

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**UTILIZACIÓN DE DRONES PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN
PASTURAS DURANTE EL VERANO**

por

Gonzalo DAVYT MALÁN

Felipe MALÁN MAURÍN

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

MONTEVIDEO

URUGUAY

2026

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Mag.) Gastón Ortega

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Gastón Ortega

Ing. (Dr.) Gastón Notte

Ing. Agr. Candela Villanueva

Fecha:

25 de mayo de 2026

Estudiante:

Gonzalo Davyt Malán

Felipe Malán Maurín

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
SUMMARY	9
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Hipótesis	11
1.2 Objetivos generales	11
1.3 Objetivos específicos.....	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Importancia de conocer la disponibilidad forraje en un sistema.....	12
2.2 Gestión eficiente de la base forrajera	13
2.3 Gestión de un área de pastoreo	15
2.4 Métodos para la estimación de forraje	16
2.4.1 Métodos destructivos o directos	16
2.4.2 Métodos no destructivos o indirectos	16
2.5 Antecedentes en el uso de drones para estimar biomasa	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 Condiciones experimentales	24
3.1.1 Lugar y período del experimento	24
3.1.2 Registros meteorológicos previos y durante el periodo de estudio	26
3.1.3 Materiales.....	26
3.1.4 Dron	27
3.1.5 Pasturas	27
3.2 Metodología experimental	28
3.2.1 Metodología del trabajo en la etapa a campo.....	28
3.2.2 Realización de los vuelos con el dron.....	29

3.2.3 Metodología del trabajo en la etapa post – campo	31
3.2.4 Análisis de datos.....	32
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1 Relación entre biomasa y NDVI	33
4.1.1 Relación biomasa (kg MS/ha) y NDVI	33
4.1.2 Relación biomasa (kg BF/ha) y NDVI	36
4.2 NDVI como indicador para control del stock	37
4.3 Implicancias prácticas en el uso del dron	41
5. CONCLUSIONES	43
6. BIBLIOGRAFIA	45
7. ANEXOS.....	51

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Ubicación del CRS, donde se llevó a cabo el experimento.....	25
Figura 2. Registro histórico de precipitaciones (INIA Las Brujas) y registro para el ejercicio 2023-2024 (CRS).....	26
Figura 3. Imagen del dron DJI Phantom 4 multiespectral como el utilizado.....	27
Figura 4. Parte de los materiales utilizados en la etapa de campo.....	28
Figura 5. Secado de muestras en bandeja de aluminio en estufa.....	29
Figura 6. Programación de la ruta de vuelo.....	30
Figura 7. Relación NVDI y biomasa (kg MS/ha) para pasturas con diferentes componentes	33
Figura 8. Relación biomasa fresca (kg/ha) obtenida en el doble muestreo y NVDI	36
Figura 9. Relación entre biomasa (kg MS/ha) estimada a través de NDVI y estimada a través de C-Dax	37
Figura 10. Evolución del stock (kg MS/ha) en la plataforma de pastoreo según diferentes métodos y stock objetivo.....	38
Figura 11. Comparación del indicador NDVI correspondiente a toda la plataforma de pastoreo para dos fechas contrastantes.....	40
Tabla 1. Regresiones según componentes de las pasturas.....	35

RESUMEN

La producción ganadera y lechera en Uruguay se desarrolla mayormente bajo sistemas pastoriles, donde la correcta estimación de la disponibilidad de forraje resulta clave para optimizar la carga animal, la productividad y la eficiencia del sistema. Los métodos tradicionales de estimación presentan limitaciones en cobertura espacial y rapidez de medición. En este contexto, el uso de drones con sensores multiespectrales surge como una alternativa tecnológica para estimar biomasa con mayor precisión y representatividad espacial.

El objetivo general del trabajo fue estimar la biomasa disponible por potrero y el stock de forraje en la plataforma de pastoreo durante el verano, mediante el uso de un dron multiespectral, y contrastar su desempeño con un pasturómetro C-Dax. Como objetivos específicos se planteó comparar la evolución del stock estimado por ambas metodologías, determinar el grado de asociación entre el índice NDVI y la biomasa, y cuantificar las diferencias en las estimaciones tanto a nivel de potrero como de la plataforma de pastoreo.

El estudio se realizó en un sistema pastoril con rotación de praderas perennes y verdes estivales. Las mediciones se efectuaron semanalmente durante el período estival. Para la calibración del dron se utilizó el método de rendimiento comparativo (COMPYLD), utilizando cuadrantes distribuidos en los potreros donde se realizaron estimaciones visuales, mediciones de altura, registros con plato de levante y cortes para determinación de materia seca. El dron empleado fue un DJI Phantom 4 multiespectral, operado a 60 m de altura. A partir de las imágenes se calculó el índice NDVI y se analizó su relación con la biomasa determinada en campo. Los datos fueron procesados para estimar biomasa por potrero y el stock total de la plataforma, comparando los resultados con los obtenidos mediante C-Dax.

Los resultados evidenciaron una relación lineal significativa entre NDVI y biomasa, tanto en kg MS/ha como en kg BF/ha. No obstante, se observaron diferencias en la magnitud de las estimaciones entre metodologías, registrándose una tendencia del NDVI a sobreestimar la biomasa respecto al C-Dax, particularmente al inicio del período estival. La evolución temporal del stock estimado mostró comportamientos similares entre métodos, aunque con diferencias en valores absolutos.

Se concluye que el uso de drones con sensores multiespectrales constituye una herramienta válida para la estimación de biomasa y el monitoreo del stock de forraje a

nivel de potrero y plataforma de pastoreo. La tecnología permite obtener información espacial detallada y rápida, lo que puede contribuir a mejorar la toma de decisiones en sistemas pastoriles intensivos, complementando los métodos tradicionales de medición.

Palabras clave: dron multiespectral, NDVI, biomasa, sistemas pastoriles,
Uruguay

SUMMARY

Livestock and dairy production in Uruguay are mainly based on pasture systems, where accurate estimation of forage availability is essential to optimize stocking rate, productivity, and overall system efficiency. Traditional estimation methods present limitations in spatial coverage and speed of measurement. In this context, the use of drones equipped with multispectral sensors emerges as a technological alternative to estimate biomass with greater precision and spatial representativeness.

The main objective of this study was to estimate the available biomass per paddock and the forage stock of the grazing platform during summer using a multispectral drone, and to compare its performance with a C-Dax pasture meter. Specific objectives included comparing the evolution of forage stock estimated by both methodologies, determining the degree of association between the NDVI index and biomass, and quantifying differences in biomass estimation at both paddock and grazing platform levels.

The study was conducted in a pasture-based system composed of perennial pastures and summer forages. Measurements were carried out weekly during the summer period. For drone calibration, the comparative yield method (COMPYLD) was used, establishing quadrants distributed across paddocks where visual estimations, height measurements, rising plate meter readings, and destructive cuts were performed to determine dry matter. The drone used was a DJI Phantom 4 Multispectral, operated at 60 m flight height. NDVI was calculated from the images and its relationship with field-measured biomass was analyzed. Data were processed to estimate biomass per paddock and total forage stock of the grazing platform, and results were compared with those obtained using the C-Dax pasture meter.

Results showed a significant linear relationship between NDVI and biomass, expressed in both kg DM/ha and kg FM/ha. However, differences in magnitude were observed between methodologies, with NDVI tending to overestimate biomass compared to C-Dax, particularly at the beginning of the summer period. Temporal evolution of forage stock showed similar patterns between methods, although absolute values differed.

It is concluded that the use of multispectral drones represents a valid tool for biomass estimation and forage stock monitoring at paddock and grazing platform levels. This technology provides rapid and spatially detailed information, contributing to improved decision-making in intensive pasture-based systems.

Keywords: multispectral drone, NDVI, biomass, pasture systems, Uruguay

1. INTRODUCCIÓN

En el sector pecuario de Uruguay, la ganadería y la lechería representan dos de las actividades económicas más relevantes, contribuyendo significativamente al PIB, el empleo y las exportaciones del país. Ambos sistemas se sustentan principalmente en el consumo directo de forraje, que les brinda sostenibilidad económica y ambiental. En este marco, la producción de pasturas, asociada a una buena utilización y eficiencia de transformación de la materia seca en producto animal, tiene impacto directo en los costos de producción (Chilibroste et al., 2024).

Por este motivo, la gestión eficiente del forraje es clave en la planificación, tanto en el corto como en el largo plazo, y conforma la base fundamental para optimizar estos sistemas.

La estimación precisa y de manera rápida de la disponibilidad de biomasa permite evaluar estrategias de manejo como el ajuste de la carga animal y suplementación que hacen a la eficiencia del sistema productivo.

En los últimos años, el uso de tecnologías avanzadas en la agricultura ha crecido notablemente, destacándose el empleo de drones equipados con sensores especializados que brindan el monitoreo de variables para la toma de decisiones. Estas herramientas han demostrado ser eficientes en tareas como la estimación de biomasa, y aportar mejoras en la gestión y rendimiento de los cultivos. En el ámbito internacional, así como a nivel nacional, existen trabajos que reportan la utilización de estas herramientas para la determinación de biomasa en predios pastoriles, para la mejora en la toma de decisiones.

La incorporación de esta tecnología radica en la rapidez y detalle de la información que ofrece frente a métodos tradicionales, o instrumentos como el plato de levante o pasturómetros, que permiten cubrir áreas extensas en pocos minutos con una alta descripción espacial. Eso genera la posibilidad de lograr estimaciones en toda el área de pastoreo, para contar con información detallada del forraje que se dispone total para la toma de decisiones estratégicas de un predio.

En ese contexto, el presente estudio tiene como principal objetivo estimar la disponibilidad por potrero y el stock de forraje en un área de pastoreo conformado por una rotación de pasturas perennes y verdeos en el período estival, mediante el análisis y procesamiento de imágenes tomadas por un dron multiespectral. Este enfoque busca

aportar una metodología diferente a las convencionales y reproducible para mejorar la gestión de los recursos forrajeros en sistemas pastoriles.

1.1 Hipótesis

- Es posible la utilización de sensores multiespectrales mediante el uso del dron para la determinación de biomasa disponible a nivel de potrero y el stock de forraje en el área de pastoreo para la toma de decisiones en un sistema pastoril intensivo.

1.2 Objetivos generales

- Estimar la biomasa disponible en potreros que conforman una rotación de praderas y verdeos, a través de imágenes multiespectrales utilizando un dron, durante la estación de verano con una altura de vuelo de 60 m.

- Estimar el stock de forraje de la plataforma de pastoreo y contrastar su desempeño con el uso de un pasturómetro C-Dax.

1.3 Objetivos específicos

- Comparar para verano la evolución del stock de forraje estimado entre un dron y pasturómetro C-Dax

- Determinar el grado de asociación entre NDVI, biomasa a nivel de potrero.

- Cuantificar las diferencias en estimación de biomasa entre el dron y el pasturómetro C-Dax tanto a nivel de potrero como en la plataforma de pastoreo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importancia de conocer la disponibilidad forraje en un sistema

La ganadería como la lechería en Uruguay se desarrollan mayormente bajo sistemas pastoriles, por lo que el uso adecuado de los recursos forrajeros son claves en el desempeño del rubro y la competitividad del sector.

Según Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al. (2013) una estimación incorrecta de la disponibilidad de forraje, puede llevar a errores en el manejo de las diferentes opciones forrajeras, afectando la productividad, y la persistencia de las pasturas. Esto no solo impacta en la cantidad y calidad del alimento disponible para el ganado, sino también repercute negativamente en la rentabilidad del sistema productivo.

Por otra parte, según Stirling (2021) existe una oportunidad clara para incrementar la producción de leche por hectárea en los sistemas lecheros pastoriles de Uruguay, mediante un aumento de la carga animal y la utilización del forraje producido en el sistema. Adicionalmente, el aumento en la intensidad del pastoreo y utilización de la pastura, resulta en una mayor productividad y calidad de la misma (McCarthy et al., 2016).

Por lo tanto, para determinar la carga animal que un sistema puede soportar, debe estar en equilibrio el consumo animal y oferta de forraje con suplementación. Por lo que es esencial conocer con cuanto forraje contamos a nivel de potrero y en el sistema en su conjunto. De esta manera, se busca maximizar la productividad de la tierra mediante altas cargas animales para lograr una alta utilización del forraje, lo que conduce a una mayor productividad y, en consecuencia, a un mayor beneficio económico. Sin embargo, el aumento de la carga, implica que el desafío en el control de forraje sea mayor, así como la necesidad de ajuste de la suplementación.

Al realizar estimaciones periódicas, es posible generar indicadores en el área de pastoreo, como la biomasa disponible y la tasa de crecimiento de un área de pastoreo, que permiten evaluar el estado de los potreros dentro de la misma. Estos indicadores contribuyen a la toma de decisiones basadas en criterios establecidos, considerando tanto el estado fenológico de los potreros como la performance animal para la producción de carne y leche (Ortega et al., 2023). Se entiende que si la demanda animal esta igualada a la capacidad que tiene el sistema de crecer, el área de pastoreo está en equilibrio.

2.2 Gestión eficiente de la base forrajera

La presupuestación forrajera consiste en confrontar la oferta de forraje disponible, con la dotación animal (demanda), para un período determinado (Irigoyen, 2011). De ésta manera, se busca saber de antemano situaciones de desbalances entre la oferta y demanda, para poder ajustar medidas según sea la situación.

Una herramienta utilizada en el sector productivo, es la presupuestación forrajera para planificar el manejo del pastoreo. En el largo plazo, se debe tener en cuenta la rotación que se desarrolla en el predio, para que, de esta forma, conociendo la producción de forraje de cada componente, se pueda llegar a determinar la producción de toda la rotación. Por otro lado, en base a los requerimientos animales, y contrastándolos con dicha oferta, se logra determinar la capacidad de carga del sistema (Pravia, Montossi, Andregnette, et al., 2013).

Pravia, Montossi, Andregnette, et al. (2013) a través de una encuesta realizada en 2008 a 30 productores integrantes a GIPROCAR II, el 93,3% de los productores presupuestan forraje, siendo que el 39% la realiza anualmente, 37% trimestralmente y 17% hace presupuestaciones parciales.

El primer objetivo de estas presupuestaciones, es cuantificar el forraje del cual van a disponer los establecimientos y de esta manera ajustar la carga; definir momentos de ventas y compras; por último, el tercero de los objetivos es evaluar la necesidad de reservas a producir o comprar para soportar la carga (Pravia, Montossi, Andregnette, et al., 2013).

Estas presupuestaciones se basan en diferentes fuentes de información, siendo las principales la base de datos de productores de FUCREA o información propia de cada uno de los productores. Adicionalmente, otras bases de datos que se utilizan en menor medida son publicaciones de INIA u otras fuentes como Leborgne (1984).

Respecto al manejo de la pastura al inicio del pastoreo, un 77% de los productores lleva a cabo algún tipo de estimación de la disponibilidad de forraje, de los cuales un 63% es a través de la estimación visual, 27% realiza cortes con secado en estufa y un 10% utiliza la estimación a través de la regla graduada (Pravia, Montossi, Andregnette, et al., 2013).

En cuanto a los resultados productivos, el promedio de producción de carne en los predios encuestados en Pravia, Montossi, Andregnette, et al. (2013) se encontró en los

251 kg peso vivo/ha, este valor se encuentra muy por encima del reportado por Aguirre (2019), el cual rondaba los 108 kg/ha. Esto sugiere que existe una alta respuesta a las tecnologías adoptadas por los mismos, ya que la mayoría de los productores realizan presupuestaciones, así como estimaciones indirectas (estimación visual y estimación a través del uso de regla graduada) y directas (corte y secado en estufa).

Según la encuesta anteriormente mencionada (Pravia, Montossi, Andregnette, et al., 2013), el método de determinación de biomasa más utilizado es la estimación visual, sin embargo, el criterio más utilizado para el manejo del pastoreo (entrada y salida de animales), es la altura del forraje.

Para lograr un sistema de pastoreo eficiente, es fundamental mantener un control riguroso sobre la disponibilidad y el crecimiento del forraje en cada potrero. Según Fariña et al. (2017), un manejo adecuado del pastoreo permite maximizar la cosecha de pasto y reducir costos en la producción.

En los sistemas lecheros del Uruguay, el crecimiento acumulado anual de las pasturas sembradas según el monitoreo satelital de Conaprole, ronda los 9.500 kg MS/ha año para raigrás y de 11.000 a 12.000 kg MS/ha año en pasturas perennes (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.). Sin embargo, la cosecha directa se encuentra entorno a los 3.000 kg MS/ha año, en predios con asesoramiento técnico (Chilibroste et al., 2003), esto implica, que solamente se cosecha alrededor del 25-30% del crecimiento anual. Por otra parte, información proveniente de *Estrategias de intensificación de sistemas lecheros* (2024), menciona que, con crecimientos acumulados similares, se llegó a una cosecha directa del forraje producido por parte de los animales, de entorno al 60%; y si a esta se le agrega la cosecha mecánica se llega a valores de entorno al 80% lo que evidencia un amplio margen de mejora en la eficiencia de cosecha. Si bien la carga animal fue alta, encontrándose en torno a las 1,8 VO/ha; existe un exceso de forraje producido, el cual no se logra aprovechar de la mejor manera. Realizando una correcta gestión del área de pastoreo, se pueden llegar a cuantificar estos excesos y aumentar de esta manera la eficiencia tanto del área de pastoreo como del área destinada a reserva.

2.3 Gestión de un área de pastoreo

La investigación nacional plantea una metodología para el monitoreo y seguimiento de las áreas de pastoreo. En ese entendido es que desde el 2017 se viene trabajando en la utilización del sistema “Las 3 R” utilizado en INIA La Estanzuela y Facultad de Agronomía Udelar (en las investigaciones a nivel de sistemas) el cual se basa en tres aspectos clave. En primer lugar, la Recorrida consiste en realizar una evaluación semanal del estado fenológico de las pasturas en los potreros, la Rotación que busca ajustar el área de pastoreo de acuerdo con la tasa de crecimiento de las especies que integran el área de pastoreo; como último punto importante, el control de los remanentes, que se enfoca en la cantidad de forraje que queda después del pastoreo, de manera de garantizar un rebrote óptimo (Fariña et al., 2017).

Otaño et al. (2021) destacan el impacto positivo que genera el Sistema 3R aplicado a predios productivos, mejorando la toma de decisiones del pastoreo. Particularmente, los propios productores destacan una mejora en el orden de los trabajos, mayores consumos de forrajes, aumenta la persistencia de las pasturas y la posibilidad de incremento de la carga animal del sistema, logrando así aumentos en la producción por unidad de superficie.

En un trabajo realizado por Ortega et al. (2024) se logró optimizar de manera eficiente el balance entre la oferta y la demanda de forraje. Esta optimización fue posible gracias a un manejo dinámico, donde la asignación diaria de parcelas se realizaba en función de la disponibilidad real de forraje, la tasa de crecimiento del área de pastoreo y de los requerimientos nutricionales de los animales. Cada semana, se estimaba la disponibilidad de cada potrero, así como la tasa de crecimiento en el potrero mediante el método doble muestreo (Haydock & Shaw, 1975). Luego, considerando los requerimientos de consumo de las vacas y el aporte de suplementos (concentrados o forraje conservado), se calculaba el área necesaria a asignar, teniendo en cuenta además el remanente post pastoreo como objetivo. De esta manera, se ajustaba el tamaño de las parcelas ofrecidas, evitando tanto la sobreestimación como la subestimación de la necesidad de forraje, lo cual permitió maximizar la utilización de la pastura, sostener la producción animal y proteger la persistencia del recurso forrajero.

En Stirling (2021) se destaca que, el manejo del pastoreo, incluyendo la medición sistemática del stock de forraje en el área de pastoreo y ajustes semanales en la asignación de área, permite sincronizar el consumo con el crecimiento, maximizando así la cosecha

mediante pastoreo directo. De esta manera se consiguieron producciones anuales de leche de entre los 18.000 y 19.000 kg/ha con alrededor de 1.450 kg de sólidos/ha; contrastando con sistemas sin este nivel de ajuste, donde se lograron producciones 30% inferiores.

2.4 Métodos para la estimación de forraje

El método para estimar disponibilidad de forraje debe ser rápido y confiable, de fácil aplicabilidad para el usuario ya que el manejo del pastoreo es dinámico. A su vez, ésta estimación es una práctica que presenta dificultades, debido a que las praderas presentan gran variabilidad dentro del potrero, entre potreros y a lo largo del año (Canseco et al., 2007).

Se han desarrollado diversas técnicas para la estimación de forraje, las cuales se pueden dividir en métodos directos y métodos indirectos (Canseco et al., 2007).

2.4.1 Métodos destructivos o directos

2.4.1.1 Método de corte

El método de corte y pesaje del forraje implica realizar cortes en áreas representativas de la parcela, posteriormente el mismo es pesado, luego se deja secar en un horno a 100°C durante 24 horas o a 60°C durante 48 horas. Finalmente, se determina el peso del material ya seco utilizando una balanza de precisión (Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al., 2013). Luego se determina la proporción de MS de la muestra (peso seco/peso fresco) para de esta manera obtener la MS contenida en el área muestreada, la cual posteriormente se extrapola a la hectárea (kg MS/ha).

Fernández (2004) indica que es el método más preciso y confiable, pero posee como aspectos negativos que es costoso en términos de tiempo y trabajo. Además, para lograr resultados concisos, es necesario que las muestras sean representativas de todo el espacio, para de esta manera poder captar la mayor variabilidad posible.

Gracias a esa precisión de este método, Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al. (2013) destacan que se utiliza para comparar la cantidad de materia seca real con algún otro método estimativo no destructivo.

2.4.2 Métodos no destructivos o indirectos

Según Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al. (2013), si bien los métodos de estimación de biomasa indirectos no son destructivos ya que no requieren cortes cada vez que se mide, estos requieren cortes de manera continua y sostenida en el tiempo para lograr una

calibración. Las ventajas de estos métodos radican en que son métodos más económicos, prácticos y rápidos que los métodos destructivos, ya que no requieren del corte, recolección y pesaje de las muestras, mientras que son métodos menos precisos y requieren de entrenamiento del personal que realiza las estimaciones.

Arrillaga López y Píriz Herrera (2021) mencionan que la elección el método a utilizar para poder realizar un seguimiento del stock del forraje en el área de pastoreo, dependerá de la infraestructura, mano de obra, tamaño del establecimiento y capacidad de inversión. Por ejemplo, la opción que no requiere una inversión inicial es la estimación visual, si bien esta no presenta una inversión en capital, se requiere tiempo y capacitación para los operarios lleven a cabo la estimación, además de que el estimador sea siempre la misma persona, ya que es un método subjetivo. Por otra parte, aunque plato de levante (RPM) requiere de una inversión inicial, dicho método es objetivo y una vez calibrado, la estimación puede llevarse a cabo por diferentes operarios. Por último, se menciona el C-Dax (tipo de pasturómetro), el cual requiere una inversión inicial mayor, pero asegura un ahorro de tiempo en la recorrida y se obtiene una mayor cantidad de muestras, logrando captar de buena manera la variabilidad espacial del potrero.

2.4.2.1 Estimación visual

Para una estimación visual de la disponibilidad de forraje de un potrero, se requiere una recorrida que sea representativa del mismo. Para poder realizarla de manera confiable, se requiere tiempo y esfuerzo, además de una calibración y experiencia en el uso del método. Las ventajas de este tipo de estimación radican en que se puede realizar de manera rápida, así como sin equipamiento especializado (Fernández, 2004). Según Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al. (2013), este método de estimación, es subjetivo, por lo que pueden existir diferencias entre los distintos observadores, además, como se menciona en Fernández (2004) es necesario un entrenamiento previo por parte del observador ya que de lo contrario se suele subestimar o sobreestimar la disponibilidad. Dado que el registro depende del observador, las decisiones deben ser tomadas exclusivamente por quienes realizaron la medición, excluyendo a terceros ajenos al proceso. Otra de las desventajas que presenta la estimación visual, es que muchas veces no se hace hincapié en el registro, lo que dificulta la acumulación de información para su posterior análisis. Una de las limitantes de su uso radica en la forma de registro de este método, que muchas veces no está acompañada de una base de datos que permita agrupar

la información, pero es un método ampliamente aceptado y validado en condiciones de producción real.

2.4.2.2 Estimación de biomasa con altura de regla

Este es uno de los métodos más comunes de estimación de disponibilidad; esto debido a la relación positiva que existe entre la altura de regla y la disponibilidad de la pastura; por lo que a través de ecuaciones de regresión se puede llegar a valores de disponibilidad de forraje. Sin embargo, esto requiere una calibración, ya que las ecuaciones que determinan la relación entre la disponibilidad de forraje y la altura de regla van a depender de la pastura en el lugar y momento determinado (Montossi et al., 2013).

Este autor menciona diferentes ecuaciones de predicción según el tipo de pastura, las cuales presentan un R^2 de 0,54 a 0,88; puntualmente, para la festuca pura, su ecuación de predicción es $y=164,04x+538,87$, logrando un ajuste de 0,72. El experimento fue llevado a cabo en las diferentes estaciones experimentales de INIA, así como en predios de productores ganaderos.

Como desventaja a considerar de este método, en grandes áreas heterogéneas, la operativa es más difícil de llevar a cabo, ya que se debe identificar el área total en áreas más pequeñas y homogéneas para poder realizar una correcta calibración.

2.4.2.3 Método de doble muestro (COMPYLD)

El método COMPYLD, propuesto por Haydock y Shaw (1975), también llamado doble muestreo o método de rendimientos comparativos, se basa en la asignación de valores cualitativos al forraje presente, en una escala de 1 (baja) a 5 (alta), permitiendo capturar su variabilidad espacial.

Para garantizar el correcto ajuste entre las determinaciones, las evaluaciones visuales se calibran de manera periódica mediante el muestreo, pesaje y secado del material estableciendo una relación entre los valores visuales y la biomasa real medida (Ortega et al., 2023).

Una de las mayores ventajas, es la de cubrir más área a través de una mayor cantidad de muestras que no requieren tanto tiempo en comparación con el método de estimación directa, esto nos da una mayor rapidez y representatividad en el muestreo. Como desventajas, es un método que requiere una alta demanda de tiempo para ajustar la medición con los cortes, lo que en áreas grandes se vuelve impracticable.

2.4.2.4 Estimación de biomasa con plato de levante

Plato de levante (Rising Plate Meter, RPM) el cual mide simultáneamente altura de forraje y densidad del mismo, proporciona un valor de “altura de forraje comprimido”, integrando de esta manera tanto la altura como la densidad de la pastura para poder obtener un valor de forraje disponible. Este instrumento consiste en un disco rígido de 0,3 a 0,8 metros de diámetro, con un orificio en el centro, por el cual pasa una varilla que está marcada con divisiones graduadas a lo largo de su longitud, en la parte superior de la varilla central, se encuentra un mango fijado, el cual permite que el disco se deslice perpendicularmente a lo largo de la varilla según la altura y la densidad de la pastura, mientras que la varilla central queda en contacto con la tierra (Montossi et al., 2013).

Su principal ventaja radica en la practicidad y rapidez con la cual los técnicos y/o los productores disponen de la estimación de forraje in situ (Montossi et al., 2013). En cuanto a las desventajas, es pertinente mencionar que, en potreros extensos, para poder captar la variabilidad espacial, es necesario recorrerlo previamente y planificar la estrategia de muestreo, para posteriormente realizar el muestreo a pie.

Al igual que el resto de métodos necesita ser calibrado para distintos tipos de pastura y condiciones específicas de cada lugar. Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al. (2013) mencionan que la situación ideal es tener una ecuación universal para la predicción de estimación de disponibilidad de materia seca que contemple todos los escenarios posibles en cuanto al clima y tipo de pastura; sin embargo, Waller Bárcena (2020) y Ortega et al. (2023) mencionan que, para la situación de Uruguay, es viable la utilización de una ecuación única ya que el grado error no te permite diferenciar entre ecuaciones.

2.4.2.5 Estimación de biomasa con pasturómetros

Según Lyons (2007), a nivel internacional, uno de los pasturómetros más conocidos es el sensor C-Dax ®, desarrollado en Nueva Zelanda, el cual mide la altura del forraje mediante tecnología de sensores lumínicos. Este dispositivo cuenta con 18 emisores de rayos dispuestos verticalmente sobre el suelo y separados a 2,5 cm entre sí. Al ser arrastrado por un vehículo a velocidades máximas de hasta 20 km/h, realiza 200 lecturas de altura por segundo, en un ancho de pasada de 30 cm.

La ventaja de este sensor es la alta representatividad espacial gracias a la elevada frecuencia de muestreo que no dependen del usuario, esto evita variaciones subjetivas en la medición. Además, se destaca la rapidez y facilidad de las mediciones.

Un estudio realizado en Suiza por Schori (2015) indica que se puede reducir a la sexta parte el tiempo de medición, cuando se compara con el uso del RPM.

Ortega et al. (2023), en un estudio llevado a cabo en Canelones, Uruguay, mencionan como desventaja de ésta herramienta la alta inversión inicial, la inactividad a causa de reparaciones e infraestructura de caminos para el correcto uso y la necesidad de contar con un vehículo para acoplarlo de características rústicas. Otro aspecto mencionado en el mismo artículo, es la sobreestimación respecto al método COMPLYLD (22%), esto provoca una diferencia entre ambos métodos durante el estudio de entre 1138 kg MS/ha a -119 kg MS/ha. Por ende, es fundamental considerar qué método de estimación se utiliza al momento de tomar decisiones de manejo, si bien en este caso es diferente fue constante para la variable stock por lo cual para definir el control de esa variable en el área de pastoreo los métodos (CDAX VS COMPLYLD) no se diferenciaron. Esto implica que una sobreestimación o subestimación del forraje disponible puede llevar a asignaciones inadecuadas de superficie, afectando la eficiencia del pastoreo y la planificación diaria.

2.4.2.6 Estimación de biomasa con sensores satelitales

El método satelital está basado en sensores remotos e información geográfica para estimar la cobertura de forraje en grandes extensiones y a bajo costo, mediante índices espectrales (Pravia, Montossi, Gutiérrez, et al., 2013).

En este sentido Ortega (2019) menciona que existen diferentes sensores satelitales, los cuales permiten trabajar a diferente escala y con distinta frecuencia de registro. Los sensores con mayor frecuencia de registro, tienen un tamaño de pixel mayor, lo que facilita el trabajo en áreas muy extensas. En cambio, los que registran con menos frecuencia suelen tener pixeles más pequeños, lo que permite trabajar a escalas temporales mayores.

Particularmente, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), posee una resolución de 5 has, pero con una frecuencia de registro diaria, por lo que no es viable su utilización como método para la toma de decisiones diarias en predios lecheros, donde predominan tamaños de potreros menores a eso. Actualmente es posible contar con el sensor que presentan una resolución mayor (100 m²), con una frecuencia de registro de 5- 10 días tal es el caso de Sentinel-2 (Ortega, 2019).

Un estudio llevado a cabo en Colombia, logró ajustar regresiones que relacionan diferentes índices basados en distintos sensores, logrando por ejemplo para el caso del Sentinel-2, un ajuste de 0,71, para la ecuación $Y = 1.547,7 X - 572,71$; donde “Y” es kg MS/ha y “X” es NDVI captado por el sensor (Díaz Giraldo et al., 2021).

Malaquín et al. (2019) realizaron un seguimiento forrajero a través del procesamiento de imágenes satelitales en “La Mensualada” ubicada en el departamento de Paysandú, Uruguay. Los mismos evidencian la viabilidad de dicha herramienta para poder tomar decisiones en cuanto al manejo en las presupuestaciones forrajeras. Otro uso importante mencionado en el mismo artículo (Malaquín et al., 2019), es la capacidad de esta herramienta de ser usada para calcular tasas de crecimiento y como las mismas varían a lo largo del año.

Adicionalmente, según Serrano et al. (2018), a medida que la planta madura, el contenido de clorofila disminuye repercutiendo en el NDVI, que disminuye, pero no así la biomasa, la cual continúa aumentando hasta la culminación de la maduración.

2.5 Antecedentes en el uso de drones para estimar biomasa

Recientemente, el uso de drones ha adquirido una mayor relevancia en los sistemas de producción agropecuaria, ya que permite obtener rápidamente una representación más detallada y al instante del espacio; de esta manera, surge como alternativa la utilización de dron multiespectral para determinar la biomasa disponible y tomar decisiones a partir de dicha medición, sumado a la rápida cobertura y mayor detalle que permite ésta herramienta.

Para la correcta utilización de la herramienta, hay aspectos a tener en cuenta, Pompa-García et al. (2024) destacan que existe una variación diaria del NDVI medido con dron, cuyo comportamiento es cuadrático, teniendo su máximo aproximadamente a las 13:00 hs, esto se debe a la mejor recepción de energía lumínica en la biomasa. Se observa, además, una disminución de la reflectancia al inicio y final del día, atribuibles a los cambios en el ángulo del sol y sombras resultantes en la vegetación.

Además, Pompa García et al. (2024) remarcan la importancia en el horario en el cual se mide el NDVI, por la inestabilidad del mismo. Por ende, se convierte en un factor decisivo para la interpretación de éste índice y uso para la toma de decisiones posteriores.

A escala internacional, Mattera et al. (2022) exploraron la capacidad de drones con cámaras multiespectrales para estimar la producción de forraje en pasturas templadas, utilizando el NDVI para medir la salud vegetal y correlacionar esta información con la producción de materia seca. Siendo este enfoque más rápido y eficiente que las mediciones tradicionales, sin embargo, destacaron que es efectivo, pero disminuye la precisión por factores como un alto volumen de forraje o presencia material senescente.

Además, Insua et al. (2021) demostraron la viabilidad de esta tecnología en pasturas de agropiro, donde la estimación de biomasa mediante NDVI mostró una correlación significativa ($R^2=0,72$) con las mediciones convencionales. Además, la variación espacial registrada por los drones permitió optimizar el uso de los recursos forrajeros, facilitando la gestión del pastoreo y la toma de decisiones.

En Uruguay, Artola Guynot de Boismenu y Pérez del Castillo López (2024) evaluaron la cuantificación de biomasa y altura de pasturas de Festuca utilizando imágenes de drones multiespectrales y la generación de mapas de NDVI. Los resultados mostraron una correlación significativa entre el NDVI y la biomasa real ($R^2=0,74$), así como entre el NDVI y la altura de la pastura ($R^2=0,76$).

Insua et al. (2019) además de estimar la disponibilidad de biomasa a través de NDVI, fueron capaces de predecir los cambios en la longitud de hoja, estadio foliar, fibra detergente neutro, digestibilidad de la fibra detergente neutro y digestibilidad de la materia seca a través de un enfoque integrado. Si bien las decisiones para determinar momento de pastoreo se basan en un número fijo de días, una acumulación de biomasa objetivo o un número de hojas/macollo; dichos autores utilizan como criterio de decisión la digestibilidad del forraje, debido a que la misma puede afectar significativamente la ingesta de pasto y rendimiento del animal. De ésta manera, y teniendo en cuenta el estado de la pastura, el forraje ofrecido es de alta calidad asociado a rotaciones de pastoreo rápidas, evitando aumentos en la fibra detergente neutro y disminución de la digestibilidad de la misma a causa de la senescencia de las hojas.

En cuanto al control del stock de forraje de la plataforma de pastoreo, Caraballo Barboza y Severi Silva (2024) lograron estimar la evolución del forraje disponible entre el 31 de julio y el 11 de setiembre de 2023, al compararlo con el control del stock mediante el C-Dax, se observó que la diferencia promedio entre ambos métodos para dicho periodo es de 1700 kg MS/ha; si bien esta diferencia es abultada, la tendencia es similar, donde

se mantuvo una diferencia constante entre ambos métodos, similar pero de menor magnitud a lo encontrado por Ortega et al. (2023) para C-Dax y doble muestreo.

Estos estudios demuestran que la combinación de drones y NDVI, es una herramienta que describe el espacio de manera detallada, característica que puede brindar soporte para la estimación de la biomasa en pasturas permitiendo tener un control del stock de forraje en un área de pastoreo, facilitando la gestión y la toma de decisión en los sistemas ganaderos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Condiciones experimentales

3.1.1 Lugar y período del experimento

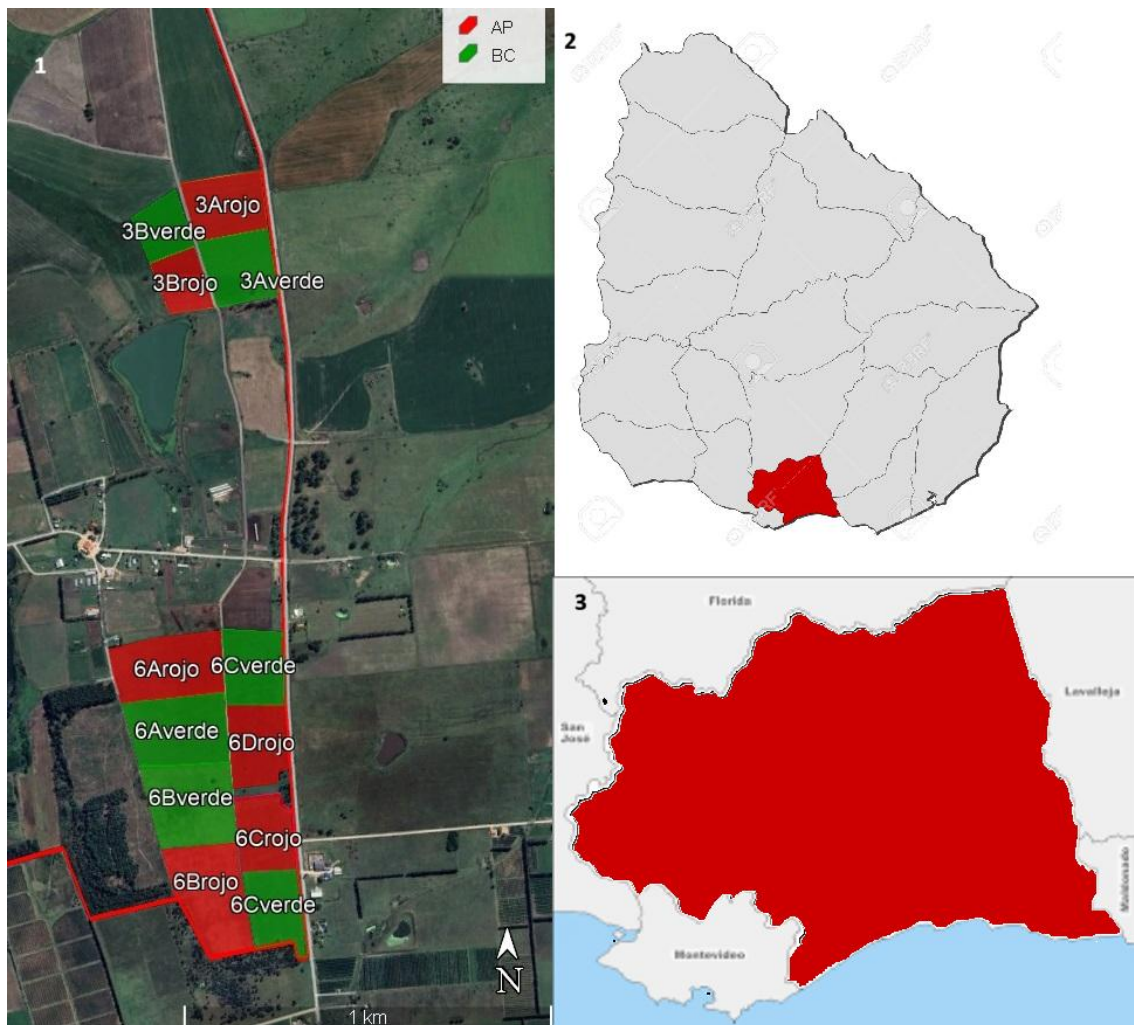
El experimento tuvo lugar en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía, ubicado en Progreso, Canelones, Uruguay (latitud 34°36'57.33 "S longitud 56°13' 3.50"O).

El ensayo consistió en aplicar el uso del dron en dos sistemas de producción de leche con estrategias productivas contrastantes, como se cita en la primera de las estrategias, denominada bajo costo (BC), se enfocó en lograr una mayor simplicidad operativa y mantener bajos costos de producción, con una carga de 1,8 vacas en ordeño por hectárea de plataforma (Briñón Ghione & López Lans, 2024). La segunda estrategia, denominada alta productividad (AP), tuvo como objetivo maximizar la producción de leche por hectárea, implementando una mayor carga animal de 3,0 vacas en ordeño por hectárea de plataforma.

Si bien la plataforma de pastoreo de este sistema ocupaba 41,8 hectáreas, en el presente trabajo, no se utilizaron los potreros 6C ni 3A, ya que estos se encontraban en barbecho; por lo que el total de hectáreas utilizadas fueron 29,6. Por lo tanto, los potreros sobre los cuales fueron tomadas las distintas mediciones fueron el 3B, 6A, 6B y 6D (Figura 1) correspondiente cada potrero cada uno de los tratamientos AP y BC. El período experimental fue desde el 18 de diciembre del 2023 al 05 de marzo del 2024.

Figura 1

Ubicación del CRS, donde se llevó a cabo el experimento

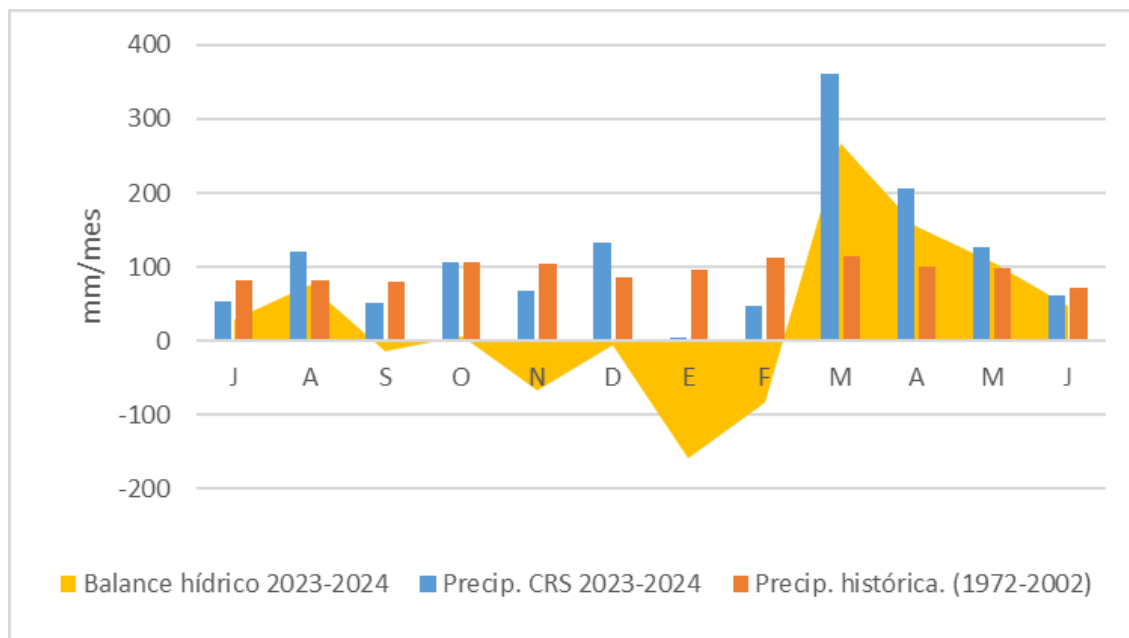


Nota. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de ¹Google (2024), cartografía de ²Hammer (s.f.) en 123RF y mapa base de ³d-maps (s.f.).

3.1.2 Registros meteorológicos previos y durante el periodo de estudio

Figura 2

Registro histórico de precipitaciones (INIA Las Brujas) y registro para el ejercicio 2023-2024 (CRS)



Nota. Elaboración propia a partir de datos históricos de la Estación Experimental INIA Las Brujas (1972-2002) (Unidad GRAS, 2026) y G. Ortega (comunicación personal, 2024) respecto a los registros del Centro Regional Sur

Las precipitaciones durante los meses de enero y febrero (período comprendido dentro del experimento) fueron inferiores a los registros históricos promedio para respectivos meses. Para el mes de enero se ubicaron en 93mm por debajo del promedio, mientras que para el mes de febrero 64 mm. A su vez, en estos meses la evapotranspiración fue mayor que las precipitaciones, por lo que el balance hídrico resultó ser negativo. Puntualmente, el balance hídrico de enero fue de -158 mm, mientras que febrero resultó en -83 mm (G. Ortega, comunicación personal, 2024; Unidad GRAS, 2026).

3.1.3 Materiales

Para poder llevar a cabo el experimento se utilizaron los siguientes materiales: dron, tablet, regla, 30 rectángulos de madera (50 x 30 cm en el interior), tijeras de esquilador, bandejas de aluminio, balanza, estufa para el secado de las muestras, bolsas de nylon, RPM, C-Dax y computadora.

3.1.4 Dron

El dron utilizado fue un DJI Phantom 4 Multiespectral (Figura 3, equipado con una cámara de 6 lentes que captura imágenes en 6 bandas de color; luz visible (RGB), rojo (R), rojo lejano (RE), infrarrojo cercano (NIR), verde (G) y azul (B). Utilizando las bandas de color R y NIR, se construye el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Figura 3

Imagen del dron DJI Phantom 4 multiespectral como el utilizado



Nota. Tomado de DJI (s.f.).

3.1.5 Pasturas

Las mediciones se realizaron sobre las pasturas de los potreros correspondientes al ensayo (Figura 1). Las pasturas incluían mezclas de festuca, trébol blanco y alfalfa de segundo año en los potreros 6A; festuca de cuarto año con una intersiembra de raigrás perenne en los potreros 6B; dactylis con alfalfa de segundo año en los potreros 6D; raigrás con achicoria en los potreros 3B.

3.2 Metodología experimental

3.2.1 Metodología del trabajo en la etapa a campo

Para la etapa de calibración del dron, se utilizó el método de rendimiento comparativo (COMPYLD) (Haydock & Shaw, 1975), de forma de capturar la variación espacial con una evaluación visual cualitativa de la biomasa disponible de la pastura con escalas de rendimiento del 1 al 5 (1 = baja a 5 = alta) y 6 repeticiones por cada valor de la escala de rendimiento. Por lo que se colocaron treinta rectángulos de madera (teniendo en consideración la escala de rendimiento) con unas medidas internas de 30*50 cm, distribuido en el potrero, el cual iba variando semanalmente, cada uno de ellos identificados con una letra del abecedario. Los mismos tenían sus bordes cubiertos con cinta de color rojo para facilitar su identificación en las imágenes que posteriormente se tomarían con el dron (ver figura 4).

Figura 4

Parte de los materiales utilizados en la etapa de campo



Una vez que la totalidad de los cuadrantes se distribuían por todo el potrero, se realizaron diferentes mediciones en cada uno de los mismos. En primer lugar, se llevó a cabo una estimación visual de la biomasa. Luego se midió la altura promedio de la biomasa utilizando una regla, tomando cinco mediciones en cada rectángulo (una en cada esquina y una en el centro). Además, la medida de altura también se realizó con RPM para complementar las mediciones utilizando otro método indirecto para la calibración.

Posteriormente, luego de realizar las diferentes mediciones, se llevó a cabo el vuelo semanal con el dron (3.2.2) sobre el potrero correspondiente. Finalmente, se cortó la biomasa al ras del suelo en los rectángulos que se distribuían en el potrero, identificando cada muestra con el respectivo cuadrante para posteriormente pesarla y secarla en estufas a 60°C por 48 horas y determinar la materia seca correspondiente a cada muestra (ver figura 5).

Figura 5

Secado de muestras en bandeja de aluminio en estufa



3.2.2 Realización de los vuelos con el dron

Luego de tomar las medidas para la calibración, se realizaba el vuelo sobre el potrero en cuestión, esa información se utilizó para contrastar los valores de NDVI; calculado como $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$, con el dato real de biomasa de cada cuadrante.

Adicionalmente, se realizó un vuelo por semana en toda el área de pastoreo que involucraba los dos sistemas AP y BC (figura 1) de esa manera se obtuvieron imágenes multiespectrales en las 6 bandas de color para llegar a calcular un índice de NDVI a nivel

de cada potrero; y con la calibración realizada, se estimó un valor de biomasa; y este se contrastó con las estimaciones semanales del C-Dax (realizadas en el contexto de otro trabajo de investigación) (Gil-Zibil et al., 2025).

3.2.2.1 Programación del vuelo

Se delimitó cada potrero mediante la aplicación DJI GS PRO y se definió una altura de vuelo de 60 metros. La velocidad de vuelo fue de 18km/h, logrando una definición de 3,2cm²/pixel. Las imágenes fueron capturadas con un ángulo de 90° y un solapamiento del 70 % tanto frontal como lateral, con el objetivo de generar un mosaico continuo (ortomosaico). Se realizaron tomas en luz visible (RGB), en el espectro del rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR).

La ruta de vuelo se generó automáticamente (ver figura 6) luego de establecidos estos parámetros. Tras completar cada misión de vuelo, se transfirieron las fotos generadas a una computadora para su posterior procesamiento.

Figura 6

Programación de la ruta de vuelo



Nota. Fotografía de la pantalla de control del software DJI Ground Station Pro (DJI, 2023) durante la planificación del vuelo.

3.2.3 Metodología del trabajo en la etapa post – campo

3.2.3.1 Laboratorio

Una vez en el laboratorio, las muestras extraídas en el punto 3.2.2 se colocaban en bandejas claramente identificadas, las cuales se pesaban para obtener su peso en base fresca. Aquellas muestras que eran muy voluminosas y dificultaba su manejo, se pesaba su totalidad, primeramente, y luego se tomaba una sub – muestra la cual se volvía a pesar con la intención de conocer el % de MS una vez que la muestras hayan permanecido en la estufa.

Una vez pesadas todas las muestras y sub – muestras, se colocaban en una estufa de secado durante 72hs donde luego, se volvían a pesar, para determinar su peso en base seca; de ésta manera se obtenía el valor de materia seca (%MS) de cada muestra.

Este valor se utilizó para determinar la cantidad de materia seca disponible (kg MS) en cada cuadrante mediante el valor del peso seco multiplicado por el % MS. Considerando el área de cada cuadrante, se calculó la disponibilidad de materia seca en kilogramos por hectárea (kg MS/ha) (ver figura 7).

3.2.3.2 Procesamiento de imágenes en software para generar ortomosaicos.

Una vez obtenidas las imágenes con el vuelo, estas fueron procesadas en el programa AgisoftMetaShape Professional (Agisoft LLC, 2024). En un primer paso, se importaron a la carpeta con las imágenes al programa. Posteriormente, se realizó un orientado de las fotos, donde las imágenes se alinearon y se establecieron distancias relativas entre ellas.

A continuación, se generó una nube de puntos densa que representa un modelo tridimensional inicial. Una vez obtenida la nube de puntos densa, se procedió a crear una malla, que transformó los puntos en una superficie tridimensional continua, a la cual posteriormente se le añadió textura.

Con el modelo texturizado, se crea un modelo de teselas usando la nube de puntos como fuente de datos. Este proceso divide el modelo en bloques, lo que facilita su manejo y procesamiento. Además, a partir de la nube de puntos, se generó un modelo digital de elevaciones (MDE), que representó la topografía del potrero en cuestión.

Seguidamente, se creó el ortomosaico a partir de este MDE. Este ortomosaico es una imagen georreferenciada que combina todos los procesamientos previos. Una vez

obtenido el ortomosaico, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para cada pixel, utilizando los valores de las bandas rojo e infrarrojo.

Finalmente, el ortomosaico, con los valores de NDVI incorporados, se exportó en formato .tif, se configuró el sistema de coordenadas a UTM 21S y se aseguró que el valor del índice se incluya activando la opción correspondiente.

Siguiendo con el procesamiento de las imágenes, luego de obtener el ortomosaico en formato .tiff el mismo se exportó al programa QGIS (Versión 3.44). En el mismo, se creó una capa ráster con los diferentes cuadrantes de madera delimitados, con ésta capa y con la exportada, a través de la herramienta “cortar ráster por capa de máscara” se obtuvo una capa con los treinta cuadrantes cortados tomando como base la capa con el ortomosaico. Posteriormente, se aplicó la herramienta de “píxeles ráster a puntos”, de ésta manera, los píxeles se convirtieron a diferentes puntos, cada uno de ellos con un valor de NDVI. Cada cuadrante conformado por múltiples puntos, por ende, con la herramienta “unir atributos por localización (resumen) – resúmenes a calcular: media”, se obtuvo el valor de NDVI promedio de cada uno de los cuadrantes. De la tabla de atributos, se extrajo el valor promedio de NDVI correspondiente a cada cuadrante.

3.2.4 Análisis de datos

Los datos se analizaron para los diferentes métodos de medición a través de una regresión lineal, donde se correlacionó el valor de disponibilidad (kg MS/ha) en los cuadrantes con las diferentes medidas registradas a campo (RPM, estimación visual y altura de regla).

Particularmente, para la calibración (NDVI biomasa, altura, RPM) de la estimación realizada mediante el dron, partiendo de los datos obtenidos, se realizó un modelo de regresión lineal simple $y = ax + b$ (donde “a” indica la pendiente y “b” determina la ordenada en el origen).

A nivel de potrero se estimó el NDVI promedio y con la regresión generada en la etapa de calibración se estimó el valor disponibilidad de cada potrero, para integrarlo a la plataforma y tener un valor de stock de forraje promedio en el área de pastoreo para ambos sistemas, contrastándolo con el valor de C-Dax.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Relación entre biomasa y NDVI

4.1.1 Relación biomasa (kg MS/ha) y NDVI

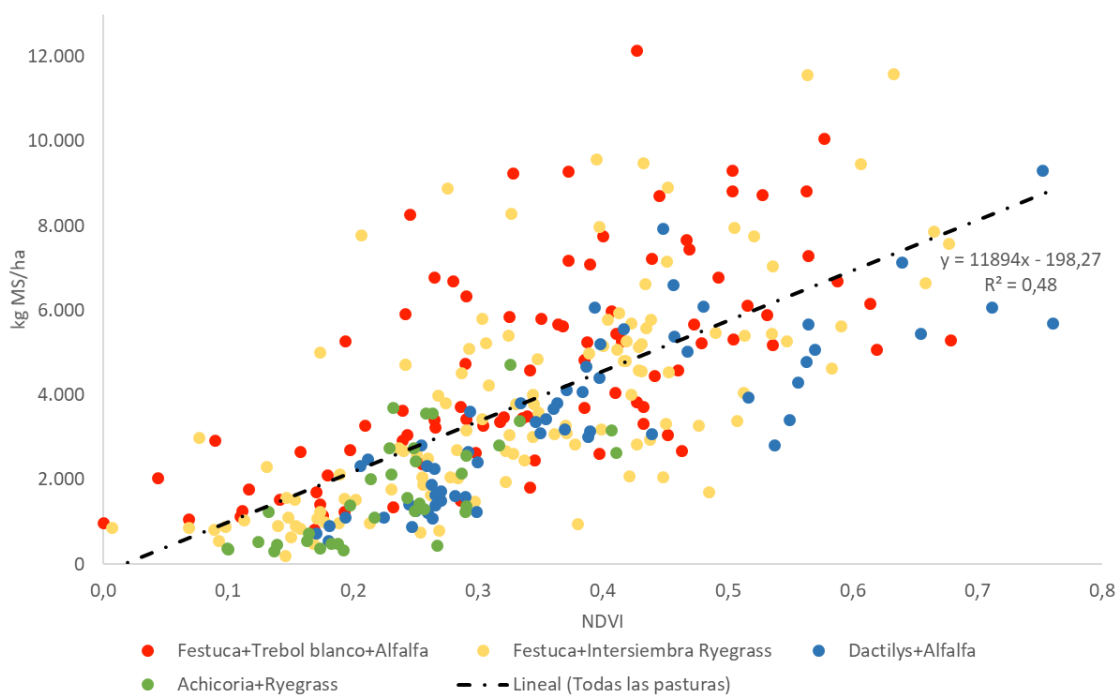
Los valores promedio de NDVI para cada uno de los muestreos (punto 3.2.2.), oscilaron entre -0,20 y 0,56. Se decidió aplicar un factor de corrección de +0.2 a los valores de NDVI, ya que según Marchesi y Castillo (2016), valores negativos indican ausencia de vegetación. De ésta manera, el valor mínimo de NDVI pasó a ser 0, mientras que el valor máximo 0,76. Esto concuerda con lo mencionado por dichos autores, debido a que el valor de NDVI máximo de una planta en buenas condiciones es de 0,7 - 0,8.

Posteriormente, se extrapoló la biomasa presente en cada rectángulo a disponibilidad de forraje/ha para las distintas pasturas (kg MS/ha), y se ajustó una ecuación lineal simple. De esta manera, se obtuvo un R^2 de 0,48 (Figura 7), este valor es inferior al reportado por Artola Guynot de Boismenu y Pérez del Castillo López (2024) quienes registraron un R^2 de 0,60 para una Festuca en otoño en Uruguay, para condiciones similares, pero en estaciones diferentes. Regionalmente, puntualmente en Argentina, Insua et al. (2021) reportaron un R^2 de 0,72 surgido de una regresión exponencial de primer orden, dicho trabajo fue llevado a cabo sobre parcelas de agropiro. Esta diferencia en los valores de R^2 podría explicarse por el tipo de unidades experimentales utilizadas. A diferencia de los estudios mencionados, que se desarrollaron en parcelas experimentales con condiciones más controladas y homogéneas, el presente trabajo se realizó en un entorno con alta variabilidad (potreros más grandes con mayor variabilidad en tipos de suelos, pasturas con especies diferentes, estación de verano, etc.) que representa las condiciones de un sistema de producción en pastoreo, lo que posiblemente introdujo mayor heterogeneidad y fuentes de error en los datos y redujo el ajuste estadístico.

La siguiente figura presenta la relación existente entre la biomasa expresada en kg MS/ha y el NDVI, clasificadas según el tipo de pastura. Cada punto representa una observación individual, es decir, un cuadrante de madera.

Figura 7

Relación NDVI y biomasa (kg MS/ha) para pasturas con diferentes componentes



Se observa una acumulación de biomasa incluso en valores moderados de NDVI (desde 0,3 a 0,45). Esta situación puede explicarse por la composición de las praderas, dominadas por especies de crecimiento invernal. Dado que el relevamiento se llevó a cabo en verano, y bajo condiciones de escasas precipitaciones (ver Figura 2), gran parte de la vegetación se encontraba en estado senescente, con baja actividad fotosintética. Como el NDVI está directamente relacionado con la reflectancia de vegetación verde activa, esta condición redujo sus valores, a pesar de la elevada biomasa total presente. Esta discrepancia ha sido reportada por Di Bella et al. (2004), donde el NDVI tiende a subestimar la biomasa en presencia de material seco o senescente. Por lo tanto, cualquier estimación de biomasa basada exclusivamente en este índice puede estar sujeta a errores según el estado fenológico de la cobertura vegetal.

Se observó que, cuando los valores de NDVI fueron menores a 0,3, los datos de biomasa tendieron a agruparse sobre la línea de tendencia. En cambio, con valores superiores a 0,3, los datos se dispersan y no siguen un patrón claro. Esto coincide con lo mencionado por Insua et al. (2019), quienes sugieren que la efectividad del dron para estimar biomasa es mayor en pasturas que no superen los 3.000 kg MS/ha, ya que por encima de este umbral la precisión de la predicción disminuye significativamente.

Para evaluar el impacto de las distintas pasturas en el ajuste de la regresión, se realizaron modelos lineales específicos para cada una de las especies que componían el uso del suelo del área de plataforma de pastoreo.

Tabla 1

Regresiones según componentes de las pasturas

Pastura	Ecuación	R ²
Festuca+TB+Alfalfa	$y = 13214x$	0,39
Festuca+IS ryegrass	$y = 11671x$	0,47
Dactilys+Alfalfa	$y = 9384,5x$	0,65
Achicoria+Ryegrass	$y = 7762,3x$	0,43

Se encontró que para la pastura de Alfalfa con Dactylis el ajuste obtenido fue superior al resto de las pasturas. Esto puede estar dado principalmente, por la menor proporción de componente invernal que presenta esta pastura respecto al resto. Esto se ve reflejado en el gráfico D del Anexo A, donde se observa que los puntos que corresponden a la pastura de Alfalfa con Dactylis no están tan dispersos como en el caso de Festuca+IS ryegrass, esto en parte genera que haya diferencias entre los ajustes obtenidos para cada pastura.

Paruelo (2008) señala que la capacidad predictiva de la biomasa a través del NDVI se ve afectada por la presencia de material senescente en la pastura. Dado que el estudio se llevó a cabo en la estación de verano, las pasturas con mayor proporción de especies invernales presentaban más biomasa contenida en la fracción senescente, lo que redujo el ajuste de la estimación basada en NDVI. En cambio, la pradera de Alfalfa con Dactylis, con mayor proporción de componente estival, presentó una mayor cantidad de biomasa contenida en la fracción verde, mostró una mejor relación entre NDVI y biomasa, alcanzando un ajuste de $R^2 = 0,65$.

El ajuste obtenido deja en evidencia que el NDVI por sí solo, no es el predictor de la biomasa más adecuado en pasturas para las condiciones de Uruguay, ya que el mismo explicó un 48% de la biomasa disponible; ajuste que se encuentra un poco por debajo de los valores reportados por Montossi et al. (2013); los cuales para praderas cultivadas presentan un ajuste del R^2 de 0,61 estimado con RPM. En el presente trabajo, se pudo observar que para las condiciones en las que se desarrolló, el NDVI fue

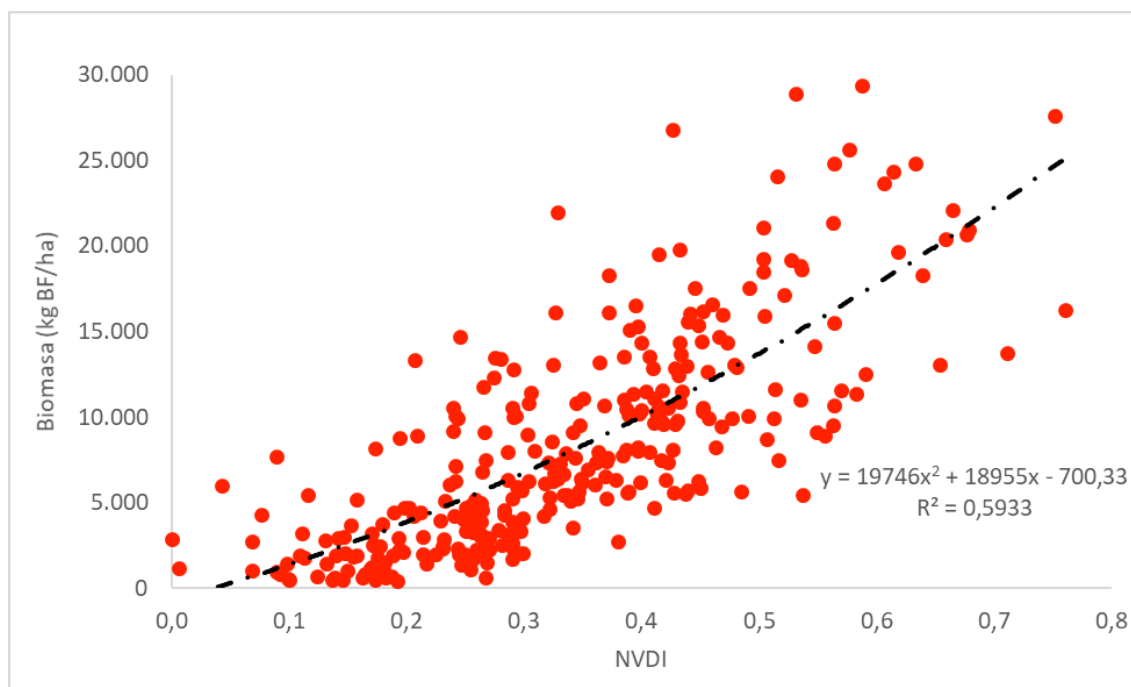
significativamente mejor predictor de la altura de la pastura que de la biomasa presente (ver figura A y B en Anexo A). En este sentido, Schaefer y Lamb (2016) mencionan que el ajuste mejora cuando se combinan los métodos de NDVI con altura de la pastura; a su vez, se menciona como la combinación de éstos métodos, permite estimar de manera más precisa cuando existe una alta proporción de la biomasa contenida en la fracción senescente, ya que la medición de altura si contempla dicha fracción en la estimación.

4.1.2 Relación biomasa (kg BF/ha) y NDVI

Para eliminar el efecto generado que pudo haber existido por las cenizas, debido al verano con un déficit hídrico marcado (Figura 2), tanto minerales propios de las plantas como polvo e impurezas adheridos a las mismas y minimizar el error asociado al uso de datos expresados en base seca, se decidió trabajar con la biomasa en base fresca. Esta elección metodológica buscó quitar dicho efecto. El resultado de correlacionar el NDVI con el material fresco ajustó una regresión polinómica de segundo orden, en este caso relacionando biomasa en base fresca y NDVI.

Figura 8

Relación biomasa fresca (kg/ha) obtenida en el doble muestreo y NDVI



Una vez construido el gráfico, se observó que el R^2 aumentó significativamente, el cual pasó de un valor medio-bajo ($R^2=0,48$) a un ajuste medio alto ($R^2=0,59$).

Este comportamiento coincidió con lo reportado por Waller Bárcena (2020), quien analizó la relación entre la altura del forraje medida con C-Dax y la biomasa (kg/ha), donde obtuvo un mejor ajuste cuando relacionó altura con biomasa fresca, en lugar de seca; aunque en su estudio no se trabajó con NDVI, en ambos casos, lo que se buscó fue explicar que tanto implicaba el pasaje de MS debido a fuentes de error que pueden estar incidiendo en el contenido seco del forraje.

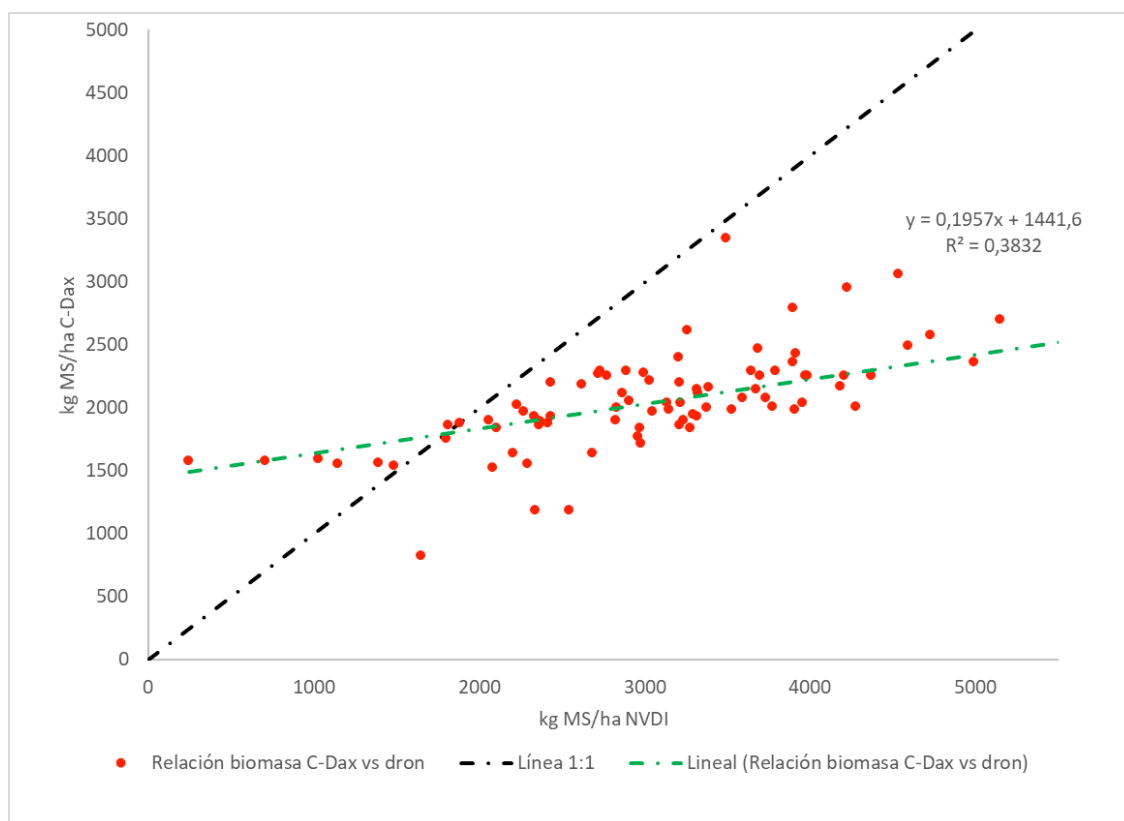
Con este modelo, conociendo el porcentaje de materia seca de las pasturas, se puede transformar fácilmente la biomasa fresca presente (kg BF/ha) en biomasa presente expresada en materia seca (kg MS/ha).

4.2 NDVI como indicador para control del stock

Una vez se obtuvo la ecuación de predicción, se utilizó la misma para poder calcular la biomasa disponible a nivel de potrero, esta biomasa se comparó a través de la construcción de un gráfico con la biomasa a nivel de potrero estimada a partir del C-Dax.

Figura 9

Relación entre biomasa (kg MS/ha) estimada a través de NDVI y estimada a través de C-Dax



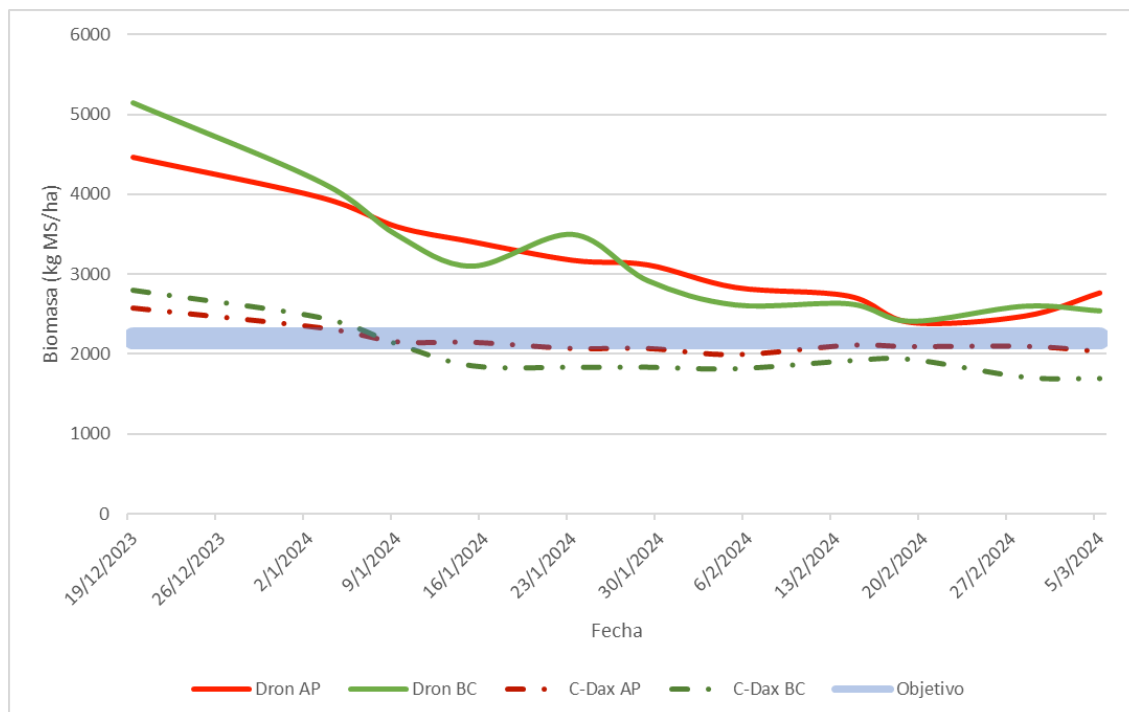
Con el gráfico construido, se calculó el punto de intersección entre la línea de relación 1:1 y la línea de la relación lineal entre biomasa estimada a través del C-Dax y dron igualando ambas ecuaciones, el valor resultante, se encontró en 1792 kg MS/ha; esto quiere decir, que cuando uno de los dos métodos estime 1792 kg MS/ha, el otro también lo hará. En el gráfico, queda de manifiesto que, a valores altos de biomasa (superiores a 1792 kg MS/ha), la estimación a partir del NDVI, sobrestima respecto a la biomasa calculada a partir del C-Dax. Esta diferencia se acentúa en mayor medida con valores más altos de biomasa. En contra puesto, en valores bajos de biomasa (inferiores a 1792 kg MS/ha), el modelo de predicción de biomasa a partir de NDVI, subestima respecto al del C-Dax.

Además de los aspectos mencionados en el punto 4.1.1, otro factor que pudo influir en que la estimación de biomasa a través del NDVI sobreestime, en la mayoría de los casos, respecto a la realizada a través del C-DAX radica en que ésta última herramienta, utiliza una variable que tiene en cuenta tanto la altura como el volumen de la pastura, en la estación de verano y con pasturas mayoritariamente conformadas por especies invernales, hace a la estructura del forraje menos denso, perdiendo turgencia y aumentando la fibrosidad (tallos encañados), reduciendo dicha variable (Susruthan et al., 2025). Esto repercute directamente en la estimación de kg MS/ha, y es una posible explicación por la cual no se hayan logrado obtener valores más altos de biomasa calculado a través del C-DAX.

Posteriormente, se realizó una gráfica en función del tiempo de los valores promedio por hectárea de la plataforma de pastoreo de cada semana para ambos sistemas (AP y BC), tanto del método C-Dax y NDVI, de forma tal de poder comparar ambos métodos.

Figura 10

Evolución del stock (kg MS/ha) en la plataforma de pastoreo según diferentes métodos y stock objetivo



Al obtener la gráfica, se observó y confirmó lo mencionado previamente, donde con valores más cercanos a 1792 kg MS/ha, la diferencia entre ambos métodos se hace menor. Lo contrario pasa cuando la biomasa estimada es más alta, donde la diferencia entre ambas se acentúa, para la totalidad del período, la diferencia promedio entre ambos métodos de estimación, se ubicó alrededor de 1.100 kg MS/ha (ver anexo B). En consecuencia, para emplear el NDVI en el control de stock bajo la metodología 3R, es fundamental considerar la técnica aplicada, dado que las variaciones en los resultados (Figura 10) implican que los valores de stock objetivo deben ajustarse específicamente para cada método.

De forma tal de poder visualizar dos momentos opuestos del experimento en cuanto a las condiciones hídricas, se realizó la comparación visual del NDVI a través de los ortomosaicos generados, dando los siguientes resultados.

Figura 11

Comparación del indicador NDVI correspondiente a toda la plataforma de pastoreo para dos fechas contrastantes



Nota. Elaboración propia a partir de imágenes capturadas por el sensor del dron y procesadas en el software QGIS (versión 3.44).

En la figura se observan dos fechas y situaciones forrajeras contrastantes, donde los valores más bajos, tienden al color rojo, y los valores más altos tienden al color verde, pasando por amarillo en valores medios. En la imagen de la izquierda, correspondiente al 19/12/23, se observan tonalidades verde claro y oscuros mayoritariamente, lo cual refleja una situación de alta disponibilidad forrajera, cuyo NDVI promedio para toda la plataforma de pastoreo es de 0,46. Por otra parte, la imagen de la derecha correspondiente al 19/02/24, se observa la consecuencia de un período estival con escasas precipitaciones.

A diferencia de la otra situación, se aprecian colores anaranjados/rojizos correspondiente a una situación de escasas forrajera, logrando un valor de NDVI aproximado de 0,21.

Otro aspecto a remarcar de la imagen es el detalle que se logra con la utilización del dron para medir NDVI, pudiendo obtener un pixel de 3,2 cm² y en el momento que uno lo considere necesario, a diferencia de la imagen satelital que cuenta con un tamaño de pixel de 100 m² y con una imagen que se obtiene cada 5 días de manera constante, la cual puede ser obstruida por nubes. La utilización del dron permite realizar un ajuste fino a la hora del pastoreo, teniendo en una hectárea 312.500 datos, en contraste con el satélite que solamente se logra obtener 100 datos.

4.3 Implicancias prácticas en el uso del dron

El uso de drones para estimar forraje presenta implicancias prácticas que son relevantes al momento de utilizar este método, especialmente frente al desafío de escalar las mediciones de un potrero a superficies extensas. Previo a la introducción de las nuevas tecnologías de medición, la presupuestación forrajera implicaba recorrer grandes áreas a pie, un método con altos costos de tiempo y mano de obra que, además, difícilmente lograba una representación completa del forraje (Ortega et al., 2023).

Como alternativa, las imágenes satelitales permiten caracterizar grandes superficies sin necesidad de trabajo de campo. Sin embargo, Tiscornia et al. (2019) muestran que su resolución espacial puede omitir variaciones finas dentro de los potreros, variaciones que son cruciales para el manejo del pastoreo en sistemas heterogéneos. En contraste, los drones multiespectrales ofrecen resoluciones de centímetros, permitiendo describir en detalle la estructura del forraje sin recorrer físicamente el campo.

Sin embargo, esta alta resolución genera dos limitaciones prácticas: un enorme volumen de información que debe ser manejado y procesado, y la escasa duración de las baterías, que dificulta la cobertura de áreas medianas o grandes. Una forma de superar esto sería disminuir la resolución (aumentar el tamaño del píxel); esto reduciría la cantidad de datos y aumentaría la eficiencia de las baterías, permitiendo cubrir más área por vuelo.

En cuanto a la confiabilidad diaria, es clave asumir que el valor de "stock objetivo" utilizado por el dron será distinto al utilizado con otros métodos. Aun así, permite un

control efectivo de la disponibilidad de forraje (remanentes y disponibles) y la aplicación de métodos como el de las 3R.

Finalmente, se debe considerar la variabilidad climática anual. Para obtener estimaciones confiables a largo plazo, la situación ideal sería desarrollar nuevas calibraciones adaptadas a las condiciones específicas de cada año, diferenciando, por ejemplo, entre veranos secos, lluviosos o normales.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue evaluar la utilidad de drones equipados con cámaras multiespectrales para la estimación de forraje en pasturas durante el verano. Los resultados mostraron que, si bien el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) por sí solo no es un predictor perfecto de la biomasa total debido a su sensibilidad a la fracción senescente de la pastura, su uso es viable y prometedor bajo ciertas condiciones.

En el estudio realizado se encontró que, la relación entre el NDVI y la biomasa mejora significativamente cuando el ajuste se realiza en biomasa fresca ($R^2=0,59$) (ver figura 8) o cuando se considera el tipo de pastura en esta estación; la predicción a través del NDVI mejora mucho cuando las pasturas presentan una alta proporción de forraje verde activo durante la estación de verano, como es el caso de la pastura de alfalfa con *dactylis*.

La comparación del método del dron con el del C-Dax demostró que la estimación de biomasa puede diferir según el nivel del stock, donde el dron tiende a subestimar en valores bajos y a sobrestimar en valores altos.

Otro aspecto importante a considerar y reconocer es que la implementación práctica de esta tecnología enfrenta desafíos logísticos, como la limitada duración de la batería del dron, que restringe el área de vuelo por sesión y requiere planificación de múltiples vuelos para cubrir grandes extensiones. Además, hay que tener en cuenta el tiempo que se demora en cubrir toda el área, donde en el caso de una plataforma de pastoreo de poca área como la que se trabajó (alrededor de 30 has), realizar todos los vuelos, teniendo dos baterías totales a disposición, lleva alrededor de 7 horas, para recién luego realizar el procesamiento de las imágenes. Este procesamiento de las imágenes multiespectrales generadas constituye una tarea compleja debido al gran volumen de datos involucrados, lo que en muchos casos supera la capacidad de las computadoras utilizadas para su análisis, provocando interrupciones durante el procesamiento.

En conclusión, en el estudio se determinó que, la tecnología de drones equipados con cámaras multiespectrales es una herramienta valiosa para la estimación de forraje en pasturas de Uruguay, sin embargo, para una exitosa implementación, se recomienda calibrar los modelos de predicción según el tipo de pastura y la estación del año. Dado el nivel de detalle alcanzado, el compromiso entre el tiempo requerido y la calidad de la información obtenida es considerable, lo que sugiere la necesidad de avanzar hacia

metodologías más eficientes en términos de tiempo, sin comprometer la utilidad para la toma de decisiones de pastoreo. En ese entendido el dron tiene potencial, pero a los efectos del uso en este trabajo las limitantes fueron mayores.

6. BIBLIOGRAFIA

- Agisoft LCC. (2024). *Agisoft Metashape Professional Edition* (Versión 2.0.2) [Software]. <https://www.agisoftmetashape.com/>
- Aguirre, E. (2019). Productividad ganadera de los establecimientos de carne bovina del Censo General Agropecuario. En *Anuario OPYPA 2019* (pp. 497-510). MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202019/ORIGINAL%202019%20OPYPA%20INTERACTIVO%20agregado%2018-12-2019.pdf>
- Arrillaga López, A., & Píriz Herrera, S. (2021). *Comparación del uso de tres métodos para la estimación de biomasa en el área de la plataforma de pastoreo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/46301>
- Artola Guynot de Boismenu, I., & Pérez del Castillo López, J. M. (2024). *Estimación de biomasa de festuca mediante el uso de drone multiespectral* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Briñón Ghione, M. P., & López Lans, S. (2024). *Evaluación productiva de sistemas pastoriles de producción de leche en estrategias de bajo costo y alta productividad para la estación de invierno* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/47284>
- Canseco, C., Demanet, R., Balocchi, O., Parga, J., Anwandter, V., Abarzúa, A., Teuber, N., & Lopetegui, J. (2007). Determinación de la disponibilidad de materia seca de praderas en pastoreo. En N. Teuber, O. Balocchi & J. Parga (Eds.), *Manejo del pastoreo* (pp. 23-50). Gobierno de Chile; Universidad de la Frontera; Anasac; Universidad Austral de Chile; Cooprinsem. <https://bibliotecadigital.fia.cl/server/api/core/bitstreams/0b65fc50-9283-43a6-8e92-36373c5c898d/content>
- Caraballo Barboza, N. A., & Severi Silva, A. C. (2024). *Estimación de biomasa disponible mediante imágenes multiespectrales adquiridas con un dron* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Servicio de corrección bibliográfica. <http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/view/263/183/5497>
- Chilibroste, P., Battagazzore, G., & Fariña, S. (2024). Productivity versus area: The growth dilemma of the Uruguayan dairy sector. *Agrociencia Uruguay*, 28(NE1), Artículo e1236. <https://doi.org/10.31285/AGRO.28.1236>

- Chilibroste, P., Ibarra, D., Zibil, S., & Laborde, D. (2003). *Proyecto Alimentación Reproducción: Informe final 2002*. Conaprole.
- Di Bella, C. M., Paruelo, J. M., Becerra, J. E., Bacour, C., & Baret, F. (2004). Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5415-5427. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269724>
- Díaz Giraldo, R. A., Álvarez de León, M., & Pérez López, O. (2021). Use of remote sensors to determine forage availability in grazed pastures of *Urochloa humidicola* cv. Llanero in the Colombian Altillanura. *Tropical Grasslands-Forrajeros Tropicales*, 9(3), 376-382. [https://doi.org/10.17138/tgft\(9\)376-382](https://doi.org/10.17138/tgft(9)376-382)
- DJI. (s.f.). *P4 multispectral: Plant intelligence for targeted action*. <https://ag.dji.com/p4-multispectral>
- DJI. (2023). *DJI Ground Station Pro* (Versión 2.0.18) [Software]. <https://www.dji.com/es/ground-station-pro>
- d-maps. (s.f.). *Canelones (Uruguay): Departamento de Canelones*. [Mapa] https://www.d-maps.com/carte.php?num_car=269064&lang=es
- Estrategias de intensificación de sistemas lecheros*. (2024, 18 de octubre). Conaprole; INALE; INIA; Fundación LATU; Universidad de la República; UTEC. https://www.inale.org/wp-content/uploads/2024/10/Jornada-CRS-RTCL_18_10_2024.pdf
- Fariña, S. R., Tuñón, G., Pla, M., & Martínez, R. (2017). *Sistema de pastoreo La Estanzuela: Guía práctica para la implementación de un sistema de pastoreo*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7228/1/bd-115-2017.pdf>
- Fernández, H. H. (2004). *Estimación de la disponibilidad de pasto*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/130-estimacion_9.pdf
- Gil-Zibil, L., Ortega, G., Custodio, D., Loza, C., Briñón, M. P., & Chilibroste, P. (2025). Exploring intensification strategies of pasture-based dairy systems in Uruguay: High-productivity and inputs versus medium-productivity and simpler systems. *Frontiers in Animal Science*, 6, Artículo e1685390. <https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1685390>

- Google. (2024). [Imagen satelital del Centro Regional Sur, Canelones, Uruguay. Mapa]. Recuperado 15 de Abril de 2026, de https://earth.google.com/web/@-34.61300963,-56.21832999,46.52212394a,6490.80326135d,35y,0h,0t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASg0I_____ARAA?authuser=0
- Hammer, S. [schwabenblitz] (s.f.). *Mapa político de Uruguay con los diversos departamentos de Canelones donde se destaca* [Mapa]. 123RF. https://es.123rf.com/photo_11566222_mapa-político-de-uruguay.html
- Haydock, K. P., & Shaw, N. H. (1975). The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 15(76), 663-670. <https://doi.org/10.1071/EA9750663>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Proyecto 10-MIL (Módulos de Intensificación Lechera)*. <https://www.inia.uy/proyectos/proyecto-10-mil-modulos-de-intensificacion-lechera>
- Insua, J. R., Cicore, P. L., Utsumi, S. A., Laplacette, C., Marino, M. A., & Berone, G. D. (2021). *Monitoreo de pasturas con drones*. Universidad Nacional de Mar del Plata. <https://fca.mdp.edu.ar/wp-content/uploads/2023/09/03-IDE-MONITOREO-DE-PASTURAS-CON-DRONES.pdf>
- 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://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0212773>
- Irigoyen, A. (2011). *Presupuestación forrajera*. MGAP; IPA; BID. <https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/filemanager/source/2021/Librillos/pdf/Presupuestaci%C3%B3n%20forrajera.pdf>
- Leborgne, R. (1984). *Antecedentes técnicos y metodología para presupuestación en establecimientos lecheros*. Hemisferio Sur.
- 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.

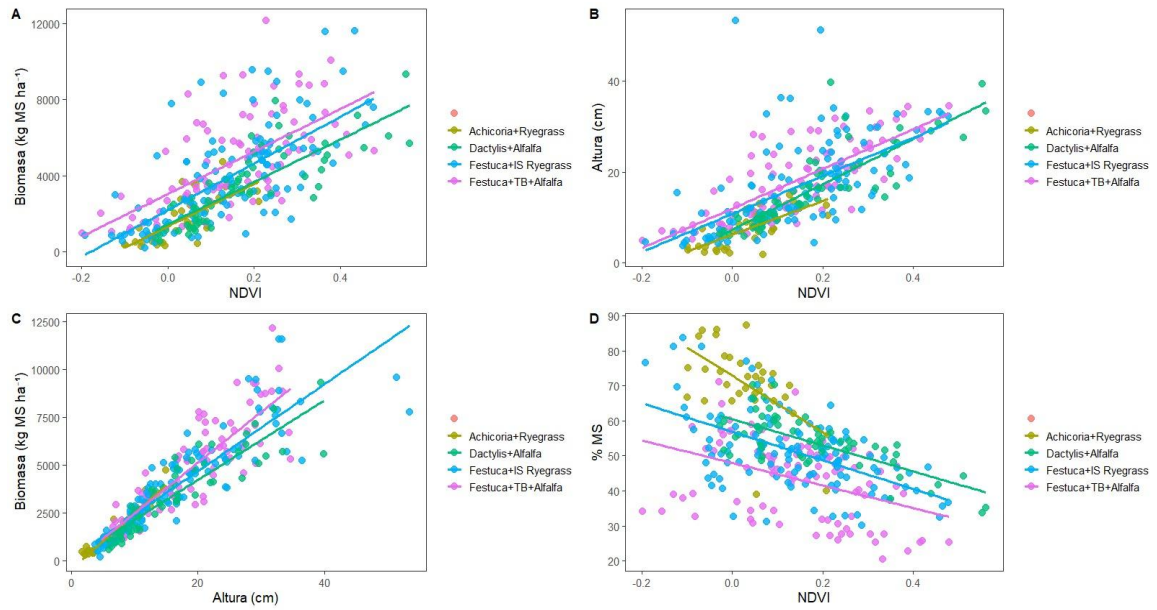
- Malaquín, I., de Torres, M., & Vasallo, M. (2019). Seguimiento forrajero basado en imágenes satelitales: El estudio de caso del sistema ganadero “La Mensualada”. *Revista del Plan Agropecuario*, (172), 44-48.
https://planagropecuario.org.uy/publicaciones/Revista_on_line/Revista_172/files/assets/basic-html/index.html
- Marchesi, C., & Castillo, J. (2016). Índice verde (NDVI), indicador del status nitrogenado del cultivo. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Eds.), *Presentación resultados experimentales de arroz zafra 2015-2016* (pp. 21-24). <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5938/1/Arroz-INIA-agosto-2016-web.pdf>
- Mattera, J., Portillo, J., Beribe, M. J., Pacente, E., Scheneiter, O., Barletta, P., & Gallo, S. (2022, 30 de diciembre). *Estimación de la producción de forraje de pasturas templadas mediante dron con cámara multiespectral*. Engormix.
https://www.engormix.com/lecheria/manejo-pasturas/estimacion-produccion-forraje-pasturas_a51772/
- McCarthy, B., Delaby, L., Pierce, K. M., McCarthy, J., Fleming, C., Brennan, A., & Horan, B., (2016). The multi-year cumulative effects of alternative stocking rate and grazing management practices on pasture productivity and utilization efficiency. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3784-3797.
[https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(16\)00151-X/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(16)00151-X/fulltext)
- Montossi, F., Pravia, M. I., Dighiero, A., Porcile, 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.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7057/1/revista-INIA-34-p.25-29.pdf>
- Ortega, G. (2019). *Aplicación de sistemas de percepción remota para el monitoreo gestión de recursos forrajeros en sistemas pastoriles de producción* [Tesis de Maestría, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/29887>
- Ortega, G., Berberian, N., & Chilbroste, P. (2024). The effects of stocking rate, residual sward height, and forage supplementation on forage production, feeding strategies, and productivity of milking dairy cows. *Frontiers in Animal Science*, 5, Artículo e1319150. <https://doi.org/10.3389/fanim.2024.1319150>

- Ortega, G., Chilibróste, 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>
- Otaño, C., Fariña, S., & Tuñón, G. (2021). Implementación del sistema de pastoreo 3R en predios experimentales y comerciales del Uruguay. *Revista INIA*, (65), 14-17. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15755/1/Revista-INIA-65-Junio-2021-04.pdf>
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, *17*(3), 4-22. https://www.researchgate.net/publication/26595670_La_caracterizacion_funcional_de_ecosistemas_mediante_sensores_remotos
- Pompa-García, M., Sigala-Rodríguez, J. Á., Vivar-Vivar, E. D., Rodríguez-Flores, F. D. J., & Rascón-Solano, J. (2024). Diurnal change of NDVI from UAV in trees of a temperate unavenged forest stand. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *15*(82), 50-68. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i82.1431>
- Pravia, M. I., Montossi, F., Andregnette, B., Invernizzi, G., Ayala, W., Cuadro, R., & Porcile, V. (2013). Resultados y análisis de la encuesta tecnológica realizada a los productores del GIPROCAR II. En F. Montossi (Ed.), *Invernada de precisión: Pasturas, calidad de carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental (GIPROCAR II)* (pp. 7-30). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2559/1/18429280114125310.pdf>
- Pravia, M. I., Montossi, F., Gutiérrez, D., Ayala, W., Andregnette, B., Invernizzi, G., & Porcile, V. (2013). Estimación de la disponibilidad de pasturas y forrajes en predios de GIPROCAR II: Ajuste del "Rising Plate Meter" para las condiciones de Uruguay. En F. Montossi (Ed.), *Invernada de precisión: Pasturas, calidad de carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental (GIPROCAR II)* (pp. 31-67). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2559/1/18429280114125310.pdf>

- Schaefer, M. T., & Lamb, D. W. (2016). A combination of plant NDVI and LiDAR measurements improve the estimation of pasture biomass in tall fescue (*Festuca arundinacea* var. Fletcher). *Remote Sensing*, 8(2), Artículo e109. <https://doi.org/10.3390/rs8020109>
- Schori, F. (2015). Sward surface height estimation with a rising plate meter and the C-Dax Pasturemeter. En A. van den Pol-van Dasselaar, H. F. M. Aarts, A. De Vliegheer, A. Elgersma, D. Reheul, J. A. Reijneveld, J. Verloop, & A. Hopkins (Eds.), *Grassland and forages in high output dairy farming systems* (pp. 310-312). NVWV. https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed_Matter/Proceedings/EGF2015.pdf#page=329
- Serrano, J., Shahidian, S., & Marques da Silva, J. (2018). Monitoring seasonal pasture quality degradation in the mediterranean montado ecosystem: Proximal versus remote sensing. *Water*, 10(10), Artículo e1422. <https://doi.org/10.3390/w10101422>
- Stirling, S. (2021). *Estrategias de intensificación para sistemas lecheros pastoriles en Uruguay: Análisis biofísico y del potencial impacto ambiental* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/34679>
- Susruthan, V., Donaghy, D. J., Kenyon, P. R., Sneddon, N. W., & Cartmill, A. D. (2025). Measuring herbage mass: A review. *Agronomy*, 15(10), Artículo e2264. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102264>
- Tiscornia, G., Baethgen, W., Ruggia, A., Do Carmo, M., & Ceccato, P. (2019). Can we monitor height of native grasslands in Uruguay with Earth observation? *Remote Sensing*, 11(15), Artículo e1801. <https://doi.org/10.3390/rs11151801>
- Unidad GRAS. (2026). *Precipitación y temperaturas extremas - Estación Las Brujas* [Conjunto de datos]. Catálogo de Datos Abiertos. <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/inia-precipitacion-temps-extremas-lb>
- Waller Bárcena, A. C. (2020). *Análisis de metodología para el monitoreo de pasturas en predios comerciales* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/32561>

7. ANEXOS

Anexo A

Relaciones entre diferentes variables

Anexo B

Biomasa obtenida mediante diferentes métodos, biomasa objetivo y diferencia entre los métodos

Fecha	Dron AP	Dron BC	C-Dax AP	C-Dax BC	Objetivo	Diferencia AP	Diferencia BC
19/12/2023	4470	5140	2572	2794	2200	1897	2346
3/1/2024	3961	4147	2327	2451	2200	1634	1696
9/1/2024	3597	3492	2155	2126	2200	1442	1366
15/1/2024	3407	3103	2149	1854	2200	1258	1249
23/1/2024	3174	3499	2072	1836	2200	1102	1663
29/1/2024	3115	2922	2072	1836	2200	1044	1086
5/2/2024	2831	2619	1995	1818	2200	837	801
14/2/2024	2723	2634	2111	1916	2200	612	718
19/2/2024	2390	2416	2095	1933	2200	296	483
28/2/2024	2471	2603	2099	1713	2200	372	891
5/3/2024	2763	2546	2035	1695	2200	728	851