

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**UTILIZACIÓN DE DRONES EN LA ESTIMACIÓN DE
PARÁMETROS PARA LA GESTIÓN DE SISTEMAS
PASTORILES**

por

Juan José SECCO REGUSCI

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

HOJA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. Dr. Gastón Notte

Tribunal:

Ing. Dr. Gastón Notte

Ing. Eléctrico Msc. Juan Cardelino

Ing. Agr. Candela Villanueva

Fecha:

28 de marzo de 2025

Estudiante:

Juan José Secco Regusci

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia por su constante apoyo a lo largo de toda mi carrera. Su acompañamiento ha sido fundamental en este camino.

En segundo lugar, mi gratitud se dirige a Gastón Ortega y Gastón Notte por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo final de grado junto a ellos, así como por su valiosa guía durante todo el proceso.

Asimismo, quiero reconocer y agradecer a Pía Paulo, Pablo Secco, Agustín Arrospide, Santiago López, Juan Skunca, Pía Briñón y Agustina Regusci, quienes me brindaron su colaboración en distintos momentos durante la realización del trabajo.

Finalmente, agradezco a Cecilia Severi por haberme inspirado a elegir este tema para mi trabajo final, y a Mia Rivara por su entusiasmo inicial al emprender este proyecto conmigo. Aunque por razones personales no pudo continuar, su participación en la etapa inicial fue muy valiosa.

TABLA DE CONTENIDO

HOJA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	8
SUMMARY.....	10
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Hipótesis.....	13
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
2. REVISIÓN BILIOGRÁFICA.....	14
2.1. Sistemas pastoriles en Uruguay.....	14
2.1.1. Características climáticas	14
2.1.2. Producción de pasturas.....	14
2.2. Gestión de la pastura.....	15
2.3. Herramientas para el monitoreo de la disponibilidad de forraje	16
2.3.1. Método directo o destructivo.....	17
2.3.1.1. Cosecha de forraje.....	17
2.3.2. Métodos indirectos o no destructivos	18
2.3.2.1. Estimación visual.....	18
2.3.2.2. Doble muestreo o método de rendimientos comparativos	18
2.3.2.3. Regla graduada	19
2.3.2.4. Plato de levante o de altura comprimida (RPM)	19
2.3.2.5. Pasturómetro (C-Dax).....	20
2.3.2.6. Sensores Remotos	21
2.3.2.6.1. Imágenes Satelitales	21
2.3.2.6.2. Drones.....	22
2.4. Antecedentes en la utilización de drones para la estimación de biomasa.....	23
2.4.1. A nivel internacional.....	24
2.4.2. A nivel nacional.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.1. Condiciones experimentales.....	27
3.1.1. Lugar y período del experimento.....	27
3.1.2. Condiciones climáticas	28
3.1.2.1. Precipitaciones y balance hídrico previo y durante el experimento ...	28
3.1.2.2. Temperaturas y precipitaciones durante el período experimental	29
3.2. Materiales	30
3.2.1. Pastura.....	30
3.2.2. Dron	32
3.3. Metodología.....	33
3.3.1. Diseño experimental	33
3.3.2. Programación de vuelo.....	34
3.3.3. Muestreos para determinar los parámetros de la pastura para la calibración del dron	36
3.3.4. Procesamiento de imágenes.....	38
3.3.5. Análisis de datos	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. Calibración del dron.....	44

4.1.1.	Relación entre la Altura de RPM (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹)	44
4.1.2.	Relación entre la Altura de Regla graduada (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹)	46
4.1.3.	Relación entre el Número de hojas por macollo y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹)	47
4.1.4.	Relación entre el NDVI y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹)	49
4.1.5.	Relación entre el NDVI y la Altura de RPM (cm)	50
4.1.6.	Relación entre el NDVI y la Altura de Regla graduada (cm)	52
4.1.7.	Relación entre el NDVI y el Número de hojas por macollo	53
4.2.	Aplicación práctica del dron	54
4.2.1.	Biomasa estimada semanalmente mediante dron en comparación con la biomasa estimada mediante C-Dax	54
4.2.2.	Biomasa desaparecida estimada mediante dron en comparación con la biomasa desaparecida estimada mediante C-Dax y RPM para un pastoreo	59
4.2.3.	Altura de forraje estimado mediante dron en comparación con altura medida mediante RPM	63
4.2.4.	Distribución espacial de la biomasa y la altura del forraje pre y post pastoreo	66
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	70
6.	BIBLIOGRAFÍA	73
7.	ANEXO	79

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dinámica del crecimiento de las pasturas sometidas a pastoreo.	15
Figura 2. Ubicación del área experimental.....	27
Figura 3. Precipitaciones mensuales y balance hídrico 2023-2024 para el CRS, FAgro, Udelar.....	28
Figura 4. Temperaturas medias, máximas y mínimas y precipitaciones durante el período experimental.....	29
Figura 5. Algunos de los materiales utilizados en el muestreo de forraje.	30
Figura 6. Potrero T5 dividido en dos pasturas.....	31
Figura 7. Dron DJI Phantom 4 Multiespectral.	32
Figura 8. Cuadro identificado con la letra “L”, correspondiente al valor 2 de la escala visual.	34
Figura 9. Plan de vuelo del dron en aplicación DJI GS Pro.....	35
Figura 10. Muestra de forraje identificada y guardada en bolsa de nylon.	36
Figura 11. Muestras frescas.....	37
Figura 12. Muestras secas.	37
Figura 13. NDVI generado el 03/09/2024 para el potrero T5.....	39
Figura 14. Vista de los cuadros en el ortomosaico.	40
Figura 15. Distribución espacial de la biomasa el 20/08/2024.....	41
Figura 16. Relación entre la Altura de RPM (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹).	45
Figura 17. Relación entre la Altura de Regla graduada (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹).	46
Figura 18. Relación entre el Número de hojas por macollo y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹).	48
Figura 19. Relación entre el NDVI y la Biomasa disponible (KgMS.ha ⁻¹).	49
Figura 20. Relación entre el NDVI y la Altura RPM (cm).	51
Figura 21. Relación entre el NDVI y la Altura de Regla graduada (cm).....	52
Figura 22. Relación entre el NDVI y el Número de hojas por macollo.....	53
Figura 23. Biomasa semanal estimada mediante NDVI y C-Dax para la pastura de Raigrás.....	55
Figura 24. Biomasa semanal estimada mediante NDVI y C-Dax para la pastura de Raigrás con Llantén.	56
Figura 25. Distribución espacial de la biomasa estimada mediante dron el 12/08/2024.	58
Figura 26. Biomasa estimada pre-pastoreo mediante Dron, C-Dax y RPM según franja de pastoreo y pastura.....	59
Figura 27. Biomasa estimada post-pastoreo mediante Dron, C-Dax y RPM según franja de pastoreo y pastura.....	61
Figura 28. Biomasa desaparecida estimada mediante Dron, C-Dax y RPM según franja de pastoreo y pastura.....	62
Figura 29. Altura de forraje estimada mediante dron en comparación con la medida mediante RPM pre-pastoreo.	64

Figura 30. Altura de forraje estimada mediante dron en comparación con la medida mediante RPM post-pastoreo.	65
Figura 31. Distribución espacial de la biomasa para la pastura de Raigrás por franjas.	67
Figura 32. Distribución espacial de la biomasa para la pastura de Raigrás con Llantén por franjas.	67
Figura 33. Distribución de la altura del forraje para la pastura de Raigrás con Llantén por franjas.	68
Figura 34. Distribución de la altura del forraje para la pastura de Raigrás por franjas.	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Promedios y Desvíos Estándar de la Biomasa estimada (KgMS.ha-1) previo al pastoreo.	60
Tabla 2. Promedios y Desvíos Estándar de la Biomasa estimada (KgMS.ha-1) posteriormente al pastoreo.....	61
Tabla 3. Promedios y Desvíos Estándar de la Biomasa desaparecida (KgMS.ha-1).....	63
Tabla 4. Cronograma de muestreos para la calibración del dron en el año 2024.	79

RESUMEN

En Uruguay, la producción de carne y leche proviene principalmente de sistemas pastoriles, cuya productividad mejora con un manejo eficiente del forraje. Esto requiere conocer su disponibilidad y planificar su uso. Este trabajo tuvo como objetivo estimar la disponibilidad, altura del forraje y número de hojas por macollo utilizando un dron DJI Phantom 4 Multiespectral y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El experimento, realizado en invierno sobre pasturas de raigrás perenne y raigrás con llantén, en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía (Udelar), incluyó dos etapas: calibración y validación de la calibración. Durante la etapa de calibración se midió la altura del forraje con un plato de levante (RPM) y una regla graduada, conjuntamente con el registro del número de hojas por macollo y la biomasa. Los muestreos se realizaron semanalmente. Para el muestreo se colocaban treinta cuadros de 0,17 m² utilizando la técnica de doble muestreo. En total, se obtuvieron 420 cuadros muestreados repartidos en 14 instancias. Simultáneamente, se realizaron vuelos con el dron y se calculó el NDVI promedio de cada cuadro utilizando los programas Agisoft Metashape Professional y QGis. Se realizaron regresiones lineales simples que evidenciaron las siguientes correlaciones: R² entre la altura medida con RPM y la biomasa de 0,69; R² entre la altura medida con regla graduada y la biomasa de 0,75; R² entre la biomasa y el NDVI de 0,48; R² entre la altura medida con RPM y el NDVI de 0,37; y R² entre la altura medida con regla graduada y el NDVI de 0,46. Estas regresiones permitieron calibrar el dron y estimar tanto biomasa como altura del forraje a través del NDVI. Sin embargo, no se encontró relación entre el número de hojas por macollo y la biomasa, y tampoco entre el número de hojas por macollo y el NDVI. Con la calibración generada, se comparó la biomasa estimada mediante los vuelos semanales del dron con la estimada por un dispositivo de determinación indirecta (C-Dax). Esta comparación reveló una sobreestimación promedio del 58% por parte del dron en relación con el C-Dax. No obstante, el dron representó de manera correcta el comportamiento del crecimiento de las pasturas, lo cual fue muy alentador. Adicionalmente, se estimó la disponibilidad de forraje previo al pastoreo y el remanente posterior mediante el dron, el C-Dax y el RPM. Los resultados fueron prometedores, demostrando que el dron puede incorporarse en la estimación de forraje desaparecido en parcelas, lo que sería de utilidad en sistemas pastoriles. Asimismo, se evaluó la capacidad del dron en comparación con la del RPM para estimar la altura del forraje antes y después del pastoreo. Los resultados mostraron que el dron

fue un buen estimador de la altura, con menores sobreestimaciones que el RPM. Finalmente, se generaron mapas espaciales de biomasa y altura estimadas por el dron, que ofrecieron representaciones visuales de la biomasa y que resultan herramientas valiosas para el monitoreo y la toma de decisiones.

Palabras clave: dron, estimación, NDVI, biomasa, altura de forraje

SUMMARY

In Uruguay, meat and milk production primarily comes from pastoral systems, whose productivity improves with efficient forage management. This requires understanding of forage availability and planning its use. This study aimed to estimate forage availability, height, and the number of leaves per tiller using a DJI Phantom 4 Multispectral drone and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The experiment, conducted in winter on perennial ryegrass and ryegrass with plantain pastures at the Southern Regional Center of the Faculty of Agronomy (Udelar), included two stages: calibration and practical application. During the calibration stage, forage height was measured using a rising plate meter (RPM) and a graduated ruler, alongside recording the number of leaves per tiller and biomass. Sampling was carried out weekly. For sampling, thirty 0.17 m² quadrats were placed using the double sampling technique. A total of 420 quadrats were sampled over 14 sessions. Simultaneously, drone flights were conducted, and the average NDVI of each quadrat was calculated using Agisoft Metashape Professional and QGIS software. Simple linear regressions revealed the following correlations: R² between height measured with RPM and biomass was 0.69; R² between height measured with the graduated ruler and biomass was 0.75; R² between biomass and NDVI was 0.48; R² between height measured with RPM and NDVI was 0.37; and R² between height measured with the graduated ruler and NDVI was 0.46. These regressions enabled the calibration of the drone to estimate both biomass and forage height through NDVI. However, no relationship was found between the number of leaves per tiller and biomass, nor between the number of leaves per tiller and NDVI. With the calibration established, biomass estimated through the drone's weekly flights was compared to biomass estimated by an indirect determination device (C-Dax). This comparison revealed an average overestimation of 58% by the drone relative to the C-Dax. Nonetheless, the drone accurately represented the growth behavior of the pastures, which was encouraging. Additionally, forage availability before grazing and residuals after grazing were estimated using the drone, the C-Dax, and the RPM. The results were promising, demonstrating that the drone can be incorporated into the estimation of disappeared forage in plots, which would be useful in pastoral systems. The drone's ability to estimate forage height before and after grazing was also evaluated against the RPM. Results showed that the drone was a good estimator of height, with fewer overestimations than the RPM. Finally, spatial maps of biomass and height estimated by the drone were generated, offering visual

representations of biomass and serving as valuable tools for monitoring and decision-making.

Keywords: drone, estimation, NDVI, biomass, forage height

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, tanto la producción de carne como la producción de leche ha experimentado un incremento a lo largo del tiempo (Cortelezzi, 2022). La mayor parte de esta producción se basa en sistemas pastoriles, aunque también se realiza bajo sistemas estabulados. Del total de la superficie del país, el 85,9% está destinada al pastoreo ganadero (SPG). Esta SPG se divide en un 80,9% de campo natural y un 19,1% de pasturas mejoradas; es decir, el 15,8% de la superficie total del país está cubierta por pasturas mejoradas (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2023).

La obtención de forraje a través del pastoreo directo es el componente más económico en las dietas de los sistemas ganaderos y lecheros. Al incrementar la producción de forraje, se puede aumentar la carga animal por hectárea y, en consecuencia, mejorar la productividad. Para lograr esto, es fundamental realizar un manejo eficiente del forraje, lo que requiere estimar adecuadamente la cantidad de forraje disponible y planificar su uso de manera efectiva. Además, la adecuada gestión del recurso forraje representa una valoración alta en la percepción de los consumidores, acompañado de la obtención de certificaciones de calidad internacionalmente reconocidas para productos animales basados en sistemas pastoriles. Asimismo, se pueden generar ingresos adicionales mediante la venta de bonos de carbono y contribuir con la mitigación del cambio climático.

Para llevar a cabo estas estimaciones, se utilizan variados métodos desde muestreos directos en la pastura a estimaciones indirectas, que difieren en costo, escala y facilidad de aplicación (Montossi, Pravia et al., 2013). Actualmente se dispone de herramientas que brindan información de manera rápida y con un detalle elevado, tales como las imágenes satelitales e imágenes capturadas por drones. Mediante esta información se pueden calcular índices multispectrales, como por ejemplo el NDVI, a través de los cuales se pueden estimar parámetros de las pasturas.

En este trabajo se pretende utilizar un dron para obtener imágenes de los potreros y, mediante el procesamiento de dichas imágenes, estimar la disponibilidad, altura del forraje y número de hojas por macollo, con el objetivo de disponer de herramientas que proporcionen información con gran nivel de detalle espacial, de manera rápida, confiable y de fácil implementación para la mejora de la cosecha y producción de forraje.

1.1. **Hipótesis**

Es posible estimar la disponibilidad, altura de forraje y número de hojas por macollo mediante índices multiespectrales utilizando un dron, obtener una descripción detallada de la pastura tanto en el espacio como en el tiempo y utilizarlo como herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

1.2. **Objetivos**

1.2.1. **Objetivo general**

Estimar la disponibilidad, altura, número de hojas por macollo y el forraje desaparecido por hectárea en una pradera de Raigrás perenne y otra de Raigrás perenne con Llantén utilizando el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas a partir de imágenes capturadas por un dron a 60 metros de altura durante la estación de invierno.

1.2.2. **Objetivos específicos**

- Calibrar el dron Phantom 4 Multiespectral para la estimación de biomasa, altura y número de hojas por macollo de pasturas sembradas utilizando imágenes multiespectrales.
- Estimar la disponibilidad y altura de forraje mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y compararlo con un método de estimación indirecto confiable (C-Dax y plato de levante).
- Estimar el forraje desaparecido de la pastura debido al pastoreo utilizando las estimaciones por dron contrastándolo con el C-Dax.
- Crear mapas espaciales de la pastura que permitan visualizar su distribución.

2. REVISIÓN BILIOGRÁFICA

2.1. Sistemas pastoriles en Uruguay

2.1.1. Características climáticas

La República Oriental del Uruguay se encuentra ubicada en América del Sur, específicamente entre los paralelos 30° y 35° de latitud Sur y los meridianos 53° y 58° de longitud Oeste. Esta región se caracteriza por su clima templado (Ministerio de Economía y Finanzas [MEF], 2019).

En Uruguay la temperatura promedio anual es de 17,5 grados Celsius. En cuanto a las precipitaciones, el valor medio anual varía desde los 1000 milímetros en el suroeste hasta los 1600 milímetros en el noreste del país. Además, los vientos predominan en el noreste y este del país, con una velocidad promedio de 4 metros por segundo. Los vientos máximos se registran en el suroeste, con velocidades promedio de hasta 7 metros por segundo. A su vez, es frecuente que los vientos superen los 30 metros por segundo (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], 2024).

2.1.2. Producción de pasturas

En un clima templado como el de Uruguay, a principios de la primavera se dispone de una buena cantidad de agua en el suelo y las temperaturas empiezan a aumentar. Estos factores generan que en esta estación se obtengan las máximas tasas de crecimiento de las pasturas (sin considerar el período de encañazón). Sin embargo, en verano, la demanda atmosférica de agua aumenta debido al incremento de la evaporación potencial. Esto, combinado con precipitaciones iguales o menores a las que se tenía en primavera, provoca una restricción hídrica de las plantas, reduciendo las tasas de crecimiento en condiciones de secano (Olmos, 1997).

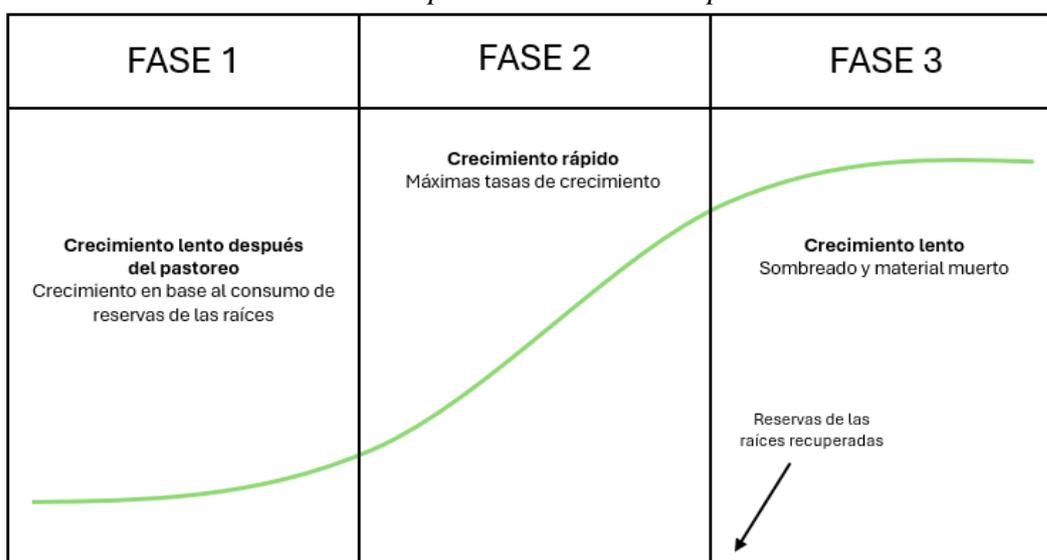
Al comenzar el otoño, el balance hídrico mejora debido a la disminución de los requerimientos atmosféricos, aunque el riesgo de heladas aumenta, lo que detiene el crecimiento de las plantas. Finalmente, durante el invierno, a pesar de que el balance hídrico sigue siendo favorable, las frecuentes heladas y la baja proporción de especies invernales en relación con las estivales provocan una notable disminución en la producción de forraje (Olmos, 1997).

2.2. Gestión de la pastura

Según Lombardo (2022), para lograr un manejo eficiente de las pasturas es fundamental alcanzar un equilibrio entre las tres eficiencias que determinan su productividad: el crecimiento de forraje, el consumo de forraje y la producción animal. El crecimiento de forraje, tras haber sido pastoreado, se desarrolla en tres fases: una primera fase de crecimiento lento, basado en el consumo de reservas acumuladas en las raíces; una segunda fase de crecimiento rápido, caracterizado por las tasas máximas de crecimiento; y una tercera fase de crecimiento lento, como consecuencia de la presencia de sombreado y el material muerto (Figura 1).

Figura 1.

Dinámica del crecimiento de las pasturas sometidas a pastoreo



Nota. Adaptado de Demanet (como se cita en Lombardo, 2022).

Lombardo (2022) señala que para garantizar altas tasas de crecimiento en las pasturas es fundamental un manejo adecuado. Esto puede lograrse ajustando la demanda (varían los objetivos de la producción) o ajustando la oferta de forraje (por ejemplo, cierres para reserva).

En cuanto al consumo de pasto, advierte que un pastoreo excesivamente intenso disminuye la calidad de la dieta, mientras que un pastoreo demasiado aliviado genera pérdidas de crecimiento debido al sombreado y pisoteo. El pastoreo eficiente se logra con utilizaciones instantáneas del 50% (Lombardo, 2022).

Desde la perspectiva de la producción animal, este 50% no solo equilibra la calidad del forraje y las tasas de crecimiento, sino que también maximiza la productividad por unidad de superficie (Lombardo, 2022).

2.3. Herramientas para el monitoreo de la disponibilidad de forraje

La utilización de herramientas para la estimación de la disponibilidad de forraje y el correcto manejo de las pasturas y animales tiene un impacto significativo en la productividad del sistema (Montossi, Pravia et al., 2013). En sistemas intensivos como los tambos, donde la correcta utilización del forraje es crucial, se ha observado que la mayoría de los establecimientos no implementan métodos objetivos, racionales y estandarizados para el monitoreo del forraje (CONAPROLE, 2009 como se cita en Ribarola & Villanueva, 2023).

Un buen sistema de pastoreo es aquel que cosecha la totalidad del crecimiento del forraje. Para lograr esto, en la bibliografía nacional se remarcan tres pasos esenciales para su aplicación, los que se conocen como “Las 3 R”: Recorrida, Rotación y Remanentes (Fariña et al., 2017). En primer lugar, se deben realizar recorridas semanales para estimar la biomasa disponible por potrero y así obtener el crecimiento total diario del campo. En segundo lugar, se debe ajustar la rotación de tal manera que, mediante el área de pastoreo asignada al ganado, este consuma la totalidad del crecimiento diario. En tercer lugar, se debe controlar los remanentes monitoreando diariamente los pastoreos, con el objetivo de que quede un remanente de 5 cm de altura entre las matas de pasto rechazado y que estas matas no superen el 15% del área pastoreada (Fariña et al., 2017).

Los métodos para realizar la recorrida son variados y no hay uno específico ni que se ajuste mejor o peor, va a depender de las condiciones de cada predio (Ortega et al., 2023). Pueden ser métodos directos (destructivos) los cuales son muy útiles en investigación porque permiten una comparación precisa entre cantidad real de materia seca y las mediciones obtenidas mediante métodos indirectos (no destructivos). Cuando se obtiene una alta correlación entre ambos tipos de métodos, se puede optar por utilizar exclusivamente los métodos indirectos. Estos últimos ofrecen ventajas frente a los métodos directos, ya que son más económicos en términos de tiempo y dinero, y más fáciles de aplicar (Canseco et al., 2007). Para lograr una mayor confiabilidad, no es necesario alcanzar coeficiente de regresión extremadamente alto, sino que es más

importante obtener el mayor número de estimaciones posibles, siempre que no exista un sesgo determinado (Insua, 2023).

2.3.1. **Método directo o destructivo**

2.3.1.1. Cosecha de forraje

El método directo de cosecha o corte del forraje implica cortar el material a nivel del suelo dentro de una superficie conocida (marco recomendado de 0,25 a 0,5 m²). Los marcos deben distribuirse al azar para capturar la variabilidad del forraje a medir. Una vez cosechado, el forraje se coloca en bolsas plásticas identificadas, se retira el aire y se pesa el material fresco (Canseco et al., 2007). Para determinar el contenido de materia seca, se debe secar el material en hornos especializados. Una vez secas las muestras, se calcula la cantidad de materia seca como la variación del peso una vez extraída el agua de la muestra y se extrapolan estos datos a la totalidad del área deseada en cada caso (potrero, parcela).

Canseco et al. (2007) indican que este método es el más preciso y objetivo para medir la disponibilidad de forraje. Su exactitud lo hace muy útil para comparar la cantidad real de biomasa con métodos de medición indirectos o no destructivos.

En la investigación se busca lograr altas correlaciones entre el método directo (corte y pesaje del forraje) y los métodos indirectos para poder utilizar exclusivamente estos últimos, los cuales son más económicos y sencillos de aplicar, permitiendo a los productores tomar un mayor número de muestras y capturar de mejor manera la variabilidad del forraje en el espacio (Ortega et al., 2023).

Una desventaja que presenta es la alta demanda de tiempo, lo que lo convierte en un método poco práctico para los productores (Canseco et al., 2007). Sin embargo, su principal desventaja es la imposibilidad de llevarlo a cabo en la práctica debido a que se debería cortar la totalidad del forraje a pastorear y, una vez cortado todo el forraje, el mismo ya no estaría disponible para ser pastoreado.

2.3.2. **Métodos indirectos o no destructivos**

2.3.2.1. Estimación visual

La estimación visual implica evaluar a simple vista la disponibilidad de forraje en una determinada área. Esto se realiza recorriendo la pastura y observando su variabilidad (Canseco et al., 2007). Este método es altamente subjetivo, por lo que se recomienda que sea realizado siempre por la misma persona y que esta haya tenido un entrenamiento previo, para mantener la consistencia en el criterio de observación (Insua, 2023). El observador debe realizar una evaluación de la densidad, cobertura, contenido de materia seca, relación tallo/hoja, proporción vivo/muerto y composición botánica de la pastura, para posteriormente integrar todos estos aspectos y estimar la biomasa presente (Montossi, De Barberi et al., 2013). Además, la precisión y exactitud de los datos obtenidos aumenta con la experiencia del observador. Una de las principales ventajas de este método es que puede ser llevado a cabo de manera rápida y sin necesidad de equipamiento especializado (Canseco et al., 2007).

2.3.2.2. Doble muestreo o método de rendimientos comparativos

La metodología mediante la cual se ajusta el método de estimación visual se denominada “doble muestreo” o de “rendimientos comparativos” y consta de dos etapas de muestreo. En primer lugar, se realiza un primer muestreo de la variación espacial mediante una estimación visual y, en segundo lugar, se lleva a cabo un muestreo directo (cosecha de forraje) (Haydock & Shaw, 1975). La evaluación visual de la variación espacial es cualitativa (escala desde 1 = baja a 5 = alta) y se combina con el método directo de corte de forraje para calibrar la biomasa de cada categoría de la escala realizada. Su precisión es moderada, pero sus costos son significativamente menores que el método directo únicamente y su rapidez es mayor (t Mannelje 2000; O'Donovan et al., 2002). Además, se logran buenos niveles de representatividad a nivel de potrero (Waller, 2020). Una vez realizada la escala se recorre el potrero y se cuantifica la frecuencia de la presencia de cada escala en el terreno, lo que definirá el valor de biomasa presente en el potrero al realizar un promedio ponderado.

2.3.2.3. Regla graduada

La regla graduada se utiliza para medir la altura de la pastura y es un método que ha tenido gran aplicabilidad en los sistemas por su simplicidad. Según Montossi, Pravia et al. (2013), la altura medida debe reflejar el “frente de forraje verde”. Para obtener una estimación precisa, se recomienda realizar de 20 a 40 mediciones por potrero, dependiendo del tamaño del potrero, la heterogeneidad de la pastura, la topografía del terreno, el tipo de suelo, la estación del año y la experiencia del medidor.

Debido a que existe una estrecha correlación entre la altura y la disponibilidad de forraje, se han desarrollado ecuaciones que relacionan ambas variables de acuerdo con el tipo de pastura.

La medición de la altura de la pastura ofrece a los productores una forma sencilla de estimar disponibilidad y con ello la oferta de forraje para los animales. Entre sus ventajas se encuentran su fácil aplicación, su bajo costo y la obtención de resultados inmediatos, aspectos cruciales para la toma de decisiones y el manejo adecuado de las pasturas y animales (Montossi, Pravia et al., 2013). Sin embargo, su principal desventaja es que no considera la estructura de la pastura. Además, el método presenta cierto grado de subjetividad, ya que depende tanto de la elección de las zonas de medición como de la forma en que se captura el área de un potrero. Sus resultados son altamente susceptibles a errores provocados por la variación espacial, la intensidad del pastoreo, la composición botánica y la estación del año (Millapán, 2014). Por lo tanto, se recomienda realizar calibraciones en función de las diferentes condiciones y cambios que se presenten en la pastura (Insua, 2023).

2.3.2.4. Plato de levante o de altura comprimida (RPM)

El plato de levante, de altura comprimida o rising plate meter (RPM) es una herramienta que mide la altura comprimida del forraje debido al propio peso del plato, lo que permite tener en cuenta los cambios en la densidad de la pastura y genera, en comparación a la regla, mayor objetividad y mejor capacidad de obtener un número más elevado de medidas (Cangiano & Brizuela, 2011). A mayor densidad de la pastura, mayor resistencia encontrará el plato al descender, lo que resultará en una mayor altura comprimida registrada. No obstante, cada plato requiere una calibración específica debido a las variaciones entre distintos tipos de platos (materiales, pesos y tecnologías) (Insua,

2023). La mejor correlación entre la altura comprimida y la disponibilidad de forraje se observa cuando la pastura está en estado vegetativo, dado que la relación entre la biomasa y la altura comprimida puede presentar variaciones de acuerdo con el estado fenológico y momento de pastoreo (Waller, 2020).

La principal ventaja del plato es su simplicidad de utilización y la rapidez con que permite estimar la disponibilidad de forraje in situ (Montossi, Pravia et al., 2013). Además, una ventaja destacable es la baja variabilidad en los resultados, independientemente del operador (Ortega Conforte, 2019). Sin embargo, puede haber sobreestimaciones en ciertos casos en comparación con el método de corte de forraje, como por ejemplo en remanentes post-pastoreo o en pasturas con un alto estado reproductivo (Insua, 2023). Por otro lado, al igual que con la regla graduada, el uso del plato requiere un esfuerzo considerable para cubrir áreas extensas (Ortega Conforte, 2019).

2.3.2.5. Pasturómetro (C-Dax)

El C-Dax es un dispositivo electrónico diseñado para ser remolcado por vehículos como cuatriciclos o tractores pequeños a velocidades máximas de 20 km/h a través de la plataforma de pastoreo. Su software interno procesa 200 medidas de cobertura de forraje por segundo y genera un valor promedio de estas medidas el cual, al aplicarse a una ecuación calibrada, proporciona un valor estimado de biomasa ($\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$). Esto es posible gracias a sus 18 emisores de rayos infrarrojos, cada uno emparejado con su respectivo receptor y separados entre sí 2,5 centímetros (C-Dax, 2024).

Entre las principales ventajas de este método se destaca la rapidez en la obtención de datos, la representación espacial detallada de las mediciones y la objetividad de los resultados al no depender de la interpretación del usuario (Lyons, 2007). A su vez, brinda la posibilidad de monitorear áreas de gran superficie debido a que se recorre el área en un vehículo motorizado, cubriendo hasta $100 \text{ m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ (Schori, 2015). Sin embargo, una de las limitaciones es su elevado costo inicial, debido a la necesidad de contar con un vehículo de remolque (López & Sosa, 2019), pero a largo plazo los costos se diluyen y terminan siendo menores que la utilización de un método que implique el pago a un empleado para que camine el área a muestrear (Ortega et al., 2023). A su vez, el C-Dax tiende a sobreestimar la biomasa en veintidós puntos porcentuales (Ortega et al., 2023).

2.3.2.6. Sensores Remotos

Según Insua (2023) “la teledetección o estimación remota se define como la extracción de información sobre un objeto sin entrar en contacto físico con él” (p. 25). Mediante la estimación remota se pueden medir rápidamente, con alta resolución espacial y temporal y en grandes áreas distintos parámetros de las pasturas como lo son la biomasa y la altura del forraje (Insua, 2023).

La composición de la superficie se puede conocer mediante la cantidad de luz que esta refleja (Ferwerda, 2005). Utilizando la radiación electromagnética reflejada por el canopeo de las plantas, se puede construir el denominado “índice verde” o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés). El NDVI indica la actividad fotosintética del material vegetal, con una escala de medición que va desde -1 (superficie inerte) a +1 (vegetación densa), pasando por el 0 (suelo desnudo). El NDVI se calcula como $NDVI = [(NIR-R)/(NIR+R)]$, siendo NIR la longitud de onda Infrarrojo Cercano y R la longitud de onda Rojo (Marchesi & Castillo, 2016). Con una calibración adecuada de este índice, es posible estimar la disponibilidad de forraje. Un índice verde elevado indica una mayor intercepción de radiación solar por parte de la pastura, lo que se traduce en una mayor disponibilidad de forraje (Sciaretta, 2012).

Una ventaja de este método de estimación de la disponibilidad de forraje es la posibilidad de realizar mapas que representen la variación espacial de la biomasa acumulada en una determinada superficie (Insua, 2023). Sin embargo, se han encontrado problemas de precisión del NDVI para estimar oferta de forraje cuando la pastura cubre completamente el suelo. Además, se ha demostrado que el NDVI se estabiliza cuando el Índice de Área Foliar (IAF) es elevado, generando problemas de precisión en pasturas con más de 3.000 kgMS.ha⁻¹. No obstante, este problema se puede mitigar utilizando una curva de calibración NDVI-biomasa y garantizando una buena frecuencia de lectura. Factores como la presencia de material vegetal muerto, la disposición del follaje, el nivel de clorofila y la luz reflejada por el suelo pueden afectar negativamente la relación NDVI-biomasa (Insua, 2023).

2.3.2.6.1. Imágenes Satelitales

El uso de satélites equipados con sensores remotos, radares o LiDAR (detección y localización con luz de laser) permite estimar la producción y disponibilidad de las

pasturas (Insua, 2023). Las imágenes proporcionadas por satélites son especialmente útiles en producciones a gran escala (Sciaretta, 2012).

La principal ventaja de este método para medir la disponibilidad de forraje es que no requiere realizar visitas al campo, eliminando o reduciendo la subjetividad de los datos recabados (Insua, 2023). Sin embargo, presenta desventajas importantes, como la demora en la obtención de las imágenes, la baja resolución espacial, la imposibilidad de realizar estimaciones en condiciones de nubosidad y la necesidad de tener disponibilidad de almacenamiento para los datos. Otra desventaja de este método es una reducción de la efectividad en los potreros o parcelas que son de menor tamaño que los píxeles de las imágenes satelitales. Además, la necesidad de realizar calibraciones es mayor (Martínez & Reyes, 2020).

Hoy en día se puede trabajar con softwares que cuentan con imágenes de alta definición gracias a la posibilidad de que sus píxeles son de tamaño pequeño (Sciaretta, 2012). Dos ejemplos destacados en el área de imágenes satelitales son MODIS y Sentinel-2. En el caso de MODIS, aunque su resolución espacial es baja (5 hectáreas por píxel), su alta frecuencia de registros permite realizar estimaciones diarias. Por otro lado, Sentinel-2 ofrece imágenes con una resolución espacial de 10 metros cuadrados por píxel, lo que proporciona buena definición, aunque con una frecuencia de registros más baja (5 a 10 días) (Insua, 2023).

Actualmente, existen plataformas comerciales que ofrecen altas resoluciones espaciales (< 4 metros) y frecuencias diarias. Estas opciones, sumadas al avance tecnológico, hacen que el uso de satélites sea una muy buena opción para estimar la oferta de forraje indirectamente a través del NDVI y que se simplifiquen las recorridas en áreas extensas, además de optimizar e intensificar el trabajo de gabinete (Insua, 2023).

2.3.2.6.2. Drones

En la actualidad, el gran desarrollo tecnológico ha permitido integrar sensores remotos multiespectrales (rojo, rojo lejano, infrarrojo cercano, verde, azul y RGB) a drones. Estos sensores capturan imágenes multiespectrales que permiten generar índices vegetales, los cuales pueden estimar la disponibilidad de forraje y producir mapas donde estos índices se ven representados (Insua & Utsumi, 2016).

La utilización de drones permite realizar mediciones sobre las pasturas de manera más rápida y con menor esfuerzo humano que herramientas tradicionales como la regla

graduada o el uso del plato de levante. Además, los drones permiten realizar estimaciones con mayor definición que las imágenes satelitales, gracias a su mayor resolución, la cual se debe a la menor altura de vuelo, obteniendo así imágenes de mayor calidad (Rueda et al., 2019). Sin embargo, el uso de drones también presenta algunas limitantes, como la influencia de las condiciones climáticas y la complejidad del procesamiento de la información generada (Théau et al., 2021). Otra limitante es la capacidad de las baterías, dado que cada batería tiene autonomía para volar únicamente de dos a tres hectáreas (en un dron DJI Phantom 4 Multiespectral). Esto genera una disminución de la eficiencia en la captura de imágenes como consecuencia de la pérdida de tiempo a la hora de realizar los cambios de las baterías (Ribarola & Villanueva, 2023). A su vez, se debe disponer de buena capacidad de almacenamiento debido al tamaño de las múltiples imágenes capturadas.

Un aspecto adicional para tener en consideración es el costo del dron. Si bien la inversión inicial es mayor en comparación con herramientas más tradicionales como la regla graduada, la superioridad en la calidad de la información obtenida y el ahorro del pago a un empleado para que camine el área e muestrear permite amortizar este costo (Ortega et al., 2023).

Los estudios en esta área se encuentran en incremento y cada vez se dispone de mayor cantidad de información sobre las relaciones entre las imágenes multiespectrales y la biomasa. Sin embargo, estas correlaciones han mostrado una alta variabilidad ($R^2 = 0,23-0,8$) (Insua et al., 2019). Para obtener correlaciones fiables, es necesario considerar la relación NDVI-biomasa como una relación no lineal, debido a que estos parámetros tienden a saturarse en valores altos (Prabhakara et al., 2015).

2.4. Antecedentes en la utilización de drones para la estimación de biomasa

En la actualidad, se dispone de un número creciente de investigaciones sobre la estimación de biomasa utilizando cámaras multiespectrales en drones tanto a nivel regional como global. A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos en estos estudios.

2.4.1. A nivel internacional

En Finlandia Viljanen et al. (2018) realizaron un experimento en una pastura de festuca con seis niveles diferentes de fertilización nitrogenada y cuatro fechas de cosecha. Se utilizó un dron de la marca Gryphon Dynamics y se llegó a la conclusión de que este dispositivo puede ser desarrollado como una herramienta de bajo costo para las prácticas agrícolas, proporcionando estimaciones precisas de la biomasa del forraje con coeficientes de correlación de Pearson de hasta 0,98.

Por otro lado, Insua et al. (2019) llevaron a cabo una calibración a escala parcela de un dron Micro Drone md4-1000 sobre festuca en la Estación Biológica W.K. Kellogg de la Universidad Estatal de Michigan, en Hickory Corners, MI, USA. Posteriormente, se probó el dron a escala de campo en una pastura de raigrás bajo pastoreo rotacional con ganado lechero. El objetivo fue probar la capacidad del dron para predecir la biomasa de la pastura bajo rotación de pastoreo a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El resultado obtenido mostró una alta correlación con las mediciones de biomasa en parcelas ($R^2=0,80$) en el rango de 226 y 4.208 KgMS.ha⁻¹. Además, no se encontraron diferencias significativas entre las estimaciones de biomasa realizadas por el dron y los dos métodos convencionales que se utilizaron como control (C-Dax y regla graduada).

En Alemania, específicamente en el Rengen Grassland Experiment (RGE), Lussem et al. (2020) utilizaron un dron DJI Phantom 2 para la estimación de biomasa en un experimento de tres años consecutivos, con variaciones en la fecha de cosecha, el año específico y la comunidad de plantas. Aunque la combinación de todas las variables arrojó un buen resultado ($R^2=0,65$), los modelos específicos de las variables mostraron mejores resultados. En general, los valores obtenidos con el dron sobrestimaron la biomasa en comparación con los obtenidos con el método del plato de levante.

Asimismo, Théau et al. (2021) realizaron un estudio en Canadá en el que se llevaron a cabo catorce vuelos con un dron DJI Inspire 1 Pro sobre treinta parcelas de pastura, cinco parcelas de suelo desnudo y seis parcelas de control. Estas parcelas presentaban distintos niveles de biomasa gracias a un sistema de rotación de ganado y recorte durante una estación de crecimiento completa. Al utilizar el NDVI para la estimación de biomasa se obtuvieron muy buenas correlaciones, siendo $R^2=0,80$ para la materia fresca y $R^2=0,66$ para la materia seca.

Finalmente, Sinde-González et al. (2021) llevaron a cabo un experimento en el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador, donde se estimó la biomasa aérea de 54 parcelas con diferentes tipos de pasturas y tratamientos de fertilización. El dron, un DJI Phantom 4, mostró una muy buena precisión en las estimaciones ($R^2=0,78$).

2.4.2. A nivel nacional

A nivel nacional, existen pocos estudios que utilizaron drones para la estimación de biomasa. Rodríguez y Triñanes (2018) realizaron un trabajo en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Uruguay. El objetivo del estudio fue “validar un método de procesamiento de imágenes obtenidas por un dron para estimar la altura de las pasturas” (Rodríguez & Triñanes, 2018, p. 2). Se evaluaron dos metodologías propuestas para realizar la estimación de la altura de la pastura: Estacas y Mapping 3D. Además, se analizó la performance del dron, permitiendo un primer acercamiento al desarrollo de modelos digitales y al procesamiento y análisis de datos. De las dos metodologías, Mapping 3D con cámara RGB obtuvo los mejores resultados, con un R^2 de 0,56. Esta técnica sobreestimó la altura del forraje en 0,5 cm en comparación con la regla graduada, con un desvío de 13% cuando se consideraron todas las variables involucradas. Se llegó a la conclusión de que el error de posicionamiento de captura de imagen es la variable que posee un mayor impacto en los resultados, siendo la velocidad del viento la principal causa de estos errores. Permitiendo un mayor error en el posicionamiento, se encuentran otras variables que influyen como lo son la radiación, la versión de los modelos y los tratamientos (Rodríguez & Triñanes, 2018).

Posteriormente, Ribarola y Villanueva (2023) llevaron a cabo un estudio con el objetivo de estimar la altura y biomasa de pasturas sembradas mediante imágenes capturadas por drones. El ensayo se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Uruguay. En esta investigación se calibraron tanto la regla como el plato de levante (RPM) para la pastura bajo estudio y se analizaron las imágenes obtenidas con un dron DJI Mavic 2 Pro con cámara UHD (5.472 x 3.648 píxeles). Además, se desarrolló una metodología para estimar la biomasa a partir de las imágenes y los datos relevados a campo, y se

compararon los diferentes métodos de medición. La metodología se basó en la toma de alturas de biomasa tanto con regla como con RPM y aplicar una clasificación supervisada (CS) en el ortomosaico generado. Los vuelos se realizaron a alturas de 60 y 100 metros. La calibración de altura medida con regla y RPM respecto a la biomasa disponible mostró un R^2 de 0,52 y 0,54 respectivamente. Por otro lado, la relación entre la biomasa obtenida mediante una clasificación supervisada a partir de los ortomosaicos y las alturas mostró mejores ajustes: $R^2 = 0,84$ y $R^2 = 0,92$ con la regla y $R^2 = 0,57$ y $R^2 = 0,46$ con RPM, para alturas de vuelo de 60 y 100 m respectivamente (Ribarola & Villanueva, 2023).

Además, Artola y Pérez del Castillo (2024) realizaron otro trabajo enfocado en la estimación de la biomasa disponible de praderas de festuca mediante índices multiespectrales obtenidos a partir de imágenes capturadas por un dron a 60 metros de altura durante la estación de otoño. El ensayo se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) sobre una pastura de festuca de tercer año bajo riego. Se realizaron vuelos semanales y mediciones de altura utilizando regla y métodos de doble muestreo. Las correlaciones entre NDVI y biomasa alcanzaron un $R^2 = 0,74$, mientras que la correlación entre el NDVI y altura medida con regla fue de $R^2 = 0,76$. A su vez, se estableció una relación entre el NDVI y la tasa de crecimiento, con un ajuste de $R^2 = 0,70$ (Artola & Pérez del Castillo, 2024).

Finalmente, Carballo y Severi (2024) llevaron a cabo otro trabajo ubicado en el Centro Regional Sur (CRS) durante la estación de invierno con el objetivo de estimar la biomasa disponible utilizando imágenes multiespectrales capturadas por un dron. Además, se buscó evaluar su aplicación para la toma de decisiones en dos sistemas intensivos de producción lechera en base pastoril. El dron que se utilizó fue un DJI Phantom 4 Multiespectral. El trabajo se dividió en dos etapas: la primera consistió en la calibración del dron en una pastura mezcla de *Dactylis* y Alfalfa de segundo año, mientras que la segunda se enfocó en los vuelos sobre el área de pastoreo. El análisis reveló que la relación entre el NDVI y la biomasa disponible presentó un coeficiente de regresión $R^2 = 0,41$, aunque dicha relación no era uniforme, ya que variaba según las etapas de crecimiento de la pastura. A su vez, la correlación entre el NDVI y la altura arrojó un $R^2 = 0,29$. Por otro lado, al comparar los valores de biomasa estimados para el área de pastoreo mediante el dron con los estimados a partir de un C-Dax, se detectó una diferencia de $\pm 1.700 \text{ KgMS.ha}^{-1}$ (Carballo & Severi, 2024).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

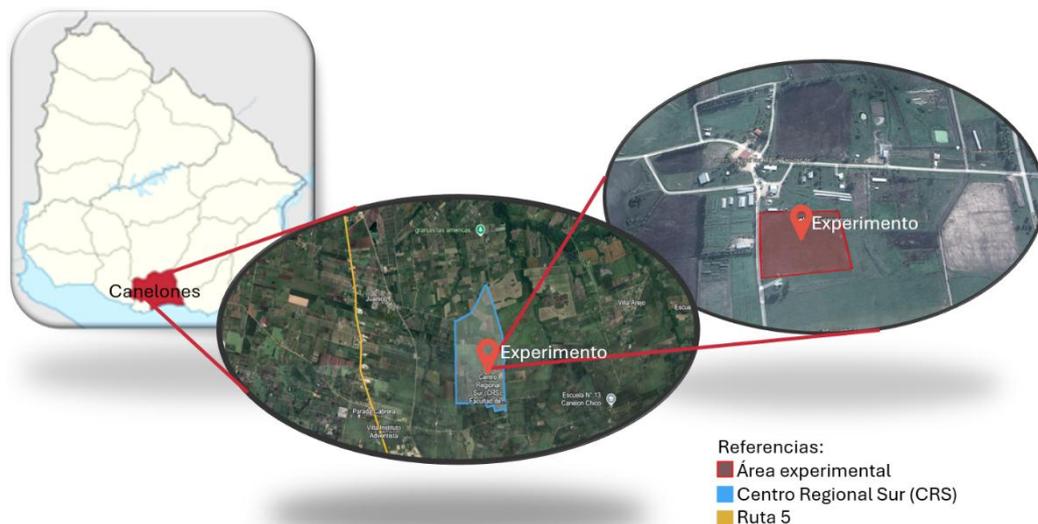
3.1. Condiciones experimentales

3.1.1. Lugar y período del experimento

El experimento se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (C.R.S.) de la Facultad de Agronomía, Udelar, situado en Progreso, Canelones, Uruguay (latitud 34°36'53.28"S, longitud 56°13'00.07"O), en el potrero T5, con una superficie de 2 hectáreas (Figura 2).

Figura 2.

Ubicación del área experimental



Nota. Adaptado de “Departamento de Canelones” (2024) y Google (2024)

El periodo experimental abarcó desde el 26/06/2024 hasta el 16/09/2024, incluyendo la estación de invierno. Los muestreos se realizaron semanalmente, aunque cada pastura se muestreaba cada 15 días (± 1 día), intercalando semanalmente la pastura muestreada, con el propósito de permitir el descanso de la pradera entre cada muestreo.

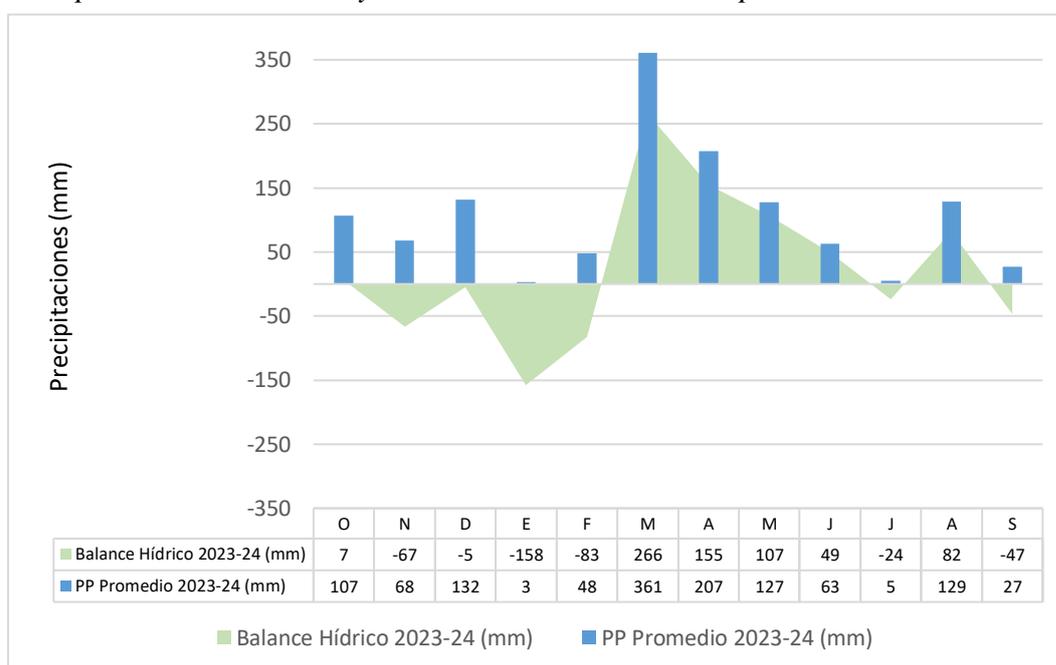
3.1.2. Condiciones climáticas

3.1.2.1. Precipitaciones y balance hídrico previo y durante el experimento

En la Figura 3 se pueden observar las precipitaciones mensuales y el balance hídrico del C.R.S. para el período 2023-24. Los datos de precipitaciones fueron tomados de la estación meteorológica del C.R.S., mientras que los datos para realizar el cálculo del balance hídrico fueron tomados de la estación meteorológica INIA “Las Brujas”, la cual se encuentra a 13 kilómetros en línea recta del experimento.

Figura 3.

Precipitaciones mensuales y balance hídrico 2023-2024 para el C.R.S.



Nota. Elaborado a partir de Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, 2024) y G. Ortega (comunicación personal, 2024)

Al observar la Figura 3 se puede ver como el año 2024 comenzó con precipitaciones menores al promedio histórico, pero en el mes de marzo las precipitaciones triplicaron el promedio histórico de este mes. Si bien la estación de otoño fue lluviosa (120% por encima del promedio histórico), durante la estación de invierno las precipitaciones fueron significativamente menores al promedio histórico (21% por debajo), llegando a tener balances hídricos negativos, lo que no es esperado que suceda en esta época.

Por otra parte, se analizó el comportamiento del balance hídrico, concluyendo que durante el verano se experimentó un déficit hídrico notablemente superior al promedio

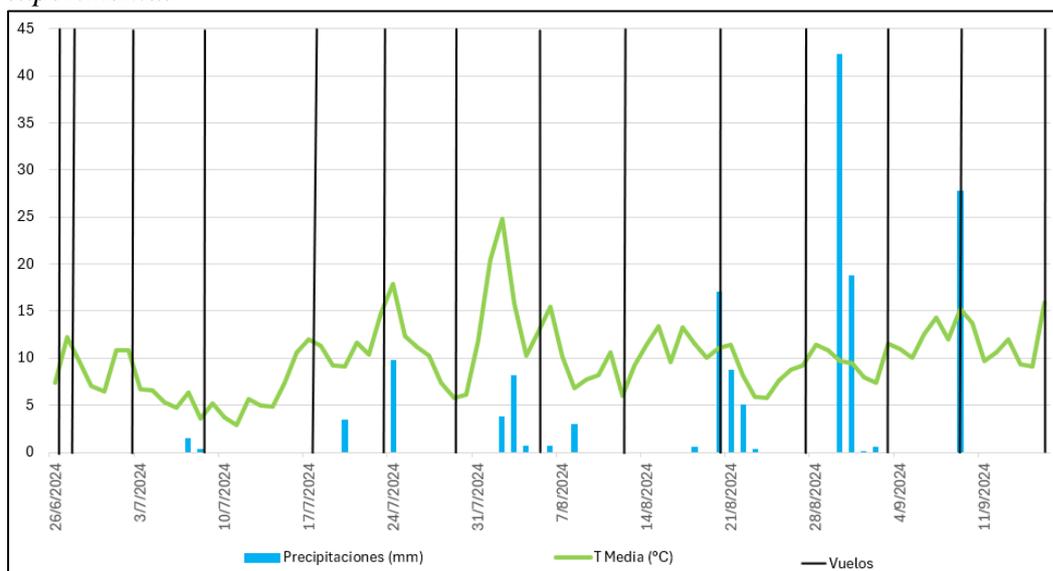
histórico, alcanzando un valor 123% por encima de dicho promedio. Sin embargo, en otoño se observó un balance positivo, superando en 378 puntos porcentuales el promedio histórico. Finalmente, en invierno, la disponibilidad hídrica fue un 62% inferior al promedio, registrándose tanto períodos de disponibilidad como de déficits leves de agua.

3.1.2.2. Temperaturas y precipitaciones durante el período experimental

En la Figura 4 se observan la temperatura media diaria para el período en el que transcurrió el experimento (línea verde). Además, se muestran las precipitaciones diarias (barras celestes) y los días en que se realizaron los vuelos y muestreos (líneas negras).

Figura 4.

Temperaturas medias, máximas y mínimas y precipitaciones durante el período experimental



Nota. Elaborado a partir de INIA (2024) y G. Ortega (comunicación personal, 2024)

Como se puede ver, al inicio del experimento se presentaron varios eventos de bajas temperaturas medias diarias, que coinciden con días donde se presentaron heladas meteorológicas (INIA, 2024). Estos eventos son normales para la región y época del año. Otro aspecto que se puede ver son las bajas cantidades de precipitaciones que ocurrieron al inicio del experimento, lo que concuerda con lo presentado en la Sección [3.1.2.1](#).

3.2. Materiales

Para llevar a cabo el experimento, fue necesario contar con los siguientes elementos: un dron DJI Phantom 4 Multiespectral para realizar los vuelos, un iPad para el mando remoto del dron, una regla graduada y un plato de levante para medir la altura de la pastura, treinta cuadros de madera (0,52 x 0,32 m) con sus respectivas letras identificadoras en hojas A4 y herramientas para el muestreo de biomasa de la pastura. En dichas herramientas se incluían dos tijeras de esquilar, bolsas de nylon, bandejas de aluminio, una balanza y una estufa. Además, se necesitó una computadora para la toma de datos y su procesamiento (Figura 5).

A su vez, se utilizó un dispositivo C-Dax para la estimación semanal de la biomasa de ambas parcelas.

Figura 5.

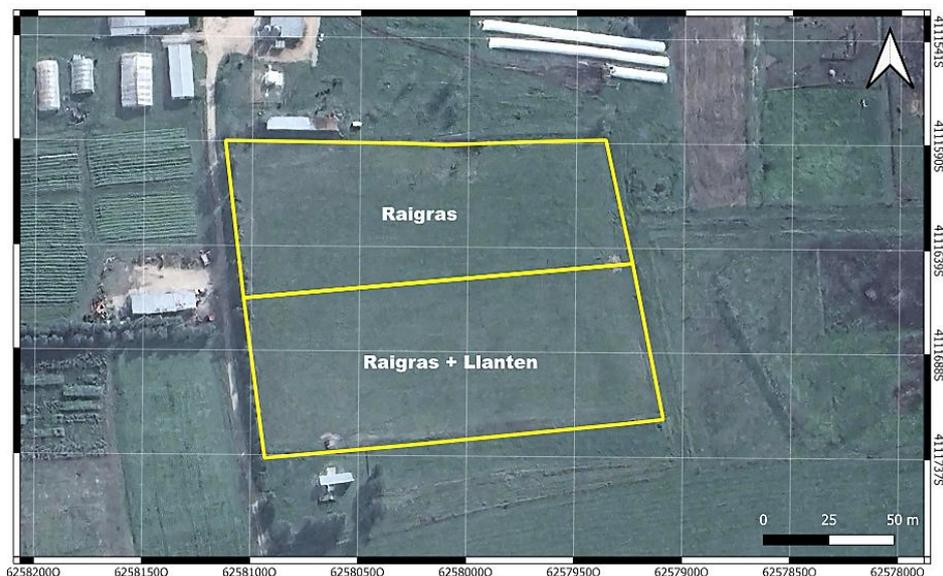
Algunos de los materiales utilizados en el muestreo de forraje



3.2.1. **Pastura**

Se trabajó sobre una pastura de segundo año de Raigrás perenne cv. Virazón (*Lolium perenne* cv. Virazón), dividida en dos parcelas. Una de ellas contenía una mezcla con Llantén cv. Tonic (*Plantago lanceolata* cv. Tonic) (Figura 6).

Figura 6.
Potrero T5 dividido en dos pasturas



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024)

La pastura se sembró el 30/05/2023 con $18 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Raigrás y $12,5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Llantén (en el caso de la parcela sur). Sin embargo, el Llantén se resembró en dos ocasiones: el 23/02/2024 y el 08/04/2024 con $9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ambas veces.

Previo a la siembra, el 08/05/2023 se aplicaron $4 \text{ L}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Glifosato, repitiéndose la aplicación el día siguiente a la siembra. Por otro lado, la pastura se fertilizó con $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de UREA el 26/10/2023. A su vez, el 26/03/2024 se llevó a cabo un control de hormigas con Lampo ($1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y al día siguiente un control de bicho bolita con Clartex ($4,75 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Posteriormente, se pastoreó entre el 29/05/2024 y el 18/06/2024 con treinta y tres terneros de 98 kg de Peso Vivo (PV) promedio, aplicándose $75 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de UREA al término del pastoreo el 21/06/2024. Este pastoreo finalizó prácticamente al inicio del experimento (8 días antes). Finalmente, se pastoreó cada tratamiento en franjas diarias, con seis vacas de 489 kg de PV promedio, entre el 26/08/2024 y el 05/09/2024, incluyéndose dentro del período del experimento.

3.2.2. Dron

El dron utilizado fue un DJI Phantom 4 Multiespectral (Figura 7). Este modelo tiene un peso de 1.487 gramos y su distancia diagonal sin tener en cuenta las hélices es de 35 cm. Puede volar hasta 6 km sobre el nivel del mar, teniendo una velocidad máxima de ascenso de 6 m.s^{-1} y de descenso de 3 m.s^{-1} . Puede volar con una velocidad de hasta 58 km.h^{-1} y su tiempo máximo de vuelo es de 27 minutos aproximadamente. Su temperatura óptima de vuelo va desde los 0 hasta los $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (DJI Agriculture, 2025).

Figura 7.

Dron DJI Phantom 4 Multiespectral



El rango de precisión de vuelo estacionario en vertical es de $\pm 0,1 \text{ m}$ con posicionamiento de visión y de $\pm 0,5 \text{ m}$ con posicionamiento GNSS (Sistema de Navegación Global por Satélite); mientras que en horizontal es de $\pm 0,3 \text{ m}$ con posicionamiento de visión y de $\pm 1,5 \text{ m}$ con posicionamiento GNSS. En el experimento se utilizó el posicionamiento GNSS. Está equipado con seis cámaras de 2,08 MP efectivos que capturan en seis bandas de color: luz visible (RGB), rojo (R), rojo lejano (RE), infrarrojo cercano (NIR), verde (G) y azul (B). El tamaño máximo de la imagen es de 1.600×1.300 y el formato de las imágenes capturadas mediante la cámara RGB es JPEG mientras que las de las otras cámaras son en formato TIFF. El dron posee un puerto compatible con una tarjeta MicroSD para el almacenamiento de las imágenes (DJI Agriculture, 2025).

Posee un control remoto cuya distancia máxima de transmisión es de 7 km y una batería de 6000 mAh. Es compatible tanto con tabletas como con teléfonos inteligentes (DJI Agriculture, 2025).

Las baterías del dron son de 5870 mAh, su voltaje es de 15,2 V y su potencia de carga máxima es de 160 W. Además, cuentan con un centro de carga de baterías cuyo voltaje es de 17,5 V (DJI Agriculture, 2025).

3.3. **Metodología**

3.3.1. **Diseño experimental**

El objetivo general de este trabajo fue estimar la disponibilidad, altura, número de hojas por macollo y el forraje desaparecido por hectárea en una pradera de Raigrás perenne y otra de Raigrás perenne con Llantén utilizando el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) a partir de imágenes capturadas por un dron a 60 metros de altura durante la estación de invierno. Teniendo en cuenta esto, se realizaron vuelos y mediciones un solo día a la semana, preferentemente los lunes o martes para respetar los tiempos fijados entre muestreos. Durante ese día se llevó a cabo el muestreo de una única parcela, excepto en la primera semana, en la que se realizaron vuelos y mediciones en dos días (un día por parcela), debido a que aún se encontraba ajustándose el diseño experimental. La parcela muestreada cada semana fue aquella que no había sido muestreada la semana previa, siendo así que cada parcela se muestreó cada 15 días (± 1 día), excepto en los dos primeros muestreos de la parcela de Raigrás, los cuales se efectuaron con un intervalo de una semana (ver Anexo A). El objetivo de los tiempos planteados fue el de respetar el tiempo de descanso de la pastura entre vuelos.

Cada semana se seleccionaron treinta cuadros de $0,52 \times 0,32$ m ($0,17$ m²) en los que se aplicaba la técnica de doble muestreo (Figura 8). Se optó por utilizar estos cuadros con la finalidad de tener un área fija de referencia sobre la cual muestrear. Si bien la forma no adquiere mayor importancia, el área si es relevante, dado que se busca obtener la mayor representación de la pastura posible. Según Canseco et al. (2007), el área mínima a utilizar debería ser de $0,25$ m², aunque en este caso se optó por un área de $0,17$ m², debido a un tema de practicidad a la hora de transportar los cuadros y a que los mismos ya se encontraban armados y listos para ser utilizados.

Por otro lado, la decisión de realizar treinta muestreos fue con la finalidad de cubrir la heterogeneidad de la pastura. Canseco et al. (2007) sugieren que en pasturas heterogéneas se deberían superar las veinte muestras, por lo que en este caso se estaría cubriendo e incluso superando las recomendaciones mínimas de muestreo.

Figura 8.

Cuadro identificado con la letra “L”, correspondiente al valor 2 de la escala visual



La selección de la ubicación semanal de los cuadros se realizó mediante una escala visual que comprendía los números enteros del uno al cinco, donde el uno representaba las menores disponibilidades de forraje de la pastura en ese momento, y el cinco las mayores. Cada valor de la escala se repitió seis veces por muestreo. El objetivo de realizar el muestreo de esta manera fue el de abarcar la totalidad de la heterogeneidad de la pastura, con el fin de lograr realizar la mejor calibración posible del dron (ver Sección [3.3.4.](#), Sección [3.3.5.](#) y Sección [4.1.](#)). A su vez, cada cuadro se identificó con una letra del abecedario, a las que se añadieron las letras A', B' y C', completando así un total de treinta letras. La letra A se correspondió al valor uno de la escala visual, y las letras siguientes se asignaron en orden alfabético (seis letras por valor de escala) hasta terminar con la letra C', correspondiente al valor cinco de la escala visual. En total se tomaron treinta muestras en 14 instancias, totalizando 420 muestras a lo largo del experimento, el cual es un valor de gran robustez para realizar la calibración del dron.

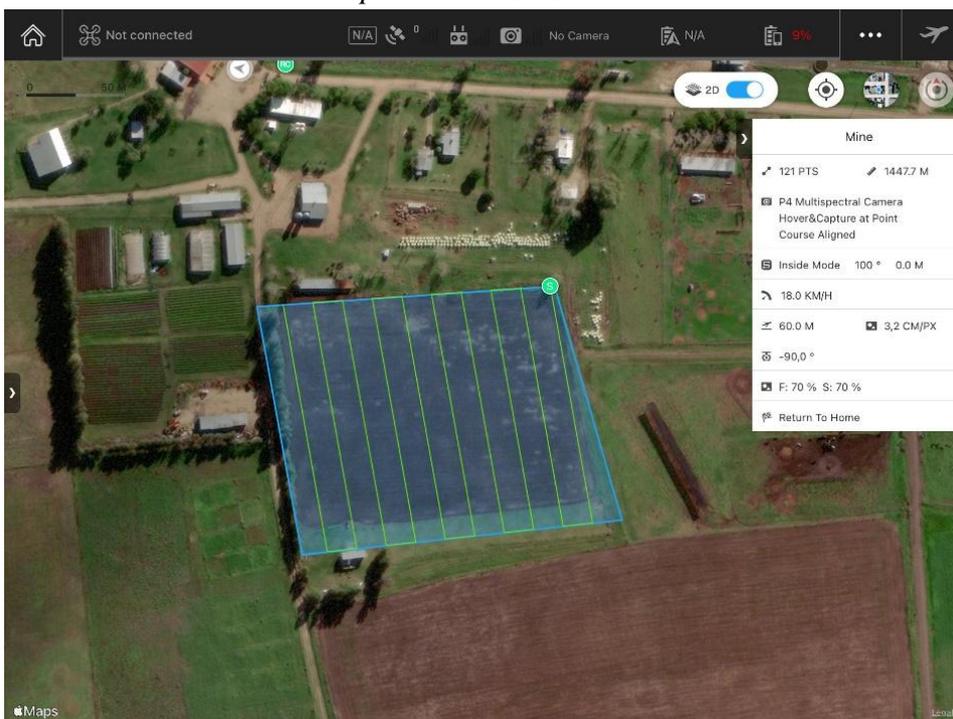
3.3.2. Programación de vuelo

Para realizar la programación de los vuelos se utilizó la aplicación DJI GS Pro (Ground Station Pro), instalada en el iPad conectado al mando del dron. Los vuelos se

realizaron a 60 metros de altura. Además, se capturaron las imágenes con un solapamiento tanto frontal como lateral de 70 % y un ángulo de 90°. Tanto para la determinación de la altura de vuelo como del solapamiento y el ángulo de las imágenes capturadas se tuvo en cuenta la bibliografía citada, dado que en gran parte de los casos se recomendaban solapamientos mayores al 60% y alturas de 60 a 100 m. Esto se puede visualizar en la Figura 9, donde las líneas verdes corresponden a la recorrida del dron, de tal manera que se cumplen las restricciones de solapamiento y cobertura del área objetivo de vuelo (área azul). En total, por vuelo se obtuvieron 360 imágenes distribuidas en 120 puntos dentro del potrero donde el dron se detenía a capturar tres imágenes por punto: una en Luz visible (RGB), una en Rojo (R) y una en Infrarrojo cercano (NIR).

Si bien los muestreos de biomasa se realizaban en una única parcela, el vuelo abarcaba ambas parcelas, obteniendo imágenes semanales de la totalidad del potrero, con la finalidad de luego poder estimar semanalmente la biomasa y la altura de ambas parcelas.

Figura 9.
Plan de vuelo del dron en aplicación DJI GS Pro



Nota. Tomado de DJI GS Pro (2024).

3.3.3. Muestreos para determinar los parámetros de la pastura para la calibración del dron

Antes de realizar el vuelo del dron y la captura de imágenes para la posterior construcción del índice NDVI, se colocaban seis cuadros aleatoriamente según la escala de rendimiento. Durante la colocación de estos cuadros, se tomaban las siguientes medidas dentro de cada uno: altura con el plato de levante apoyándolo en el centro del cuadro, altura con la regla graduada en cinco puntos seleccionados al azar dentro del cuadro y número de hojas por macollo de cinco macollos seleccionados al azar dentro del cuadro. Todas las medidas se registraban.

Una vez completado el vuelo, se procedía a cortar el forraje dentro de cada cuadro hasta dejarlo al ras del suelo, de tal manera de obtener la totalidad del forraje por cuadro, como lo indican Canseco et al. (2007). El forraje se colocaba en bolsas de nylon y se etiquetaba con la letra correspondiente (Figura 10).

Figura 10.

Muestra de forraje cortada al ras del suelo, identificada y guardada en bolsa de nylon



Las treinta muestras se llevaban al laboratorio para ser pesadas y determinar el contenido de materia seca y el posterior valor de biomasa. El procedimiento de pesaje incluía: pesar el total de la muestra dentro de la bolsa, pesar una bandeja, tarar el peso de la bandeja, pesar una submuestra dentro de la bandeja y finalmente pesar la bolsa con la balanza ya destarada. De este modo, se obtenía el peso de la muestra y de la submuestra (Figura 11). Las bandejas con las submuestras se colocaban en un horno para ser secadas (Figura 11 y 12) durante 48 horas y luego se pesaban nuevamente para determinar el peso seco (Figura 12). Esto permitía determinar el porcentaje de materia seca de la submuestra, extrapolarlo a la muestra total y calcular el contenido de biomasa presente en una hectárea con esa disponibilidad de forraje.

Figura 11.
Muestras frescas



Nota. Izquierda: muestras frescas pesadas y prontas para ser llevadas al horno de secado. Derecha: muestras frescas en horno de secado

Figura 12.
Muestras secas



Nota. Izquierda: muestras secas en horno de secado. Derecha: pesaje de muestras secas

3.3.4. **Procesamiento de imágenes**

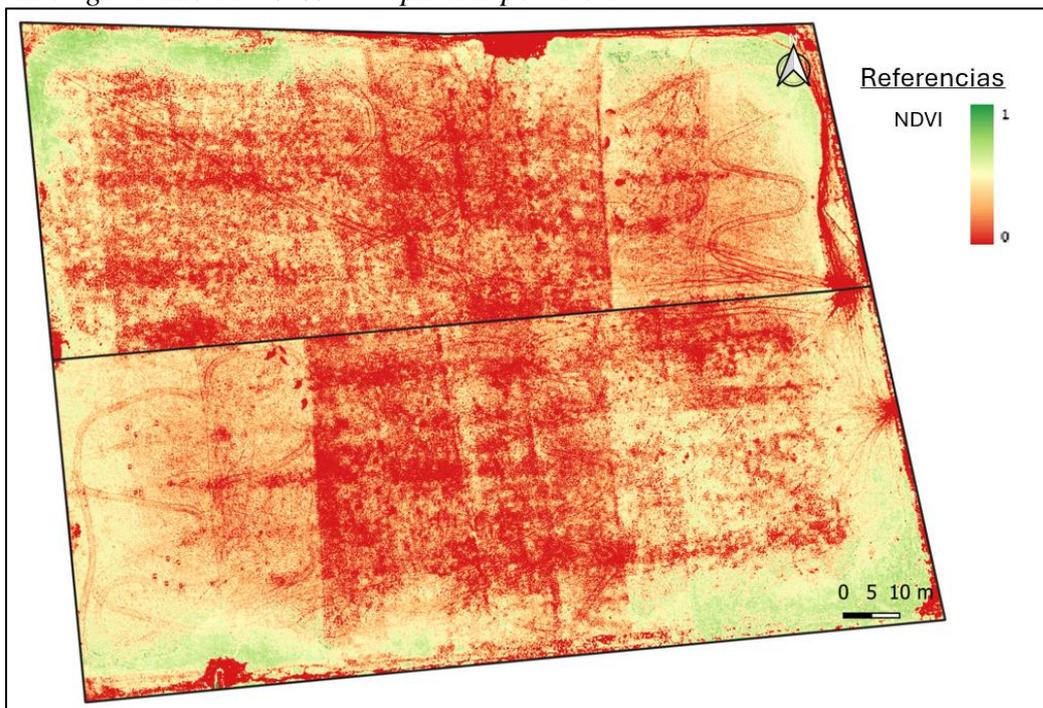
Una vez completado el vuelo, las imágenes capturadas por el dron se procesaron utilizando el programa Agisoft Metashape Professional (Agisoft LCC, 2024), donde se generó un ortomosaico por cada vuelo procesado (Figura 13). Agisoft Metashape Professional es un software avanzado de fotogrametría que permite procesar imágenes y generar modelos detallados. Es ampliamente utilizado en aplicaciones como la agricultura de precisión, la cartografía, la arqueología, la geología y la silvicultura.

El procesamiento incluyó los siguientes pasos:

1. Carga de las imágenes del vuelo en el programa:
Se importan las imágenes capturadas durante el vuelo del dron.
2. Orientación de las fotos:
Se identifican puntos en común entre las imágenes, se calcula su posición relativa y se obtiene una nube de puntos dispersa que representa la estructura del terreno.
3. Optimización de la orientación de las imágenes:
Se corrigen posibles errores en la orientación inicial, obteniendo resultados más precisos.
4. Creación de una nube de puntos de paso:
Se genera una nube de puntos densa que posee mayor detalle de la geometría de la superficie capturada que la nube de puntos dispersa creada, lo que sirve de base para los modelos posteriores.
5. Creación del modelo:
Se genera un modelo tridimensional a partir de la nube de puntos densa, el cual está compuesto por polígonos que representan la superficie del terreno.
6. Creación de la textura:
Se le aplica textura al modelo 3D basándose en la información de color de las imágenes originales, mejorando la apariencia visual del modelo.
7. Creación del modelo de teselas:
Se genera una estructura optimizada que permite visualizar y manejar modelos grandes de manera eficiente.
8. Creación del modelo digital de elevaciones:
Se genera un modelo que representa la altura de la superficie capturada.
9. Creación del ortomosaico:
Se produce una imagen ortorrectificada (sin distorsiones) combinando todas las fotos y ajustando la perspectiva. Este ortomosaico es una representación precisa del terreno en dos dimensiones.

Figura 13.

NDVI generado el 03/09/2024 para el potrero T5



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024)

El ortomosaico se procesó utilizando la calculadora ráster del software para calcular el NDVI mediante la fórmula presentada por Marchesi y Castillo (2016): $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$, obteniendo así un valor del índice para cada píxel del ortomosaico. Posteriormente, se exportó el ortomosaico y, a través QGIS, se determinó el NDVI promedio dentro de cada cuadro de 0,52 x 0,32 m correspondiente al vuelo, para luego vincularlo con las variables tomadas a campo (biomasa, altura y número de hojas por macollo).

QGIS es un software de Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) de código abierto, utilizado para visualizar, editar, analizar y gestionar datos geoespaciales. Es una alternativa gratuita a softwares como ArcGIS y se destaca por su versatilidad y amplia comunidad de usuarios y desarrolladores. Se optó por utilizar QGIS debido a la practicidad de utilización que este posee y el previo conocimiento de su manejo por parte del autor de este trabajo, así como también por la gran cantidad de funciones que este posee.

El procedimiento en QGIS consistió en cargar el ortomosaico y, posteriormente crear una capa shape con polígonos que representaban el borde interior de cada cuadro. En la Figura 14 se muestra cómo se veían los cuadros en los ortomosaicos. Luego, se cortó la capa ráster del ortomosaico según los cuadros delimitados y se transformaron los píxeles cortados a puntos. Finalmente, se unieron los atributos por localización para calcular la

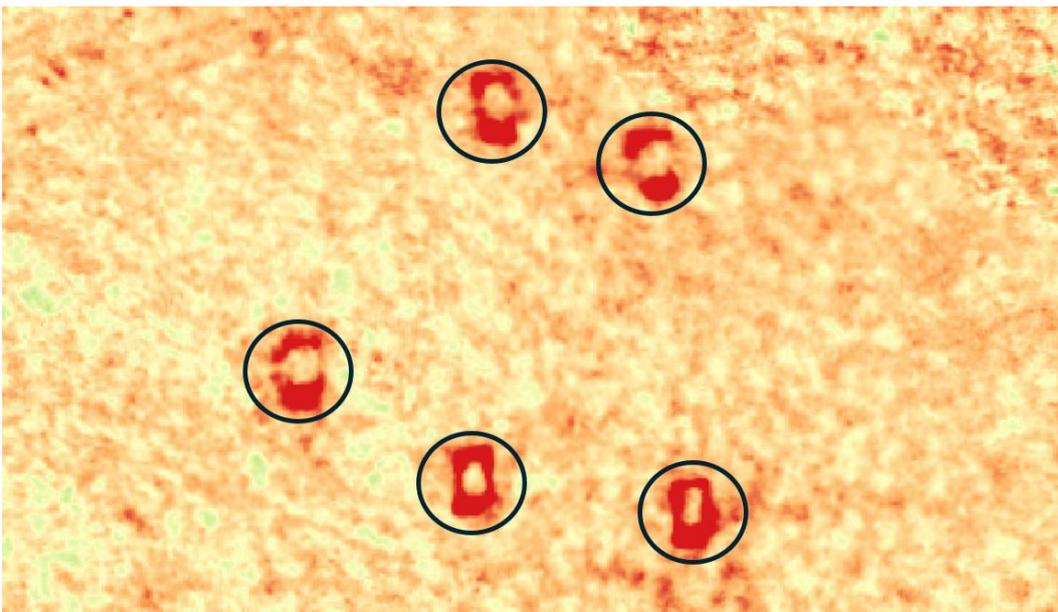
media de NDVI dentro de cada cuadro. Dado que cada píxel consistía en cuadrados de 0,03 metros de lado, por cada cuadro se tenían 185 píxeles, lo cual brindó un gran nivel de detalle para realizar la calibración del dron.

Gracias a este procedimiento, se obtuvieron semanalmente datos de NDVI en los treinta cuadros. Con esta información se generaron regresiones que permitieron calcular la biomasa ($\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) y altura (cm) de cada pastura, las cuales se explican en la Sección [3.3.5](#). Esta biomasa y altura se calculó a partir del NDVI promedio de cada pastura, el cual para obtenerlo se siguió el mismo procedimiento mencionado para la determinación del NDVI promedio dentro de cada cuadro.

Cabe resaltar que, si consideramos cada píxel como una muestra y, debido al tamaño de cada uno ($0,0009 \text{ m}^2$), se contaba con más de once millones de muestras por hectárea, lo que se convierte en un número extremadamente elevado y que brinda un detalle de la pastura como ningún otra herramienta de medición del forraje.

Figura 14.

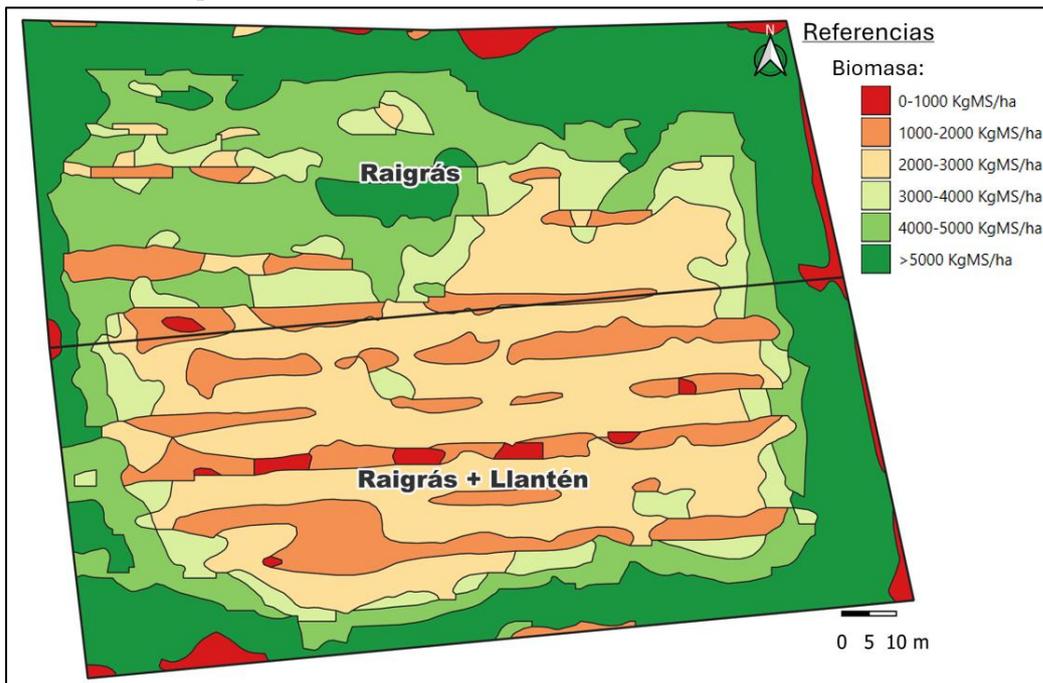
Vista de los cuadros en el ortomosaico



A continuación, para visualizar la distribución de esta biomasa se crearon mapas espaciales a partir del NDVI generado mediante las imágenes capturadas por el dron (Figura 15).

Figura 92.

Distribución espacial de la biomasa el 12/08/2024



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024).

El proceso de creación de los mapas espaciales en QGIS incluyó los siguientes pasos:

1. Calcular mediante la herramienta “Calculadora ráster” la biomasa ($\text{KgMS} \cdot \text{ha}^{-1}$) de cada píxel de NDVI utilizando la ecuación generada mediante la regresión (Sección 4.1.4).
Se usa la ecuación obtenida mediante regresión para convertir los valores de NDVI en valores de biomasa en $\text{KgMS} \cdot \text{ha}^{-1}$. Esto genera un nuevo ráster con los valores estimados de biomasa por píxel.
2. Herramienta “Resampling”, preservando el tipo de información y con 1 metro de definición.
Se ajusta la resolución espacial del ráster a 1 metro por píxel, asegurando que el tipo de información se preserve. Esto es útil para estandarizar datos y mejorar la precisión del análisis.
3. Herramienta “K-means clustering for grids”.
Se aplica el algoritmo de agrupamiento K-means sobre el ráster, clasificando los píxeles en grupos similares según sus valores. Esto permite segmentar el área en zonas homogéneas de biomasa.
4. Herramienta Majority/minority”.
Se suavizan los resultados del clustering mediante un análisis de mayoría/minoría, lo que ayuda a eliminar pequeños grupos aislados y hacer la clasificación más homogénea.
5. Herramienta “Poligonizar (ráster a vectorial)”, con el nombre de capa “ID”.
Se convierte el ráster clasificado en una capa vectorial de polígonos, asignando un ID a cada zona homogénea.
6. Cálculo del área de los polígonos, selección de los polígonos cuya área era menor a 0.001 ha y eliminación de estos mediante la herramienta

“Eliminación de polígonos seleccionados”, combinándolos con el área más grande.

Se calcula el área de cada polígono, y los que sean menores a 0.001 ha se combinan con el polígono vecino más grande para evitar la fragmentación excesiva.

7. Herramienta “Disolver” por ID.
Se agrupan los polígonos con el mismo ID en un único polígono, reduciendo la cantidad de elementos y facilitando el manejo de los datos.
8. Herramienta “v.generalize” con el algoritmo “Snakes”.
Se suavizan los bordes de los polígonos usando el método "Snakes", lo que mejora la representación visual y elimina irregularidades en los contornos.
9. Herramienta “Simplificar” con tolerancia 0.005.
Se reducen los vértices de los polígonos manteniendo su forma general, lo que optimiza el rendimiento sin perder demasiada precisión.
10. Herramienta “Unión” para unir la capa generada con el límite del potrero.
Se fusionan los polígonos generados con la capa del potrero para que la información espacial se ajuste a los límites del área de estudio.
11. Borrar los ID=NULL.
Se eliminan los polígonos sin identificador para limpiar la base de datos.
12. Herramienta “Disolver” por ID_2.
Se agrupan los polígonos nuevamente, ahora usando un nuevo identificador (ID_2), para mejorar la segmentación del área.
13. Seleccionar los ID_2=NULL y eliminar mediante la herramienta “Eliminación de polígonos seleccionados”, combinándolos con el área más grande.
Se eliminan los polígonos sin ID_2 y se fusionan con polígonos más grandes para mantener una estructura coherente en los datos.
14. Herramienta “Estadísticas de zonas”, calculando la media y agregando la capa original de NDVI.
Se calcula la media del NDVI para cada zona.
15. Acomodar ID_2 según la escala propuesta.
Se reasignan los valores de ID_2 para ajustarlos a una clasificación predefinida.
16. Herramienta “Disolver” por ID_2.
Se agrupan nuevamente los polígonos según la clasificación final establecida en el paso anterior.
17. Ajustar propiedades para darle color.
Se asigna una simbología adecuada a la capa final para representar de manera visualmente clara la distribución de biomasa en el mapa.

3.3.5. **Análisis de datos**

Para el análisis de los datos se emplearon modelos de regresión lineal simple $y = ax + b$, donde “a” representa la pendiente y “b” la intersección con el eje vertical. Con la totalidad de los cuadros muestreados durante el experimento, se evaluó la relación entre

la altura (medida con el plato de levante y con la regla) y el número de hojas por macollo con la biomasa. El objetivo de este procedimiento fue evaluar si los datos obtenidos durante el muestreo se habían tomado de manera correcta. A su vez, con la totalidad de los cuadros muestreados durante el experimento, se evaluó la relación entre la biomasa, la altura (medida con el plato de levante y con la regla) y el número de hojas por macollo con el NDVI promedio de cada cuadro. El objetivo de esta evaluación fue generar modelos que permitieran calibrar el dron con la finalidad de estimar mediante NDVI tanto la biomasa como la altura del forraje y el número de hojas por macollo.

Una vez realizada la calibración del dron, se estimó la biomasa disponible semanalmente por potrero utilizando el modelo generado de regresión lineal simple entre NDVI y biomasa. A la biomasa estimada se la comparó con la estimada semanalmente mediante un dispositivo C-Dax (Sección [4.2.1.](#)).

Por otra parte, durante el pastoreo por franjas se midió la disponibilidad de forraje en cada franja antes del pastoreo y el forraje remanente después de este. Estas mediciones de biomasa se realizaron utilizando un dispositivo C-Dax y un plato de levante (RPM). De forma similar, se empleó el RPM para estimar la altura del forraje. Asimismo, se calculó el NDVI promedio de cada franja, permitiendo estimar mediante los modelos generados tanto la biomasa como la altura, y compararlas con las estimaciones del C-Dax y el RPM (Sección [4.2.2.](#) y Sección [4.2.3.](#)). Estas herramientas fueron tomadas como testigo dado que cuentan con una mayor cantidad de antecedentes de calibración y prácticas que demuestran su correcto funcionamiento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Calibración del dron

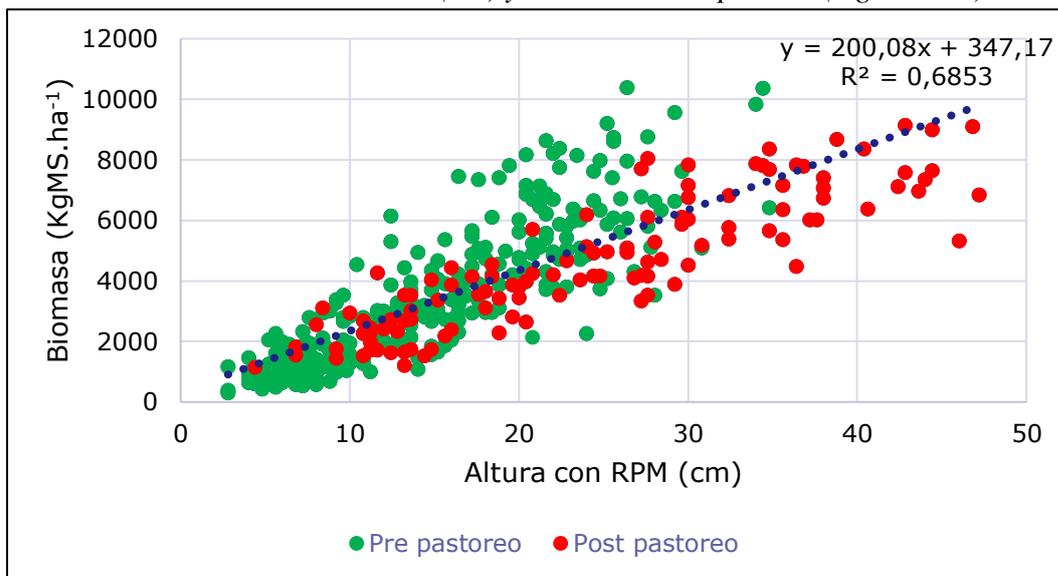
A continuación, se presentarán en primer lugar las relaciones entre la altura (medida con el plato de levante y con la regla) y el número de hojas por macollo con respecto a la biomasa; con el objetivo de evaluar si los datos obtenidos durante el muestreo se tomaron de manera correcta. En segundo lugar, se presentarán las relaciones entre la biomasa, la altura (medida con el plato de levante y con la regla) y el número de hojas por macollo con respecto al NDVI promedio de cada cuadro; con el objetivo de generar modelos que permitieran calibrar el dron con la finalidad de estimar mediante NDVI tanto la biomasa como la altura del forraje y el número de hojas por macollo.

4.1.1. Relación entre la Altura de RPM (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)

En la Figura 16 se presenta la relación entre la altura del forraje medida con el RPM (cm) y la biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹), explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,69 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 16.

Relación entre la Altura de RPM (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)



El valor del coeficiente de regresión tomando en cuenta la totalidad de los puntos se asemejó al obtenido por Canseco et al. (2007), quienes reportaron un R^2 de 0,77 durante la estación de invierno. Asimismo, se observó una tendencia positiva entre la altura del RPM y la biomasa disponible, indicando que a medida que se aumentó la altura, la biomasa disponible también se incrementó.

Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró que en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,73, mientras que para los datos de postpastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,77. Ambos resultados evidenciaron buenas correlaciones y son comparables a los valores reportados por Canseco et al. (2007). Sin embargo, si bien el valor de R^2 obtenido luego del pastoreo fue mayor, la regresión previa al pastoreo tuvo mayor confiabilidad debido al mayor número de datos (318 muestras pre pastoreo vs. 102 post pastoreo). La diferencia en el número de muestras se debe a que la duración del experimento fue fijada desde el inicio, mientras que el momento del pastoreo dependió de cuando se dieron las condiciones para que ingresaran las vacas.

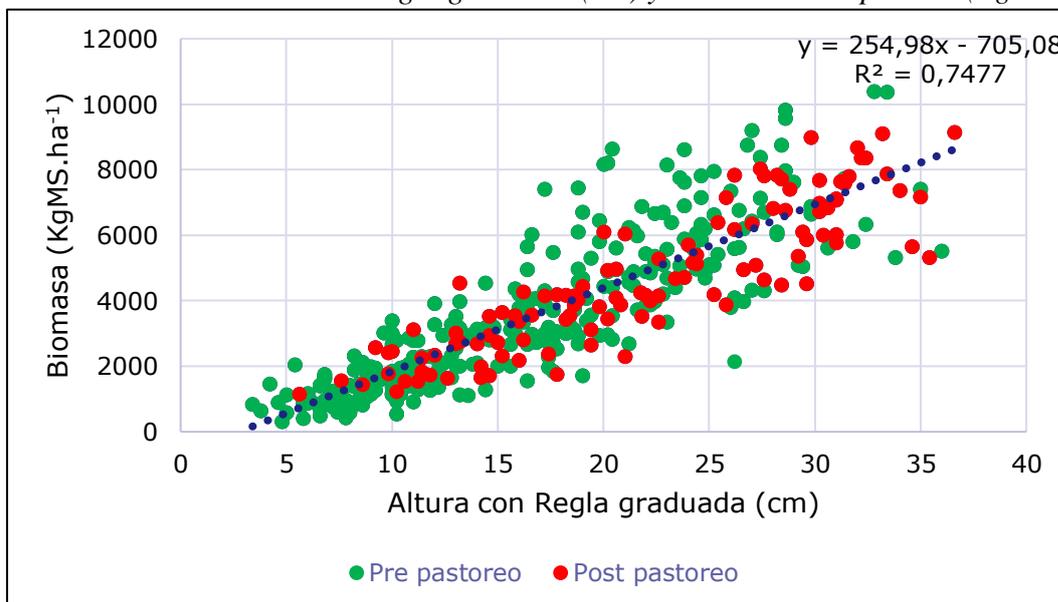
Al analizar los datos, se observó que las mediciones de altura después del pastoreo son mayores. Esto se debió a que el forraje remanente se encontró con un mayor estado de encañazón que el forraje disponible previo al pastoreo. En estas condiciones, el plato de levante se encontró con un nivel mayor de resistencia en el forraje, lo que provocó una menor compresión de este y, en consecuencia, mayores alturas registradas (Insua, 2023; Waller, 2020).

4.1.2. Relación entre la Altura de Regla graduada (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)

En la Figura 17 se presenta la relación entre la altura del forraje medida con la regla graduada (cm) y la biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹), explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,75 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 17.

Relación entre la Altura de Regla graduada (cm) y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)



El valor del coeficiente de regresión tomando en cuenta la totalidad de los puntos superó al obtenido por Montossi, Pravia et al. (2013), quienes reportaron un R^2 de 0,63 para una pastura de raigrás. Cabe destacar que estos autores realizaron entre 20 y 40 mediciones por potrero mientras que en este trabajo se realizaron 210, lo que le brinda aún más robustez a la relación encontrada.

Asimismo, se observó una tendencia positiva entre la altura de la regla y la biomasa disponible, indicando que a medida que se aumentó la altura, la biomasa disponible también se incrementó.

Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró que en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,71, mientras que para los datos de post

pastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,78. Ambos resultados muestran correlaciones sólidas que superan incluso los valores reportados por Montossi, Pravia et al. (2013). Sin embargo, si bien el valor de R^2 obtenido luego del pastoreo es mayor, la regresión previa al pastoreo posee mayor confiabilidad debido al mayor número de datos (318 muestras pre pastoreo vs. 102 post pastoreo). Nuevamente, la diferencia en el número de muestras se debe a que la duración del experimento fue fijada desde el inicio, mientras que el momento del pastoreo dependió de cuando se dieron las condiciones para que ingresaran las vacas.

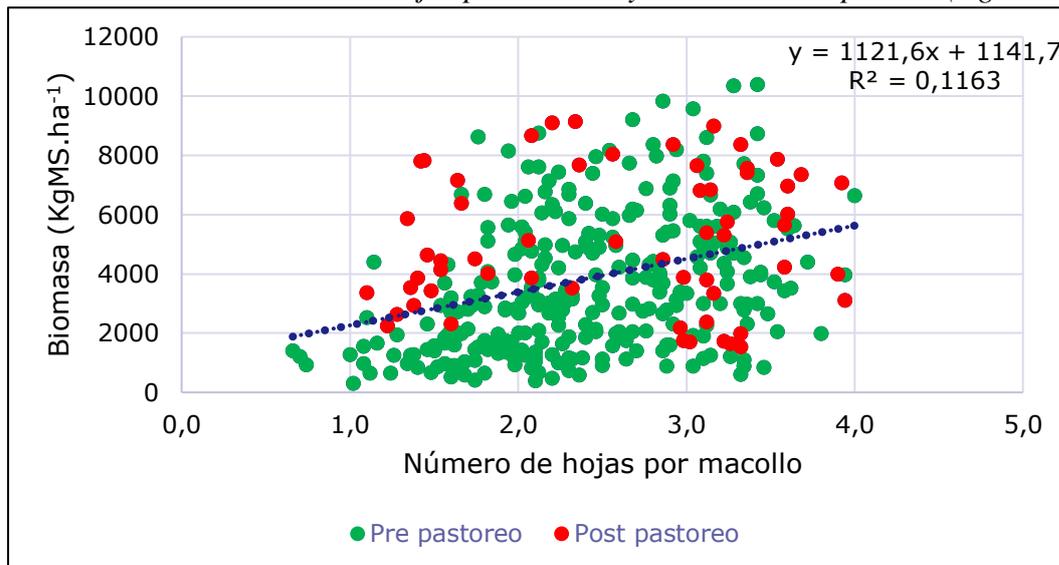
A diferencia de las mediciones de altura realizadas con el plato de levante, en este caso no se observaron mayores alturas del forraje después del pastoreo. Esto se debe a las diferencias en la metodología de estimación entre ambos métodos: mientras el plato de levante toma en cuenta la resistencia ejercida por el forraje, la regla no lo hace (Insua, 2023; Waller, 2020). Gracias a esta particularidad, los remanentes posteriores al pastoreo no presentaron sobreestimaciones de biomasa, a diferencia de lo que ocurrió con el plato de levante.

4.1.3. **Relación entre el Número de hojas por macollo y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)**

En la Figura 18 se muestra la relación entre el número de hojas por macollo y la biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹), explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,12 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 18.

Relación entre el Número de hojas por macollo y la Biomasa disponible ($\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$)



El valor del coeficiente de regresión tomando en cuenta la totalidad de los puntos se encuentra muy por debajo al obtenido por Insua et al. (2019), donde se obtuvo un R^2 de 0,70.

Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró que en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,15, mientras que para los datos de post pastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,01. Se evidencia claramente como en este caso no existió relación entre las variables.

Se observó una considerable dispersión en los datos, lo que explica el bajo coeficiente de regresión obtenido. Esta elevada variabilidad se podría haber relacionado con un reducido número de muestras tomadas por cuadro de muestreo.

Aunque la pastura fue sembrada con semillas puras, las plantas muestran diferencias naturales, incluso dentro de la misma variedad. En este estudio, en cada cuadro de muestreo, únicamente se registraron cinco mediciones del número de hojas por macollo, lo que puede no haber sido representativo de la realidad de cada cuadro. Por su parte, Insua et al. (2019) emplearon una metodología diferente para evaluar esta característica, utilizando un número significativamente menor de macollos, lo cual pudo influir en los resultados observados (2100 en el presente experimento frente a 300 en el estudio de Insua et al., 2019).

Si bien en este trabajo no se obtuvo relación entre el número de hojas por macollo y la biomasa, los datos reportados por Insua et al. (2019) son altamente prometedores. Esto quiere decir que sí es posible estimar la biomasa a partir del número de hojas, por lo que

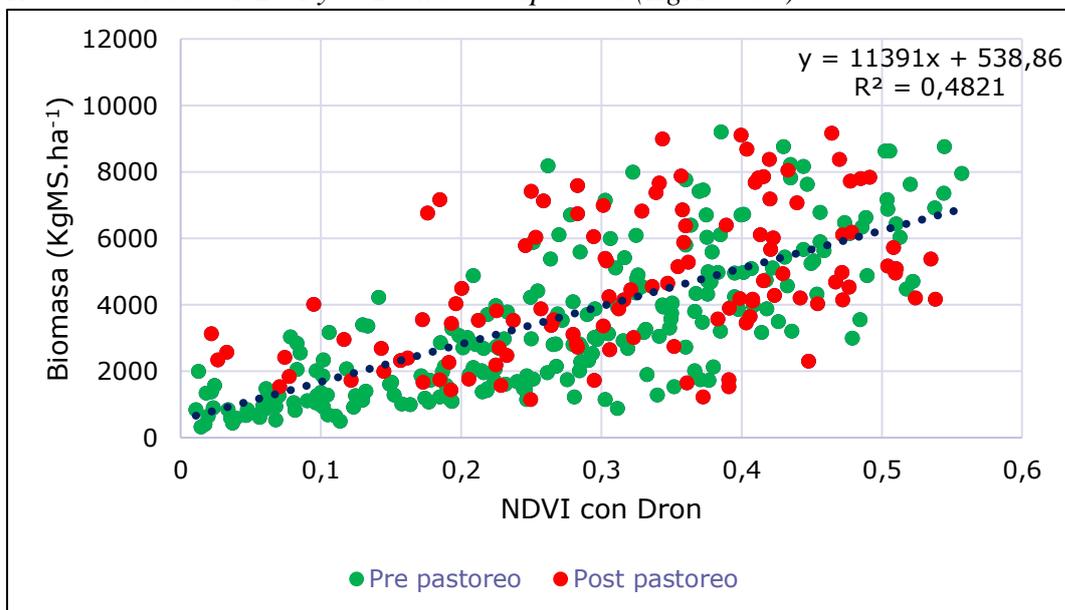
replicar sus resultados con un mayor número de muestras podría representar un avance significativo en la comprensión de estas características.

4.1.4. Relación entre el NDVI y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)

En la Figura 19 se presenta la relación entre el NDVI y la biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹), explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,48 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 19.

Relación entre el NDVI y la Biomasa disponible (KgMS.ha⁻¹)



El valor del coeficiente de regresión tomado de la totalidad de los puntos fue inferior a varios de los valores presentados en la bibliografía, quienes reportaron coeficientes de variación de hasta 0,78 utilizando el mismo dron en la estación de invierno (Sinde-González et al., 2021).

Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró que en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,59, mientras que para los datos de post pastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,24. Esto continuó evidenciando una clara problemática a la hora de estimar biomasa remanente y en estado reproductivo, pero a su

vez continuó mostrando resultados alentadores para la estimación de biomasa en estado vegetativo.

Asimismo, se observó una tendencia positiva entre el NDVI y la biomasa disponible, indicando que a medida que ésta última aumentó, el NDVI también se incrementó. La relación que se observó no coincide con lo presentado por Prabhakara et al. (2015) debido a que según estos investigadores la relación entre ambas variables es logarítmica, saturándose a valores elevados. Esto podría considerarse como un aspecto positivo, ampliando el rango de valores de biomasa en los que puede actuar eficazmente el NDVI. Un factor que podría estar contribuyendo a estos resultados es la buena frecuencia de lectura, como menciona Insua (2023).

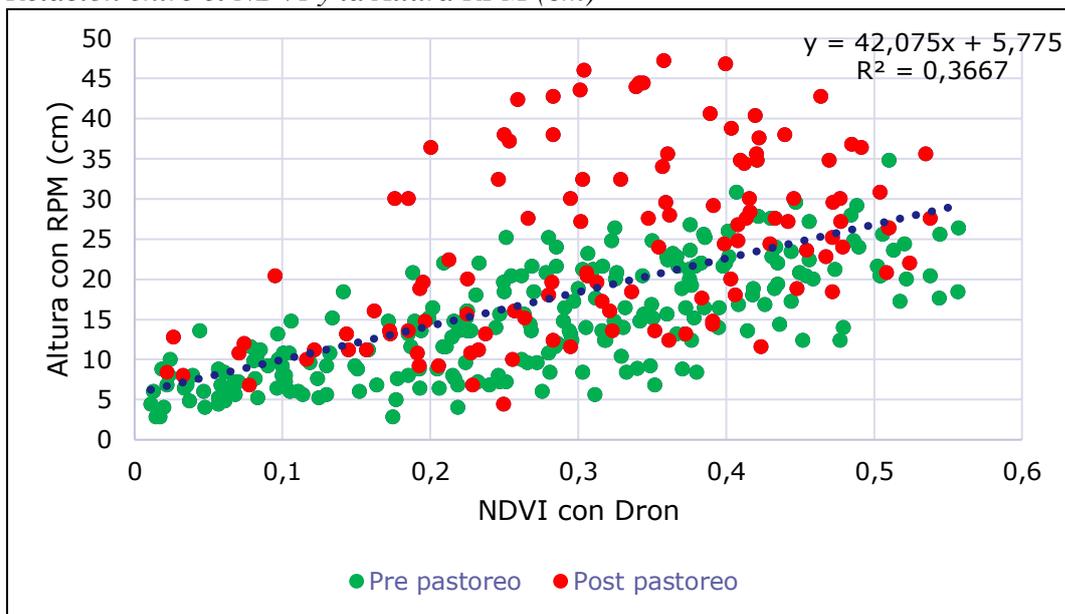
Montossi, Pravia et al. (2013) realizaron entre 20 y 40 mediciones por potrero para analizar la correlación entre la altura del forraje (medida con regla graduada y plato de levante) y la biomasa disponible. Como resultado, obtuvieron coeficientes de correlación (R^2) de 0,63 y 0,61 para la regla-biomasa y el plato-biomasa respectivamente. En este experimento, al emplear un dron, se alcanzaron valores de R^2 de 0,48 considerando todos los muestreos y de 0,59 al enfocarse únicamente en la etapa vegetativa. Estos resultados similares, se obtuvieron con 420 mediciones, lo que brinda una robustez notoriamente mayor y destaca al dron como una herramienta muy prometedora para la estimación de biomasa disponible, debido a su simplicidad de uso, su menor costo y su mayor capacidad de definición en relación con otras herramientas de medición.

4.1.5. **Relación entre el NDVI y la Altura de RPM (cm)**

En la Figura 20 se presenta la relación entre el NDVI y la altura del forraje medida con el RPM (cm), explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,37 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 20.

Relación entre el NDVI y la Altura RPM (cm)



Como se puede observar, existió una tendencia positiva entre el NDVI y la altura del RPM, indicando que a medida que se aumentó la altura, la biomasa disponible también se incrementó.

Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró que en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,53, mientras que para los datos de post pastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,24.

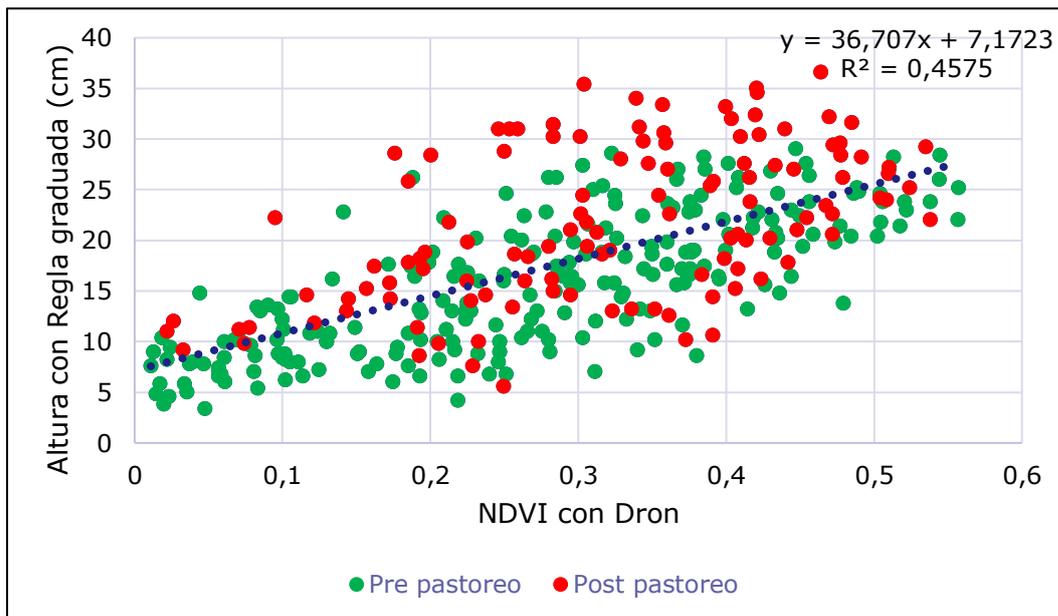
Al analizar los datos, se observó que los registros obtenidos antes del pastoreo mostraron una mayor correlación en comparación con los posteriores. Nuevamente, esto se debe a que, tras el pastoreo, los remanentes se encontraban en estado de encañazón, lo que dificultó una estimación precisa del NDVI debido a las variaciones en la relación entre la altura medida con el RPM y la biomasa. Esto concuerda con lo presentado en la Sección [2.4.2.4.](#), la Sección [4.1.1.](#) y lo presentado por Waller (2020) e Insua (2023), donde se indica que el plato de levante sobreestima la altura del forraje cuando la pastura se encuentra en estado reproductivo o en condiciones de remanentes.

4.1.6. Relación entre el NDVI y la Altura de Regla graduada (cm)

En la Figura 21 se presenta la relación entre el NDVI y la altura del forraje medida con la regla graduada (cm), explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,46 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 21.

Relación entre el NDVI y la Altura de Regla graduada (cm)



Como se puede observar, existió una tendencia positiva entre el NDVI y la altura de la regla, indicando que a medida que se aumentó la altura, la biomasa disponible también se incrementó.

Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró que en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,56, mientras que para los datos de post pastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,28. Este bajo R^2 posterior al pastoreo podría atribuirse a la limitada capacidad de la regla graduada para considerar la estructura de la pastura y la intensidad del pastoreo (Millapán, 2014). En este caso, el raigrás se encontraba en estado de encañazón, una etapa fenológica que podría no haber sido adecuadamente capturada durante la toma de muestras con la regla graduada. Sin embargo, al considerar lo discutido en la Sección [4.1.2.](#), podría argumentarse que el bajo valor de R^2 está relacionado con características del NDVI y no con características de la regla graduada.

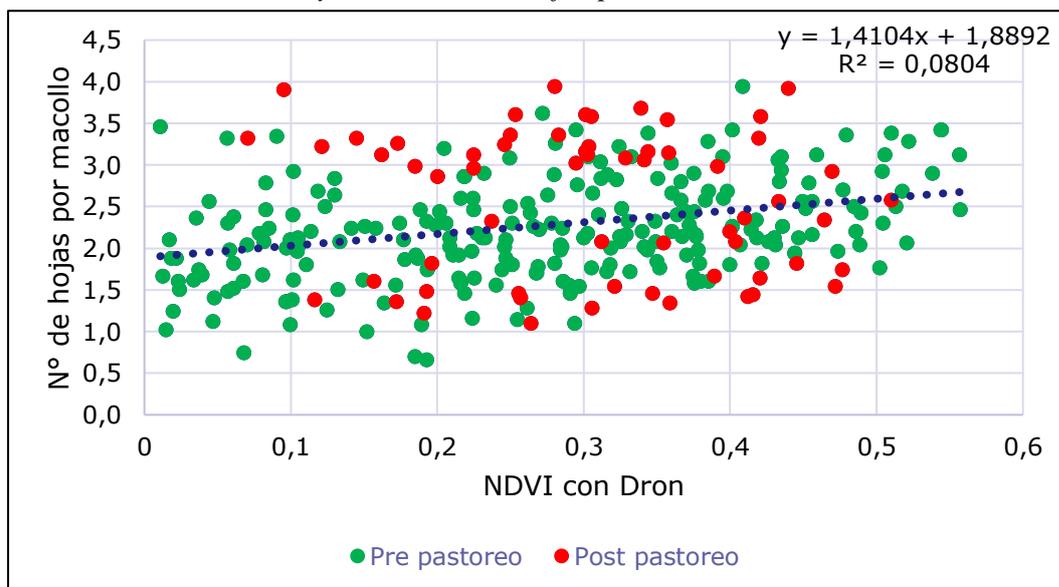
Dado que la pastura estaba en estado de encañazón y había sido pastoreada, el remanente se encontraba compuesto principalmente por “cañas” de raigrás de baja altura, con áreas de suelo descubierto y material senescente entre las plantas y macollos. Al promediar el NDVI dentro de estos cuadros y estimar la biomasa a partir de él, se obtuvo un valor inferior al real. Esto se dio como consecuencia de que la mayor definición del dron tuvo en cuenta el material senescente y las áreas de suelo descubierto para realizar el promedio, disminuyendo la biomasa estimada. La magnitud de esta subestimación varió según el cuadro, debido a las diferentes intensidades de pastoreo y la presencia o no de llantén, lo que resultó en una mayor variabilidad de los datos presentados en la Figura 21 y, consecuentemente, en el bajo R^2 observado.

4.1.7. Relación entre el NDVI y el Número de hojas por macollo

En la Figura 22 se muestra la relación entre el NDVI y el número de hojas por macollo, explicada mediante una regresión lineal, con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,08 si se tienen en cuenta la totalidad de los puntos (línea punteada). Además, se muestran datos diferenciados según si fueron tomados sin pastoreo previo (en anaranjado) y aquellos registrados después de un pastoreo (en verde).

Figura 22.

Relación entre el NDVI y el Número de hojas por macollo



Además, analizando las regresiones lineales diferenciadas para los datos obtenidos sin pastoreo previo y aquellos registrados después de un pastoreo se encontró en el caso del forraje sin pastoreo se obtuvo un R^2 de 0,15, mientras que para los datos de post

pastoreo el R^2 alcanzó un valor de 0,01. Se evidencia claramente como en este caso tampoco existió relación entre las variables. Estas bajas correlaciones y la falta de notorias tendencias crecientes o decrecientes de las regresiones se explicaron por la misma causa que se explicó la relación entre el número de hojas por macollo y la biomasa en la Sección [4.1.3](#).

Si bien en este trabajo no se obtuvo relación entre el número de hojas por macollo y el NDVI, esto no quiere decir que no sea posible estimar el número de hojas mediante el NDVI. Se deberá continuar ajustando la metodología para lograr resultados más promisorios. Dado que, en promedio, las gramíneas presentan tres hojas por macollo, estimar su número resulta fundamental para determinar si la biomasa seguirá aumentando o si la planta ha alcanzado su máximo crecimiento.

4.2. **Aplicación práctica del dron**

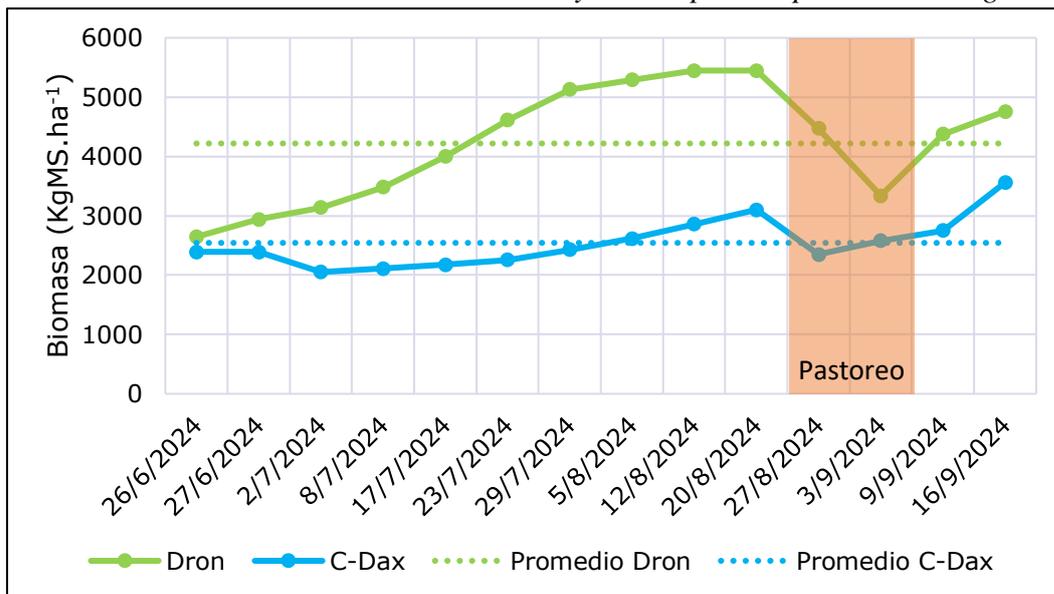
A continuación, se compararán las estimaciones de biomasa y altura del forraje obtenidas mediante el dron (a partir de los modelos generados) con las estimaciones de biomasa mediante C-Dax y de altura del forraje mediante plato de levante. El objetivo es evaluar el desempeño del dron en relación con estas herramientas de medición indirecta, previamente validadas por diversos autores.

4.2.1. **Biomasa estimada semanalmente mediante dron en comparación con la biomasa estimada mediante C-Dax**

En la Figura 23 se presenta la evolución de la biomasa ($\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) estimada a lo largo del experimento mediante dron (línea verde) y C-Dax (línea azul), junto con sus promedios respectivos (líneas punteadas) para la pastura de Raigrás.

Figura 23.

Biomasa semanal estimada mediante NDVI y C-Dax para la pastura de Raigrás



Como se puede observar, ambas estimaciones mostraron una tendencia creciente desde finales de junio hasta finales de agosto, lo que se correspondió con el período de descanso de la pastura entre pastoreos. Posteriormente, se observó una caída pronunciada de la biomasa estimada como resultado del pastoreo (período marcado en naranja), seguida de un rápido crecimiento de la pastura impulsado por altas tasas de rebrote gracias a condiciones ambientales favorables.

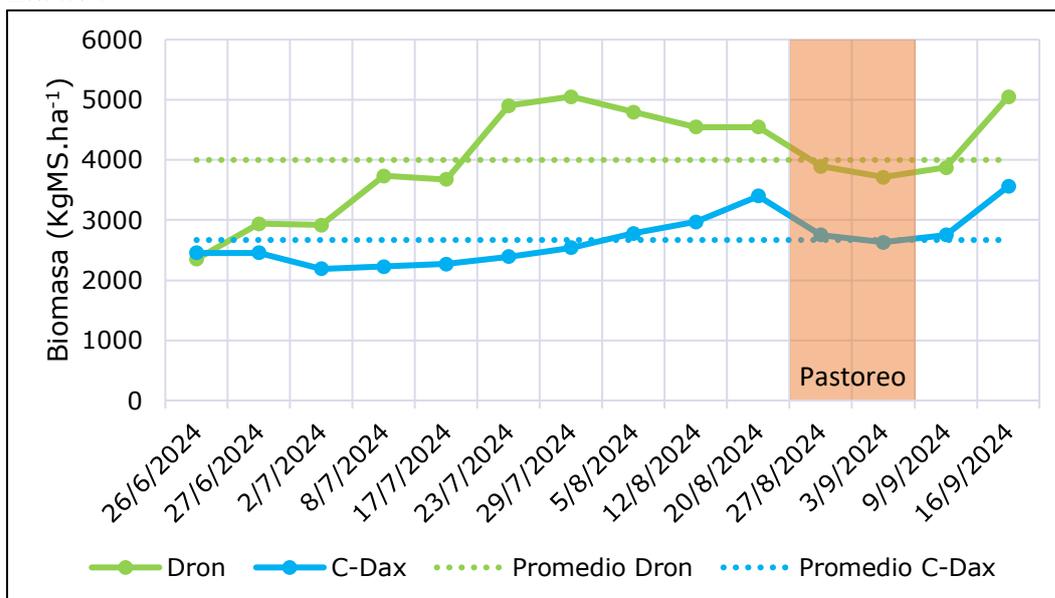
Es importante destacar que la biomasa estimada mediante C-Dax fue más estable en comparación con la obtenida por dron con un valor promedio de 2.544 KgMS.ha⁻¹. En contraste, las estimaciones de biomasa realizadas con dron presentaron fluctuaciones más marcadas, con picos pronunciados y un valor promedio 66% superior (4.219 KgMS.ha⁻¹ promedio) en comparación con el C-Dax. Esto indicó que el dron tendió a sobreestimar la biomasa en esa proporción.

La discrepancia entre ambos métodos se volvió especialmente evidente en los períodos donde el Índice de Área Foliar (IAF) se hizo mayor, en el que el dron alcanzó a estimar un 76% más de biomasa que el C-Dax, lo que concordó con lo presentado por Insua (2023) sobre la estabilización del NDVI a valores elevados de IAF. Esta diferencia se podría atribuir como una capacidad del NDVI para captar cambios rápidos en la cobertura vegetal.

Por otro lado, en la Figura 24 se presenta la evolución de la biomasa ($\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$) estimada a lo largo del experimento mediante dron (línea verde) y C-Dax (línea azul), junto con sus promedios respectivos (líneas punteadas) para la pastura de Raigrás con Llantén.

Figura 24.

Biomasa semanal estimada mediante NDVI y C-Dax para la pastura de Raigrás con Llantén



En este caso, al igual que lo que sucedía en la pastura de Raigrás, la biomasa estimada mediante C-Dax fue más estable en comparación con la obtenida por dron ($2.668 \text{ KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ promedio). En contraste, las estimaciones de biomasa realizadas con dron presentaron fluctuaciones más marcadas, con picos pronunciados y un valor promedio 50% superior que el estimado mediante C-Dax ($3.999 \text{ KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ promedio). Esto indica que el dron tendió a sobreestimar la biomasa en esa proporción.

Durante el período de crecimiento de la pastura se identificaron dos intervalos en los que la biomasa no mostró un aumento significativo: entre el 27/06 y el 02/07 y entre el 08/07 y el 17/07. Al observar la Figura 4 en la Sección [3.1.2.2](#), se puede apreciar que estos dos intervalos coincidieron con los únicos períodos sin precipitaciones registradas. Además, el segundo intervalo se superpuso con una secuencia de heladas intensas (INIA, 2024). Ambos factores contribuyeron a una reducción abrupta en la tasa de crecimiento de la pastura. Asimismo, se puede inferir que el componente de la pastura más afectado fue el llantén, ya que este comportamiento no se observó en la pastura de raigrás puro (Figura 23). Además, el NDVI generado puede haberse visto afectado por las condiciones atmosféricas no óptimas para el índice.

A su vez, mientras que la estimación mediante C-Dax mostró un patrón de crecimiento de la pastura acorde con lo esperado según Lombardo (2022), la biomasa estimada por dron alcanzó su pico aproximadamente un mes antes del pastoreo y presentó una leve disminución progresiva hasta la caída abrupta provocada por el pastoreo. Sin embargo, es importante resaltar la similitud en el comportamiento de ambas estimaciones de biomasa después del pastoreo.

En ambas pasturas se observó una saturación temprana de la biomasa estimada mediante Dron en comparación con la estimada mediante C-Dax. Esto se debe a la dificultad que presenta el NDVI cuando la pastura cubre completamente el suelo y el Índice de Área Foliar (IAF) es elevado, generando problemas de precisión en pasturas con más de $3.000 \text{ kgMS.ha}^{-1}$ (Insua, 2023). Este problema se podría solucionar utilizando otro índice espectral llamado Índice de Vegetación Mejorado (Enhanced Vegetation Index o EVI). Este índice agrega a su fórmula la banda Azul (B), logrando manejar de mejor manera la vegetación densa y se independiza de la estructura que esta posea. A su vez, otra ventaja que presenta frente al NDVI es su reducida sensibilidad a las condiciones atmosféricas (Mahute, 2024).

Por otra parte, la sobreestimación registrada por el dron en ambas pasturas podría atribuirse a errores en la calibración de los métodos utilizados (Ortega et al., 2023). Los factores con mayor probabilidad de haber generado esta variabilidad incluyen imprecisiones en el corte y el pesaje del forraje, así como en la estimación del NDVI dentro de cada cuadro de muestreo.

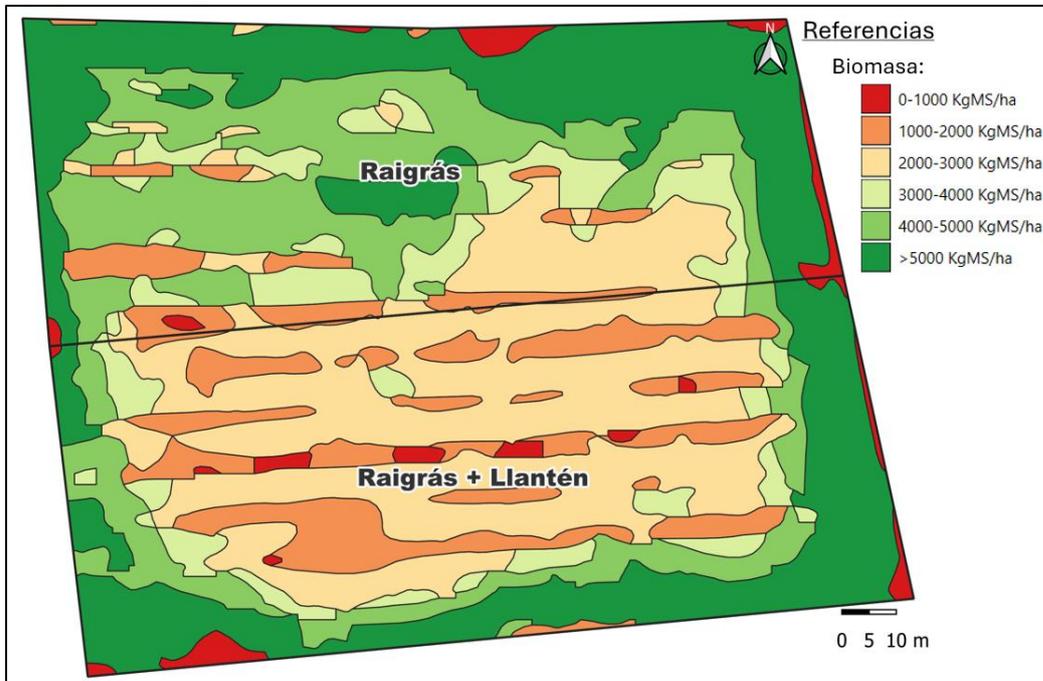
Además, considerando lo expuesto por Ortega et al. (2023), quien señala que el C-Dax sobreestima en veintidós puntos porcentuales, se puede afirmar que, en promedio, las dos sobreestimaciones del dron en comparación con el C-Dax (66% y 50%) resultan en una sobreestimación total del 80% de la biomasa. Este aspecto es clave al estimar la disponibilidad de forraje con dron, ya que será necesario aplicar una corrección de esta magnitud en los valores obtenidos.

Sin embargo, a pesar de la sobreestimación, la alta similitud entre la curva generada por el dron y la obtenida mediante C-Dax resultó muy prometedora. Esto se debió a que la curva del C-Dax coincidió con lo reportado por Lombardo (2022) sobre la dinámica de crecimiento de las pasturas. Además, dado que el C-Dax es una herramienta validada, estos resultados indicaron que el dron logró detectar con precisión los cambios en la pastura, posicionándose como una alternativa eficaz para la estimación de biomasa.

En la Figura 25 se muestra la distribución espacial de la biomasa estimada mediante el dron durante el vuelo del 12/08/2024. Las biomazas promedio estimadas mediante el dron para esta fecha, presentada en las Figuras 23 y 24, fueron de 5.448 y 4.546 KgMS.ha⁻¹ para las pasturas de raigrás y raigrás con llantén respectivamente.

Figura 25.

Distribución espacial de la biomasa estimada mediante dron el 12/08/2024



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024)

En la Figura 25, se observó claramente una diferencia notable de aproximadamente mil kilogramos de materia seca por hectárea, atribuible a la mayor presencia de colores rojizos que presenta la pastura de raigrás con llantén.

Además, al analizar la distribución espacial de la biomasa, quedó en evidencia que las pasturas no son homogéneas, sino que presentaron áreas con mayor y menor biomasa. Por ejemplo, en ambas pasturas (aunque más pronunciado en el caso del raigrás con llantén), se distinguieron franjas horizontales con menor biomasa. Estas franjas fueron el resultado de una aplicación de urea defectuosa, que no fue uniforme y dejó zonas sin cubrir adecuadamente los requerimientos de nitrógeno de las pasturas. Si bien el análisis detallado de la aplicación de fertilizantes nitrogenados excede los objetivos de este trabajo, la posibilidad de identificar visualmente mediante un dron las consecuencias de dicha aplicación representaron un aspecto sumamente prometedor de esta tecnología.

4.2.2. Biomasa desaparecida estimada mediante dron en comparación con la biomasa desaparecida estimada mediante C-Dax y RPM para un pastoreo

En la Figura 26 y la Tabla 1 se presenta la biomasa estimada antes del pastoreo para la pastura de Raigrás y de Raigrás con Llantén, incluyendo los desvíos estándar y las diferencias entre los datos. Se muestran los valores tomados por franjas de pastoreo a partir de las mediciones de dron, C-Dax y RPM. Si bien se establecieron 10 franjas de pastoreo, el análisis se realizó únicamente desde la franja 3 hasta la 8. Esta selección respondió al momento en que se llevaron a cabo los vuelos, priorizando aquel que abarcara la mayor proporción de franjas simultáneamente. Este criterio se aplicó de manera consistente en todos los análisis por franjas de pastoreo.

Figura 26.

Biomasa estimada pre-pastoreo mediante Dron, C-Dax y RPM según franja de pastoreo y pastura

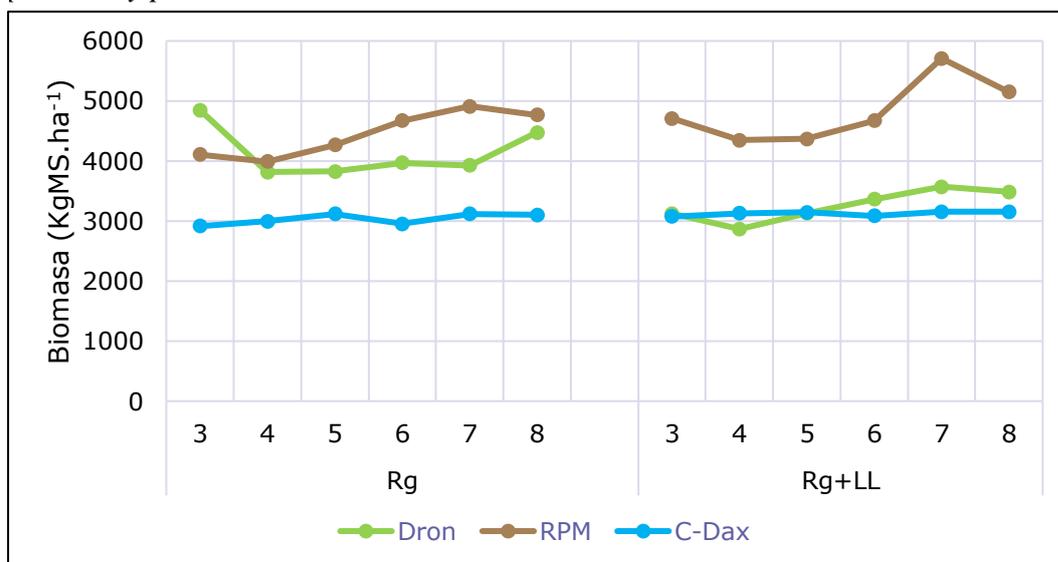


Tabla 1.

Promedios y Desvíos Estándar de la Biomasa estimada (KgMS.ha⁻¹) previo al pastoreo

Pastura	Promedio Dron	Promedio RPM	Promedio C-Dax	Dron vs. C-Dax	Dron vs. RPM	RPM vs. C-Dax
Raigrás	4.143	4.452	3.033	137%	93%	147%
Raigrás + Llantén	3.257	4.826	3.125	104%	67%	154%
Pastura	Desv Est Dron	Desv Est RPM	Desv Est C-Dax	Dron vs. C-Dax	Dron vs. RPM	RPM vs. C-Dax
Raigrás	423	380	90	471%	111%	423%
Raigrás + Llantén	263	522	35	758%	51%	1.500%

Como se puede observar, la biomasa estimada mediante C-Dax fue la que mostró menor variación, con desvíos estándar de 90 y 35 KgMS.ha⁻¹ para las pasturas de Raigrás y Raigrás con Llantén respectivamente. Aunque las estimaciones de biomasa obtenidas mediante dron y RPM presentaron mayores variaciones, estas no fueron de gran magnitud, manteniéndose relativamente estable entre franja de pastoreo.

Además, si se comparan los valores de biomasa se destaca que, en el caso del Raigrás con Llantén, las estimaciones del dron y el C-Dax fueron prácticamente idénticas. Asumiendo que las estimaciones realizadas por el C-Dax son las que representan con mayor veracidad la realidad, este resultado fue prometedor, dado que reflejó el potencial de obtener herramientas de medición sencillas y que sus estimaciones sean acordes a la realidad.

A su vez, cabe resaltar que el RPM presentó una estimación considerablemente más elevada en comparación con el C-Dax. Si se toma al C-Dax como testigo, se puede inferir que el RPM sobreestimó la biomasa en aproximadamente un 50%. Esta sobreestimación podría estar relacionada con el estado de encañazón de la pastura, como se explicó previamente en la Sección [4.1.1](#). La presente diferencia es un aspecto importante para tener en cuenta en la toma de decisiones, dado que podría influir en la planificación y el manejo de los recursos.

Por otro lado, en la Figura 27 y la Tabla 2 se presenta la biomasa estimada después del pastoreo para las pasturas de Raigrás y Raigrás con Llantén, incluyendo los desvíos estándar y las diferencias entre los datos obtenidos. Los valores se corresponden a mediciones realizadas por franjas de pastoreo utilizando dron, C-Dax y RPM.

Figura 27.

Biomasa estimada post-pastoreo mediante Dron, C-Dax y RPM según franja de pastoreo y pastura

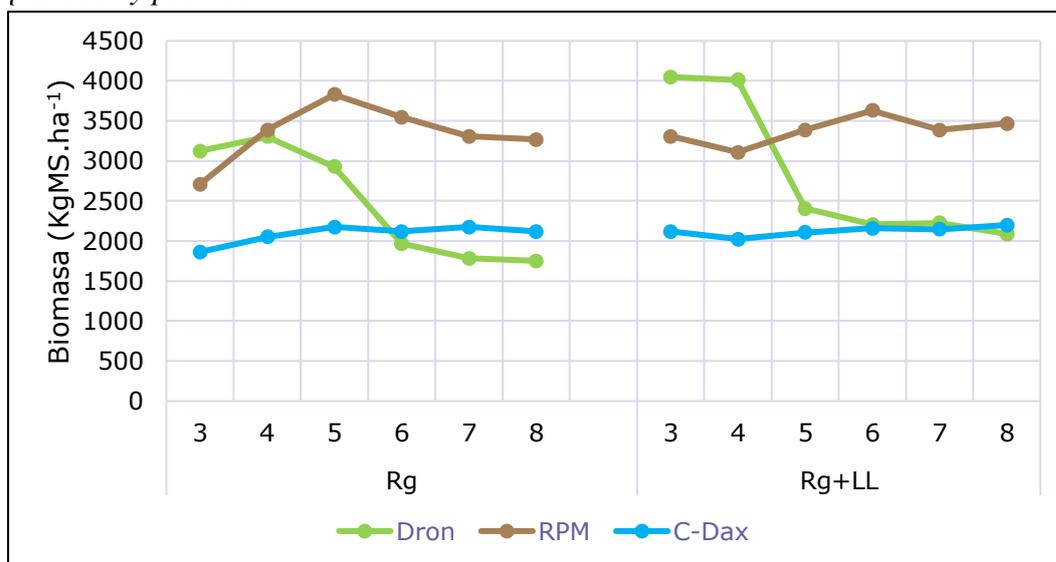


Tabla 2.

Promedios y Desvíos Estándar de la Biomasa estimada (KgMS.ha⁻¹) posteriormente al pastoreo

Pastura	Promedio Dron	Promedio RPM	Promedio C-Dax	Dron vs. C-Dax	Dron vs. RPM	RPM vs. C-Dax
Raigrás	2.476	3.342	2.083	119%	74%	160%
Raigrás + Llantén	2.831	3.382	2.126	133%	84%	159%
Pastura	Desv Est Dron	Desv Est RPM	Desv Est C-Dax	Dron vs. C-Dax	Dron vs. RPM	RPM vs. C-Dax
Raigrás	717	371	117	615%	193%	318%
Raigrás + Llantén	935	172	59	1.572%	542%	290%

En esta instancia, la biomasa estimada mediante C-Dax volvió a ser la que mostró menor variación, con desvíos estándar de 117 y 59 KgMS.ha⁻¹ para las pasturas de Raigrás y Raigrás con Llantén respectivamente. Sin embargo, las estimaciones realizadas con dron y RPM presentaron mayores variaciones, siendo estas particularmente notorias en el caso del dron.

Las variaciones observadas en el dron se pudieron explicar por la fecha en la que se realizó el vuelo. Este se llevó a cabo el 03/09/2024, mientras que los pastoreos en estas franjas

comenzaron el 28/08/2024 y concluyeron el 02/09/2024. La demora en la captura de las imágenes permitió un crecimiento adicional del forraje, lo que aumentó la variación en los valores estimados de forraje remanente. Esto se evidenció en la Figura 27, donde las franjas de mayor numeración (pastoreadas más tardíamente) mostraron diferencias menores con respecto a las estimaciones realizadas por el C-Dax. Este comportamiento de las últimas franjas reforzó el potencial del dron como herramienta para la estimación de biomasa, siempre que las capturas se realicen de manera oportuna (lo más próximo al pastoreo posible).

Por su parte, en el análisis del RPM se obtuvo nuevamente una sobreestimación de aproximadamente un 60% en comparación con los valores obtenidos por el C-Dax. Esta reiterada sobreestimación podría estar relacionada con el estado de encañazón de la pastura, como se explicó previamente en la Sección [4.1.1.](#)

En la Figura 28 y la Tabla 3 se presenta el forraje desaparecido después del pastoreo en las pasturas de Raigrás y Raigrás con Llantén, incluyendo los desvíos estándar y las diferencias entre los datos obtenidos. Los valores se corresponden a mediciones realizadas por franjas de pastoreo utilizando dron, C-Dax y RPM.

Figura 28.

Biomasa desaparecida estimada mediante Dron, C-Dax y RPM según franja de pastoreo y pastura

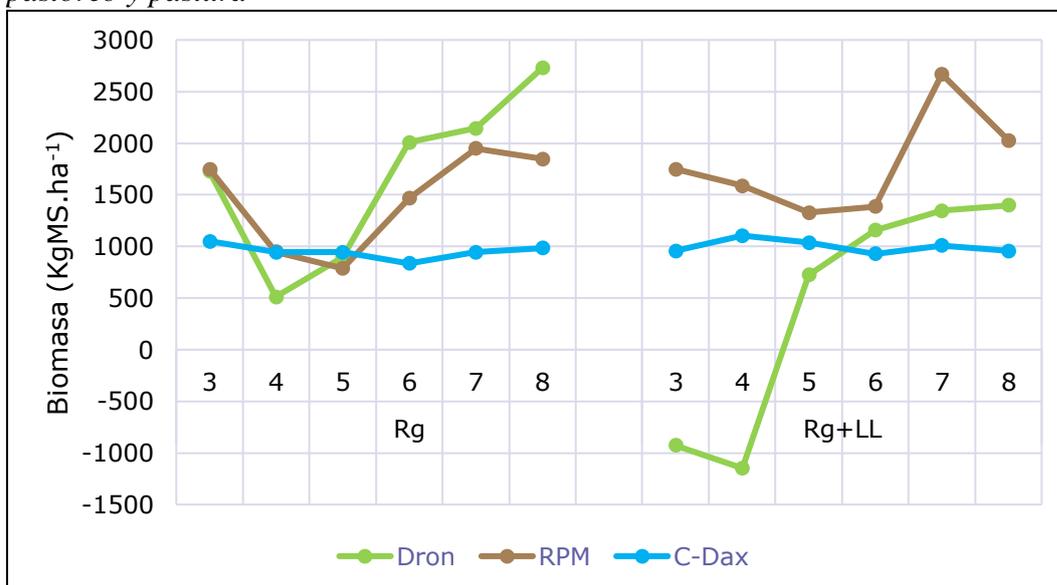


Tabla 3.*Promedios y Desvíos Estándar de la Biomasa desaparecida (KgMS.ha⁻¹)*

Pastura	Promedio Dron	Promedio RPM	Promedio C-Dax	Dron vs. C-Dax	Dron vs. RPM	RPM vs. C-Dax
Raigrás	1.669	1.458	950	176%	115%	154%
Raigrás + Llantén	426	1.791	999	43%	24%	179%
Pastura	Desv Est Dron	Desv Est RPM	Desv Est C-Dax	Dron vs. C-Dax	Dron vs. RPM	RPM vs. C-Dax
Raigrás	825	487	70	1.177%	169%	695%
Raigrás + Llantén	1.160	499	65	1.781%	232%	767%

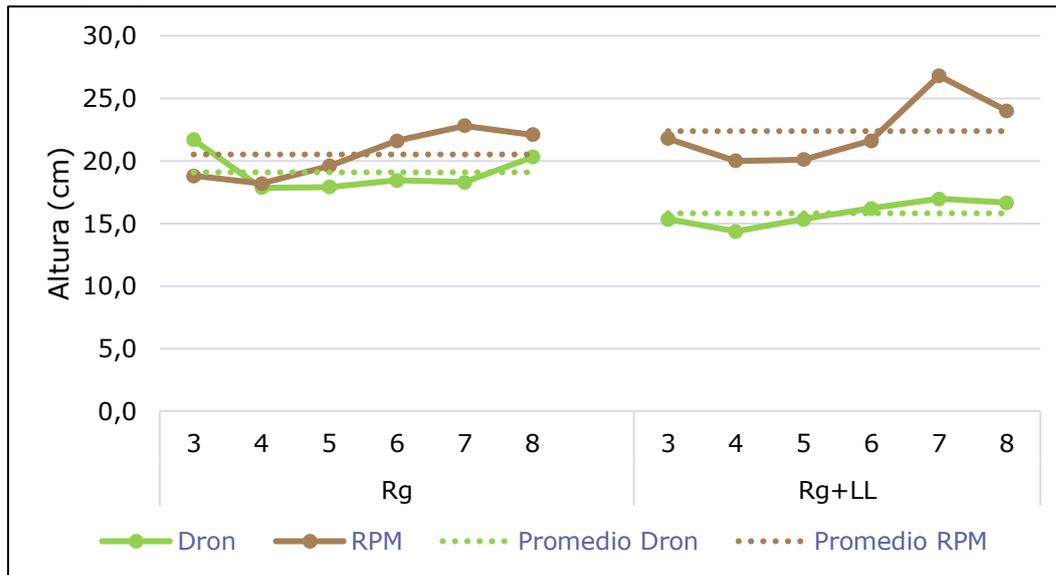
Como consecuencia de lo estimado antes y después del pastoreo, la biomasa estimada mediante C-Dax volvió a ser en la que se mostró menor variación, con desvíos estándar de 70 y 65 KgMS.ha⁻¹ para las pasturas de Raigrás y Raigrás con Llantén respectivamente. Por otro lado, el forraje desaparecido estimado mediante NDVI y RPM presentó variaciones más elevadas, en línea con las fluctuaciones observadas en las estimaciones previas y posteriores al pastoreo. Debido a estas fluctuaciones, no fue posible estimar con precisión el forraje consumido por el pastoreo. Para una estimación más precisa, los vuelos deberían realizarse inmediatamente antes y después del pastoreo, evitando intervalos de varios días como ocurrió en este experimento.

4.2.3. **Altura de forraje estimado mediante dron en comparación con altura medida mediante RPM**

En la Figura 29 se presenta la altura del forraje (cm) antes del pastoreo, estimada mediante dron (línea verde), comparada con la altura estimada por el plato de levante (línea marrón) para las franjas de pastoreo analizadas en la Sección [4.2.2](#). Además, se incluyen sus respectivos promedios (líneas punteadas).

Figura 29.

Altura de forraje estimada mediante dron en comparación con la medida mediante RPM pre-pastoreo



Como se puede observar, en ambas pasturas la estimación obtenida mediante dron fue relativamente estable, con desvíos estándar de 1,6 cm y 1,0 cm para raigrás y raigrás con llantén respectivamente. Por el contrario, las mediciones realizadas con el plato de levante mostraron una mayor variación, con desvíos estándar de 1,9 cm y 2,6 cm para raigrás y raigrás con llantén respectivamente. Asimismo, las mediciones con el RPM tendieron a reflejar un incremento en la altura conforme aumentaba el número de parcela. Esta mayor variabilidad respecto al promedio y el aumento de la altura a medida que se incrementó el número de parcela se explicó por la diferencia temporal entre las mediciones realizadas con el RPM y el día del vuelo utilizado para generar el NDVI. Las mediciones con el RPM se llevaron a cabo justo antes de cada pastoreo por franja (recordando que se pastoreó una franja por día), mientras que el vuelo con dron se realizó el día anterior al pastoreo de la franja número 3. Esto implica una diferencia de cinco días entre la medición de la franja número 8 y el vuelo del dron. A pesar de estas diferencias, la baja variabilidad en las alturas estimadas mediante dron resulta alentadora, ya que en un mismo día logró estimar alturas similares en franjas con características similares al momento del vuelo.

Otro aspecto destacado es que el dron tendió a subestimar las alturas promedio en comparación con las medidas con el RPM, con diferencias del 8% en raigrás y del 29% en raigrás con llantén. Esto podría explicarse, como mencionaron Waller (2020) e Insua (2023), por el fenómeno observado en pasturas en estado de encañazón (como es el caso

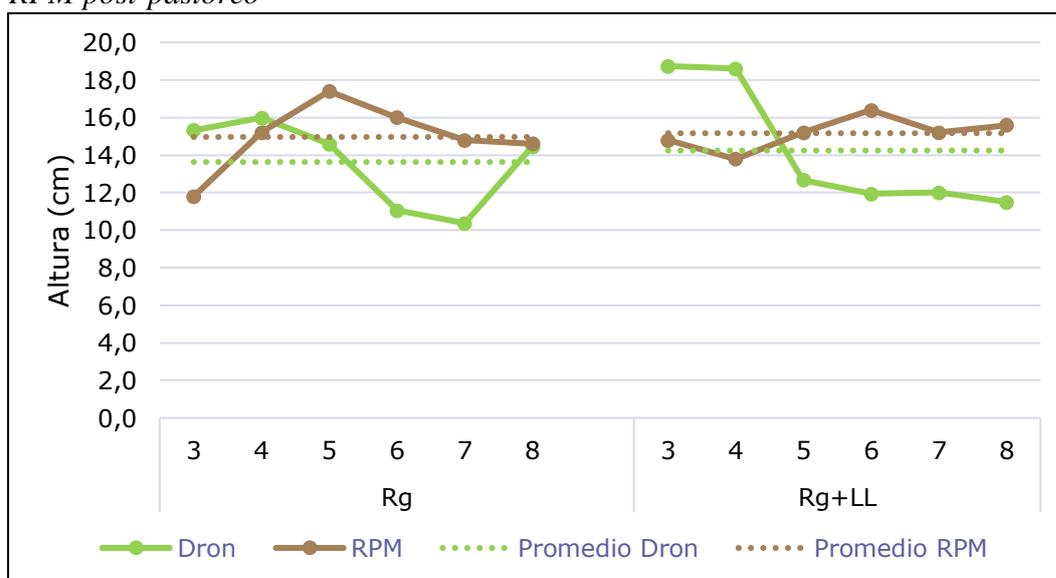
del raigrás): el plato de levante enfrentó mayor resistencia del forraje, lo que provocó una menor compresión y, por ende, mayores alturas registradas.

En el caso de la pastura de raigrás con llantén, la diferencia es aún más evidente. Por un lado, el dron tendió a estimar menores alturas en las áreas donde predominan plantas de llantén. Por otro, el RPM no logró comprimir el llantén debido a la resistencia generada por el raigrás en estado de encañazón. Esto generó que el RPM tenga en cuenta únicamente las partes del forraje con mayor altura, mientras que el dron tuvo en cuenta el abanico completo de alturas.

En la Figura 30 se presenta la altura del forraje (cm) luego del pastoreo, estimada mediante dron (línea verde), comparada con la altura estimada por el plato de levante (línea marrón) para las franjas de pastoreo analizadas en la Sección 4.2.2. Además, se incluyen sus respectivos promedios (líneas punteadas).

Figura 30.

Altura de forraje estimada mediante dron en comparación con la medida mediante RPM post-pastoreo



Como se observa, en esta situación se registró una mayor variabilidad en comparación con los datos previos al pastoreo presentados en la Figura 29. En el caso de las estimaciones a partir del dron, los desvíos estándar fueron de 2,3 cm para el raigrás y de 3,5 cm para el raigrás con llantén. Por otro lado, las mediciones realizadas con el plato de levante mostraron una mayor variación, con desvíos estándar de 1,9 cm y 0,9 cm para el raigrás y el raigrás con llantén, respectivamente.

La mayor variabilidad en las alturas registradas tras el pastoreo podría estar relacionada con diferencias en la intensidad del consumo por parte del ganado. Asimismo, como se

explicó en la Sección [4.2.2.](#), existió un desfase de hasta cinco días entre las mediciones realizadas con el plato de levante y el vuelo del dron. Esto implicó que el NDVI generado no reflejara de manera precisa la situación inmediata posterior al pastoreo en las parcelas de menor numeración.

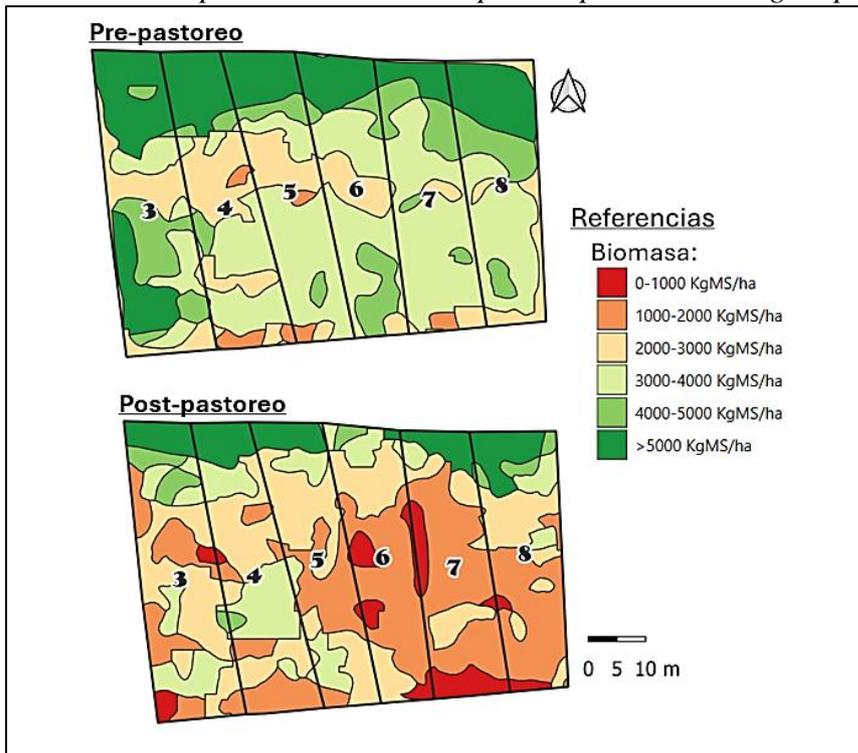
Por otro lado, en este caso, el dron volvió a subestimar la altura del forraje en comparación con el plato de levante. Sin embargo, al estimar la altura a partir de cada píxel generado, el dron proporciona un resultado más acorde con la realidad que el obtenido mediante el plato de levante. Esto sugiere que, gracias al mayor nivel de detalle en la información recopilada, el dron podría ser una herramienta más precisa para la estimación de la altura del forraje.

4.2.4. Distribución espacial de la biomasa y la altura del forraje pre y post pastoreo

En las Figuras 31 y 32 se presenta la distribución espacial de la biomasa (KgMS.ha^{-1}) por franjas pre y post pastoreo para las pasturas de raigrás y raigrás con llantén respectivamente. De igual manera, en las Figuras 33 y 34 se muestra la distribución espacial de la altura (cm) por franjas pre y post pastoreo para las pasturas de raigrás y raigrás con llantén respectivamente.

Figura 31.

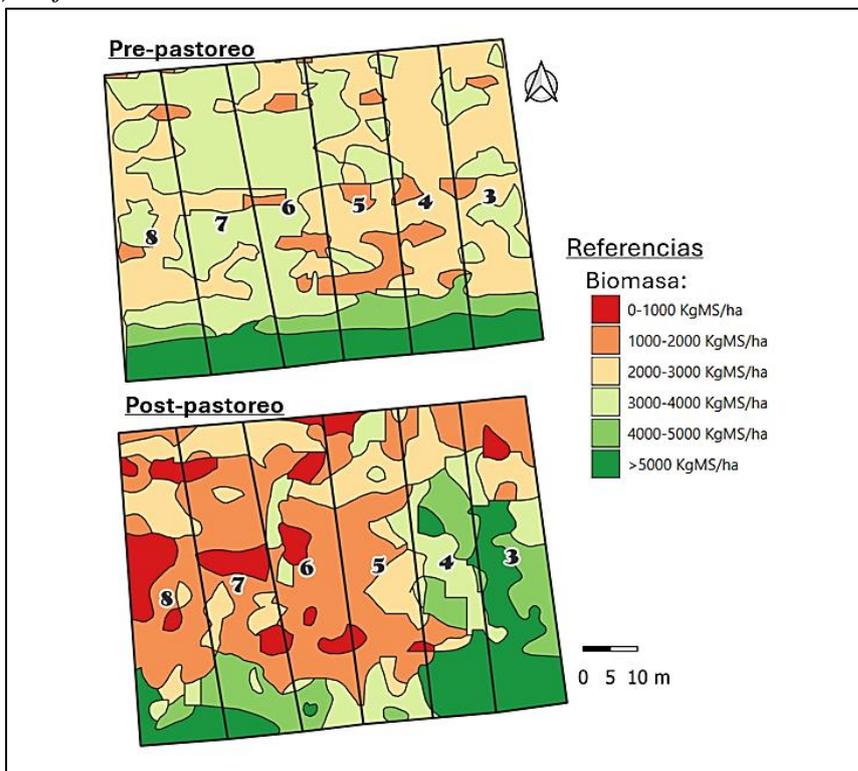
Distribución espacial de la biomasa para la pastura de Raigrás por franjas



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024)

Figura 32.

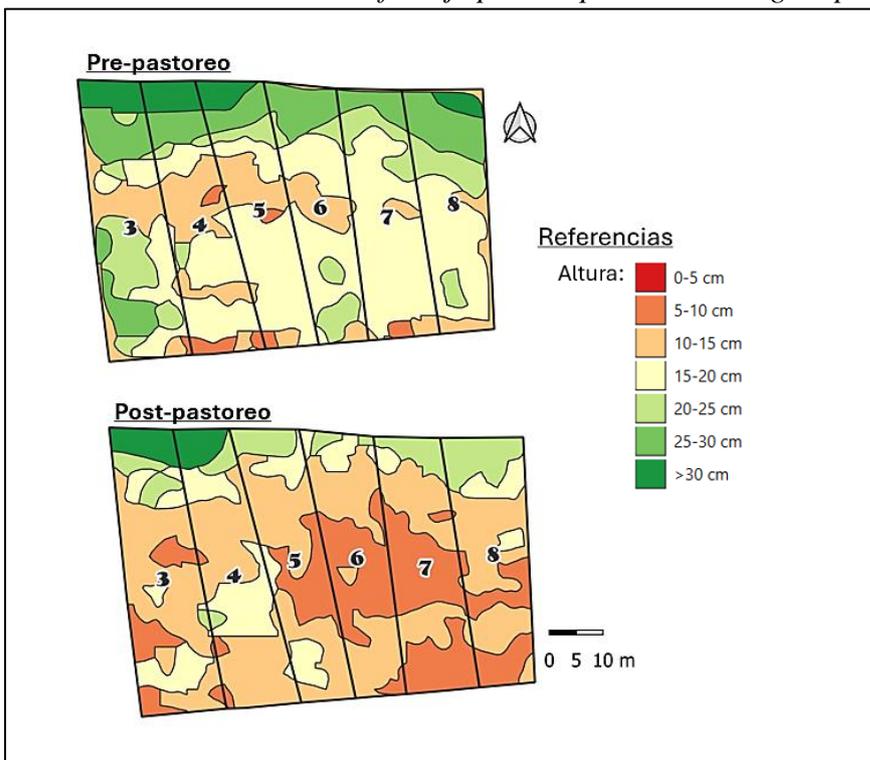
Distribución espacial de la biomasa para la pastura de Raigrás con Llantén por franjas



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024)

Figura 33.

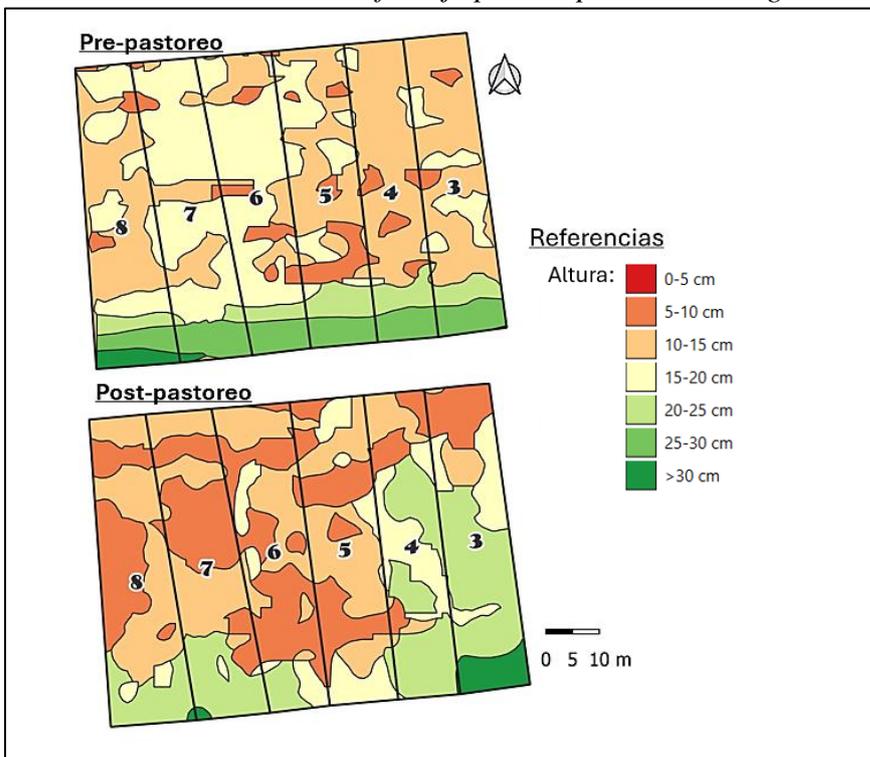
Distribución de la altura del forraje para la pastura de Raigrás por franjas



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024).

Figura 34.

Distribución de la altura del forraje para la pastura de Raigrás con Llantén por franjas



Nota. Elaborado en Sutton et al. (2024)

Como se observa, tanto en la biomasa como en la altura del forraje, existieron diferencias marcadas entre las condiciones previas y posteriores al pastoreo. Antes del pastoreo, predominaron los colores verdes sobre los rojos, mientras que después del pastoreo ocurrió lo contrario, con una mayor proporción de colores rojos. Es importante recordar que los colores más rojizos indicaron menor biomasa y altura del forraje, mientras que los tonos verdes reflejaron valores más altos.

Otro aspecto destacado es la variabilidad dentro de cada franja. A pesar de que cada franja abarcó apenas 0,1 hectárea, presentaron zonas considerablemente distintas entre sí. Esta variabilidad interna fue tomada en cuenta al calcular los promedios de biomasa y altura de forraje de cada franja, presentados en la Sección [4.2.2.](#) y la Sección [4.2.3.](#) respectivamente.

Además, se observó una notable concordancia entre las zonas de mayor y menor biomasa y altura, entre las condiciones pre y post pastoreo. Las áreas que antes del pastoreo se clasificaron como las de mayor biomasa y altura, mantuvieron esta categoría después del pastoreo. De manera similar, las zonas clasificadas como intermedias o de menor biomasa y altura también conservaron su categoría relativa.

Finalmente, y en línea con lo señalado en la Sección [4.2.2.](#) y la Sección [4.2.3.](#), las franjas pastoreadas en primer lugar (numeración más baja) presentaron mayor proporción de zonas con mayor biomasa y altura en comparación con las franjas pastoreadas al final. Esto se explica por la diferencia de hasta cinco días entre el momento del pastoreo y el vuelo del dron.

Tras haber analizado y discutido estos aspectos, y considerando lo expuesto por el Fariña et al. (2017) sobre “Las 3 R”, se puede afirmar que el dron es una herramienta de gran utilidad que optimiza significativamente todas las etapas del proceso.

En primer lugar, elimina la necesidad de realizar recorridos a pie o en vehículo, ya que permite estimar la biomasa disponible en cada potrero sin requerir el desplazamiento del operario. Además, la estimación obtenida ofrece un alto nivel de detalle.

En segundo lugar, la generación de mapas de distribución espacial facilita un ajuste más preciso de las rotaciones o incluso la implementación de pastoreos por franjas dentro de los potreros, al proporcionar información exacta sobre la disponibilidad de forraje en cada sector.

Por último, estos mapas permiten un control eficiente de la altura del remanente y del área ocupada por las matas de forraje rechazado, mejorando la gestión del recurso forrajero.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En conclusión, el dron representa una herramienta que permite realizar estimaciones rápidas a partir de la toma de una importante cantidad de mediciones, siendo este nivel de detalle muy difícil de alcanzar con otra herramienta. Además, estas mediciones se realizan con menor esfuerzo humano en comparación con métodos tradicionales como la regla graduada o el plato de levante. Asimismo, ofrece la posibilidad de realizar estimaciones en grandes áreas con mayor definición que las imágenes satelitales, gracias a su mayor resolución derivada de la menor altura de vuelo. Aunque el dron tiende a sobreestimar la biomasa, esta limitación puede gestionarse adecuadamente para realizar tomas de decisiones sobre las pasturas, ya que captura de manera precisa los cambios en la misma. Además, permite estimar con precisión la altura del forraje y generar mapas espaciales que son herramientas clave para una gestión eficiente de los recursos.

Por otro lado, se concluye que tanto la altura del forraje medida con el plato de levante como la altura registrada con la regla graduada presentaron una relación lineal con la biomasa, reflejada en un elevado coeficiente de correlación. Sin embargo, no se encontró una relación entre el número de hojas por macollo y la biomasa, probablemente debido a la metodología empleada para la cuantificación del número de hojas por macollo.

A su vez, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), medido mediante un dron Phantom 4 Multiespectral, mostró una regresión lineal con un coeficiente de correlación aceptable tanto con la biomasa como con la altura del forraje registrada con el plato de levante y la regla graduada. La correlación entre estas variables es más pronunciada cuando la pastura se encuentra en estado vegetativo y no ha sido pastoreada. En cambio, estas correlaciones se debilitan o desaparecen cuando la pastura está en estado reproductivo o ha sido sometida a pastoreo. Además, debido a la metodología empleada para la cuantificación del número de hojas por macollo, no se identificó una relación entre el NDVI y esta variable.

También se puede concluir que, utilizando un número de mediciones ampliamente superior al empleado por otros autores para la calibración del plato de levante y la regla graduada, se logró una alta correlación entre el NDVI y la biomasa en estado vegetativo, y una buena correlación si se tiene en cuenta todos los estados de la pastura. Estos resultados destacan el potencial del dron como una herramienta que, además de ofrecer

alta definición en la representación de las pasturas, adquiere confiabilidad y requiere menor esfuerzo humano y tiempo de trabajo que otras herramientas.

Además, se debe considerar que, con esta calibración, el dron tendió a sobreestimar la disponibilidad de forraje en comparación con el C-Dax. Esta sobreestimación es más evidente a medida que aumenta la biomasa, dado que el dron tiene una mayor sensibilidad para detectar cambios en la pastura. Gracias a esto, el dron logró detectar de manera correcta el crecimiento de la pastura. No obstante, las estimaciones de biomasa realizadas con el dron alcanzaron un nivel de saturación antes que las del C-Dax. Una posible solución para este problema podría ser el uso del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) como alternativa espectral.

Por otro lado, el plato de levante también sobreestimó la disponibilidad de forraje en comparación con el dron y, aún más, frente al C-Dax. Las estimaciones de altura del plato de levante fueron similares a las del dron cuando la pastura está en estado vegetativo y no ha sido pastoreada. Sin embargo, cuando la pastura entra en estado reproductivo o ha sido pastoreada, el plato de levante tendió a sobreestimar significativamente la altura del forraje, siendo el dron una herramienta más confiable para estimarla.

Por último, los mapas espaciales generados a partir de las imágenes capturadas por el dron son herramientas de gran utilidad para visualizar la distribución de la biomasa y la altura del forraje. Estos mapas permitieron representar la heterogeneidad de las pasturas y registrar sus cambios a lo largo del tiempo, complementando los valores promedio con información espacial detallada que resulta valiosa para la toma de decisiones y que logra ajustarse de gran manera a “Las 3 R”.

A su vez, se identifican futuras líneas de investigación. Por un lado, sería relevante mejorar la estimación del forraje consumido por el pastoreo. Para ello, se propondría realizar los vuelos del dron inmediatamente antes y después del pastoreo de cada franja, con el objetivo de obtener resultados más precisos y comparables con los obtenidos mediante herramientas validadas, como el C-Dax y el plato de levante.

Por otro lado, se podría desarrollar una metodología que represente con mayor precisión el número de hojas por macollo en la pastura, con la expectativa de encontrar buenas correlaciones entre esta variable, la biomasa y el NDVI.

Además, otra línea de trabajo podría enfocarse en la calibración del dron para que, a través del NDVI, sea capaz de identificar distintas especies vegetales dentro de la pastura. Esto

permitiría determinar la proporción de cada especie y, a su vez, inferir la calidad del alimento disponible para el ganado.

Por último, se propondría ajustar los parámetros tanto del vuelo como del procesamiento de las imágenes para lograr resultados más detallados. A su vez, realizar el cálculo del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para estimar biomasa a través de él y comparar estas estimaciones con las generadas mediante el NDVI.

6. **BIBLIOGRAFÍA**

- Agisoft LCC. (2024). *Agisoft Metashape Professional Edition* [Software].
<https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>
- Artola, I., & Pérez del Castillo, J. M. (2024). *Estimación de biomasa de festuca mediante el uso de dron multiespectral* [Trabajo final de grado].
 Universidad de la República.
- Cangiano, C. A., & Brizuela, M. (2011). Cómo evaluar la pastura. En C. A. Cangiano & M. Brizuela (Eds.), *Producción animal en pastoreo* (pp. 237-246). INTA.
- Canseco, C., Demanet, R., Balocchi, O., Parga, J., Anwandter, V., Abarzúa, A., Teuber, N., & Lopetegui J., T. (2007). Determinación de la disponibilidad de materia seca de praderas en pastoreo. En N. Teuber, O. Balocchi, & J. Parga (Eds.), *Manejo del pastoreo* (pp. 23-49). Gobierno de Chile; Universidad de La Frontera; Anasac; Universidad Austral de Chile; Cooprinsem.
<https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/18ba30d0-aea8-4fb0-9c82-e4e935fbf2/content>
- Carballo, N. A., & Severi, A. C. (2024). *Estimación de biomasa disponible mediante imágenes multiespectrales adquiridas con un dron* [Trabajo final de grado].
 Universidad de la República.
- C-Dax. (2024). *Pasture meter manual lift*. <https://www.C-Dax.com/product/pasture-meter-manual-lift>
- Cortelezzi, Á. (2022). Situación y perspectivas de las cadenas agroindustriales 2022-2023. En *Anuario de OPYPA 2022* (pp. 17-32). MGAP.
<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/anuario-opypa-2022/presentacion>
- Departamento de Canelones. (2024, 20 de mayo). En *Wikipedia*.
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Departamento de Canelones&oldid=160232080>
- DJI Agriculture. (2025). *Especificaciones DJI P4 Multiespectral*.
<https://ag.dji.com/p4-multispectral/specs>

- DJI GS PRO. (2024). *DJI Ground Station Pro*. <https://www.dji.com/global/ground-station-pro>
- Fariña, S., Tuñón, G., Pla, M., & Martínez, R. (2017). *Sistema de pastoreo La Estanzuela: Guía práctica para la implementación de un Sistema de pastoreo*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7228/1/bd-115-2017.pdf>
- Ferwerda, J. G. (2005). *Charting the quality of forage: Measuring and mapping the variation of chemical components in foliage with hyperspectral remote sensing* [Disertación doctoral, Wageningen University]. Wageningen University and Research ProQuest Dissertations. <https://www.proquest.com/openview/13acb67dfe00ee770f30ad04221255f1/1?pq-origsite=gscholar&cbl=44156>
- Google. (2024). [Centro Regional Sur, Canelones, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 17 de julio de 2024, de <https://maps.app.goo.gl/MBs7AupmBsHwfVKa7>
- Haydock, K. P., & Shaw, N. H. (1975). The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 15(76), 663-670.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2024). *Estación Meteorológica Las Brujas*. <https://www.inia.org.uy/online/site/gras.php?idEst=1>
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (2024). *Características climáticas*. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas>
- Insua, J. R. (2023). *Drones, satélites y modelos de simulación para el monitoreo y manejo del pastoreo*. Fundación FORTALECER.
- Insua, J. R., & Utsumi, S. (2016). Nuevas tecnologías para el monitoreo de pasturas. *Visión Rural*, (115), 9-12. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80888>
- Insua, J. R., Utsumi, S. A., & Basso, B. (2019). Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PLoS ONE*, 14(3), Artículo e0212773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>

- Lombardo, S. (2022). ¿Cómo utilizar el 90% del pasto? *Revista del Plan Agropecuario*, (183), 50-52. https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/183_2810.pdf
- López, J., & Sosa, O. (2019). *Uso de herramientas alternativas en el monitoreo del forraje* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29403>
- Lussem, U., Schellberg, J., & Bareth, G. (2020). Monitoring forage mass with low-cost UAV Data: Case study at the rengen grassland experiment. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, (88), 407-422. <https://doi.org/10.1007/s41064-020-00117-w>
- Lyons, N. (2007). *Calibración de un nuevo método de estimación indirecta de disponibilidad forrajera en pasturas típicas de Australia* [Trabajo final de grado]. Universidad de Buenos Aires.
- Mahute, M. (2024, noviembre). *Vegetation indices are powerful tools in remote sensing, offering insights into vegetation health, density, and distribution.* [Publicación]. LinkedIn. https://www.linkedin.com/posts/mashford-mahute-012487178_remotesensing-gis-vegetationindices-activity-7263866815674548224-7gih?utm_source=share&utm_medium=member_android
- Marchesi, C., & Castillo, J. (2016). Manejo integrado de cultivos: Índice verde (NDVI), indicador del status nitrogenado del cultivo. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Presentación resultados experimentales de arroz zafra 2015-2016* (pp. 21-24). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5938/1/Arroz-INIA-agosto-2016-web.pdf>
- Martínez, M., & Reyes, E. (2020). *Detección del forraje existente en praderas con imágenes adquiridas por drones* [Trabajo final de grado, Instituto Tecnológico de Huejutla]. RI-TecNM. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/1133/1/TESIS-Deteccion%20de%20Forrajes%20con%20Drones.pdf>

- Millapán, L. (2014). *Estimación de biomasa aérea en pasturas templadas de sistemas lecheros pastoriles* [Trabajo de especialización]. Facultad de Agronomía de Buenos Aires.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2019, 1 de octubre). *Uruguay – El país*. <https://www.gub.uy/ministerio-economia-finanzas/politicas-y-gestion/uruguay-pais#:~:text=La%20Rep%C3%ABlica%20Oriental%20del%20Uruguay,58%C2%B0%20de%20longitud%20Oeste>
- Montossi, F., De Barbieri, I., & Dighiero, A. (2013). El uso de la altura del forraje: Una herramienta disponible para el manejo eficiente de sistemas pastoriles orientados a la producción ovina. En F. Montossi & I. De Barbieri (Eds.), *Tecnologías de engorde de corderos pesados sobre pasturas cultivadas en Uruguay* (pp. 159-182). INIA.
- Montossi, F., Pravia, M. I., Dighiero, A., Porile, V., Gutiérrez, D., & De Barbieri, I. (2013). Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. *Revista INIA*, (34), 25-29. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7057/1/revista-INIA-34-p.25-29.pdf>
- O'Donovan, M., Connolly, J., Dillon, P., Rath, M., & Stakelum, G. (2002). Visual assessment of herbage mass. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 41(2), 201-211.
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario estadístico agropecuario 2023*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2023/ANUARIO2023WEB.pdf>
- Olmos, F. (1997). *Efectos climáticos sobre la productividad de pasturas en la región noreste*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2764/1/111219240807160512.pdf>
- Ortega, G., Chilbroste, P., Garrido, J. M., Waller, A., Fariña, S. R., & Lattanzi, F. A. (2023). Monitoring herbage mass and pasture growth rate of large grazing areas: A comparison of the correspondence, cost and reliability of indirect methods. *The Journal of Agricultural Science*, 161(4), 502-511. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000333>

- Ortega Conforte, G. (2019). *Aplicación de sistemas de percepción remota para el monitoreo y gestión de recursos forrajeros en sistemas pastoriles de producción* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.
- Prabhakara, K., Hively, W. D., & McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>
- Ribarola, J. A., & Villanueva, C. (2023). *Cuantificación de biomasa en pasturas a partir de imágenes tomadas por drones* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Rodríguez, G., & Triñanes, I. (2018). *Uso de un UAV para estimar la altura del forraje* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Rueda, V., Peña, J. M., Höglind, M., Bengochea-Guevara, J. M., & Andújar, D. (2019). Comparing UAV-Based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. *Sensors*, 19(3), Artículo e535. <https://doi.org/10.3390/s19030535>
- Schori, F. (2015). Sward surface height estimation with a rising plate meter and the C-Dax Pasturemeter. *Grassland Science in Europe*, 20, 310-312.
- Sciaretta, F. (2012). *Estimaciones forrajeras, claves para un rendimiento óptimo*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/149-ESTIMACIONES_FORRAJERAS.pdf
- Sinde-González, I., Gil-Docampo, M., Arza-García, M., Grefa-Sánchez, J., Yáñez-Simba, D., Pérez-Guerrero, P. & Abril-Porras, V. (2021). Biomass estimation of pasture plots with multitemporal UAV-based photogrammetric surveys. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 101, Artículo e102355. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102355>
- Sutton, T., Dassau, O., Sutton, M., Nsibandé, L. & Mthombeni, S. (2024). *QGIS* (versión 3.40) [Software]. <https://qgis.org/>

- Théau, J., Lauzier-Hudon, É., Aubé, L., & Devillers, N. (2021). Estimation of forage biomass and vegetation cover in grasslands using UAV imagery. *PLoS ONE*, *16*(1), Artículo e0245784. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245784>
- 't Mannetje, L. (2000). Measuring biomass of grassland vegetation. En L. 't Mannetje & R. M. Jones (Eds.), *Field and laboratory methods for grassland and animal production research* (pp. 151-178). CAB International.
- Viljanen, N., Honkavaara, E., Näsi, R., Hakala, T., Niemeläinen, O., & Kaivosoja, J. (2018). A novel machine learning method for estimating biomass of grass swards using a photogrammetric canopy height model, images and vegetation indices captured by a drone. *Agriculture*, *8*(5), Artículo e70. <https://doi.org/10.3390/agriculture8050070>
- Waller, A. (2020.). *Análisis de metodología para el monitoreo de pasturas en predios comerciales* [Tesis de maestría]. Universidad de la República.

7. ANEXO

Anexo A

Cronograma de muestreos para la calibración del dron en el año 2024

Fechas de muestreo							
Raigrás	26/06	02/07	17/07	29/07	12/08	27/08	09/09
Raigrás + Llantén	27/06	08/07	23/07	05/8	20/08	03/09	16/09