figura 15. Son Ar (área), M (eje mayor), Me (eje menor), P (perímetro), B (azul), CH (matiz), Sh1, Sh2, Sh3, Sh10 las

cargas principales en forma directa y en forma inversa CS (saturación), H (tono), S (saturación), Sh4, Sh5, Sh6 y Sh9.

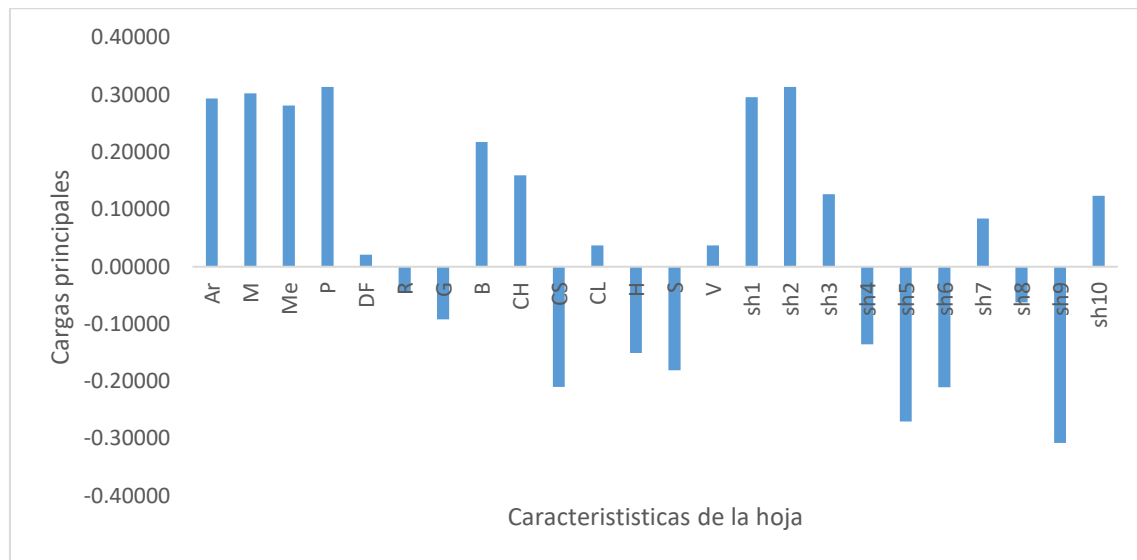


Figura 15. Cargas principales para el primer componente principal

Las cargas principales para el PC2 se presentan en la Figura 16. Son Ar (área), Me (eje menor), DF (dimensión fractal), R (rojo), G (verde), CS (saturación), CL (luminosidad), S (saturación), V (valor), Sh1, Sh4, Sh7, Sh8 las cargas principales en forma directa y en forma inversa CH (matiz), Sh3, Sh5 y sh10.

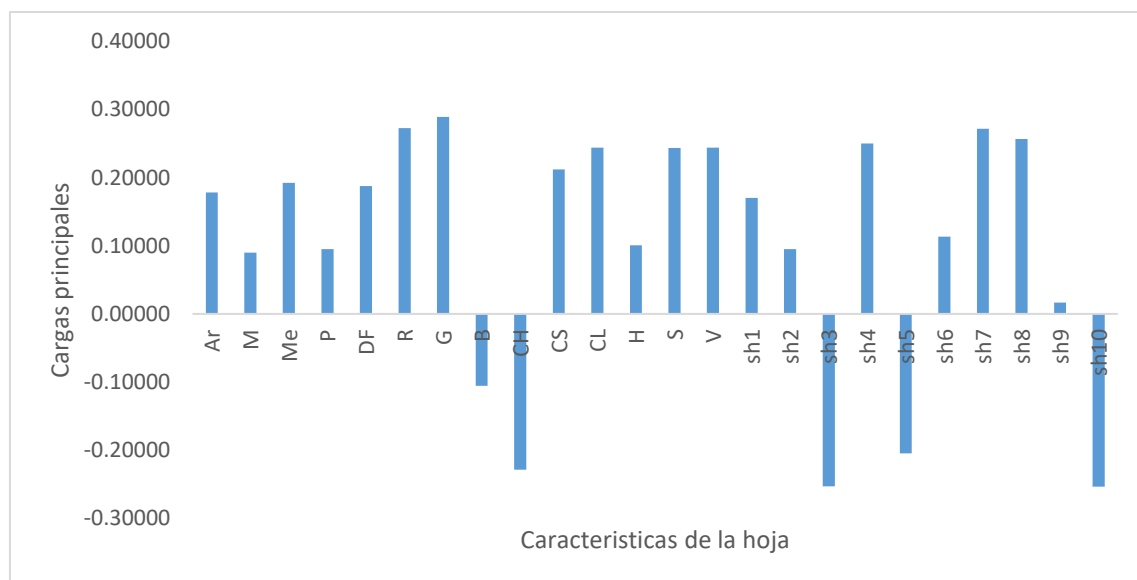


Figura 16. Cargas principales para el segundo componente principal

Las cargas principales para el PC3 se presentan en la Figura 17. Son los factores de color R (rojo), G (verde), CS (saturación), CL (luminosidad), S (saturación), V (valor), Sh3,

Sh10 las cargas principales en forma directa y en forma inversa CH (matiz), Sh4, Sh6, Sh7, Sh8 y Sh9.

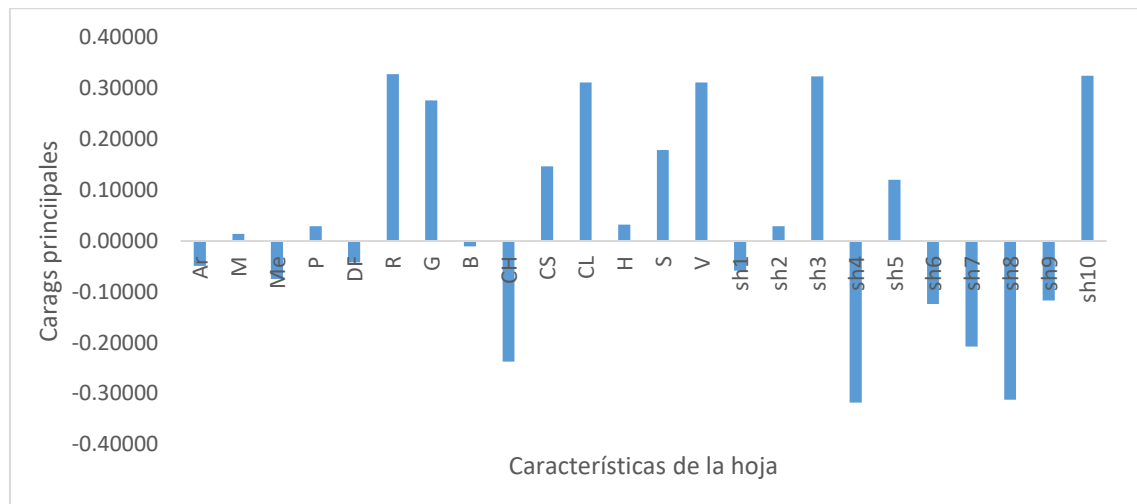


Figura 17. Cargas principales para el tercer componente principal

Para el análisis de componentes principales, se calculó los valores Eigen de la matriz principal, la cual explica el 39% del CP1 con características geométricas y factores de forma, el 20% del CP2 en el cual las variables alcanzan el valor mínimo de 0.10 y 17% del CP3 con factores de color RGB (rojo), color HSL (luminosidad) y del color HSV (valor), con un acumulado de 77.91% de varianza para el envés de la hoja.

Al respecto Thyagarajan y Raji, (2019) reconocen que las características geométricas de las hojas son cálculos rápidos, de baja dimensión y con un bajo coste computacional y por tanto fácil de realizar. Respecto a los factores de forma, Zahra et al. (2020) considera que la identificación de hojas por su forma es un problema difícil debido a la similitud de la morfología y la existencia de contornos similares, mientras que para Saleem et al. (2019) se requiere una descripción adecuada de la forma de la hoja para luego representarlo en forma matemática.

Respecto a los factores de color, Yang et al. (2015) considera que el color de la planta varía del verde oscuro al verde brillante y está asociado a los niveles de contenido de clorofila (Siedliska et al., 2021) o en otros casos al cambio climático (Thyagarajan y Raji, 2019). Para Nikolaev et al. (2018) el color RGB representa los colores de la naturaleza. La luminosidad en el color HSL es la reflectancia de un color (Bettinger et al., 2020). Para Yang et al. (2015) el color HSV está afectado por la luz al ser demasiado tenue o demasiado brillante alterando las imágenes de las hojas.

En la Figura 18, se encuentran los clústeres formados por las accesiones y variedades de cañihua, que indican que el componente con más información recolectada es el número CP1 (rojo), seguida del CP2 (amarillo) y CP3 (verde)

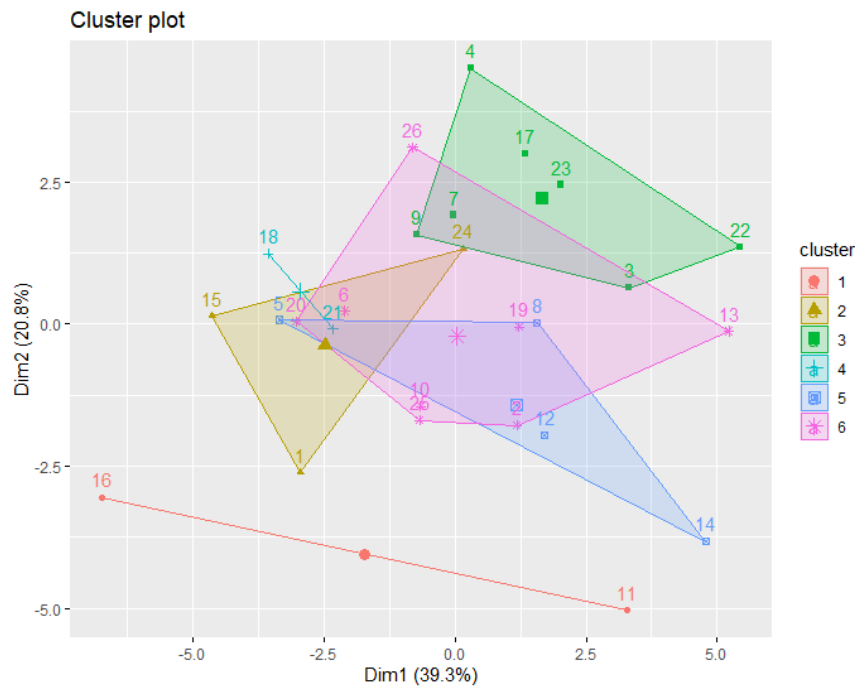


Figura 18. Clúster de componentes para el envés de la hoja

El análisis de clúster permite clasificar a los individuos con características homologas en grupos. El CP1 agrupa a la mayor cantidad de accesiones que están relacionadas, seguido del CP2 y CP3. Al respecto Kapczyńska, (2022) El análisis de componentes principales (ACP) se recomienda en la investigación hortícola para la reducción de datos con el fin de obtener un conjunto más pequeño de atributos que concentren la mayor parte de la información obtenida de muchas variables de entrada. Mediante estos dos métodos de análisis de componentes principales del haz y envés de las hojas es notorio que diferenciar a las variedades y accesiones de cañihua.

4.2. Analizar la respuesta de las variedades y accesiones de cañihua a la fertilidad del suelo

Para la evaluación de la fertilidad del suelo se empleó el producto comercial Mycoup®, basado en un hongo que forma micorrizas en las raíces de las plantas, que fue aplicado a los 60 días después de la siembra con el propósito de analizar el comportamiento de la variedades y accesiones de cañihua (Tabla 8).

Tabla 8

Altura de planta, diámetro de tallo principal y contenido de clorofila

Variedad / Accesión	Variables					
	Altura (cm)		Diámetro (mm)		Clorofila (%)	
	T0	T1	T0	T1	T0	T1
Ramis	18.90	30.80	0.64	1.35	40.40	41.90
Cupi	26.80	35.70	0.92	1.40	51.90	48.20
INIA	24.60	40.80	0.60	1.72	33.00	41.50
Puka	18.20	36.20	0.96	1.99	41.30	43.20
Acc2	12.40	35.20	0.49	2.20	33.20	41.10
Acc3	25.50	35.50	0.95	2.50	34.00	48.20
Acc7	24.60	34.00	1.13	1.87	31.50	51.10
Acc23	20.10	29.90	0.97	1.63	38.90	53.20
Acc24	16.20	32.80	0.61	1.74	40.10	50.40
Acc26	18.50	26.10	0.51	1.85	35.20	51.80
Acc27	14.20	27.40	0.42	1.37	36.10	49.90
Acc37	20.90	31.90	0.88	1.39	46.80	47.60
Acc64	21.40	30.90	0.61	1.37	55.00	39.50
Acc117	16.20	17.00	0.59	0.72	46.40	41.00
Acc124	16.60	22.10	0.54	0.95	46.70	40.00
Acc130	15.90	28.70	0.60	1.30	38.70	49.30
Acc140	11.50	26.00	0.43	1.31	35.50	35.60
Acc146	19.70	31.80	0.59	2.55	43.90	49.70
Acc156	21.20	27.80	0.50	1.38	42.00	46.60
Acc196	26.60	21.30	0.49	0.79	39.60	38.30
Acc204	19.20	30.60	0.60	1.91	33.10	41.10
Acc215	27.80	37.10	0.75	2.42	35.20	51.00
Acc218	16.40	31.80	0.71	2.06	31.50	50.40
Acc230	20.50	42.10	0.81	2.29	48.90	54.00
Acc231	22.10	39.90	1.03	2.38	33.10	51.80
Acc246	17.70	39.20	0.96	2.03	32.10	55.60
Acc267	15.20	34.00	1.14	1.63	35.50	50.70

Acc296	16.60	31.40	0.83	1.69	33.20	48.40
Acc301	26.60	31.30	0.84	1.78	34.70	42.70
Acc315	31.80	35.00	0.93	1.89	37.10	46.60
Máximo	31.80	42.10	1.14	2.55	55.00	55.60
Mínimo	11.50	17.00	0.42	0.72	31.50	35.60
χ	20.13	31.81	0.73	1.72	38.82	46.68
Diferencia	11.68		0.98		7.86	

T0 = Tratamiento testigo

T1 = Tratamiento con adición de micorrizas

4.2.1. Altura de planta

Se resume las mediciones realizadas a los 60 días del experimento en las variedades y accesiones de cañihua (Figura 19). En el caso de la altura la media en el testigo (T0) fue 20.13 cm, con valor máximo de 31.80 cm en la Acc315 y el menor 11.50 cm en la Acc140; en cambio en el tratamiento (T1) con la adición de micorrizas, la altura media fue 31.81 cm, con incremento a 41.10 cm en la Acc230 y menor altura menor fue 17 cm en la Acc117.

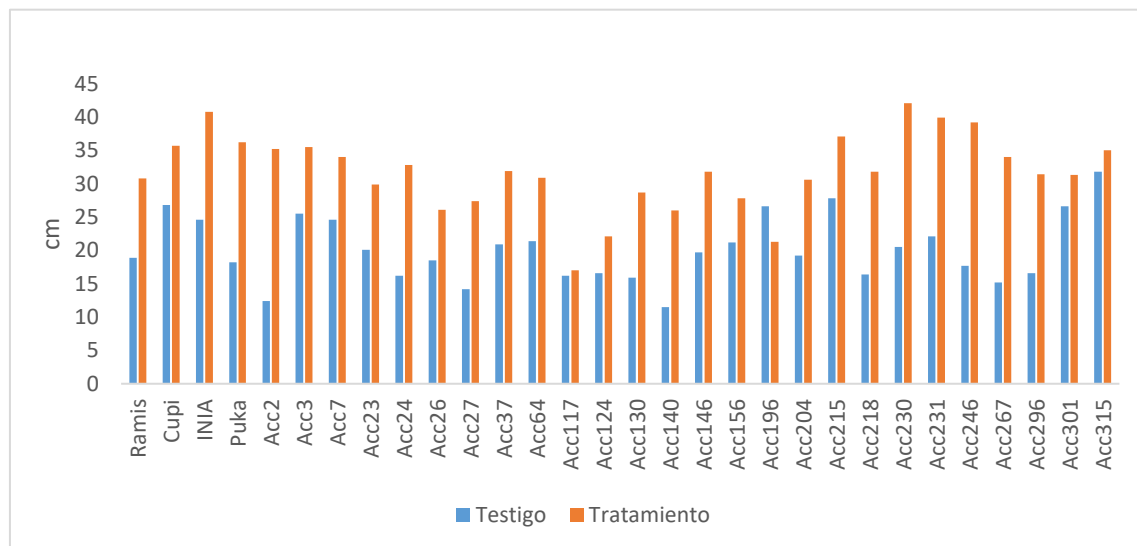


Figura 19. Altura de planta de variedades y accesiones de cañihua

La diferencia de altura entre la media de ambos tratamientos en 10 cm denota el efecto de los HMA sobre la altura de planta de todas las variedades y accesiones a excepción de la Acc196. Al respecto, Fernandez et al. (2017) considera que el hongo *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* induce a una elevada biomasa vegetal, tolera un amplio rango de

valores de pH y altos niveles de salinidad del suelo; además tiene la capacidad para permitir una mayor absorción de nutrientes y agua por parte de las plantas (Kapoor et al., 2008).

4.2.2. Diámetro de tallo principal

El diámetro del tallo central es una medición recomendada por el Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI et al., 2005) en las plantas de cañihua. El testigo (T0) obtuvo un valor promedio general de 0.73 mm, siendo el diámetro máximo de 1.14 mm en la Acc267 y el menor de 0.42 mm en la Acc27; en contraste el tratamiento (T1) en promedio alcanzó 1.72 mm, siendo la Acc146 que obtuvo el valor más alto con 2.55 mm y la Acc117 el diámetro menor del experimento con 0.72 mm (Figura 20).

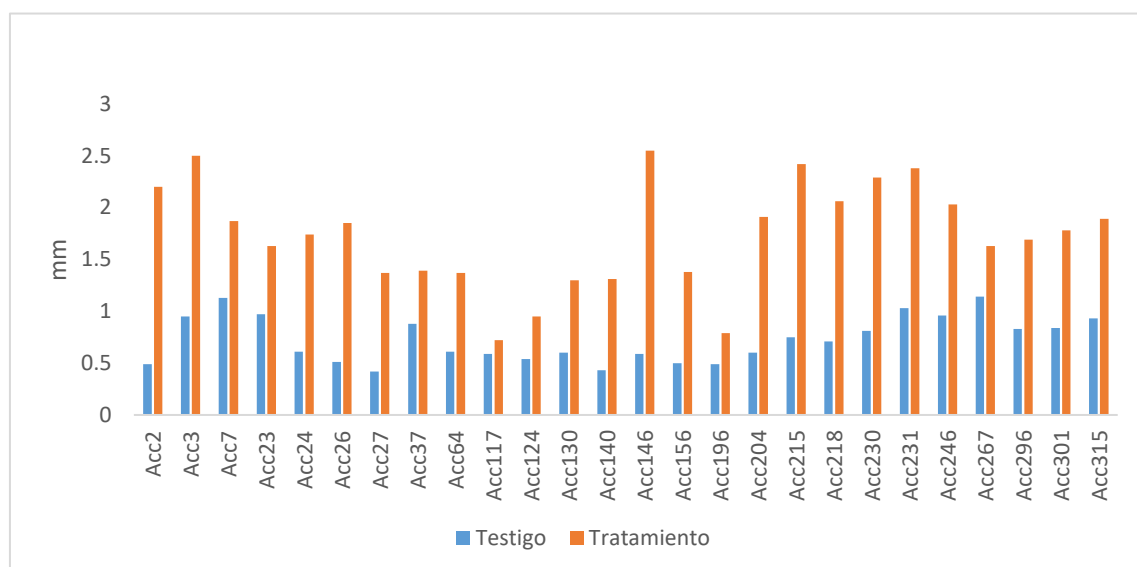


Figura 20. Diámetro de tallo central de variedades y accesiones de cañihua

En este marco es notorio, que la media entre tratamientos de 0.98 mm indica que la aplicación de Mycoup® indujo un mayor engrosamiento del tallo en las accesiones y variedades. Al respecto Fernandez et al. (2017) y Gómez-Bellot, et al. (2015) consideran que *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* genera una alta actividad fisiológica y potencial hídrico que estaría relacionado no solo con el crecimiento de la planta sino con el diámetro del tallo. Para Apaza, (2010) el tallo principal depende del hábito de crecimiento de la planta, por ende, un tallo bien nutrido posee mayor fuerza de resistencia al tumbamiento de la planta (Zhan et al., 2022)

4.2.3. Porcentaje de clorofila

En el caso del porcentaje de clorofila en las hojas, se observó que el testigo (T0) obtuvo una media total de 38.82% con la máxima cantidad registrada en la Acc64 con 55% y la más baja en Acc218 con 31.50%. A su vez, en el tratamiento (T1) el promedio general fue de 46.68%, siendo el valor máximo de 55.60% en la Acc246 y la menor cantidad de clorofila fue de 35.60% en la Acc140. Sin embargo, no todas las accesiones respondieron a la aplicación de las micorrizas, las accesiones Acc64, Acc117, Acc 124 y la variedad Cupi fueron la excepción (Figura 21).

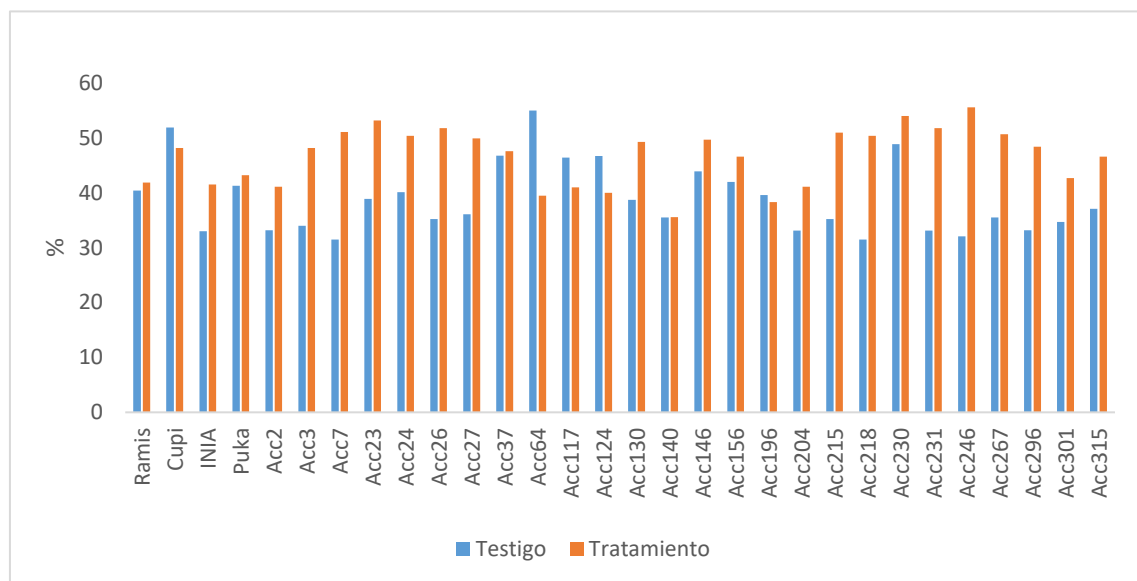


Figura 21. Porcentaje de clorofila en variedades y accesiones de cañihua

En este caso la diferencia de 7.86% entre ambos tratamientos muestra que el tratamiento con micorrizas (T1) obtuvo mejores resultados en la variable de clorofila. Al respecto Fernandez et al. (2017) considera que el hongo aumenta la actividad fotosintética de la planta, y un uso eficiente del agua. Para Roupheal et al. (2015) la aplicación de micorrizas influye en la altura de las plantas, la longitud de las raíces, la producción de biomasa y las tasas fotosintéticas netas

4.2.4. Análisis de agua

Se reporta el resultado del análisis del agua de riego para el cultivo de macetas (Tabla 9). La conductividad eléctrica (CE) presenta un valor de, 1.012 dS/m y con un pH de 8.09. Además, sodio con 35.702 mg/L, cloruro con 85.9 mg/L, sulfato con 80.06 mg/L, calcio

con 110.351 mg/L y magnesio con 17.226 mg/L. Los contenidos de boro, hierro y manganeso son de 0.193 mg/L, 0.107 mg/L, 0.0126 mg/L respectivamente.

Tabla 9

Análisis del agua de riego

Parámetro	Unidad	Resultado
Conductividad eléctrica	dS/m a 25°C	1.012
pH	-	8.09
Alcalinidad total	mg/L	205.5
Cloruro	mg/L	85.9
Nitrato	mg/L	62.21
Metales ICP-OES-Agua		
Boro	mg/L	0.193
Calcio	mg/L	110.351
Hierro	mg/L	0.107
Magnesio	mg/L	17.226
Manganeso	mg/L	0.0126
Potasio	mg/L	1.64
Sodio	mg/L	35.702
Sulfato	mg/L	80.06

Los parámetros de conductividad eléctrica se ubican por debajo de 1.5 dS/m considerado como un agua moderada de salinidad, con un pH alcalino. En cuanto a los iones perjudiciales no existe problemas de toxicidad por boro. Sin embargo, si hay inconvenientes con los iones de sodio, cloruro, sulfato, calcio y magnesio que producen una relación de absorción de sodio (RAS) de 6.32 y RAS_{aj} de 7.12.

Respecto a la conductividad eléctrica Castellanos et al. (2000) considera el lavado para el control de sales. Además, el pH alcalino limita la disponibilidad nutrimental de P, Fe, Mn, B, Cu, Zn (Arevalo, 2015). Por otra parte, la relación de absorción de sodio (RAS) aumenta el pH, disminuye la infiltración para conducir agua y oxígeno, volviéndolo compacto en condiciones secas (Castellanos et al., 2000). Con base en los parámetros del agua, se establece que no presenta una calidad adecuada que contribuya al desarrollo de la planta.

4.2.5. Análisis de suelo

El segundo análisis que se realizó fue al sustrato, es decir, al suelo en donde se sembró las variedades y accesiones de cañihua, considerando al tratamiento testigo como el suelo inicial y las macetas con los tratamientos como suelo final (Anexo 3). El análisis de suelo se efectuó al culminar el experimento, es decir a los 135 días de realizada la siembra en las accesiones 146, 204, 231, 301, 315, Puka, y variedades Inia y Ramis.

La conductividad eléctrica se incrementó en la Acc146 y Acc204 con valores de 1.7 dS/m y 1.6 dS/m respectivamente frente al testigo con 1.5 dS/m y disminuyó en las demás. Respecto al pH, presenta una clara tendencia a mantenerse alcalino, mientras que el carbonato de calcio y el PMP fue constante durante todo el estudio. En el caso de la materia orgánica, se incrementó en suelos con las accesiones Puka, Acc301 y la Acc231. Sin embargo, en la variedad Ramis y la accesión Acc204 se redujo a 10.81% y 11.88%, respectivamente.

Respecto a las bases cambiables, como el calcio y magnesio, presentaron aumento a diferencia del testigo, en contraparte el potasio y sodio se redujeron. A su vez, las bases disponibles presentan diferentes comportamientos para los cationes de calcio, magnesio, potasio y sodio, además, la relaciones entre bases Ca+Mg/K se incrementó, mientras que la relación Ca+Mg fue indistinta.

Debido a la amplitud del estudio se analizaron cuatro características: Fósforo disponible, Boro, Manganeso y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), en los que se observaron diferencias al inicio y final del experimento. Respecto al contenido de fósforo disponible disminuyó en todas las variedades y accesiones de cañihua, el contenido más bajo fue en la Acc231 con 181.8 mg/kg y el más alto fue la Acc204 con 290.58 mg/kg, frente al suelo inicial con 376.77 mg/kg (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

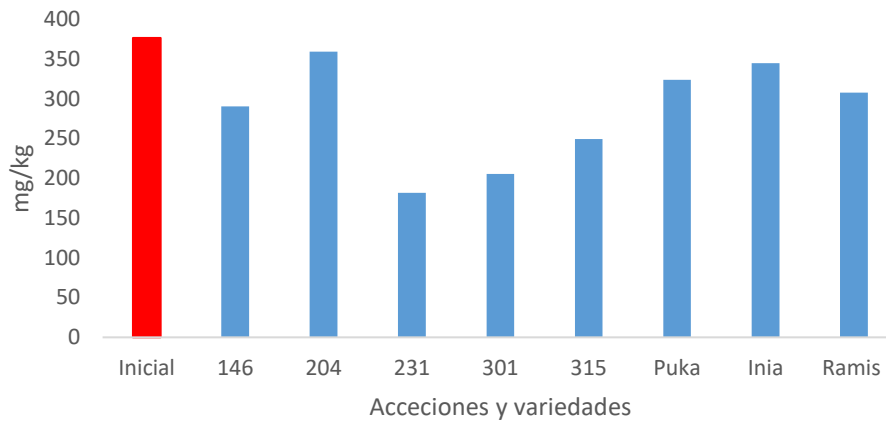


Figura 22. Fósforo disponible en el suelo

El Fosforo favorece el crecimiento de raíces, sin embargo, un bajo contenido de este elemento incrementa el volumen radicular hasta que encuentra fosforo en el medio y en este momento hace que se detenga el crecimiento (INTAGRI, 2017). Al respecto Alarcón et al. (2020) y Ortuño et al. (2018) observaron que la inoculación de micorrizas promueve el incremento de raíces laterales y solubiliza el fosforo del suelo.

Además, en la naturaleza este elemento es insoluble y poco móvil requiriendo suficiente cantidad de materia orgánica para ser absorbido por las plantas. Al respecto Toubali et al. (2022) indica que en el cultivo de quinua, pariente cercano de la cañihua, las micorrizas promueven la interacción con la materia orgánica, incrementando los niveles de Fosforo en el suelo y por ende la fertilidad del mismo.

Por otro lado, respecto al Boro disponible, este disminuyó en todas las variedades y accesiones, la mayor diferencia fue 8.56 mg/kg y con entre el testigo y la variedad Inia (Figura 23). El contenido más bajo fue para la variedad Inia con 32.08 mg/kg y el más alto para Ramis con 37.75 mg/kg, frente al suelo inicial con 40.64 mg/kg.

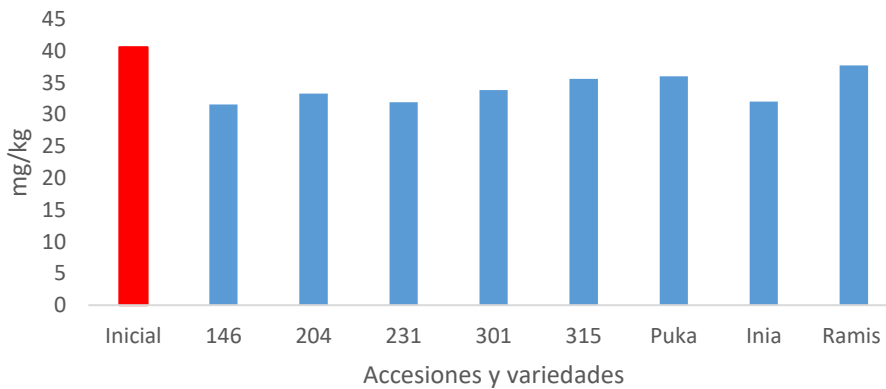


Figura 23. Boro disponible en suelo

El boro es un nutrimento esencial para el desarrollo de las plantas con un papel fundamental en la fertilidad, participa en la síntesis de proteínas, transporte de azúcares, provee protección fitosanitaria y regula las auxinas (Castellanos et al., 2000). Los resultados indicarían el aprovechamiento de este elemento por parte de la planta, ya que en todos los análisis disminuyó este parámetro. Al respecto (Castellanos, 2014), indica que el boro es un nutrimento que es variable según el clima, puede lixiviarse y es antagonista al potasio, por ello es necesario realizar análisis de suelo y de material vegetal para su correcta aplicación.

De otro lado el manganeso disponible, se incrementó en las accesiones 146, 204, 231, 246 y 315 junto con la variedad Ramis, sin embargo, el efecto fue opuesto en las accesiones 301, Puka y en la variedad Inia

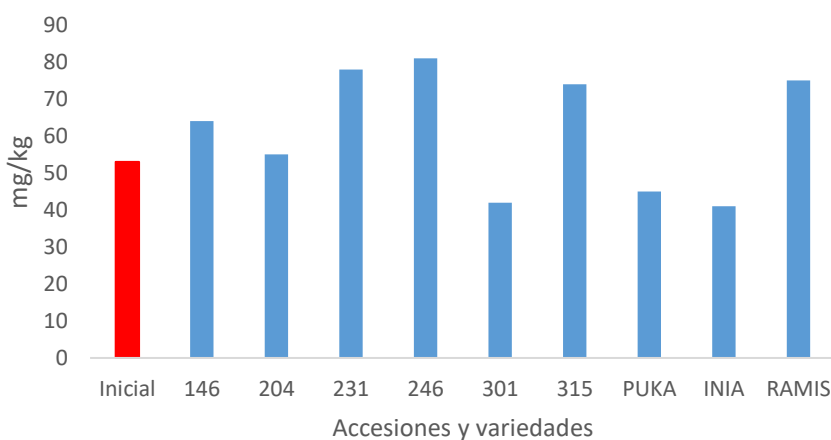


Figura 24. Manganeso disponible en el suelo

El manganeso es esencial para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas, se absorbe por la raíz, se transporta el xilema con una movilidad baja y es almacenado como óxido de manganeso, además participa en la fotosíntesis, síntesis de clorofila y ATP (Castellanos et al., 2000). Los resultados obtenidos estarían relacionados con fertilidad del suelo que retiene cationes de manganeso (Toubali et al., 2022).

La capacidad de intercambio catiónico efectiva se incrementó en todas las plantas a excepción de las variedades Inia y Ramis las cuales obtuvieron valores de 31.16 meq/100g y 31.22 meq/100g frente al testigo que alcanzó 31.45 meq/100g (Figura 25).

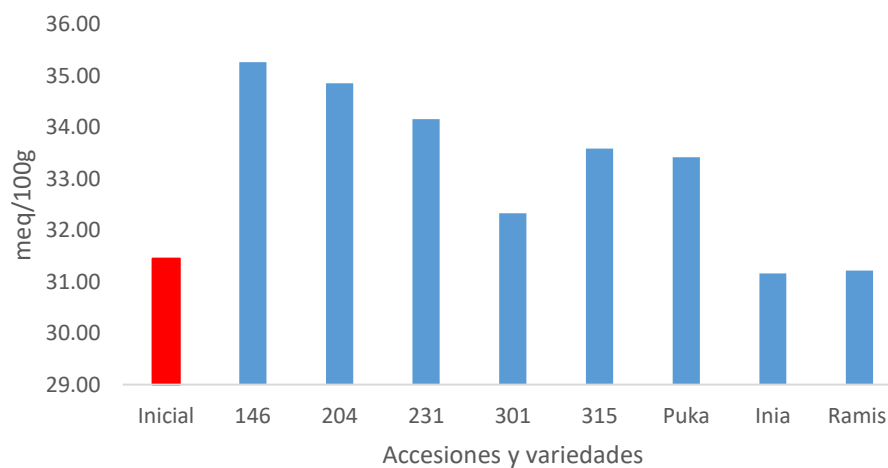


Figura 25. Capacidad de intercambio catiónico efectivo en suelo

La CIC indica el potencial de un suelo para retener e intercambiar nutrientes, que está estrechamente vinculada con el contenido de materia orgánica (Castellanos et al., 2000). Los resultados se explicarían por la interacción de las micorrizas con la materia orgánica contenido en el sustrato. Al respecto Ortuño et al. (2018) evidenció suelos más fértiles por aplicación de micorrizas así como Roupheal et al. (2015) demostró la capacidad de las micorrizas para desarrollar hifas capaces de explorar el suelo hasta 40 veces.

Luego de revisar los parámetros del suelo antes y después del estudio se evidencia que hay diferencias en los parámetros del suelo, así como en las variedades y accesiones de cañihua. La adición de agua con características de pH alcalino, salinidad y RAS moderado limitaría el estado nutricional de las plantas en cuanto a contenidos de macro y micronutrientes y la permeabilidad del suelo.

Respecto a ello, Fernandez et al. (2017) indica que la adición de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* al suelo ayuda a tolerar un amplio rango de pH, que permite soportar la alta salinidad (Rouphael et al., 2015), reduce la absorción de sodio por las plantas (Vicente-Sánchez et al., 2014), mejora la absorción de nutrientes como el fósforo, mejora la eficiencia del uso de agua (Ortuño et al., 2018) y la fertilidad del suelo (Toubali et al., 2022).

4.2.6. Análisis de material vegetal

El tercer análisis que se realizó fue el material vegetal al final del experimento. Para el estudio de parámetros fisicoquímicos se empleó el análisis foliar por medio de la Desviación del Óptimo Porcentual (DOP) siendo este método estadístico el que compara las concentraciones del muestreo respecto a un valor referencial utilizando la siguiente fórmula.

$$DOP = \frac{A - a}{a} \times 100$$

La Desviación del Óptimo Porcentual (DOP) relaciona la cantidad inicial de nutriente (A), obtenida por muestreo con la media del nutrimento (a), recolectada en estudios previos. Si el resultado es negativo (-) indica la deficiencia del nutriente, si tiene un valor positivo (+) indica abundancia, pero si es igual a cero, la nutrición de la hoja de la planta cuenta con la cantidad óptima.

Los valores negativos representan una deficiencia en los nutrientes como de Nitrógeno total, Calcio y Cobre. En cambio, los valores positivos denotan un exceso del nutrimento, como sucede con el Azufre, Boro, Fósforo, Hierro, Magnesio, Manganeso, Potasio y Zinc. La evaluación del material vegetal de las hojas de cañihua se evidencia con la aplicación del DOP (Tabla 10).

Dentro del análisis, los valores más cercanos a cero, es decir, al óptimo fue para el Boro en las variedades Ramis y Puka. Para el caso del Zinc se obtuvo valores cercanos para las accesiones 204 (19 DOP), 325 (19 DOP) y la variedad INIA (17 DOP). Por otra parte, los nutrientes que presentaron un exceso considerable son el Potasio (>500 DOP), seguido por el Azufre (>110 DOP), el Fósforo (>104 DOP) y el Magnesio (>100 DOP).

Además, se evidencia que el tratamiento testigo no presentó valores cercanos a cero, así como en varios nutrientes que indican exceso y deficiencia (N, Ca, Cu).

Tabla 10

Análisis foliar del material vegetal de la planta de cañihua

Nutriente	DOP*									
	Testigo	146	204	231	246	301	315	PUKA	INIA	RAMIS
Nitrógeno total	-60	-61	-60	-61	-62	-60	-60	-59	-60	-62
Azufre	161	200	197	153	127	174	152	114	165	175
Boro	22	20	27	20	19	23	15	9	27	6
Calcio	-91	-92	-91	-95	-91	-94	-93	-93	-91	-93
Cobre	-78	-81	-81	-78	-75	-79	-83	-81	-81	-74
Fosforo	152	119	143	143	174	108	104	113	86	213
Hierro	36	30	42	39	35	24	22	39	13	28
Magnesio	115	108	153	108	83	102	100	101	114	112
Manganeso	53	64	55	78	81	42	74	45	41	75
Potasio	584	637	604	586	648	610	608	574	597	702
Zinc	31	25	19	38	39	35	19	39	17	36

*Calculado con el valor norma obtenido de cereales por Arévalo (2015).

Luego de analizar los resultados de los tres análisis se observa una relación directa del efecto del agua de riego con el sustrato ocasionando un desbalance nutricional en las plantas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Las variables de altura de planta, diámetro de tallo y contenido de clorofila reflejan ese panorama (Tabla 8). El testigo evidencia que el sustrato y agua de riego no aportaron positivamente el desarrollo de este cultivo, pero que fue compensado por la aplicación de HMA que potenciaron la correcta disponibilidad de nutrientes en el tratamiento (T1).

La fertilidad del suelo estuvo limitada por la aplicación del agua de riego que contiene un RAS moderada con efecto directo sobre el pH del suelo, y por ende en la alteración del balance nutricional de macro y microelementos en las plantas. Por ello, Conesa et al. (2021); Alarcón et al. (2020) y Ortuño et al. (2018) sugieren la aplicación de *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* al suelo para mejorar la absorción de nutrientes como el P, K, Ca, Fe, Mn, B, Cu, Zn, eficiencia del uso de agua y soportar la salinidad (Toubali et al., 2022).

CONCLUSIONES

1. Las variedades y accesiones de cañihua pueden diferenciarse entre sí según diferentes agrupamientos. Las accesiones rodean indistintamente a las variedades más cercanas o parientes silvestres según características semejantes. Los tres componentes principales aportan el 76% y 77% de varianza al haz y envés de las hojas. Las principales diferencias se enmarcan en las características geométricas (Ar, M, P), factores de color (RGB, HSL, HSV) y factores de forma (sh1, sh2, sh3, sh4, sh8, sh10). Respecto al análisis de los componentes principales (PCA) asociado al haz de la hoja el CP1 se relaciona con las características geométricas (Ar, M, P) y factores de forma (sh1, sh2), mientras que el CP2 se relaciona con los factores de forma (sh4, sh8) y el CP3 con factores de color (R, G, L, V). Para el caso del envés de la hoja el CP1 se relaciona con características geométricas (M, P) y factores de forma (sh2), para el CP2 no presenta ninguna variable directa y el CP3 con factores de color (R, L, V) y factores de forma (sh3, sh10).
2. Las variedades y accesiones de cañihua responden a la fertilidad del suelo con la aplicación del producto comercial Mycoup® (*Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*). La diferencia del tratamiento frente al testigo fue 11.68 cm en altura de planta, 0.98 mm en diámetro de tallo principal y 7.86% de contenido de clorofila. Los análisis de suelo al final del experimento demuestran incremento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mayor disponibilidad de Fosforo, Manganeso y Boro en el suelo. Los análisis del material vegetal demuestran valores óptimos para el Boro y el Zinc. El análisis de agua demuestra una baja calidad por lo que no aporta al desarrollo del cultivo, pero fue compensado por la aplicación de Mycoup®.



RECOMENDACIONES

1. Evaluar la metodología del análisis de imágenes del haz y el envés de las hojas para el reconocimiento y diferenciación de variedades y accesiones en otras especies de importancia local, aprovechando los recursos de alta biodiversidad vegetal disponibles en los bancos de germoplasma. Además, se sugiere complementar con el análisis de imágenes para la identificación de plagas, enfermedades o problemas fisiológicos de la planta como consecuencia del cambio climático.
2. Inocular el producto comercial Mycoup® en otros cultivos de importancia regional frente a una eventual condición de Cambio Climático. Evaluar las condiciones de pH en suelo, frecuencia y calidad de agua de riego y disponibilidad de macronutrientes como el Nitrógeno, Fosforo, Potasio y micronutrientes como el Boro, Manganeso contenidos en la planta. Complementar con evaluaciones de rendimiento en grano y forraje.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdalla, A., Cen, H., Wan, L., Rashid, R., Weng, H., Zhou, W., He, Y., Agrawal, S., Jalal, A. S., Khan, M. A., Alvarez, R., Nguyen, A., Peredo, S., Joffre, R., Winkel, T., Awad, M. M., Bakhshipour, A., Zareiforoush, H., Bambil, D., ... Fan, J. (2019). Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies based on temporal dynamics of leaf morphology and color. *Computers and Electronics in Agriculture*, *16*(1), 1–11.
- Alarcón, A. L., Gómez-Bellot, M. J., Bernabe, A. J., Calvo, G., & Fernández Martín, F. (2020). Changes in root architecture and productivity of melon (*Cucumis melo* L. cv. Hispano Nunhems) promoted by *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum*. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *95*(3), 364–373.
- Alexis, E. (2011). *Cultivo de cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen) en el altiplano. Puno*.
- Apaza, V. (2010a). Manejo y mejoramiento de kañiwa. Convenio Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA, Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente-CIRNMA, Bioversity International y el International Fund for Agricultural Development-IFAD. En *Editorial Altiplano E.I.R.L.* (Vol. 1).
- Apaza, V. (2010b). *Manejo y mejoramiento de kañiwa*.
- Arevalo, J. (2015). *Interpretación de analisis de suelos y agua para formulacion de fertirrigacion*. (p. 48).
- Bambil, D., Pistori, H., Bao, F., Weber, V., Alves, F. M., Gonçalves, E. G., de Alencar Figueiredo, L. F., Abreu, U. G. P., Arruda, R., & Bortolotto, I. M. (2020). Plant species identification using color learning resources, shape, texture, through machine learning and artificial neural networks. *Environment Systems and Decisions*, *40*(4), 480–484.
- Bargshady, G., Zhou, X., Deo, R. C., Soar, J., Whittaker, F., & Wang, H. (2020). The modeling of human facial pain intensity based on Temporal Convolutional Networks trained with video frames in HSV color space. *Applied Soft Computing Journal*, *97*, 106805.
- Bartolo, D. (2013). Propiedades nutricionales y antioxidantes de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). *Revista de Investigación Universitaria*, *2*(1), 47–53.

<https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/riu/article/view/713>

- Bennett, B. C., & Balick, M. J. (2014). Does the name really matter? the importance of botanical nomenclature and plant taxonomy in biomedical research. *Journal of Ethnopharmacology*, 152(3), 387–392.
- Bettinger, P., Merry, K., & Boston, K. (2020). Map Colors. En *Mapping Human and Natural Systems* (pp. 217–254). Elsevier.
- Bonifacio, A. (2019). Improvement of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and qañawa (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) in the context of climate change in the high andes. *Ciencia e Investigacion Agraria*, 46(2), 113–124.
- Bruno, M. C., Pinto, M., & Rojas, W. (2018). Identifying Domesticated and Wild Kañawa (*Chenopodium pallidicaule*) in the Archeobotanical Record of the Lake Titicaca Basin of the Andes. *Economic Botany*, 72(2), 137–149.
- Caglayan, A., Guclu, O., & Can, A. B. (2013). A plant recognition approach using shape and color features in leaf images. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8157 LNCS(PART 2), 161–170.
- Campos, D., Chirinos, R., Gálvez Ranilla, L., & Pedreschi, R. (2018). Bioactive Potential of Andean Fruits, Seeds, and Tubers. En *Advances in Food and Nutrition Research* (1a ed., Vol. 84). Elsevier Inc.
- Carranza-Rojas, J., Goeau, H., Bonnet, P., Mata-Montero, E., & Joly, A. (2017). Going deeper in the automated identification of Herbarium specimens. *BMC evolutionary biology*, 17(1), 181.
- Castellanos, J. (2014). *El Boro (B)*, en *la Nutrición de los Cultivos. Hojas Técnicas de Fertilab* (p. 4).
- Castellanos, J., Uvalle, J., & A., A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*.
- Cerisola, C. (2015). *La materia organica edafica. Manejo y conservacion de suelos* (D. de ambiente y recursos Naturales (ed.)).

- Chahua, J. (2020). *Comportamiento agromorfológico de diez accesiones de cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen) en el centro experimental Camacani Puno* [Universidad Nacional del Altiplano de Puno]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/16863>
- Chernov, V., Alander, J., & Bochko, V. (2015). Integer-based accurate conversion between RGB and HSV color spaces. *Computers and Electrical Engineering*, 46, 328–337.
- Choque, R. (2005). *Efecto de niveles de fertilización con estiércol de llama (Lama glama) en tres ecotipos de Kañawa (Chenopodium pallidicaule Aellen) en el altiplano norte (Región cordillera)*. Universidad Mayor de San Andrés.
- Conesa, M. R., López-Martínez, L., Conejero, W., Vera, J., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungus stimulates young field-grown nectarine trees. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16).
- De Luna, R., Baldovino, R., Cotoco, E., De Ocampo, A., Valenzuela, I., Culaba, A., & E, D. (2017). Identification of philippine herbal medicine plant leaf using artificial neural network. *HNICEM 2017 - 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, 2018-Janua*, 1–8.
- Du, J. xiang, Zhai, C. M., & Wang, Q. P. (2013). Recognition of plant leaf image based on fractal dimension features. *Neurocomputing*, 116, 150–156.
- Dyrmann, M., Karstoft, H., & Midtiby, H. S. (2016). Plant species classification using deep convolutional neural network. *Biosystems Engineering*, 151(2005), 72–80.
- FAO. (2022). *Soils for nutrition: state of the art*. FAO.
- Fernandez, M., Juarez, J., Nicolás, E., Alarcón, J., Kirchmair, M., García, F., Bernabe, A., & Bernal, C. (2017). Application of Arbuscular Mycorrhizae *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* var. *nova* in Intensive Agriculture: A Study Case. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 7(4), 221–247.
- Ferreira, M. G., Azevedo, A. M., Siman, L. I., da Silva, G. H., Carneiro, C. dos S., Alves, F. M., Delazari, F. T., da Silva, D. J. H., & Nick, C. (2016). Automation in accession classification of Brazilian Capsicum germplasm through artificial neural networks.

Scientia Agricola, 74(3), 203–207.

Fertilab. (2012). *Manual De Muestreo. Cuarta Edición*.

Flexas, J., Zhang, Y., Gulías, J., Xiong, D., Carriquí, M., Baraza, E., Du, T., Lei, Z., Meng, H., Dou, H., Ribas-Carbo, M., Xiang, D., & Xu, W. (2022). Leaf physiological traits of plants from the Qinghai-Tibet Plateau and other arid sites in China: Identifying susceptible species and well-adapted extremophiles. *Journal of Plant Physiology*, 272, 153689.

Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola-FIDA. (2010). *Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañihua y kiwicha en Perú. Biodiversity International*.

Fuentes, S., Hernández-Montes, E., Escalona, J. M., Bota, J., Gonzalez Viejo, C., Poblete-Echeverría, C., Tongson, E., & Medrano, H. (2018). Automated grapevine cultivar classification based on machine learning using leaf morpho-colorimetry, fractal dimension and near-infrared spectroscopy parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151(April), 311–318.

Fuentes, Y. (2000). *El suelo y los fertilizantes* (esca y A. Ministerio de agricultura (ed.)).

G., J. B., & Gopi, E. S. (2021). An hierarchical approach for automatic segmentation of leaf images with similar background using kernel smoothing based Gaussian process regression. *Ecological Informatics*, 63(October 2020), 101323.

Gade, D. W. (1970). Ethnobotany of cañihua (*Chenopodium pallidicaule*), rustic seed crop of the Altiplano. *Economic Botany*, 24(1), 55–61.

Gao, L., & Lin, X. (2018). A method for accurately segmenting images of medicinal plant leaves with complex backgrounds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155(November), 426–445.

Gómez-Bellot, M., Ortuño, M., Nortes, P., Vicente-Sánchez, J., Martín, F., Bañón, S., & Sánchez-Blanco, M. (2015). Protective effects of *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* on soil and *Viburnum tinus* plants irrigated with treated wastewater under field conditions. *Mycorrhiza*, 25(5), 399–409.

- Guo, W. (2018). Automated Characterization of Plant Growth and Flowering Dynamics Using RGB Images. *Smart Plant Factory*, 385–393.
- Gupta, S., & Ibaraki, Y. (2015). Plant Image Analysis: Fundamentals and Applications. En *CRC Press. Taylor & Francis Group*.
- INTAGRI. (2017). *Fosforo y calcio en el crecimiento de la raiz*. (p. 3).
- IPGRI, PROINPA, & IFAD. (2005). *Descriptores para Cañahua (Chenopodium pallidicaule Aellen)* (I. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma, Italia; Fundación PROINPA, La Paz, Bolivia; International Fund for Agricultural Development, Roma (ed.)). https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/user_upload/online_library/publications/pdfs/1071.pdf
- Islam, M., Ria, N. J., Ani, J. F., Masum, A. K. M., Abujar, S., & Hossain, S. A. (2022). Deep Learning Based Classification System for Recognizing Local Spinach. En L. Troiano, A. Vaccaro, R. Tagliaferri, N. Kesswani, I. Díaz Rodríguez, I. Brigui, & D. Parente (Eds.), *Advances in Deep Learning, Artificial Intelligence and Robotics* (pp. 1–14). Springer International Publishing.
- Kalist, V., Ganesan, P., Sathish, B. S., Jenitha, J. M. M., & Basha.shaik, K. (2015). Possibilistic-Fuzzy C-Means Clustering Approach for the Segmentation of Satellite Images in HSL Color Space. *Procedia Computer Science*, 57, 49–56.
- Kapczyńska, A. (2022). Morphological and botanical profile of Lachenalia cultivars. *South African Journal of Botany*, 147, 472–481.
- Kapoor, R., Sharma, D., & Bhatnagar, A. K. (2008). Arbuscular mycorrhizae in micropropagation systems and their potential applications. *Scientia Horticulturae*, 116(3), 227–239.
- Kumar, P., Sambit, S., Ioannis, B., Hatzilygeroudis, K., Narayan, M., & Editors, S. (2017). *Advances in Intelligent Systems and Computing 709 Recent Findings in Intelligent Computing Techniques* (Vol. 3). <http://www.springer.com/series/11156>
- Kurmi, Y., Gangwar, S., Agrawal, D., Kumar, S., & Srivastava, H. S. (2021). Leaf image analysis-based crop diseases classification. *Signal, Image and Video Processing*, 15(3),

589–597.

- Larese, M. G., Bayá, A. E., Craviotto, R. M., Arango, M. R., Gallo, C., & Granitto, P. M. (2014). Multiscale recognition of legume varieties based on leaf venation images. *Expert Systems with Applications*, 41(10), 4638–4647.
- Lescano, J. (1994). *Genética y mejoramiento de cultivos alto andinos: quinua, kañihua, tarwi, kiwicha, papa amarga, olluco, ashua y oca*.
- Li, C., Adhikari, R., Yao, Y., Miller, A. G., Kalbaugh, K., Li, D., & Nemali, K. (2020). Measuring plant growth characteristics using smartphone based image analysis technique in controlled environment agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 168(October 2019), 105123.
- Luna-Mercado, G. I., & Repo-Carrasco-Valencia, R. (2020). Gluten-free bread applications: Thermo-mechanical and techno-functional characterization of Kañiwa flour. *Cereal Chemistry*, cche.10386.
- Machaca, R. (2015). *Caracterización agronómica y morfológica de doce accesiones de maíz (zea mays l.) altiplánicos tolerantes al frío en CIP Camacani, Puno*. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Maertens, M., & Vande, K. (2017). Contract-farming in Staple Food Chains: The Case of Rice in Benin. *World Development*, 95, 73–87.
- Mamani, E. (2013). Caracterización molecular de 26 accesiones de cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) con mayor rendimiento en grano: Altiplano - Puno. En *Universidad Nacional del Altiplano de Puno*.
- Mangelson, H., Jarvis, D. E., Mollinedo, P., Rollano-Penalosa, O. M., Palma-Encinas, V. D., Gomez-Pando, L. R., Jellen, E. N., & Maughan, P. J. (2019). The genome of *Chenopodium pallidicaule*: An emerging Andean super grain. *Applications in Plant Sciences*, 7(11), 1–12.
- McGrath, J. M., Spargo, J., & Penn, C. J. (2014). Soil Fertility and Plant Nutrition. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, 166–184.
- Min, Z., Li, R., Zhao, X., Li, R., Zhang, Y., Liu, M., Wei, X., Fang, Y., & Chen, S. (2018).

- Morphological variability in leaves of Chinese wild *Vitis* species. *Scientia Horticulturae*, 238(April), 138–146.
- Montalvo, M., Guijarro, M., Guerrero, J., & Ribeiro, A. (2016). Identification of plant textures in agricultural images by Principal Component Analysis. En F. Martínez-Álvarez, A. Troncoso, H. Quintián, & E. Corchado (Eds.), *In: Martínez-Álvarez F., Troncoso A., Quintián H., Corchado E. (eds) Hybrid Artificial Intelligent Systems. HAIS 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9648. Springer, Cham* (Vol. 9648, pp. 391–401). Springer International Publishing.
- N'guessan, S. O., & Ling, N. (2018). Saturation-aware human attention region of interest algorithm for efficient video compression. *Multimedia Tools and Applications*, 77(23), 31067–31093.
- Nikolaev, V. F., Foss, L. E., Sulaiman, B. F., Agybay, A. B., Timirgalieva, A. K., & Sultanova, R. B. (2018). The unified scale of natural waters. *Georesursy*, 20(2), 58–66.
- Núñez, E. (2011). Análisis molecular de la diversidad intra accesional de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild.) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) mediante marcadores AFLP'S. En *Universidad Nacional Agraria La Molina* (Número September).
- Oncevay, A., Juarez, R., Khlebnikov, S., & Beltrán, C. (2015). Leaf-based plant identification through morphological characterization in digital images. *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, 9257, 326–335.
- Ortuño, M. F., Lorente, B., Hernández, J. A., & Sánchez-Blanco, M. J. (2018). Mycorrhizal inoculation on compost substrate affects nutritional balance, water uptake and photosynthetic efficiency in *Cistus albidus* plants submitted to water stress. *Revista Brasileira de Botanica*, 41(2), 299–310.
- Pandolfi, C., Mugnai, S., Azzarello, E., Bergamasco, S., Masi, E., & Mancuso, S. (2009). Artificial neural networks as a tool for plant identification : a case study on Vietnamese tea accessions. *Euphytica*, 411–421.
- Parray, J. A., Mir, M. Y., & Shameem, N. (2019). Sustainable agriculture: Biotechniques in

- plant biology. En *Sustainable Agriculture: Biotechniques in Plant Biology*.
- Patricio, D. I., & Rieder, R. (2018). Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 69–81.
- Paul, P., & Chowdhury, M. (2021). Foliar micromorphology as a tool for identification of Indian taxa of Polygonaceae. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 14(4), 569–589.
- Perez, D., & Antezana, R. (2018). The Functionality of Pseudocereal Starches. En *Starch in Food* (Vol. 570). Elsevier Ltd.
- Pérez, G. T., Steffolani, M. E., & León, A. E. (2016). Functional Properties of Traditional Foods. En K. Kristbergsson & S. Ötles (Eds.), *Functional Properties of Traditional Foods*. Springer US.
- Qiao, Q., Ye, M., Wu, C., Wang, J., Liu, Q., Tao, J., Zhang, L., & Feng, Z. (2022). Analysis of leaf morphology variation and genetic diversity via SRAP markers for near-threatened plant *Acer truncatum*. *Global Ecology and Conservation*, 33(December 2021), e01980.
- Quiroga, C. (2020). Native food crops for present and future generations: Their role in nutrition and health. Their role in nutrition and health. En *Sustainability of the Food System: Sovereignty, Waste, and Nutrients Bioavailability*. Elsevier Inc.
- Rehman, T. U., Mahmud, M. S., Chang, Y. K., Jin, J., & Shin, J. (2019). Current and future applications of statistical machine learning algorithms for agricultural machine vision systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156(March 2018), 585–605.
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., Pascale, S. De, Bonini, P., & Colla, G. (2015a). Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 91–108.
- Rouphael, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., Agnolucci, M., Pascale, S. De, Bonini, P., & Colla, G. (2015b). Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 91–108.
- Rzanny, M., Wittich, H. C., Mäder, P., Deggelmann, A., Boho, D., & Wäldchen, J. (2022).

Image-Based Automated Recognition of 31 Poaceae Species: The Most Relevant Perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 12(January).

Sachar, S., & Kumar, A. (2021a). Survey of feature extraction and classification techniques to identify plant through leaves. *Expert Systems with Applications*, 167(January 2020), 114181.

Sachar, S., & Kumar, A. (2021b). Survey of feature extraction and classification techniques to identify plant through leaves. *Expert Systems with Applications*, 167(October 2020), 114181.

Saleem, G., Akhtar, M., Ahmed, N., & Qureshi, W. S. (2019). Automated analysis of visual leaf shape features for plant classification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157(November 2018), 270–280.

Siedliska, A., Baranowski, P., Pastuszka-Woźniak, J., Zubik, M., & Krzyszczyk, J. (2021). Identification of plant leaf phosphorus content at different growth stages based on hyperspectral reflectance. *BMC Plant Biology*, 21(1), 1–17.

Simpson, M. G. (2006). Plants Systematics. En *Elsevier Academic Press* (Vol. 53, Número 9).

Sitts, M. K. (2000). Handbook for Digital Projects: A Management Tool for Preservation and Access. En *Library Resources & Technical Services* (Vol. 45, Número 1).

Smith, A. R. (1978). Color gamut transform pairs. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 12(3), 12–19.

Smith, S., & Read, D. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis. Third Edition*. Elsevier.

Suchowilska, E., & Wiwart, M. (2006). Multivariate analysis of image descriptors of common wheat (*Triticum aestivum*) and spelt (*T. spelta*) grain infected by *Fusarium culmorum*. *Growth (Lakeland)*, 20, 345–351.

Sun, Y., Tong, C., He, S., Wang, K., & Chen, L. (2018). Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies based on temporal dynamics of leaf morphology and color. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3).

Taraschi, G., & Florindo, J. B. (2019). Computing fractal descriptors of texture images using

sliding boxes: An application to the identification of Brazilian plant species. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*.

- Tavakoli, H., Alirezazadeh, P., Hedayatipour, A., Banijamali Nasib, A. H., & Landwehr, N. (2021). Leaf image-based classification of some common bean cultivars using discriminative convolutional neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181(October 2020), 105935.
- Thyagarajan, K., & Raji, K. (2019). A Review of Visual Descriptors and Classification Techniques Used in Leaf Species Identification. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26(4), 933–960.
- Toubali, S., Ait-El-Mokhtar, M., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-Rahou, Y., Benaffari, W., Ben-Ahmed, H., Mitsui, T., Baslam, M., & Meddich, A. (2022). Root Reinforcement Improved Performance, Productivity, and Grain Bioactive Quality of Field-Droughted Quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Frontiers in Plant Science*, 13(March).
- Vargas, A., Elzinga, D. B., Rojas-Beltran, J. A., Bonifacio, A., Geary, B., Stevens, M. R., Jellen, E. N., & Maughan, P. J. (2011). Development and use of microsatellite markers for genetic diversity analysis of cañahua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 58(5), 727–739.
- Vicente-Sánchez, J., Nicolás, E., Pedrero, F., Alarcón, J. J., Maestre-Valero, J. F., & Fernández, F. (2014). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alleviates detrimental effects of saline reclaimed water in lettuce plants. *Mycorrhiza*, 24(5), 339–348.
- Villa, D. Y. G., Russo, L., Kerbab, K., Landi, M., & Rastrelli, L. (2014). Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium pallidicaule* (cañ ihua) and *Chenopodium quinoa* (quinoa) seeds. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 26(7), 609–615.
- Vizcarra, G., Bermejo, D., Mauricio, A., Zarate Gomez, R., & Dianderas, E. (2021). The Peruvian Amazon forestry dataset: A leaf image classification corpus. *Ecological Informatics*, 62(February), 101268.
- Wäldchen, J., & Mäder, P. (2017). Plant species identification using computer vision techniques: A systematic literature review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25(2), 507–543.

- Waldchen, J., Rzanny, M., Seeland, M., & Mader, P. (2018). Automated plant species identification — Trends and future directions. *Plos Computational Biology*, *14*(4), 1–19.
- Walter, A., Liebisch, F., & Hund, A. (2015). Plant phenotyping: From bean weighing to image analysis. *Plant Methods*, *11*(1), 1–11.
- Wang, B., Li, H., You, J., Chen, X., Yuan, X., & Feng, X. (2022). Fusing deep learning features of triplet leaf image patterns to boost soybean cultivar identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, *197*(April), 106914.
- Xiong, Y., Liang, L., Wang, L., She, J., & Wu, M. (2020). Identification of cash crop diseases using automatic image segmentation algorithm and deep learning with expanded dataset. *Computers and Electronics in Agriculture*, *177*(September), 105712.
- Xue, J. R., Fuentes, S., Poblete-Echeverria, C., Viejo, C. G., Tongson, E., Du, H. J., & Su, B. (2019). Automated Chinese medicinal plants classification based on machine learning using leaf morpho-colorimetry, fractal dimension and visible/near infrared spectroscopy. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *12*(2), 123–131.
- Yang, W., Wang, S., Zhao, X., Zhang, J., & Feng, J. (2015). Greenness identification based on HSV decision tree. *Information Processing in Agriculture*, *2*(3–4), 149–160.
- Yanikoglu, B., Aptoula, E., & Tirkaz, C. (2014). Automatic plant identification from photographs. *Machine Vision and Applications*, *25*(6), 1369–1383.
- Zahra, S. J., Sulaiman, R., Kahaki, S. M. M., & Prabuwno, A. S. (2020). Harmonic Mean Projection Shape Transform for Leaf Classification. *Journal of Computer Science*, *16*(9), 1212–1219.
- Zapotoczny, P., Zielinska, M., & Nita, Z. (2008). Application of image analysis for the varietal classification of barley: Morphological features. *Journal of Cereal Science*, *48*(1), 104–110.
- Zhan, G., Zong, W., Ma, L., Wei, J., & Liu, W. (2022). Biomechanical properties of ready-to-harvest rapeseed plants: Measurement and analysis. *Information Processing in Agriculture*, xxx.



- Zhang, H., Kuang, Z., Peng, X., He, G., Peng, J., & Fan, J. (2020). Aggregating diverse deep attention networks for large-scale plant species identification. *Neurocomputing*, 378(xxxx), 283–294.
- Zhang, L., Weckler, P., Wang, N., Xiao, D., & Chai, X. (2016). Individual leaf identification from horticultural crop images based on the leaf skeleton. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 184–196.
- Zhou, C., Le, J., Hua, D., He, T., & Mao, J. (2019). Imaging analysis of chlorophyll fluorescence induction for monitoring plant water and nitrogen treatments. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 136, 478–486.

ANEXOS

Anexo 1. Galería fotográfica



Llenado de bolsas con sustrato para la siembra de cañihua en el vivero de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno



Etiquetado de plantas de cañihua por tratamientos en el vivero de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno



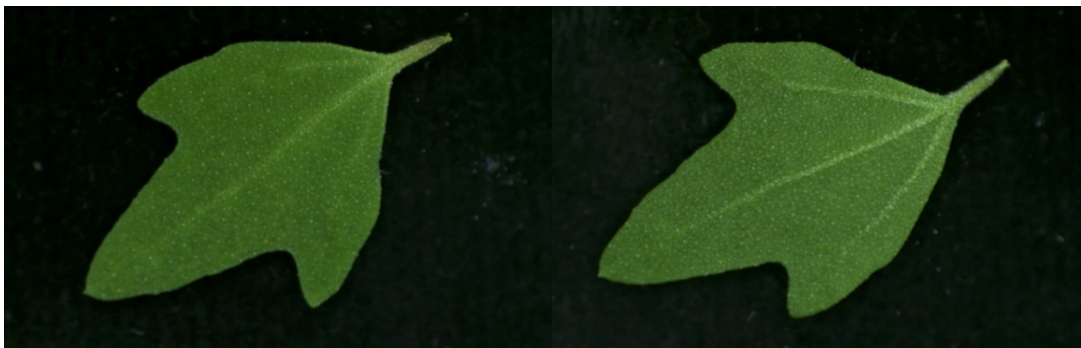
Emergencia de plantas de cañihua en el vivero de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno



Aplicación de Mycoup por tratamientos en el vivero de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno



Calibración de cámara EO-2323 y lente telecéntrico de 55 mm para la captura de imágenes de hojas en el laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno



Captura del haz y envés de las hojas de cañihua (variedades y accesiones) en el laboratorio de la escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno

Anexo 2. Análisis de agua



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-4561

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-13819	M-22-13820	M-22-13821	M-22-13822			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	C-315	C-3-146-296 BLANCO	C-INIA	C-RAMIS			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	MATERIAL VEGETAL						
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA						
INICIO DE MUESTREO (FECHA y HORA):	26-03-2022	26-03-2022	26-03-2022	26-03-2022			
FIN DE MUESTREO (FECHA y HORA):	26-03-2022	26-03-2022	26-03-2022	26-03-2022			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Nitrógeno Total (**)	%	0,20	0,60	2,26	2,26	2,26	2,19
Cloruro (**)	mg/Kg	10	25	10 352	6 876	9 764	7 413
Metales Totales ICP-OES - Vegetales (B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, S, Zn, P, Mo)							
Azufre ²	%	0,002	0,005	0,385	0,399	0,406	0,421
Boro ²	mg/Kg	0,40	1,00	26,05	27,55	28,62	23,86
Calcio ²	%	0,004	0,010	0,511	0,649	0,632	0,507
Cobre ²	mg/Kg	0,40	1,00	3,43	4,57	3,78	5,33
Fosforo ²	%	0,002	0,005	0,329	0,407	0,300	0,506
Hierro ²	mg/Kg	4,0	10,0	91,8	102,1	85,5	96,2
Magnesio ²	%	0,002	0,005	1,042	1,120	1,115	1,107
Manganeso ²	mg/Kg	4,0	10,0	23,6	20,7	19,1	23,7
Potasio ²	%	0,004	0,010	10,396	10,041	10,229	11,773
Sodio ²	mg/Kg	20,00	50,00	6 315,89	2 039,20	7 980,71	811,33
Zinc ²	mg/Kg	0,4	1,0	38,5	42,3	37,8	43,8

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

Anexo 3. Análisis de suelos inicial y al final del experimento

Ensayo	Unidad	Inicial	Final							
			146	204	231	301	315	Puka	Inia	Ramis
Conductividad eléctrica	dS/m	1.587	1.704	1.667	1.372	1.238	0.916	1.384	1.308	1.559
pH		8.09	7.92	7.94	7.89	7.93	8.19	8.04	7.89	7.77
Punto Marchitez Permanente (PMP)	%	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78
Carbonato de calcio	%	4.44	4.14	4.54	4.24	4.24	4.54	4.34	4.24	3.55
Materia orgánica	%	15.02	12.16	11.88	15.57	16.69	14.73	25.43	13.19	10.81
Nitrógeno total	mg/kg	7601	6202	8576	7971	8495	7525	13071	6740	5534
Boro disponible	mg/kg	40.64	31.63	33.31	31.98	33.9	35.67	36.06	32.08	37.75
Fósforo disponible	mg/kg	376.77	290.58	359.68	181.8	205.67	249.72	324.19	344.88	308.07
Bases cambiables (Ca, Mg, K, Na)										
Calcio cambiabile	meq/100g	19.85	21.93	22	21.6	20.49	21.74	21.02	20.52	20.07
Magnesio cambiabile	meq/100g	10.09	11.73	10.7	11.67	10.44	10.44	10.85	9.93	9.8
Potasio cambiabile	meq/100g	1.3	1.37	1.24	1.36	1.22	1.2	1.32	1.15	1.17
Sodio cambiabile	meq/100g	0.21	0.24	0.22	0.23	0.18	0.21	0.23	0.16	0.18
Bases disponibles (Ca, Mg, K, Na)										
Calcio disponible	meq/100g	22.4	24.86	25.96	23.31	21.31	21.79	23.99	21.33	20.88
Magnesio disponible	meq/100g	13.89	16.56	15.81	15.88	11.75	11.46	14.83	11.79	11.39
Potasio disponible	meq/100g	8.51	8.86	7.82	8.54	6.43	5.25	7.94	6.55	6.76
Relación Ca+Mg/K		4.3	4.7	5.3	4.6	5.1	6.3	4.9	5.1	4.8
Relación Ca+Mg		1.6	1.5	1.6	1.5	1.8	1.9	1.6	1.8	1.8
Sodio disponible	meq/100g	4.36	5.11	4.67	4.82	2.96	2.74	4.5	3.42	3.47
Suma de bases disponibles	meq/100g	49.17	55.39	54.26	52.55	42.45	41.24	51.26	43.09	42.49
CIC efectiva	meq/100g	31.45	35.27	34.16	34.86	32.33	33.59	33.42	31.16	31.22
Micronutrientes (Cu, Mn, Fe, Zn)										
Manganeso	mg/kg	1.82	4.23	3.84	2.96	1.87	2.64	2.74	2.26	1.73
Zinc	mg/kg	1.52	2.72	2.71	1.64	1.15	1.38	1.62	1.29	1.2

Nota. Toda la textura en todos los suelos fue Arena Franca.

Anexo 4. Análisis foliar



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-4524

IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-22-13653
CÓDIGO DEL CLIENTE:				RIEGO-1
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				Agua Superficial
SUB PRODUCTO:				
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO :				26-03-2022
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Conductividad Eléctrica (**)	µS/cm a 25°C	27,00	80,00	1 012,00
pH (**)	Unidad de pH	0,67	2,00	8,09
Preparacion de Muestras Aguas (**)	no unidad	NA	NA	FINALIZADO
Alcalinidad Total (**)	mg/L	2,00	5,00	205,50
Cloruro (**)	mg/L	2,0	5,0	85,9
Amonio (**)	mg/L	2,00	6,00	<6,00
Nitrato (**)	mg/L	4,00	12,00	62,21
Metales ICP - OES- Agua (B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, SO4, Zn, H2PO4-1)				
Boro (**)	mg/L	0,002	0,008	0,193
Calcio (**)	mg/L	0,002	0,006	110,351
Cobre (**)	mg/L	0,0003	0,0010	<0,0010
Fosfato (**)	mg/L	0,01	0,04	<0,04
Hierro (**)	mg/L	0,001	0,004	0,107
Magnesio (**)	mg/L	0,007	0,020	17,226
Manganeso (**)	mg/L	0,0001	0,0002	0,0126
Potasio (**)	mg/L	0,04	0,10	1,64
Sodio (**)	mg/L	0,004	0,010	35,702
Sulfato (**)	mg/L	1,00	3,00	80,06
Zinc (**)	mg/L	0,0001	0,0004	<0,0004

(**) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.
NA: No Aplica