



Scientia Agropecuaria

Web page: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>

Facultad de Ciencias
Agropecuarias

Universidad Nacional de
Trujillo

RESEARCH ARTICLE



Detection and identification of high Andean plant communities, Wetlands and Tolar de Puna Seca by means of RGB and NDVI orthophotos in “Unmanned Aerial Systems” drones

Detección e identificación de comunidades vegetales altoandinas, Bofedal y Tolar de Puna Seca mediante ortofotografías RGB y NDVI en drones “Sistemas Aéreos no Tripulados”

Andrés C. Estrada Zúñiga^{1, 2, *} ; Javier Ñaupari Vásquez¹ 

¹ Universidad Nacional Agraria la Molina _ Lima Av. La Molina 15024. Lima. Peru.

² Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Cusco, Av. De la Cultura 733, Cusco. Peru.

* Corresponding author: andres.estrada@unsaac.edu.pe (A. C. Estrada Zúñiga).

Received: 10 January 2021. Accepted: 7 June 2021. Published: 19 July 2021.

Abstract

Remote sensing and geographic information systems are tools that in the last decade have been widely used in the management of natural resources, however, they have presented deficiencies for precision livestock studies due to the quality of spatial resolutions, spectral and temporal. Faced with this limitation, microsensors appear as an alternative in Unmanned Aerial Systems (UAS) that allow obtaining orthophotographs with better resolutions. Considering these advantages, a study was developed to determine the best flight height in the detection and identification of the tolar and bofedal plant communities of the dry puna. For the study, RGB and NDVI photographs were collected with ZENMUSE X3 DJI RGB-NDVI sensors in UAS with flight heights of 25, 50, 75 and 100 m. In the field, tola plants and DIMU cushions were counted in quadrants of 10 m x 10 m (100 m²). The preparation of orthophotographs was carried out in the Pix 4D software and to analyze the information an algorithm was developed with the ability to identify a segmented element (tola Plant and / or DIMU cushion) using Python. The study found that the NDVI range for the identification of tolares of *Parastrephia lepidophylla* is from 0.20 to 0.45 and for *Distichia muscoides* bogs is from 0.68 to 0.95; finally, using RGB and NDVI orthophotographs, it was determined that the best flight height to identify the Tola and DIMU segmented species is 25 m followed by 50 m.

Keywords: Plant community; Remote sensors; Tolar; Bofedal; UAS; UAV.

Resumen

La teledetección y los sistemas de información geográfica son herramientas que en la última década se utilizan con énfasis en la gestión de recursos naturales; sin embargo, éstas han presentado deficiencias para estudios de ganadería de precisión debido a la calidad de las resoluciones espacial, espectral y temporal de las imágenes, frente a esta limitación aparece como alternativa los microsensores en sistemas aéreos no tripulados (UAS) que permiten obtener ortofotografías con mejores resoluciones. Considerando estas ventajas se desarrolló un estudio para determinar la mejor altura de vuelo de las UAV en la detección e identificación de las comunidades vegetales tolar y bofedal de puna seca. Para el estudio se recopilamos fotografías RGB y NDVI con sensores ZENMUSE X3 DJI RGB-NDVI en UAS con alturas de vuelo de 25, 50, 75 y 100 m. En el campo se contabilizaron plantas de tola y cojines de DIMU en cuadrantes de 10 m x 10 m (100 m²). La preparación de ortofotografías se realizó en el software Pix 4D y para analizar la información se elaboró un algoritmo con capacidad de identificar un elemento segmentado (planta de tola y/o cojín de DIMU) utilizando el lenguaje de programación Python. El estudio determinó que el rango de NDVI para la identificación de tolares de *Parastrephia lepidophylla* es de 0,20 a 0,45 y para bofedales de *Distichia muscoides* es de 0,68 a 0,95; finalmente usando ortofotografías RGB y NDVI se determinó que la mejor altura de vuelo para identificar las especies segmentadas Tola y DIMU es de 25 m seguido de 50 m.

Palabras clave: Comunidad vegetal; Sensores remotos; Tolar; Bofedal; UAS; UAV.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.032>

Cite this article:

Estrada Zúñiga, A. C., & Ñaupari Vásquez, J. (2021). Detección e identificación de comunidades vegetales altoandinas, Bofedal y Tolar de Puna Seca mediante ortofotografías RGB y NDVI en drones “Sistemas Aéreos no Tripulados”. *Scientia Agropecuaria*, 12(3), 291-301.

1. Introducción

El Perú por la presencia de la cordillera de los andes expone una diversidad de zonas de vida con características ecológicas muy particulares y de comunidades vegetales diferentes (Pulgar, 1996; Holdrige, 1987; Flores et al., 2014). En los andes del sur del Perú nace la franja de la Zona Homogénea de Producción de Puna Seca (ZHPPS), que se extiende desde los 15° latitud sur y comprende las tierras altas del departamento de Arequipa hasta Tucumán en Argentina a 30° Latitud Sur (Tapia & Flores, 1984). Esta zona homogénea de producción en el sur del Perú asciende a 157 000 Km² que representa el 12,77% del territorio nacional y está compuesta por las comunidades vegetales de tolar, bofedal, pajonal y césped de puna (Estrada et al., 2018). La teledetección y los sistemas de información geográfica son cada vez más utilizados para la gestión de los recursos naturales y la agricultura (Norasma et al., 2019; D'oleira et al., 2012), encontrándose condicionada por las limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes satelitales disponibles (Lost et al., 2019; Librán-Embid et al., 2020). Los sistemas aéreos no tripulados (UAS = Unmanned Aerial System) y los microsensores de alta resolución se están utilizando para establecer variables que faciliten la identificación de especies (Xie & Yang, 2020) estado nutricional y sanitario en cultivos de caña de azúcar (Kharuf et al., 2018 y Zhun et al. 2018), así como utilizando diferentes alturas de vuelo se están identificando árboles, arbustos y su estado sanitario en cultivos de trigo y alfalfa (Ishida et al., 2018; Xu & Paterson., 2019).

La incorporación de microsensores multiespectrales en la identificación de especies es una innovación y para realizar la identificación de especies vegetales a partir de ortofotografías RGB o NDVI se requiere elaborar algoritmos (Flores et al., 2021; Zhengxia et al., 2019) que faciliten la identificación y caracterización de una especie, ello es posible utilizando redes neuronales convolucionales y técnicas de segmentación.

El estudio de pastizales altoandinos en plataforma UAS se encuentra en sus inicios. La investigación responde a la necesidad de establecer la mejor altura de vuelo de la plataforma UAS para identificar de manera detallada comunidades vegetales, con las diversas clases e inclusiones que componen estas comunidades.

2. Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio

El estudio se realizó en la comunidad de Chalhuanca del distrito de Yanque y en la comunidad Hanansaya I del distrito de Callalli, geográficamente se encuentra ubicada entre las coordenadas 71°15' a 71°20' longitud oeste y de 15°15' a 16°20' latitud sur. El área de estudio se encuentra en una franja altiplánica de la provincia de Caylloma de la región Arequipa, con altura que va desde los 3800 a 5000 msnm. y es clasificada como zona homogénea de producción de puna seca con características de semi aridez, suelos arenosos, con precipitación pluvial media de 315.1 mm, con temperaturas muy bajas (Buitrón & Calisaya, 2012; Zorogastua et al., 2012; Tapia & Flores, 1984).

El ámbito de estudio presenta la comunidad vegetal tolar y bofedal adaptadas a largos periodos de sequía y temperaturas muy frías de hasta -17 °C. La comunidad tolar está compuesta por arbustos de tola y césped de puna y su composición florística presenta una diversidad de especies sobresaliendo la *Parastrephia* sp. y *Baccharis* sp. y gramíneas como *Festuca dolichophylla*, *Festuca orthophylla* y *Calamagrostis* sp. Mientras que la comunidad vegetal Bofedal está compuesta principalmente por *Distichia muscoides* que forman densas almohadillas acompañada por *Alchemilla* sp., *Plantagos* sp. que ofrecen pastos durante todo el año (Estrada et al., 2018; Librán-Embid et al., 2020).

Proceso metodológico

La adquisición de las fotografías con microsensores se realizó a 25, 50, 75 y 100 metros de altura a través de la plataforma UAS (Zhu et al., 2018; Librán-Embid et al., 2020) que estuvo compuesto por un UAV multirrotor Matrice 100 equipado con cámaras DJI Zenmuse X3 RGB y NDVI de 12.4 Mpx; con una resolución espacial de 10 cm/pixel a 150 m de altura, con autonomía de vuelo de 20 minutos por batería a 4500 msnm y una resolución espacial de dos veces al año al final de la época seca y final de la época de lluvia (Xie & Yang, 2020). De acuerdo a las características de UAV y la batería se planificó el tiempo de vuelo y área de vuelo por batería (Tabla 1) (Robb et al., 2020).

Tabla 1

Planificación de tiempo y área de vuelo por batería

Altura (m)	Área (ha)	Tiempo (min) 2D
25	5	13,45
50	13	11,30
75	17	12,18
100	31	11,43

Durante el trabajo de campo se recolectaron muestras en las comunidades vegetales tolar y bofedal. La contabilización del arbusto de tola y cojines de DIMU se realizó en cuadrantes de 10 m x 10 m (100 m²) debidamente georreferenciados.

Recopilación de fotografías con microsensores en plataforma UAS

La planificación de vuelos se realizó con el software PIX 4D, para dos y tres dimensiones. (Robb et al., 2020) Los planes de vuelo para 2D fueron diseñados con una sola grilla o con líneas de vuelo paralelas con el fin de lograr una superposición o traslape de ortofotografías de 70%, mientras que para 3D se diseñaron con doble grilla o dos capas superpuestas de líneas paralelas (Acebedo, 2011; Flores et al., 2021; Azcoiti, 2016).

En cada zona de vuelo se colocó puntos de control en tierra de 80 x 60 cm pintados de color azul, rojo y blanco para que sean fácilmente identificados por el sensor y reconocidos en el tratamiento de las ortofotografías, cada uno los puntos de control tenían datos georreferenciados con GPS SPECTRA diferencial con precisión de 2 cm. Para el estudio se dispuso con tres sistemas de control en tierra cada uno con punto central y tres puntos georreferenciados al final de las transectas fijas de 100 m (Figura 1).

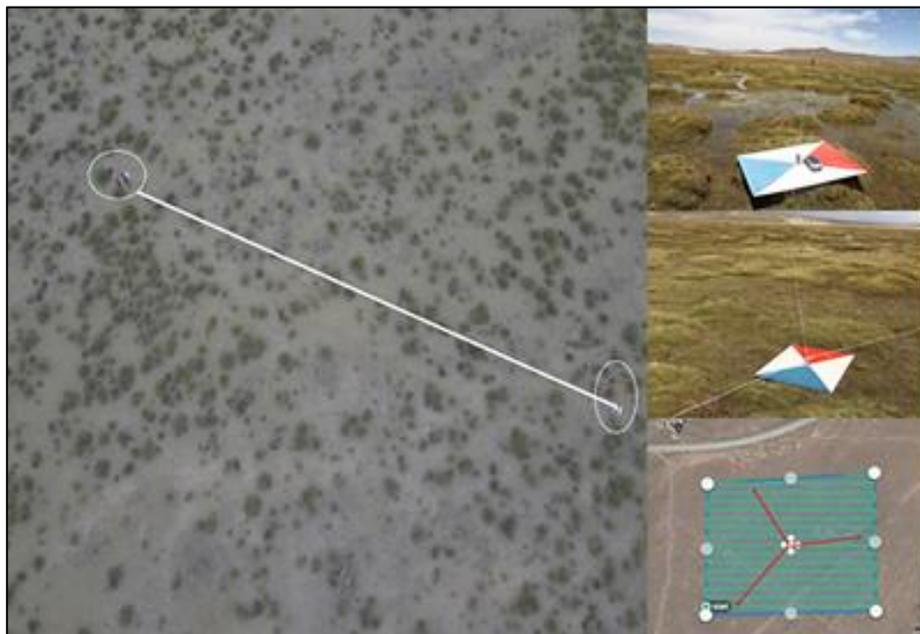


Figura 1. Puntos de control en tierra y transectas.

Generación de las ortofotografías

El procesamiento de las fotografías adquiridas con el sensor transportado por el UAV utilizó el software Pix-4D para fotogrametría, al final de este proceso se obtuvo ortofotografías RGB y NDVI. (Lost et al., 2019).

Metodología para determinación de la altura de vuelo

La determinación de la mejor altura de vuelo para la identificación de comunidades vegetales tolar, bofedal y su composición florística en ortofotografías RGB y NDVI se realizó con la técnica de fotogrametría. Para el análisis de ortofotografías NDVI se elaboró un algoritmo en el lenguaje de programación Python con capacidad de contabilizar objetos segmentados mediante la lectura valores NDVI alcanzados y umbrales NDVI establecidos para cada especie (Xie & Yang, 2020), metodología que puede ser combinada con redes neuronales convolucionales como plantea (Flores et al., 2021; Lin & Guo, 2020). Las especies segmentadas para el estudio fueron el arbusto de *Parastrephia lepidophylla* o "Tola" para la comunidad vegetal tolar y los cojines de *Distichia muscoides* o "DIMU" para la comunidad vegetal bofedal de puna seca.

Para la identificación de las especies segmentadas arbusto de Tola y cojín de DIMU se utilizó ortofotografías RGB y NDVI a diferentes alturas de vuelo (25, 50, 75 y 100 m), recortadas en cuadrantes en 10 m x 10 m que tenían la misma georreferencia de las áreas muestreadas en campo. Para corroborar los resultados del algoritmo creado, se realizaron conteos de la especie segmentada en muestras de ortofotografías RGB recortadas sobre los mismos cuadrantes utilizados con las ortofotografías NDVI, así como se comparó con los datos obtenidos en campo. Las referencias recientes muestran planes de vuelo a 50 metros de altura con sensores lidar para obtener píxeles de 50 cm (Flores et al., 2021).

Para el proceso de identificación de la mejor altura de vuelo en las comunidades vegetales tolar y bofedal de

puna seca con el algoritmo elaborado en base a segmentación de especies para el análisis en ortofotografías NDVI, se determinó como umbrales los valores mínimo y máximo alcanzados por las especies segmentadas (tola= 0,20 – 0,40 y Cojín DIMU = 0,68 – 0,95), estos valores se obtuvieron del procesamiento de fotografías con Pix 4 D. Para determinar el mejor rango de valores NDVI para identificar la especie segmentada en la comunidad vegetal Tolar, se validaron rangos de valor NDVI de 0,20 – 0,45; 0,26 – 0,45; 0,31 – 0,45; 0,36 – 0,45; y 0,41 – 0,45, y para la comunidad vegetal bofedal los rangos NDVI utilizados fueron 0,68 – 0,95; 0,76 – 0,95; 0,81 – 0,95; 0,86 – 0,95 y 0,91 – 0,95 (Figura 2).

Finalmente utilizando el mejor rango encontrado para identificar la especie segmentada (arbusto de tola y Cojín de DIMU) se realizó la identificación de especies segmentadas sobre ortofotografías adquiridas a 25, 50, 75 y 100 m de altura de vuelo. El tratamiento estadístico se realizó con mínimos cuadrados que es una técnica de optimización cuyo objetivo consiste en la obtención de la función que mejor se ajuste (en el sentido de un error cuadrático mínimo) a los datos observados de las variables objeto de estudio.

3. Resultados y discusión

3.1. Altura de vuelo para identificar la comunidad vegetal bofedal

a. Altura de vuelo para identificar la comunidad vegetal bofedal utilizando ortografías RGB

Xu & Paterson (2020) indican que la segmentación es proceso importante en la detección de comunidades vegetales, para la identificación de la comunidad vegetal bofedal se determinó que el objeto segmentado principales serán los cojines o almohadillas de DIMU. Como objetos secundarios de observación los parches de bofedal multiflora, inclusiones de graminéas altas FEDO, suelo desnudo y agua (Figura 3).

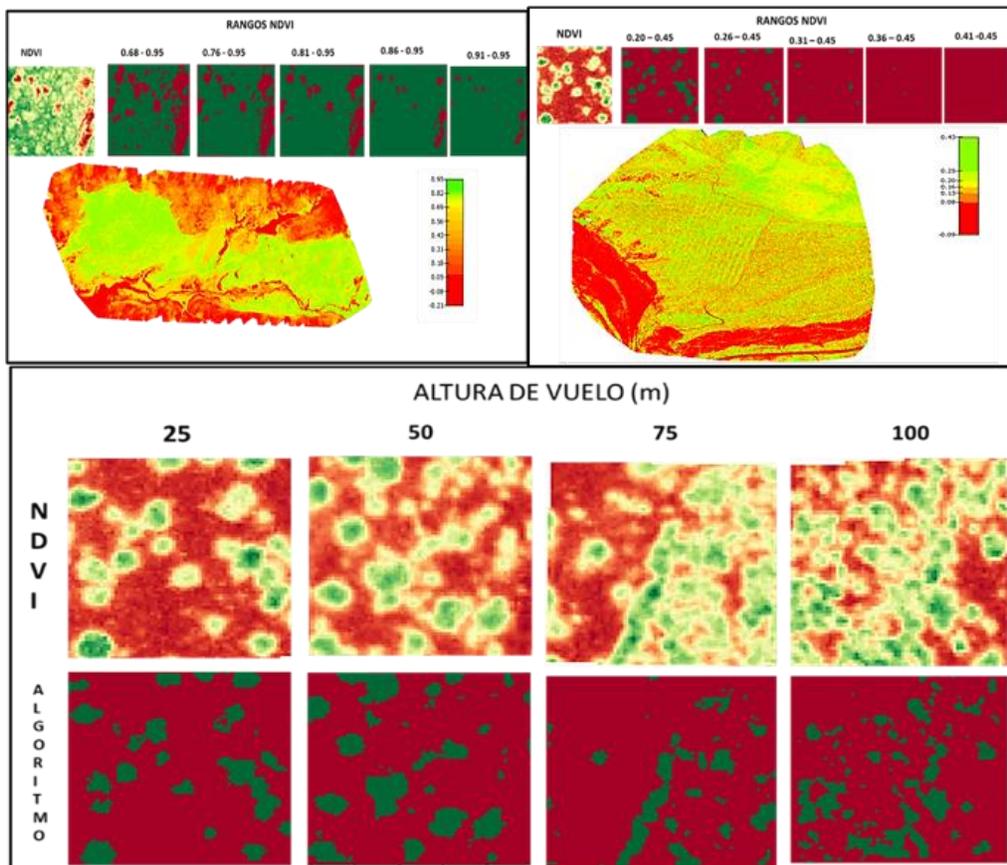


Figura 2. Identificación de especie segmentada utilizando ortofotografías NDVI.



Figura 3. Comunidad vegetal bofedal adquiridas a diferentes alturas de vuelo con sensor RGB.

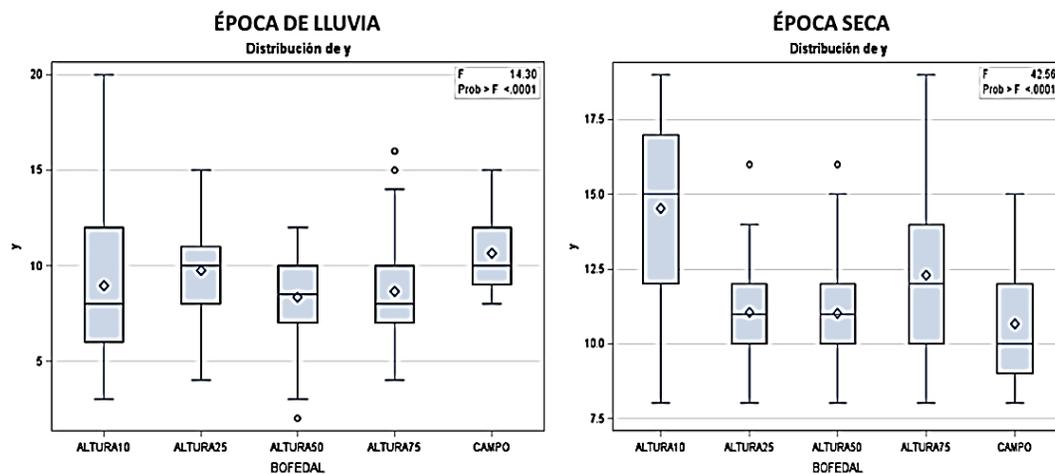


Figura 4. Mejor altura de vuelo para identificación de bofedales utilizando ortofotografías RGB.

Para las alturas de vuelo de 50, 75 y 100 m, en ortofotografías adquiridas al finalizar época seca, se identificaron 11,01; 12,28 y 14,52 cojines de DIMU respectivamente, mientras que hacía al final de la época de lluvia, para las mismas alturas, se identificaron 8,46; 8,11; 8,82 cojines de DIMU. Cabe indicar que a 75 y 100 m de altura se pueden identificar los parches de DIMU, los parches de bofedal multiflora, los parches de gramíneas altas de FEDO y el agua (Tabla 2).

Tabla 2

Identificación de especie segmentada (arbusto de tola) a diferentes alturas de vuelo, imagen RGB

Altura de vuelo (m)	Número de cojines de DIMU	
	Época de lluvia	Época de estiaje
25	9,77	10,04
50	8,46	11,01
75	8,11	12,28
100	8,82	14,52
Dato de campo	10,65	10,65

La evaluación estadística determinó que para la época de lluvia existen diferencias significativas entre las diferentes alturas de vuelo ($p < 0,001$). Mientras que en los valores observados en campo y las lecturas efectuadas para la época seca a 25 y 50 m de altura son similares entre sí ($p = 0,2123$ y $p = 0,2561$), los valores observados en las imágenes adquiridas a alturas de vuelo de 75 y 100 m son diferentes. Los reportes de (Zhun et al., 2018) concluyen que a alturas bajas entre 25 y 50 metros se pueden identificar las plantas cultivadas con precisión 0,394 a 0,937, estos resultados comparados con los encontrados en la vegetación de bofedales muestran que cuando la altura de vuelo es menor la precisión aumenta. Esto implicaría que la mejor altura de vuelo para la identificación de la comunidad vegetal bofedal para la época de lluvia, sería de 25 m, y para la época de estiaje sería de 25 y 50 m, ya que por encima de los 75 m de altura las lecturas de identificación de DIMU se hacen imprecisas (Figura 4). Flores et al. (2021) indica que los resultados de identificación de especies en mejor cuando

se segmentación de especies por espectro tecnología que corrobora a los resultados encontrados.

En la actualidad se vienen validando diferentes alturas de vuelo de las plataformas UAS para adquirir imágenes que permitan identificar pasturas y clasificar coberturas de comunidades vegetales en pastizales con especies postradas. (Bethany et al., 2019; Berrio et al., 2015), utilizando imágenes adquiridas a 100 m de altura de vuelo identificó cuatro clases de pastizales: pradera, pradera de poa, coberturas acacia, y praderas de pastizales. Los cojines de DIMU se identificaron por el diámetro, el verdor y la altura que estos muestran respecto a las demás especies de la comunidad vegetal.

Easdale et al. (2019) y Malambo et al. (2015) utilizando imágenes adquiridas 200 m de altura de vuelo identificaron coberturas de pastizal de estepa gramínea y gramínea-arbustiva, un ambiente ecotonal entre el humedal y la estepa y ambientes de alta humedad asociados a cursos de agua. El estudio de identificación de comunidades vegetales con muestras de ortofotografías RGB y NDVI adquiridas a 100 metros de altura, se identificó coberturas de la comunidad vegetal bofedal, agua y suelo desnudo, pero no logra identificar especies segmentadas (cojines de DIMU).

b. Altura de vuelo para identificar la comunidad vegetal bofedal utilizando ortofotografías NDVI

Durante el procesamiento de las fotografías con el software Pix 4D se determinó que los umbrales para identificar la especie segmentada DIMU en ortofotografías NDVI, es de 0,68 para el umbral inferior y 0,95 para el umbral superior en ambas épocas del año.

Evaluados los rangos de NDVI (0,68 - 0,95; 0,76 - 0,95; 0,81 - 0,95; 0,86 - 0,95 y 0,91 - 0,95) para la época de lluvia se encontró 9,28 cojines de DIMU en el rango 0,68 - 0,95, y en este mismo rango para la época seca se identificó 7,91 cojines de DIMU.

En el rango 0,76 - 0,95 se identificaron 8,22 y 6,42 cojines de DIMU, mientras que, en los rangos de amplitud menor 0,81; 0,86 y 0,91 a 0,95 disminuyó la precisión en la identificación de DIMU, llegando en algunos casos a identificar solo un cojín.

La evaluación estadística determinó que existen diferencias significativas entre los rangos de NDVI ($p < 0,001$) y los valores registrados en campo durante las dos épocas de muestreo. Esto implica que en el rango más amplio se identifica mejor los cojines de DIMU y, conforme disminuye el rango NDVI a 0,76; 0,81; 0,86; 0,91 a 0,95, las lecturas de identificación se hacen imprecisas. Esto indica que las mediciones para identificar DIMU para ambas épocas del año se deben realizar en el rango de 0,68 – 0,95 y con restricciones en el rango 0,76 – 0,95 (Figura 5). El análisis realizado con un rango de NDVI de 0,68 – 0,9, identificó 9,38 cojines de DIMU a 25 m de altura, siendo este el valor más próximo al encontrado en campo (10,65). A 50 m de altura la lectura empieza a ser imprecisa, llegando a contabilizar 7,25 cojines de DIMU. Finalmente, a 75 y 100 m de altura el algoritmo encuentra menor separabilidad de cojines de DIMU, identificando los cojines muy cercanos como un solo objeto (Figura 5).

La evaluación de los resultados con mínimos cuadrados determina que existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,0001$) entre las diferentes alturas de vuelo. De ello se desprende que, la mejor altura para identificar la comunidad vegetal bofedal es de 25 m, aunque se puede utilizar vuelos de 50 m, pero con restricciones (Figura 5). A partir de la evaluación estadística y de fotogrametría Xie & Yang (2020), utilizando imágenes RGB y NDVI adquiridas con la plataforma UAS y con cámara Zenmuse X3 DJI, se considera que el mejor rango de NDVI para la identificación de cojines de DIMU es de 0,68 a 0,95, mientras que los rangos de 0,71 a 0,95 y más próximos al umbral superior muestran alta imprecisión en la lectura de las muestras. Sakaran et al. (2019) y Alves et al. (2013) explican que las imprecisiones en la estimación de NDVI a partir de ortofotografías, son atribuibles a las diferentes alturas de vuelo, al estado fenológico de las plantas y a la temporalidad del muestreo.

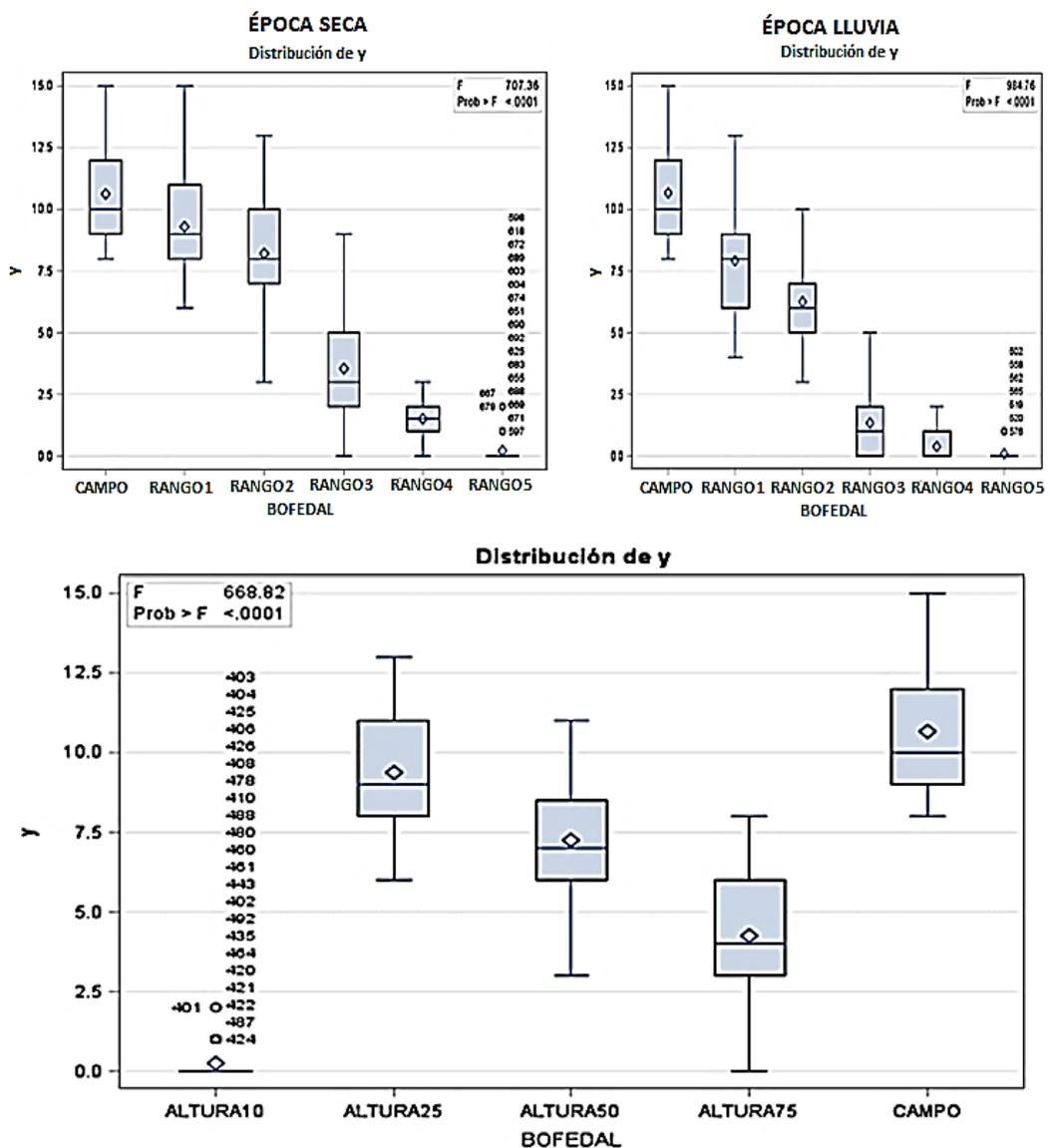


Figura 5. Mejor altura de vuelo para identificación de la comunidad vegetal bofedal analizando ortofotografías NDVI con algoritmo que identifica especie segmentada.

Para el estudio se estableció que la mejor altura de vuelo para identificar la comunidad vegetal bofedal de puna seca es de 25 m, pudiendo utilizarse también ortofotografía de 50 m con restricciones. Los resultados no muestran diferencias entre las épocas de estudio, por consiguiente, utilizando el parámetro NDVI, se puede realizar estudios en cualquier época del año. Los resultados encontrados demuestran que cuanto más baja es la altura de vuelo se puede identificar con precisión especies de pastizales prostrados, como lo demuestra **Sankey et al. (2021)** identificando especies en imágenes adquiridas a alturas de vuelo muy bajas e imágenes con píxeles de 4 a 6 cm. Asimismo **Tilahun & Seyoum (2020)** demostraron que utilizando alturas de vuelo bajas se mejora la separabilidad de los espectros de agua y aún será mejor si a las cámaras multispectrales se incorpora un sensor térmico este aporte es significativo para identificación de bofedales en ecosistemas de puna.

Ezenne et al. (2019), utilizando imágenes adquiridas a 30 metros de altura de vuelo, clasificaron cultivares de avena y alfalfa y arroz, las coberturas mostradas fueron mejores para avena, porque las plantas de alfalfa no cubrían completamente el suelo, mientras que (**Grüner et al., 2019**) con imágenes adquiridas con vuelos realizados a 20 m de altura diferenció mezclas de gramíneas y leguminosas en pasturas de trébol rojo, alfalfa y rye grass italiano. Estos resultados son concordantes con los resultados encontrados en la investigación realizada, que analizando ortofotografías de la comunidad vegetal tolar RGB y NDVI adquiridas a 25 metros de altura de vuelo logró identificar el y los Cojines de DIMU. Estos resultados están

sustentados por la alta resolución espectral de las ortofotografías adquiridas a alturas de vuelo que van de 20 a 50 m.

Los suelos húmedos pueden generar deterioro de salud en las plantas y con ello alterar ala reflectancia y variar el rango del NDVI (**Hatton et al., 2020; Zorogastua et al., 2012**), en efecto este fenómeno se puede observar en la comunidad vegetal bofedal y su especie segmentada DIMU en la época de estiaje muestra NDVI de 0.68 por visibilizarse las plantas con stress hídrico.

3.2. Determinación de la mejor altura de vuelo para la comunidad vegetal tolar de puna seca

a. Altura de vuelo para identificar la comunidad vegetal tolar, utilizando ortofotografías RGB

Utilizando ortofotografías RGB obtenidas a 25 m de altura de vuelo, se identifica y contabiliza con nitidez la especie segmentada *Parastrephia lepidophylla* (tola), así como de las inclusiones de *Bracharis* sp., gramíneas altas como la *Stipa* sp., *Festuca ortophylla*, *Margiricarpus* sp.

Tabla 3
Identificación de especie segmentada (arbusto de tola) a diferentes alturas de vuelo, imagen RGB

Altura de vuelo (m)	Número de plantas TOLA	
	Época de lluvia	Época de estiaje
25	27,55	27,24
50	33,06	29,61
75	38,08	36,36
100	39,40	38,76
Dato de campo	28,97	28,97

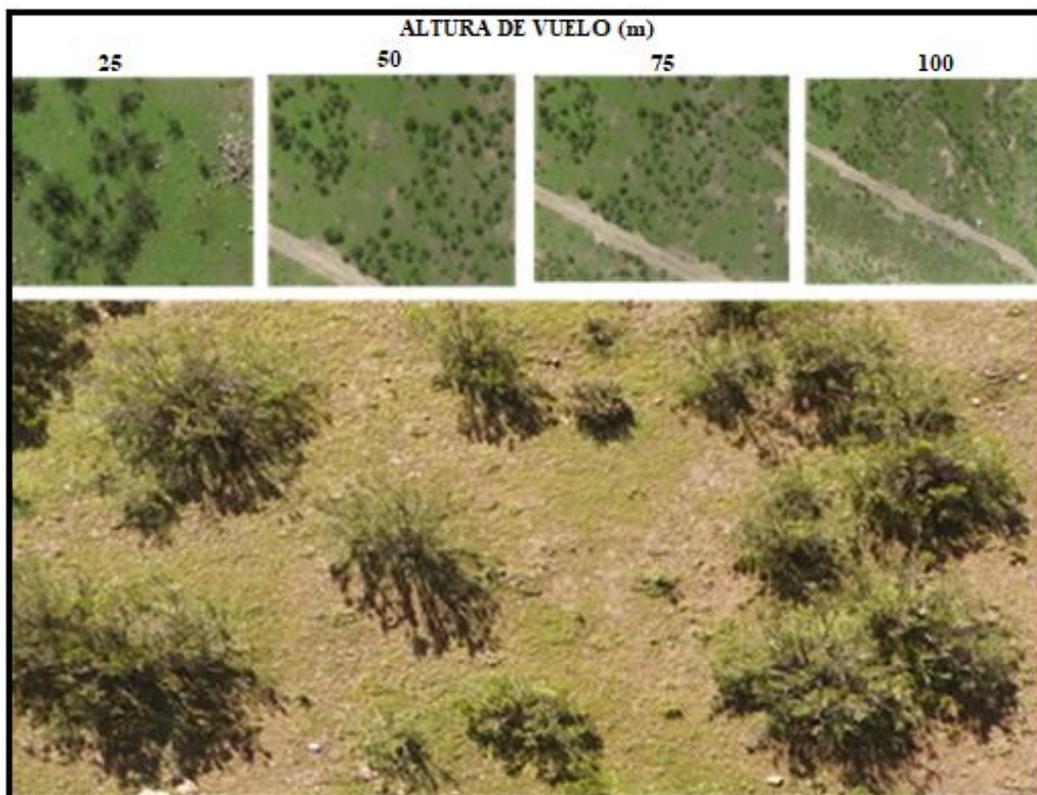


Figura 6. Fotografías de comunidad vegetal tolar.

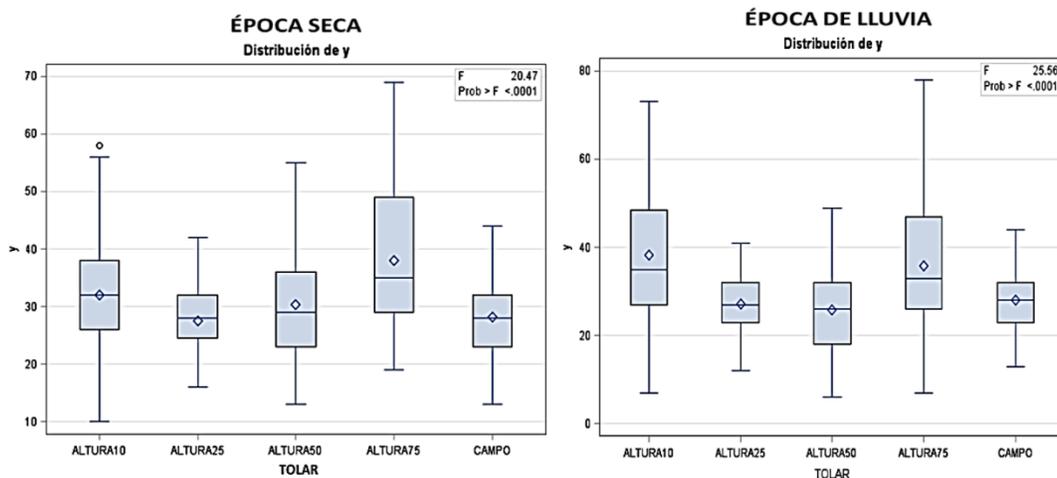


Figura 7. Determinación de mejor altura de vuelo en imágenes RGB.

A 50 m de altura, la especie segmentada (arbustos de tola), se observa como pequeños parches irregulares de color verde intenso en comparación a los demás componentes de la imagen, a esa misma altura (Flores et al., 2021) identificó especies de agave en forma de parches que es concordante los resultados obtenidos en la identificación de tolares. Un conocedor de la comunidad vegetal puede identificar y contabilizar las plantas de tola con limitaciones de precisión, porque ésta se mimetiza con otras especies de crecimiento alto (*Braccharis* sp y *Margiricarpus* sp). En imágenes adquiridas a 75 y 100 m de altura, la tola se observa como puntos difusos de color verde oscuro, imposibilitando la identificación y conteo de especies (Figura 6).

Imágenes adquiridas con cámara Zenmuse X3 DJI RGB

En las imágenes RGB de 25 y 50 metros de altura se pueden identificar y delimitar con mayor precisión los parches de tola, césped y suelo desnudo, mientras que en las imágenes de 75 y 100 m de altura se observa menor separabilidad de estas tres coberturas.

Considerando que las imágenes adquiridas con la plataforma UAS tienen mejor resolución que las imágenes satelitales, para un estudio de mayor alcance territorial se puede utilizar las ortofotografías adquiridas a 75 y 100 m de altura de vuelo (Jacsaon et al., 2020), realizando vuelos con un sensor Sequia identifico especies con enfermedades y especies invasoras en la pradera, en el caso de la comunidad vegetal tolar con el mismo a 25 y 50 metros de altura identificar otras especies a 100 m de altura de vuelo se observa como parches.

La evaluación estadística muestra diferencias significativas entre las alturas de vuelo ($p < 0,001$). Los valores observados en campo y las lecturas efectuadas a 25 m de altura son similares entre sí: ($p = 0,4408$) para las muestras adquiridas al final de la época de lluvias y ($p = 0,3394$) para las muestras adquiridas al finalizar la época seca (Figura 7). Estos valores son diferentes con los encontrados en las imágenes adquiridas de 50, 75 y 100 m de altura de vuelo. Los reportes de Zhun et al. (2018) concluyen que a alturas bajas entre 25 y 50 metros se pueden identificar plantas con precisión 0,394 a 0,937 para plantas con distanciamiento adecuado, resultados

que se encuentran en los rangos identificados para los tolares.

La calidad de una imagen puede determinarse a partir de la observación y conteo de árboles, arbustos, u otras características que marquen la diferencia entre objetos (Falk, 2014; Lin & Guo, 2020), es así que en una imagen aérea tomada desde un ángulo cenital los árboles y arbustos pueden ser reconocidos por la forma de la copa o canopia, así como por el verdor puede definir el estado sanitario (Lost et al., 2019). Considerando estos criterios, se identificó el arbusto (Xie & Yang, 2020) de Tola por el diámetro, la altura de la planta y el grado de verdor de su canopia.

b. Altura de vuelo para identificar la comunidad vegetal tolar, utilizando ortofotografías NDVI

En el procesamiento de las ortofotografías NDVI el "arbusto de tola" presentó un valor de 0,20 en el umbral inferior y de 0,45 en el umbral superior en ambas épocas de muestreo (seca y lluvias)

El análisis del algoritmo de las imágenes NDVI adquiridas a 25 metros de altura y los diferentes rangos de: 0,20 a 0,45; 0,26 a 0,45; 0,31 a 0,45; 0,36 a 0,45, y 0,41 a 0,45 de NDVI, encontró para el rango amplio 0,20 a 0,45 una media de 29,42 plantas de tola identificadas al final de la época de lluvia y 21,42 plantas identificadas para el final de la época seca. Estos valores son los que más se aproximan al muestreo realizado en campo, que tuvo una media de 28,11 para los mismos cuadrantes en ambas épocas del año.

A medida que la amplitud del rango disminuye el número de plantas segmentadas (Xu & Paterson, 2019; Baranowski et al., 2015) para el caso de estudio la tola identificadas también disminuía, es así que para el rango de 0,26 a 0,45 de NDVI, el algoritmo identificó 25,89 y 19,89 plantas de tola respectivamente, mientras para los rangos de menor amplitud, como 0,31 a 0,45; 0,36 a 0,45, el número de plantas disminuyó significativamente, llegando en la mayoría de los casos a cero individuos identificados en el rango más estrecho de 0,41 a 0,45 de NDVI (Figura 8).

La evaluación estadística de los resultados con mínimos cuadrados determinó que existen diferencias significativas entre los diferentes rangos de NDVI ($p < 0,001$).

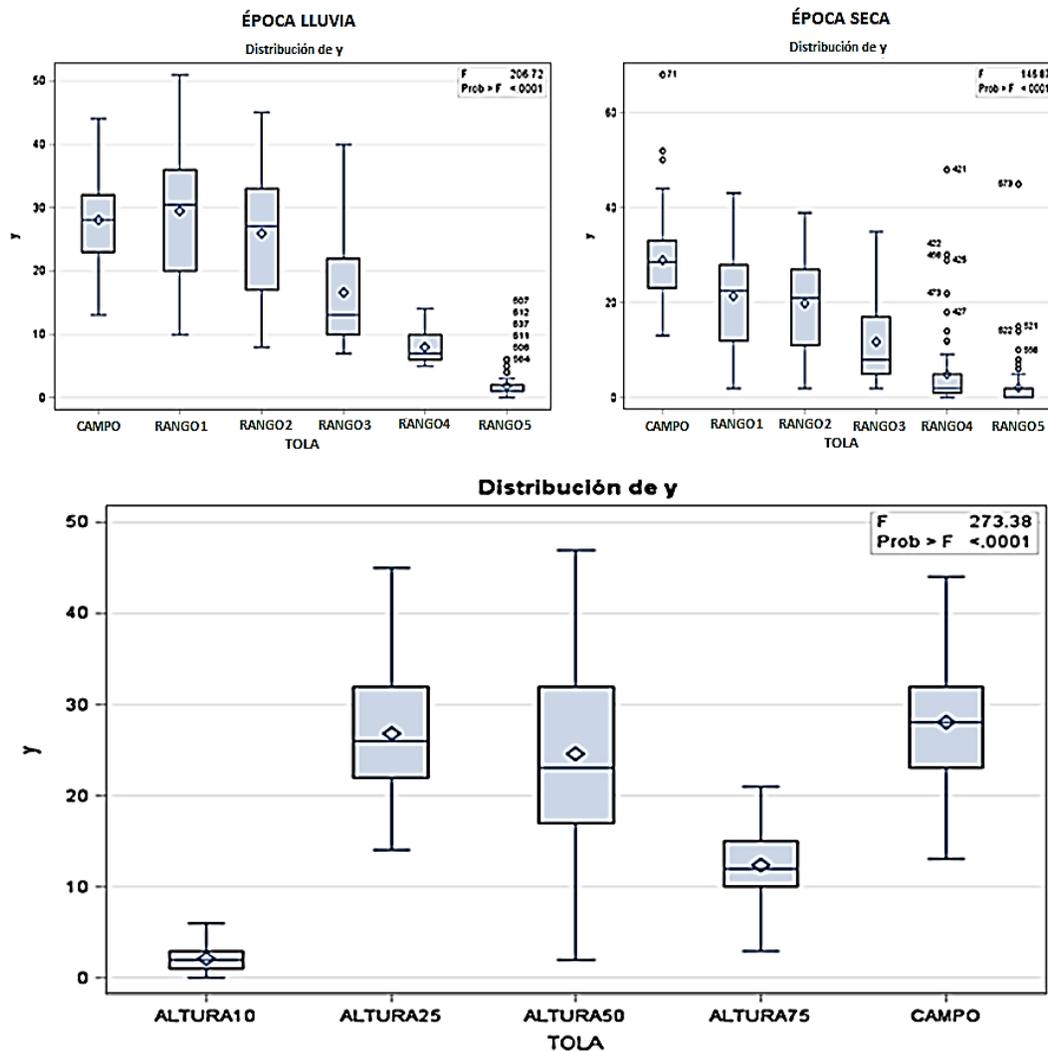


Figura 8. Mejor altura de vuelo NDVI _ Rango 0,2 a 0,45.

Los valores registrados en campo en las dos épocas de muestreo y los valores observados en las lecturas efectuadas en los rangos de 0,26 a 0,45 y 0,31 a 0,45 de NDVI, son similares ($p = 0,1593$) para las muestras adquiridas al final de la época seca. Esto implica que en el rango más amplio se identifica mejor el arbusto de tola, y conforme disminuye el rango NDVI, las lecturas de identificación de la tola se hacen imprecisas. Es decir, que las mediciones se pueden realizar en los rangos de 0,20 a 0,45 y 0,26 a 0,45, sin embargo, para lograr una mejor identificación de especies es conveniente utilizar el rango más amplio (0,20 – 0,45) (Figura 8).

El algoritmo elaborado para la identificación (Xu & Paterson, 2019) del arbusto de tola, utilizando el mejor rango de NDVI establecido (0,20 a 0,45) y las ortofotografías NDVI adquiridas a 25 y 50 metros de altura de vuelo, identificó en promedio 26,81 y 24,54 arbustos de tola, datos que se aproximan al promedio de plantas identificadas durante el trabajo de campo (28,11). Por su parte, la identificación y contabilización de la especie segmentada en ortofotografías NDVI obtenidas a 75 y 100 m de altura vuelo, fueron imprecisas (Figura 8).

Los resultados del análisis de datos muestran diferencias estadísticas significativas ($p < 0,0001$) entre las diferentes alturas de vuelo para identificar plantas de tola. Los valores observados en campo y la identificación de especies a 25 metros de altura son similares ($p = 0,1793$), aunque diferentes con los valores de las demás alturas evaluadas. Ello significa que la mejor altura de vuelo para la identificación de la comunidad vegetal tolar desde el análisis de ortofotografías NDVI es de 25 metros (Figura 8).

En la actualidad se vienen validando diferentes alturas de vuelo de las plataformas UAS para adquirir imágenes que permitan identificar pasturas y clasificar coberturas de comunidades vegetales en pastizales, y arbustos. Bethany et al. (2019); Berrio et al. (2015), utilizando imágenes adquiridas a 100 m de altura de vuelo identificó cuatro clases de pastizales: pradera, pradera de poa, coberturas acacia, y praderas de pastizales y Easdale et al. (2019) utilizando imágenes adquiridas 200 m de altura de vuelo identificó coberturas de pastizal de estepa gramínea y gramínea-arbustiva, un ambiente ecotonal entre el húmedal y la estepa y ambientes de alta humedad asociados a cursos de agua. El estudio de identificación

de comunidades vegetales con muestras de ortofotografías RGB y NDVI adquiridas a 100 metros de altura, se identificó parches de las comunidades tolar, césped, pajonal, bofedal, agua y suelo desnudo, pero no logra identificar especies segmentadas (arbusto de tola).

El rango del NDVI varía de -1 a +1. En este rango se genera gran cantidad de datos que pueden utilizarse para realizar clasificaciones detalladas de la vegetación. Pero se debe considerar que el rango de valores de NDVI puede variar según las clases de vegetación, ya que valores iguales en este índice pueden tener un significado muy distinto en el campo **Buitrón & Calisaya, 2012; Ezenne et al. (2019)** Indican que a partir de los valores 0,4 se tiene vegetación con mayor cobertura, los valores de 0,6 indican áreas boscosas, mientras que los valores por encima de 0,7 hasta 1 podrían indicar campos de cultivos de gran vigor. Gross (2005) sugiere que valores de NDVI inferiores a 0,1 corresponden a áreas estériles. Los valores de 0,2 a 0,3 indican presencia de pastizales y arbustos, mientras que 0,6 a 0,8 corresponden a vegetación selvática o tropical **(Escuer, 2007; Buitrón & Calisaya, 2012)**.

La clasificación e identificación de especies segmentadas en comunidades vegetales y cultivares con especies similares **Lin & Guo 2020; Malambo et al. (2015)** utilizando sensores de alta resolución en plataformas UAS, tienen éxito cuando: el rango espectral del sensor utilizado cubre la banda roja **(Bethany et al., 2019)**, y el infrarrojo cercano del espectro de 600 a 875 nm.

Los resultados del presente estudio de identificación de comunidades vegetales de puna seca utilizaron sensores NDVI con longitudes de onda de 575 a 850 nm, lo cual permitió identificar rangos de NDVI para la comunidad vegetal tolar (0,20 a 0,45) y su especie segmentada arbusto de tola, **(Zorogastua et al., 2012; Lin & Guo, 2020; Baranowski et al. 2015)**.

Los valores presentados en los diferentes estudios muestran que no es posible generalizar un valor del índice NDVI **(Sakaran et al., 2019; Alves et al., 2013)**, se ha observado que a mayor altura hay variaciones en la estimación del valor NDVI en cultivares, estas variaciones pueden ser mayores para todas las especies o coberturas vegetales naturales. Los resultados sugieren que previamente se realice estudios prospectivos que permitan conocer: la altura de la zona de estudio, la época de estudio y el tipo de cobertura que tiene la comunidad a estudiar **(Robb et al., 2020)**. Es común a todos los estudios, que el valor del NDVI será mayor cuando el territorio estudiado muestre mayor verdor.

Los resultados de estudios realizados con la plataforma UAS en matorrales y sotobosque muestran que está constituyendo en una buena herramienta para diseñar los sistemas de monitoreo para el seguimiento de la vegetación de tipo matorral de montaña **(Hernández et al., 2019)**.

4. Conclusiones

El estudio ha determinado que la mejor altura de vuelo para la identificación de comunidades vegetales tolar y bofedal utilizando ortofotografías RGB y NDVI a través de la plataforma UAS es de 25 m para ambos casos, seguido de 50 m. El mejor rango del índice de vegetación NDVI es

de 0,68 a 0,95 para identificar cojines de DIMU en bofedales y de 0.20 a 0,45 para el arbusto de tola.

El estudio determinó que la identificación de la comunidad vegetal bofedal y tolar de puna seca se puede realizar en cualquier época del año, sin embargo, es necesario realizar estudios con intervalos de 30 días para identificar la mejor fecha de muestreo.

Agradecimientos

A la UNSAAC Laboratorios de ciencia animal, cambio climático, nutrición y pastizales de la escuela profesional de Zootecnia. Al laboratorio de evaluación y utilización de pastizales de la Facultad de Zootecnia, al equipo docente del Doctorado en Ciencia animal.

Declaración

Los autores declaramos que hemos cumplido con las normas técnicas internacionales para la investigación.

ORCID

A. C. Estrada Zúñiga  <https://orcid.org/0000-0002-1588-6399>

J. A. Ñaupari Vásquez  <https://orcid.org/0000-0002-1554-2633>

Referencias bibliográficas

- Acebedo, R. (2011). Sistemas de teledetección activos y pasivos embarcados en sistemas aéreos no tripulados para la monitorización de la tierra Barcelona España.15 pp.
- Alve, S., Carvalho, F., Queiroz, D., Terra, N., & Sousa, J. (2013). Determination of nitrogen and Chlorophyll levels in bean plant leaves by using spectral vegetation bands and indices. *Revista Ciência Agronômica*, 44(3), 464-473.
- Azcoiti, J. (2016). Evaluación de aplicaciones para el tratamiento de imágenes mediante correlación Automática (Tesis de Maestría). Universidad Pública de Navarra. España.
- Berrio, M., Mosquera, T., & Álzate, D. (2015). Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de pre utilización de imágenes multiespectrales obtenidas por vehículos aéreos no tripulados para la determinación de zonas intra-lote con mayor rendimiento y calidad en el trigo (*Triticum aestivum*). Universidad Nacional de Villamaría, Argentina.
- Bethany, M., Lucier, A., & Aryal, J. (2019). Classification of lowland native grassland communities using hyperspectral Unmanned Aircraft System (UAS) imagery in the Tasmanian midlands. *Drones*, 3(1), 5.
- Baranowski, P., Jedryczka, M., Mazurek, W., Skowronska, D., Siedlidka, A., & Kaczmarek, J. (2015). Hyperspectral and Thermal Imagen of Rape (*Brassica napus*) response to fungal species of the genus *Alternaria*. *PLoS ONE* 10(3): e0122913.
- Buitrón, C., & Calisaya, J. (2012). Estudio espacial multitemporal de variaciones en superficie observada a través de imágenes satelitales LANDSAT en una región del Parque Nacional Sajama Bolivia, DIACONIA. La Paz, Bolivia.
- D'oleira, S., Marzoff, I., Klaus, D., & Ries, J. (2012). Unmanned aerial Vehicle (UAV) for Monitoring soil erosion in Morocco. *Remote sens.*, 4, 3390-3416.
- Easdale, M., Umaña, F., Rafo, F., Fariña, C., & Bruzzone, O. (2019). Evaluación de pastizales patagónicos con imágenes de satélites y de vehículos aéreos no tripulados. *Ecología Austral*, 29, 285-445.
- Escuer, J. (2007). Análisis multitemporal mediante el uso de imágenes del satélite Landsat. *Innovación y formación*, 2, 34-36.
- Estrada, A., Cárdenas, J., Ñaupari, J., & Zapana, J. (2018). Capacidad de carga de pastos de puna húmeda en un contexto de cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 361-368.
- Ezenne, G., Jupp, L., Mantel, S., & Tanner, J. L. (2019). Current and potential capabilities of UAS for crop water productivity in precision agriculture. *Agricultural Water Management*, 218, 158-164.
- Lost, F., Heldens, W., Kong, Z., & Lange, E. (2019). Drones: Innovate technology for use in precision pest management. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 1-25.
- Flores, D., Gonzáles, H., Lozano, R., Vazquez, J., & Hernandez, J. (2021). Automated Agave detection and counting using a covolucional Neural Network and Unmanned Aerial Systems. *Drones*, 5(1), 4.
- Flores, E. R.; Ñaupari, J. A.; & Tacuna, R. E. (2014). La economía del cambio climático en el Perú: Ganadería altoandina en la economía del cambio climático en el Perú: Desarrollo, CEPAL.
- Grüner, E, Astor, T., & Wachendorf, M. (2019). Biomass Prediction of Heterogeneous Temperate Grasslands Using an SfM Approach Based on UAV Imaging. *Agronomy*, 9(2), 54.

- Hatton, N., Sharda, A., Schapaugh, W., & Merwe, D. (2020). Remote thermal infrared imaging for rapid screening of sudden death syndrome in soybean. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105738.
- Hernández, L., Rudge, M., Bartolo, R., & Erskine, P. (2019). Identifying species and monitoring understory from UAS derived data; a literature review and future directions. *Drones*, 3(1), 9.
- Holdrige, L. R. (1987). Ecología basada en zonas de vida. Servicio editorial IICA, 3era Edición, San José de Costa Rica. ISBN 92 9039 1316 pp. 2-26.
- Ishida, T., Kurihara, J., Viray, F., Namuco, S., Paringit, E., et al. (2018). A novel approach for vegetation classification using UAV-based hyperspectral imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 144, 80-85.
- Jacsaon, M., Potrillo, Q., Cox, R., Ritchie, G., Johnson, M., et al. (2020). Season classifier, and special resolution impact honey mesquite and yellow bluestem detection using unmanned aerial System. *Rangeland Ecology & Management*, 73(5), 658-672.
- Kharuf, S.; Hernandez, L., Orosco, R., & Delgado, I. (2018). Análisis de imágenes multispectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *Ingeniería Electrónica, Automática y comunicaciones*, 39(2), 79-91.
- Librán-Embidi, F., Klaus, F., Tschardtke, T., & Grass, I. (2020). Unmanned aerial Vehicles for biodiversity friendly agricultural landscape a systematic review. *Science of The Total Environment*, 732, 139204.
- Lin, Z., & Guo, W. (2020). Sorghum panicle detection and counting using unmanned aerial system images and deep learning. *Frontiers in Plant Science*, 11, 534853.
- Malambo, L., Popescu, S., Wei, N., Romey, W., Zhou, T., & Moore, S. (2019). Ad deep learning semantic segmentation-based approach for field level sorghum panicle counting. *Remote Sens.*, 11(24), 2939.
- Norasma, C., Fadzilah, M., Roslin, N., Zanariah, Z., Tarmidi, Z., & Candra, S., (2019). Unmanned aerial vehicle applications in agriculture. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 506, 012063.
- Pulgar, J. (1996). Geografía del Perú, las ocho regiones naturales. Promoción editorial Inca S.A. 10a edición, Lima Perú, ISBN 9972400273. 15-23.
- Robb, C., Harday, A., Doonan, J., & Brook, J. (2020). Semi automated field plot segmentation from UAS imagery for experimental agriculture. *Frontiers in plant Science*, 11, 591886.
- Sakaran, S., Quirós, J., & Milkas, P. (2019). Unmanned aerial system and satellite based high resolution imagery for high throughput phenotyping in dry bean. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104965.
- Sankey, J., Sankey, T., Li, J., Ravi, S., Wang, G., et al. (2021). Quantifying plant-soil-nutrient dynamics in rangelands: Fusion of UAV hyperspectral-LiDAR, UAV multispectral-photogrammetry, and ground-based LiDAR-digital photography in a shrub-encroached desert grassland. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112223.
- Tapia, M., & Flores, J. (1984). Ecosistema de los andes del sur del Perú y su relación con los pastizales. Capítulo del libro Pastoreo y pastizales en los andes del sur del Perú. Programa colaborativo de apoyo a la investigación en rumiantes menores Cusco, Perú.
- Tilahun, T., & Seyoum, W. (2020). High-resolution mapping of tile drainage in agricultural fields using unmanned System (UAS) based radiometric thermal and optical sensors. *Hydrology*, 8(1), 2.
- Xie, Ch., & Yang, C., (2020). A review on plant high throughput traits using UAV based sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105731.
- Xu, R., & Paterson, A. (2019). Multispectral imaging and unmanned aerial systems for cotton plant phenotyping. *PLoS ONE*, 14(2), e0205083.
- Zhengxia, Z., Zhenwi, S., Young, G., & Jienping, Y. (2019). Object Detection in 20 Years: A survey. *ArXiv, abs/1905.05055*.
- Zhu, F., Jiwei, L., Honghui, X., & Goodman, E. (2018). Automatic Tobacco plant detection in UAV images via deep Neural Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(3), 876-887.
- Zorogastua, P., Quiroz, R., & Garatuza, J. (2012). Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(2), 63-75.