

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CUANTIFICACIÓN DE BIOMASA EN PASTURAS A PARTIR DE
IMÁGENES TOMADAS POR DRONES**

por

**Jonathan Alexander RIBAROLA MÁRQUEZ
Candela VILLANUEVA**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2023**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. Msc. Gastón Notte

Tribunal:

Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. Msc. Gastón Notte

Ing. Msc. PhD Juan Insua

Fecha: 29 de mayo de 2023

Autores:

Jonathan Alexander Ribarola Márquez

Candela Villanueva

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó bajo la supervisión del Ing. Agr. MSc. Gastón Ortega y del Ing. MSc. Gastón Notte a quienes agradecemos por su guía y compartir sus conocimientos, ideas y puntos de vista con respecto a este proyecto.

También agradecemos especialmente a la bachiller Micaela Picco, quien fue de gran ayuda en algunas tareas que se realizaron en la parte práctica de este trabajo.

A todas las personas que de alguna u otra manera participaron en la realización de este trabajo y en especial a nuestras familias y amigos, los cuales con mucho esfuerzo nos apoyaron incondicionalmente hasta alcanzar esta instancia.

Finalmente, le agradecemos a nuestros amigos y compañeros de estudios que directa o indirectamente nos brindaron su apoyo y compañía durante la elaboración de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN	8
SUMMARY.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. HIPÓTESIS.....	11
1.2. OBJETIVO GENERAL	11
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y DE PRODUCCIÓN DE PASTURAS EN URUGUAY	12
2.1.1. Clima y producción de pasturas.....	12
2.2. PLANIFICAR EL USO DEL PASTO.....	14
2.3. HERRAMIENTAS PARA EL MONITOREO DE LAS PASTURAS ...	15
2.3.1. Método directo destructivo.....	15
2.3.2. Métodos indirectos o no destructivos.....	16
2.3.2.1. Estimación visual	16
2.3.2.2. Doble Muestreo	17
2.3.2.3. Regla graduada	17
2.3.2.4. Plato medidor o Rising Plate Meter (RPM)	18
2.3.2.5. Pasturómetro o Rapid pasture meter (C-Dax)	19
2.3.2.6. Estimación de la productividad de biomasa por métodos satelitales y UAV	20
2.3.3. El dron y sus imágenes como nueva herramienta para la agronomía	21
2.3.3.1. Antecedentes del uso de drones para medir biomasa	23
2.3.4. Comparación entre métodos sobre la practicidad de aplicación	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. CONDICIONES EXPERIMENTALES	27
3.1.1. Lugar y periodo experimental	27

3.1.2.	Información meteorológica para el año 2021	27
3.1.3.	Dron.....	29
3.1.4.	Pastura	30
3.2.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	30
3.2.1.	Calibración de regla y RPM	30
3.2.2.	Planificación de vuelo con el dron	31
3.3.	ARREGLO EXPERIMENTAL.....	32
3.3.1.	DETERMINACIONES EN LA PASTURA.....	33
3.4.	EL DRON COMO HERRAMIENTA PARA LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMSA.....	34
3.5.	METODOLOGÍA	37
3.5.1.	Clasificación supervisada de ortomosaicos (CS).....	37
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1.	CALIBRACIÓN DE REGLA Y RPM	40
4.2.	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE ORTOMOSAICOS.....	43
4.3.	VENTAJAS, LIMITANTES Y VISTA A FUTURO	54
5.	CONCLUSIONES	57
6	BIBLIOGRAFÍA.....	58
7.	ANEXOS.....	66

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla	Página
Tabla 1 Tasas de crecimiento (kgMS/ha/d) promedio (30 años) por estación.	14
Tabla 2 Ecuaciones de predicción de biomasa del RPM para distintas pasturas.	19
Tabla 3 Comparación práctica de métodos	25
Tabla 4 Mediciones realizadas en las parcelas.	34
Tabla 5 Memoria ocupada (gigabytes) por fotos promedio para cada altura de vuelo	35
Tabla 6 Cantidad de fotos promedio para cada altura de vuelo	36
Tabla 7 Número de medidas por área.	38
Tabla 8 Altura promedio (cm) de 75 medidas y desvío estándar de regla por parcela y por fecha	41
Tabla 9 Altura promedio (cm) de 75 medidas de RPM por parcela y por fecha	43
Tabla 10 Estimación de la tasa de crecimiento en kg/MS/ha/día y forraje desaparecido en kgMS/ha para cada método de medición, entre las fechas del 13/8 y 24/9	46
Tabla 11 Porcentaje de área ocupada para suelo desnudo y clases de altura de pastura, para CS realizada con regla a alturas de vuelo de 60 y 100 m..	47
Tabla 12 Estimación de la tasa de crecimiento en kg/MS/ha/día y forraje desaparecido en kgMS/ha para cada método de medición, entre las fechas del 13/8 y 24/9.	50
Tabla 13 Porcentaje de área ocupada para suelo desnudo y clases de altura de pastura, para CS realizada con RPM a alturas de vuelo de 60 y 100 m. .	51
Figura	
Figura 1 Ortomosaico en NDVI, infrarrojo, rojo y RGB respectivamente (con parcelas experimentales) a partir de imágenes tomadas en el Centro Regional Sur.	23
Figura 2 Ubicación nacional y regional del área experimental	27
Figura 3 Precipitaciones y temperatura del año 2021 en comparación a serie histórica de INIA Las Brujas	29
Figura 4 Mavic 2 Pro DJI	30

Figura 5 Recorrido del dron sobre el área de estudio	31
Figura 6 Arreglo espacial del ensayo	33
Figura 7 Vista comparativa entre ortomosaico y DEM	35
Figura 8 Ortomosaico de vuelo a 60 m (Á. cubierta= 2,6 ha) sobre ortomosaico de vuelo a 100 m (Á cubierta= 6,5 ha)	36
Figura 9 Vista ampliada del ortomosaico desde parcela al tamaño del pixel	37
Figura 10 Ortomosaico RGB (izquierda) y ortomosaico con clasificación supervisada con las clases de RPM para ese ortomosaico	39
Figura 11 Relación entre altura de regla (cm) y biomasa disponible (kgMS/ha) desde el 21/8 al 18/10 con 150 mediciones	40
Figura 12 Relación entre la altura de RPM y biomasa disponible en kgMS/ha desde el 21/8 al 18/10 con 150 mediciones	42
Figura 13 Relación entre los kg/MS obtenidos a través de la regla (promedio de 75 medidas) y la clasificación supervisada corregida por suelo desnudo, para vuelos de 60 y 100 m de altura	44
Figura 14 Biomasa disponible (kgMS/ha) de la parcela 3, por fecha de medición, estimado con regla (promedio de 75 medidas) y con clasificación supervisada (CS) con altura de vuelo de 60 y 100 m	45
Figura 15 Ortomosaicos y sus respectivas CS con regla para alturas de vuelo de 60 y 100 m	47
Figura 16 Relación entre los kg/MS obtenidos a través del RPM (promedio de 75 medidas) y la CS RPM corregida por SD, para vuelos de 60 y 100 m de altura	48
Figura 17 Producción en kg/MS de la parcela 3, por fecha, medido con RPM (promedio de 75 medidas) y con CS RPM a una altura de vuelo de 60 m y 100 m.	49
Figura 18 Ortomosaicos y sus respectivas CS con RPM para alturas de vuelo de 60 y 100 m	51

RESUMEN

En los sistemas de producción pastoriles, para aumentar la eficiencia tanto de la pastura como del animal, es necesario llevar un sistemático monitoreo del crecimiento y disponibilidad de la biomasa de las pasturas. El dron en estos sistemas puede agilizar e incrementar la información ayudando en la toma de decisiones. Es por ello que este trabajo se propone como objetivo principal, evaluar la medición de altura y estimación de biomasa de pasturas sembradas mediante el análisis de imágenes tomadas por drones. Las evaluaciones se realizaron sobre una pastura de festuca de segundo año que se encontraba en el Centro Regional Sur (CRS) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Uruguay. En el proceso de evaluación se realizaron 4 actividades en simultáneo, se calibro regla y RPM para la pastura bajo estudio, se realizó un análisis de imágenes obtenidas por los drones, así como el desarrollo de una metodología que permita obtener la biomasa a partir de imágenes y datos relevados a campo, y la comparación entre métodos de medición. Los resultados obtenidos para la calibración de altura de regla y RPM con la biomasa disponible, lograron ajustes con un R^2 de 0,5241 y 0,5423 respectivamente.

Se utilizó el dron DJI Mavic 2 Pro, el cual cuenta con una cámara UHD (ultra HD 5472 x 3648) y se realizaron vuelos a 60 y 100 metros de altura para la creación de ortomosaicos. La metodología se basó en tomar alturas de biomasa con regla y RPM en pocos puntos georeferenciados a campo y aplicar una clasificación supervisada (CS) sobre el ortomosaico generado. En cuanto a la relación existente entre la biomasa (kgMS/ha) obtenida con la CS utilizando la regla o RPM y ajustando por el porcentaje de suelo desnudo (SD), en comparación a la biomasa obtenida utilizando 75 medidas de altura de la pastura con regla o RPM, lograron ajustes de R^2 : 0,84 y 0,92 con regla y de R^2 : 0,57 y 0,46 con RPM, para alturas de vuelo de 60 y 100 m respectivamente. Este trabajo también permitió poner en consideración una serie de ventajas y desventajas que implican la utilización de los drones en la actualidad, a partir de lo observado en el desarrollo de la actividad.

Palabras clave: drones, estimación de biomasa, altura de forraje, clasificación supervisada, metodología para la estimación de biomasa

SUMMARY

In pastoral production systems, to increase the efficiency of both the pasture and the animal, it is necessary to systematically monitor pasture growth and availability. The drone in these systems can speed up and increase the amount of information useful for making decisions. For this reason, the main objective of this work is to evaluate the height measurement and biomass estimation of sown pastures through the analysis of images taken by drones. The evaluations were carried out on a second year fescue pasture located at the Centro Regional Sur (CRS) belonging to the Agronomy Faculty of the Universidad de la República, Uruguay. In the evaluation process, 4 activities were carried out simultaneously: calibration of ruler and RPM for the pasture under study, analysis of images obtained by drones, as well as the creation of a methodology to obtain biomass from images and field data (ruler and/or RPM), and the comparison between measurement methods. The results obtained for the calibration of ruler height and RPM with the available biomass, achieved adjustments with an R^2 of 0.5241 and 0.5423 respectively.

The DJI Mavic 2 Pro drone was used, which has a UHD camera (ultra HD 5472 x 3648) and flights were made at 60 and 100 meters for the creation of orthomosaics. It was based on taking biomass heights with ruler and RPM in a few georeferenced points in the field and applying a supervised classification (CS) on the generated orthomosaic. Regarding the relationship between the biomass in (kgMS/ha) obtained with the CS using the ruler or RPM and adjusting for the percentage of bare soil (SD), compared to the biomass obtained using 75 measurements of pasture height with ruler or RPM, they achieved adjustments of R^2 : 0.84 and 0.92 with ruler and of R^2 : 0.57 and 0.46 with RPM, for flight heights of 60 and 100 m respectively. This work also allowed us to consider a series of advantages and disadvantages that involve the use of drones at present, based on what has been observed in the development of the activity.

Keywords: drones, biomass estimation, forage height, supervised classification, biomass estimation methodology

1. INTRODUCCIÓN

La producción animal a nivel mundial, ya sea en el rubro lechero como en el ganadero, ha aumentado en las últimas décadas de forma considerable. En el caso de la lechería, en las últimas tres décadas la producción ha aumentado en más del 59 %, pasando de 530 millones de toneladas de sólidos en 1988 a 843 millones de toneladas en 2018 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], s.f.). Por otro lado, el consumo de carne a nivel mundial ha sido estimulado por diferentes factores, entre ellos el crecimiento demográfico, la urbanización y el incremento de ingresos en países en desarrollo, el cual genera un cambio en el régimen de alimentación de las personas. El continente asiático se posiciona como el principal demandante de productos de origen animal en la última década y se espera un gran crecimiento en la demanda para los próximos años con China siendo el principal país que lo encabeza. (FAO, s.f.).

La actividad agropecuaria es uno de los sectores más importantes de la economía uruguaya. Particularmente, la lechería ha venido creciendo en producción con un promedio anual del 5 % desde el año 2007, representa un 9 % del PBI agropecuario y alcanza una producción total de 2200 millones de litros; el 70 % de esta producción es exportada, posicionando a Uruguay como el séptimo país exportador mundial de leche. En tanto la carne y subproductos para el año 2019 explicaron el 16 % de las exportaciones agropecuarias, que representan el 40 % de las exportaciones totales del país. Para ese año el PBI del sector agropecuario fue del 5,6 % (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2021). Tanto los sistemas lecheros como ganaderos se realizan bajo una fuerte base pastoril, en particular, en la lechería la cosecha directa de pasto representa entre el 48 % y 54 % de la dieta de los animales en el año (Aguerre et al., 2017), mientras que en la ganadería representa más del 90 % de la dieta. Este aspecto remarca la importancia de realizar un uso adecuado del recurso forrajero, ya que es el alimento de menor costo, por lo tanto, la planificación en el corto y largo plazo es fundamental para generar competitividad (Montossi, 2013) y evaluar estrategias de manejo. Para ello es de gran importancia contar con métodos para estimar la disponibilidad de forraje ya que permiten realizar una planificación y evaluar la eficiencia del sistema, así como tomar decisiones estratégicas para el ajuste de carga. Actualmente las herramientas mayormente utilizadas para estimar la biomasa disponible presentan como limitante el tiempo para lograr una buena descripción detallada del potrero. Como alternativa recientemente se ha incorporado el uso de imágenes satelitales, que permiten el monitoreo sobre varias hectáreas. El uso de drones se ha convertido en una herramienta de

mayor interés, ya que permite la automatización de vuelos y cuentan con sensores y cámaras de alta definición y calidad de imagen, para la generación de mapas precisos y de forma frecuente. Estas características hacen que el uso de drones para la medición de biomasa, tengan el potencial de poder solucionar las limitaciones que presentan las herramientas ya existentes. En Uruguay, el uso de drones está surgiendo como una oportunidad para poder monitorear los sistemas pastoriles en diferentes variables de estado. En ese orden, este trabajo se plantea como objetivo, la medición de altura y estimación de biomasa de pasturas sembradas mediante el análisis de imágenes tomadas por drones.

1.1. HIPÓTESIS

- Es posible la cuantificación de biomasa y tasa de crecimiento (TC) a partir de imágenes obtenidas con drones.

- A partir de imágenes obtenidas por drones, es posible observar y cuantificar la distribución espacial de la pastura.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Estimación de altura y biomasa de pasturas sembradas mediante el uso de imágenes tomadas por drones.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1- Calibración del dron Mavic 2 Pro, para estimar biomasa de pasturas sembradas a partir de imágenes.

2- Generación de modelos con información en tres dimensiones (X, Y, Z) de la pastura.

3- A partir de los modelos obtenidos generar mapas que permitan observar la distribución espacial y alturas de la pastura.

4- Estimación de biomasa y porcentaje de suelo desnudo (SD).

5- Comparación de las estimaciones de biomasa entre distintas alturas de vuelo.

6- Estimación de la tasa de crecimiento de la pastura.

7- Estimación del forraje desaparecido.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y DE PRODUCCIÓN DE PASTURAS EN URUGUAY

La superficie total agropecuaria ocupa unas 16.357.000 hectáreas, de las cuales 1.051.200 hectáreas corresponden a praderas artificiales y 441.300 hectáreas a forrajeras anuales, para el año 2020 (DIEA, 2021).

Entre los factores naturales, el suelo y el clima son los que afectan en mayor proporción la producción forrajera en las diferentes regiones del país (Carámbula, 1991), sin embargo, los factores genéticos de las distintas especies también afectan la producción al interactuar en un determinado espacio y tiempo.

2.1.1. Clima y producción de pasturas

Uruguay se encuentra entre latitudes 30°S y 35°S, siendo el único país sudamericano que se encuentra íntegramente en la zona templada. La temperatura media anual es de 17.5 °C. Las lluvias totales anuales varían de 1000 mm para la zona sur, a 1400 mm en la zona noroeste en la frontera con Brasil. En el mes de marzo se observan las mayores precipitaciones en todo el territorio nacional con valores que oscilan entre 90 - 140 mm y las menores precipitaciones se dan en diciembre con valores de 60 - 100 mm. En lo que refiere a humedad relativa el promedio anual oscila entre 70 - 75 %, siendo el mes de julio el mes de mayor humedad con una media de 80% y enero el de menor con una media de 65% (Severova, 1997). Estas características climáticas son muy importantes de tener en cuenta dado que existe una fuerte interacción entre las variaciones climáticas, tipo de suelo y la forma de pastoreo, que estarán afectando la producción de las pasturas (Olmos, 1997). Analizando 70 años de información pluviométrica, Olmos (1993, como se cita en Olmos, 1997) indica que es muy difícil detectar un patrón de precipitación estacional, por lo que el balance hídrico pasa a ser una de las variables más importantes tanto para pasturas cultivadas, que van a determinar su proporción y supervivencia, como para pasturas naturales la presencia de especies de ciclo invernales tipo C3 cuando existen altas probabilidades de sequía, o especies de ciclo estival C4 cuando el balance hídrico es más favorable en el verano para el crecimiento vegetal (Berretta et al., 1990, Castro, 1979, Olmos & Godron, 1990, como se cita en Olmos, 1997).

Las pasturas tienen como objetivo lograr estabilidad en la producción y calidad de forraje, además contribuyen a la reconstrucción de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a través de la incorporación de leguminosas y gramíneas (Perrachón, 2010).

En el año 2013/14 se evaluaron 87 empresas, en los cuales se obtuvo como resultado que en promedio producían unas 10 ton/ha/año y el nivel de forraje cosechado (pasturas + reservas) se encontraba en 3800 kg/MS/ha/año para el 25 % inferior, 4700 kg/MS/ha/año para el 50 % y en 5800 kg/MS/ha/año para el 25 % superior de los tambos evaluados (Chilibroste y Battezzare, 2014). La cosecha de forraje tiene un gran impacto directo en la estructura de alimentación, los costos de alimentación y productividad, por ende, incide en el resultado económico de la empresa. La carga animal es la variable con mayor impacto en la cosecha directa, según los resultados y análisis del Proyecto Producción Competitiva del 2013-2018 mismas cargas de pastoreo, ya sea de plataforma de pastoreo como de vaca masa, pueden generar variabilidad en la cantidad de forraje cosechado (Chilibroste y Battezzare, 2019).

Con el fin de asegurar que la cosecha de forraje sea lo más eficiente posible y poder mantener la producción animal y vegetal estable, se debe tener en cuenta la tasa de crecimiento de la pastura, dicho parámetro permite observar de forma dinámica cómo se comporta la pastura a lo largo de los años. Al expresarse como kilogramos de materia seca por hectárea y por día (kgMS/ha/d) facilita su relación con el consumo de los animales (kgMS/VO/d), parámetro directamente asociado con la producción animal y con el resultado económico (Quinodoz, 2004). Si bien las tasas de crecimiento varían según especie, año, estación, suelos, etc., en Uruguay una gramínea como la festuca (gramínea perenne) tiene tasas de crecimiento menores a otras especies como el raigrás (*Lolium multiflorum*, gramínea anual) (Tabla 1) (García, 2003).

Tabla 1

Tasas de crecimiento (kgMS/ha/d) promedio (30 años) por estación.

Estación	Festuca	Raigrás
Otoño	18	25
Invierno	15	40
Primavera	45	60
Verano	20	-

Nota. Adaptado de García (2003).

2.2. PLANIFICAR EL USO DEL PASTO

Durante la última década se ha dado un proceso de intensificación de los sistemas de producción. En el período correspondiente desde el ejercicio 2012/13 al ejercicio 2019/20 se observa una disminución del área lechera en un 6,1 % y una reducción del rodeo lechero del 6,7 %, pero se mantiene la producción (DIEA, 2021). Dada la disminución de áreas ganaderas por la agricultura, la ganadería se intensificó a través de la mejora en la genética, sanidad y en lo que refiere a la alimentación, en un mejor manejo del pasto en conjunto con la implementación de la suplementación a animales en pastoreo hasta el engorde en confinamiento, con el fin de acortar los ciclos de producción (Carrquiry, 2013). Mondelli (2014) también coincide con este hecho, mencionando que los cambios generados en los últimos 10 años, principalmente por el recurso tierra, han estado relacionados al desarrollo de la agricultura e intensificación de la producción agropecuaria determinando cambios en los sistemas de producción ganaderos.

Cuando se apunta a altos niveles de productividad por hectárea es necesario utilizar regularmente algún método de presupuestación, aunque por lo general se utilizan cuando los niveles de producción de las pasturas son menores a los esperados (sequía), y ya es tarde para planificar (Galli, 2004). Las mediciones de disponibilidad son esenciales para determinar la carga y ganancia animal de un sistema productivo, la productividad de las pasturas, y para evaluar distintas estrategias de manejo de pasturas y animales (Mannetje, 2000). Un manejo del pastoreo eficiente no solo implica producir más pasto, sino también requiere de una alta utilización del mismo. Para ello

es necesario ajustar la demanda de pasto (pastoreo o cosecha) con la tasa de crecimiento de las pasturas (Insua & Utsumi, 2017).

2.3. HERRAMIENTAS PARA EL MONITOREO DE LAS PASTURAS

La estimación de la disponibilidad de forraje permite realizar un uso más racional y eficiente de los recursos productivos (Sciaretta, 2012). Es necesario contar con métodos de medición que sean precisos, ya que cualquier error en la misma implica pérdidas productivas y económicas para el sistema de producción (Sanderson et al., 2001). Países como Nueva Zelanda en donde sus sistemas de producción son netamente pastoriles, solamente el 20 % de los productores utilizan tecnologías de medición de biomasa forrajera (Clark et al., 2006, como se cita en Ortega, 2019). En cambio, para Uruguay una inmensa cantidad de productores no realizan mediciones, una encuesta realizada por el GIPROCAR II, sólo el 42 % de los productores estiman la cantidad de materia seca disponible esencialmente de forma “visual” para gestionar la base forrajera (Montossi, 2013). Para el caso de sistemas más intensivos como los tambos, existe escasa información sobre el método de monitoreo de las bases forrajeras los cuales no cuentan con un método objetivo, racional y estandarizado. (Cooperativa Nacional de Productores de Leche [Conaprole], 2009).

En la actualidad existen varias herramientas y/o métodos para la estimación de biomasa, los cuales se detallarán a continuación.

2.3.1. Método directo destructivo

El método de corte directo se aplica como método de referencia, ya que es un método preciso (Cangiano, 1997), sin embargo, requiere una gran cantidad de muestras, tiempo de procesamiento y trabajo (Sciaretta, 2012). Por lo tanto, permite realizar estimaciones en pequeñas parcelas, pero se torna impracticable para su aplicación a mayor escala. Se realiza de forma manual y consiste en cortes del material vegetal dentro de un cuadrante de área conocida. Los lugares de cortes deben ser elegidos al azar, siendo representativos de todo el potrero y no deben poseer malezas leñosas. El material cortado se pesa en verde, seguidamente se coloca en bolsas de papel y se secan en una estufa de aire forzado a 100 °C por 24 horas o 60 °C por 48 horas para finalmente pesar este material en seco en una balanza de precisión (Montossi, 2013).

2.3.2. Métodos indirectos o no destructivos

Los métodos indirectos o no destructivos se basan en estimaciones visuales, medición de altura y/o densidad de forraje. Requieren en ocasiones el uso de cortes para poder realizar calibraciones continuas y obtener ecuaciones de regresión actualizadas y de mayor ajuste para cada situación. Son métodos más prácticos y rápidos que los métodos directos, ya que no requieren continuamente del corte (para calibrar), recolección de muestras y pesajes del forraje. Como desventaja son menos precisos que el corte directo y requieren calibración de las herramientas, así como entrenamiento del personal que utiliza estas técnicas (Montossi, 2013). Según Reyes et al. (2017), los métodos pueden ser clasificados en invasivos o destructivos cuando requieren contacto directo con la pastura y no invasivos.

Un estudio realizado en Nueva Zelanda encontró que los métodos indirectos, regla graduada, plato medidor y medidor de capacitancia, pueden tener un error en el rango del 26 al 33 % (Sanderson et al., 2001). A pesar de ello, han sido estudiados para poder mejorar la capacidad de predicción, estimar tasas de crecimiento, estimar disponibilidad de forraje, cuantificar las diferencias entre ellos (a nivel de potrero y plataforma de pastoreo), así como también reducir el tiempo y el trabajo para lograr las determinaciones (Ortega, 2019). Algunos de ellos serán descritos a continuación:

2.3.2.1. Estimación visual

El método de estimación visual se basa en que el evaluador debe valorar e integrar la densidad, cobertura, contenido de MS, relación tallo/hoja, proporción vivo/muerto y composición botánica para poder hacer una composición integral de los distintos factores (Sciaretta, 2012). Según Tucker (1980), como se cita en Montossi (2013) este método es sensible a las variaciones en los observadores. La ventaja que presenta es que se realiza rápidamente sin necesidad de un equipamiento especial, pero para realizar una estimación fiable es necesario que sea un observador entrenado ya que, sin él, los estimadores tienden a sobrestimar los efectos de la altura y subestimar los efectos de la densidad (Fernández, 2005). Por otra parte, existen dificultades para estimar con este método cuando los volúmenes de pasto son menores, como en otoño o invierno, y justamente en esa época del año la oferta forrajera suele ser crucial para la producción ganadera (Millapán, 2006; Sciaretta, 2012). Quizás es el método más empleado en los establecimientos dado su facilidad de aplicación, donde muchas veces no es realizado por un operario entrenado, lo que repercute en no contemplar las condiciones que expresen el potencial animal y de los recursos forrajeros.

2.3.2.2. Doble Muestreo

Como alternativa al método directo se utiliza el método de doble muestreo desarrollado por Haydock y Shaw (1975), que en principio se realiza un muestreo destructivo para luego desarrollar una relación predictiva con algún método indirecto. Es una metodología subjetiva, dado que el observador debe ser capaz de relacionar lo que está observando con estándares que han sido fijados de manera visual previamente. El éxito de esta técnica depende de que el observador mantenga los criterios y gane experiencia con la práctica frecuente de esta técnica (Moliterno, 1997). Luego de calibrar las ecuaciones predictivas de disponibilidad de forraje con su medida indirecta, no es necesario seguir usando los muestreos destructivos a no ser que sea para realizar recalibraciones del método utilizado (Ganguli et al., 2000). Sin embargo, estas estimaciones generalmente se asocian con un moderado a alto error experimental, porque las relaciones entre la producción y variables de pasto dependen de numerosos factores que pueden interactuar mutuamente (Montossi, 2013). A pesar de esto, varios autores reportan que es el método de determinación más preciso, aunque tiene una gran demanda de tiempo y trabajo (Sciaretta, 2012).

2.3.2.3. Regla graduada

El método de la regla graduada se basa en medir cuantitativamente y de forma objetiva la disponibilidad de forraje a través de la altura (Fernández, 2005). Dado que existe una estrecha relación entre la altura y la disponibilidad de forraje, se han desarrollado una serie de ecuaciones que integran estas dos variables. Las mismas se calculan a través de una regresión lineal entre la biomasa cortada en un área conocida y el promedio de alturas de esa biomasa (Montossi, 2013). Esta herramienta permite estimar la disponibilidad de forraje tanto en pre como en post pastoreo, es de sencilla aplicación y de fácil aprendizaje. Es una técnica de muy bajo costo y permite su utilización en diferentes situaciones como en campo natural o pasturas sembradas (Montossi et al., 2013). Como desventajas, las relaciones de las ecuaciones no pueden ser extrapoladas a regiones, condiciones o pasturas diferentes a las cuales fueron calculadas (Montossi, 2013) dado que la relación altura/biomasa no son universales ya que es afectada por varios factores como, especies vegetales y proporción de las mismas en el total de la pastura, composición morfológica, estructura vertical, densidad y estado fisiológico de las especies que componen el tapiz (Montossi et al., 2013). La principal desventaja es que las mediciones pueden estar influenciadas por el observador dado que depende del número de medidas que el mismo registre en la parcela, y la forma en la que son tomadas las medidas como la altura y

ángulo. Este método tampoco permite tomar las variaciones que existen por la densidad de la pastura (Millapán, 2006).

En Uruguay mediante este método, se obtuvieron valores de correlación (R^2) para pasturas gramíneas entre 0,54 a 0,81 en avena para el período otoño invierno, entre 0,63 y 0,88 en raigrás para el período otoño-invierno-primavera y entre 0,72 y 0,85 en festuca para el período otoño-invierno-primavera, en pre y post pastoreo respectivamente. Para leguminosas las correlaciones encontradas fueron entre 0,63 y 0,69 en trébol blanco, 0,67 en trébol rojo, 0,54 lotus El Rincón y 0,88 en lotus Maku (Montossi et al., 2013). En el año 2019, Garrido realizó una calibración de la regla graduada en el CRS (Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía), para las especies dactylis, alfalfa y una mezcla de avena/raigrás, dónde lograron las ecuaciones de estimación de biomasa total para cada especie y una general, concluyendo que no se encontraron diferencias entre ellas, siendo posible utilizar cualquiera de ellas. La ecuación de estimación de biomasa total genérica se conformó por 295 muestras, logrando un ajuste de 0,41 ($R^2=0,41$) presentada como $\text{kgMS/ha} = 1082,2 + 71,15x$.

2.3.2.4. Plato medidor o Rising Plate Meter (RPM)

El plato medidor (RPM por sus siglas en inglés) es un instrumento que permite estimar, a través de ecuaciones, la altura comprimida de la pastura también llamada altura aparente o densidad aparente, dado que integra en una única medida el valor de la altura y densidad del forraje (Michalk & Herbert, 1977). Estas ecuaciones tienen que ser calibradas para cada tipo de pastura y ambiente si se quiere lograr una correcta predicción (Sanderson et al., 2001). Para Uruguay se generaron ecuaciones de regresión que validaron el uso de los RPM en los distintos tipos de pasturas del Uruguay. Como resultado se obtuvieron las siguientes ecuaciones (Tabla 2) que se destacan por su coeficiente de determinación medios a altos (R^2 0,61 a 0,81) (Montossi, 2013). A su vez, se generaron ecuaciones para las 13 opciones de pasturas permanentes, siendo de relevancia para este trabajo, el recurso festuca que resultó con la ecuación $\text{kgMS/ha} = 87.14 + 118.72 \times \text{Avg}$ a partir de 130 mediciones en distintos predios, estación, estado fenológico y manejo.

Tabla 2

Ecuaciones de predicción de biomasa del RPM para distintas pasturas.

Recurso	Ecuación (kgMS/ha)	R²	n
Praderas permanentes	149.89 + 113.90 x Avg	0,614	1345
Verdeos de inviernos	132.00 + 100.35 x Avg	0,638	95
Verdeos de verano	670.73 + 99.98 x Avg	0,812	49

Nota. Adaptado de Montossi (2013).

Como ventaja, el uso del RPM permite reducir la variación entre operarios y aumentar el número de medidas por potreros, logrando así una mayor descripción de la heterogeneidad de la pastura. Como limitante al igual que la regla, presenta dificultades para aplicarlo en áreas extensas de producción, dado el gran esfuerzo físico necesario y es altamente demandante de tiempo para tener una descripción detallada del espacio (Ortega, 2019).

2.3.2.5. Pasturómetro o Rapid pasture meter (C-Dax)

El pasturómetro (C-Dax) desarrollado en Nueva Zelanda, es un dispositivo electrónico que se acopla a un cuatriciclo para ser remolcado, operando a velocidades de hasta 20 km/h. Equipado con 18 haces de luz espaciados a 20 mm, toma 200 medidas de altura por segundo y luego son promediadas para que el software interno las traduzca en un valor de biomasa (kg MS/ha) a través de una ecuación calibrada (C-Dax, s.f.) (ver Anexo A). La utilización de herramientas como el C-Dax reduce la carga de trabajo considerablemente si las medidas son tomadas de forma correcta. Una experiencia en Suiza demostró que el tiempo de medición se puede reducir en aproximadamente $\frac{1}{6}$ en comparación al uso del RPM (Schori, 2015). Como limitante presenta la necesidad de una alta inversión inicial en comparación a los otros métodos de medición de pasturas y es necesario un vehículo para remolcar el dispositivo (López & Sosa, 2019). Rennie et al. (2009) estudiaron en el norte de Nueva Zelanda el efecto de la localidad y estación del año en la utilización del C-Dax, en una pastura compuesta por raigrás que dominaba en los meses de agosto a diciembre, con un contenido creciente en el resto de los meses de Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*). Como resultado de este trabajo reportaron diferencias de 1000 kgMS/ha durante la estación de verano, y 500 kgMS/ha en la estación de primavera utilizando la ecuación de origen en comparación con una calibrada localmente. A nivel nacional, Waller (2020)

realizó una determinación de la precisión del sensor lumínico del C-Dax para estimar biomasa de las pasturas, el mismo se desarrolló en los tambos de INIA “La Estanzuela” y en el Centro Regional Sur (CRS), sobre pasturas de avena y raigrás (*Avena bizantina* + *Lolium multiflorum*), alfalfa y cebadilla (*Medicago sativa* + *Bromus catharticus*), dactylis y trébol blanco (*Dactylis glomerata* + *Trifolium repens*). Como resultados se obtuvo que la relación entre la biomasa seca y la altura medida por el C-Dax comprendieron un rango de $R^2 = 0,10 - 0,93$, con un promedio de $R^2 = 0,4$ dependiendo del tipo de pastura, época y edad. Se menciona que el C-Dax presenta problemas para estimar la biomasa cuando ésta se encuentra seca, situación que puede ocurrir cuando se realizan frecuentemente pastoreos laxos o se deja acumular demasiado volumen de pasto y comienza a aparecer material senescente. Por otro lado, la festuca mostró una relación diferente entre la altura y biomasa disponible obteniéndose un intercepto más alto, lo que podría estar dado por una mayor densidad vertical en este tipo de pastura, por lo que sugiere eliminar la festuca de la ecuación para mejorar la precisión de predicción, lo que resulta en una disminución del 10% del error. Garrido (2019) a su vez realizó un estudio de comparación entre la ecuación proporcionada por el fabricante del C-Dax con la calibración local, y con la regla graduada. Se llevó a cabo también en el CRS sobre 3 pasturas, avena y raigrás, dactylis y alfalfa. Concluyó que no hay diferencia significativa entre las distintas ecuaciones, ya sea entre una ecuación general y las ecuaciones específicas para cada recurso, así como la calibración del fabricante con la local.

2.3.2.6. Estimación de la productividad de biomasa por métodos satelitales y UAV

Los sensores remotos (satelitales) se basan en índices espectrales que captan la actividad fotosintética de la vegetación o irradiancia espectral reflejada por la cubierta verde de las pasturas. El Índice de Vegetación Normalizado (IVN) es el más usado, y es calculado a partir de la reflectancia en las porciones roja (R) e infrarroja (IR) del espectro electromagnético (Baeza et al., 2011). Un alto índice significa una mayor absorción de radiación solar y una mayor producción forrajera (Sciaretta, 2012). Para obtener la información de disponibilidad de forraje es necesario utilizar modelos calibrados que lo relacionen con los índices (Baeza et al., 2011). Presentan la ventaja que permite evaluar la producción de biomasa en áreas extensas y como desventajas, los sensores más utilizados presentan resoluciones espaciales de 5 ha, dificultando su medición en áreas de menor tamaño. Hoy día es posible contar con mejores resoluciones espaciales de estos sensores tal es el caso de Sentinel-2 (10 m²) que presenta una frecuencia de registros de 5 a

10 días, lo que incrementa la probabilidad de pérdida de los mismos por interferencia de nubes (Ortega, 2019) en comparación con MODIS. Si bien la disponibilidad de datos satelitales presenta aún algunas restricciones metodológicas y su aplicabilidad en predios pequeños resulta limitada (Piñeiro et al., 2001; Lyons, 2007, como se cita en Garrido, 2019), el uso de imágenes satelitales tiene un potencial muy importante, ya que cada vez se presentan mayores avances tecnológicos asociados a la resolución espacial y temporal (Millapán, 2006). En Uruguay existen varias plataformas de seguimiento forrajero que surgen de distintos convenios como el del Instituto Plan Agropecuario con el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección convenio LART-IFEVA y Facultad de Ciencias, como Conaprole junto a otras instituciones públicas de Uruguay (Facultad de Agronomía, Facultad de Ciencias y ANII) y Argentina (LART), así como también INIA a través del proyecto INIA-FPTA con LART donde se han planteado como objetivo disponer de información al productor para la toma de decisiones a nivel predial (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.b.).

Una alternativa para obtener información similar a la proporcionada por los sensores satelitales son los UAV, los cuales son vehículos aéreos no tripulados (del inglés UAV unmanned aerial vehicle) o también llamados drones, que pueden ser conducidos a distancia por un control remoto para utilizarlos en diversas actividades. Generalmente están equipados con una cámara u otras herramientas según el tipo de función para el cual está diseñado (Martínez & Reyes, 2020). Teniendo en cuenta las funcionalidades que ofrecen, presentan un bajo costo lo que permitieron que se introdujera en el mercado en distintos sectores económicos, presentando enormes ventajas y avances para diversas industrias (Martínez & Reyes, 2020), como por ejemplo la agropecuaria.

2.3.3. El dron y sus imágenes como nueva herramienta para la agronomía

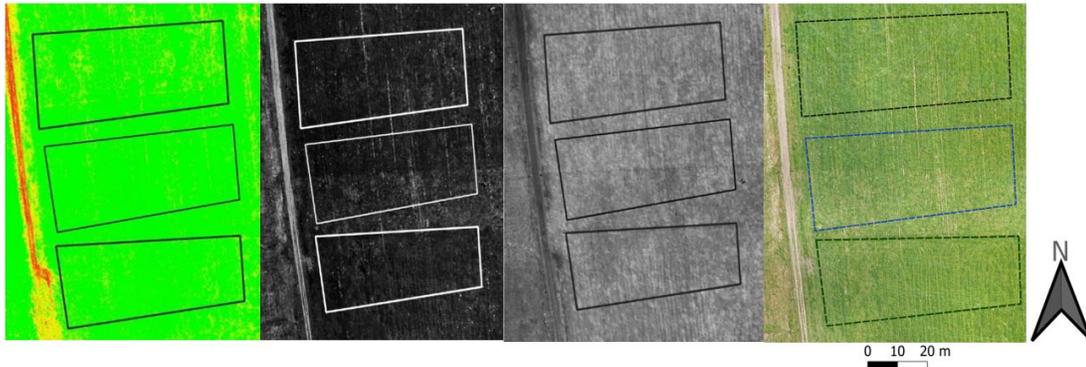
La utilización de drones en la agronomía ha ido aumentando en los últimos años, según Ottos (2014), como se cita en Krishna (2018), el dron permite (entre otras cosas) obtener imágenes del terreno, realizar mapas y poder detectar problemas de los cultivos lo cual tiene múltiples aplicaciones. El procesamiento de estas imágenes permite generar modelos digitales de elevación (DEM), modelos digitales del terreno (DTM) y ortomosaicos (imagen generada a partir de una colección de fotografías específicamente ordenadas), logrando así cuantificar las características de la superficie del suelo. Son una alternativa potencial dado su bajo costo de operación, su alta resolución espacial - temporal, flexibilidad de despliegue, capacidad de cubrir grandes

áreas y versatilidad explicada por la variedad de tipos de drones, sensores y cámaras con las que están compuestos, permitiendo que se adapten no sólo a los cultivos, sino también para el ganado, pasturas, montes, etc. (Zhang & Kovacs, 2012, Hunt et al., 2015, Hardin & Hardin, 2005, Laliberte et al., 2010, Laliberte et al., 2011a, Laliberte et al., 2011b, como se cita en Rowbottom, 2015). Las imágenes obtenidas con drones tienen una mayor resolución espacial y calidad de imagen en comparación a los satélites, debido a la calidad en los sensores utilizados y la distancia a la que se encuentran de la tierra ya que generalmente se vuelan a pocos metros del suelo (20-50 m) y permiten independizar la frecuencia y momento de la toma de registros, logrando disminuir la interferencia de las condiciones meteorológicas (Batistoti et al., 2019; Rueda-Ayala et al., 2019). Estas características hacen que el uso de los drones permita superar aquellas limitaciones que poseen las plataformas satelitales, lo que podría ayudar a adoptar métodos de estimación de biomasa (Rowbottom, 2015).

El uso de drones para relevamiento de pasturas bajo pastoreo es un tema en estudio y de gran interés, permite hacer relevamientos de áreas de aproximadamente 10 ha con gran precisión, así como crear modelos 3D del área, identificando altura, estado y composición de la vegetación y en comparación con métodos convencionales de estimación de biomasa (regla y/o RPM) permite obtener un mayor número de observaciones logrando registrar toda la variación espacial, ofreciendo información muy útil acerca del comportamiento de pastoreo de los animales y de su impacto en la vegetación (Michez et al., 2020). Algunos drones principalmente agrícolas permiten obtener imágenes del infrarrojo lejano (NIR), del rojo, logrando así imágenes en NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada o normalized difference vegetation index según sus siglas en inglés) además de RGB (Figura 1) que facilitan la identificación de deficiencias nutricionales, estrés vegetativo y enfermedades.

Figura 1

Ortomosaico en NDVI, infrarrojo, rojo y RGB respectivamente (con parcelas experimentales) a partir de imágenes tomadas en el Centro Regional Sur.



La alta resolución utilizada permite una mejor estimación de la disponibilidad y cobertura de la pastura a nivel de potrero y no se esperan variaciones entre operarios, debido a la automatización del recorrido aéreo durante el monitoreo (Insua & Utsumi, 2017). Esta herramienta también presenta la ventaja de que un mismo operario puede manejar más de un dron a la vez y dependiendo del tipo de dron es la autonomía de distancia que permite operar, logrando monitorear a distancias mayores de 7 km, significando una reducción importante en los costos y la mano de obra necesaria para la gestión del forraje en los sistemas de producción. En contraparte, como desventajas, Puerta (2015), como se cita en Ruales (2018), hace referencia a los problemas que pueden existir en la interferencia de señal entre el dron y el control remoto que tiene el operario, también destaca que se debe tener en cuenta las limitaciones meteorológicas para los vuelos, así como la limitada capacidad de vuelo dado la duración de las baterías en la mayoría de drones.

2.3.3.1. Antecedentes del uso de drones para medir biomasa

Cada vez más se utilizan drones para proporcionar información 3D, así como para describir las condiciones físicas de las pasturas con el uso de la información espectral. En ese sentido se realizó un estudio en Gembloux (Bélgica) sobre pasturas de *Lolium perenne* (raigrás) y *Trifolium repens* (trébol blanco) para evaluar la altura de la pastura y la biomasa aérea con un dron octocóptero (de 8 motores) equipado con una cámara RGB estándar de alta resolución (20 MP, Sony RX 100, distancia focal de 8,8 mm) y una cámara multiespectral (Parrot Sequoia), con vuelos a 50 metros de altura. La altura del pasto proporcionada por los drones mostró una buena correlación ($R^2= 0,62$)

con un conjunto de datos de referencia de detección y medición de luz terrestre (LiDAR). El enfoque mixto que combina la altura con los datos espectrales (reflectancia multiespectral / índices de vegetación) fue el que mejor se desempeñó ($R^2= 0,49$), por lo que se alcanzó una calidad comparable a la de herramientas de monitoreo de biomasa de pastos en el campo no destructivas más convencionales como la regla, RPM y estimación visual (Michez et al., 2019). En 2019, Batistoti et al. estimaron la altura y biomasa disponible en pasturas brasileñas en la zona de Mato Grosso do Sul, mediante imágenes tomadas por el dron Phantom 4 advance a 50 m de altura , estimaron la biomasa y altura de la pastura a través de la diferencia entre el DTM, generado a partir de 30 puntos georeferenciados por unidad experimental por un RTK (Real Time Kinematic) e interpolados por el método de interpolación triangular irregular (TIN), y el DEM generado a partir del software del dron. Por otro lado, una experiencia en un tambo robótico de la estación experimental Kellogg Biological Station (KBS), perteneciente a la Universidad estatal de Michigan, durante la primavera-verano del 2016 utilizaron un Microdrone md4-1000 equipado con cámaras multiespectrales (Micasence), para estimar la producción de forraje en pasturas de raigrás y festuca. La estimación se realizó con los valores de NDVI convertidos a kgMS/ha de pastura disponible a partir del algoritmo desarrollado durante la calibración con corte directo de parcelas geo-referenciadas. El NDVI estuvo muy relacionado a los kgMS de la pastura ($R^2 = 0,8$, $n=72$). Las estimaciones con dron fueron comparadas con el método de regla graduada y el pasturómetro (C-Dax) donde se obtuvo como resultado que las diferencias promedio fueron menores a 310 kg MS/ha. Solo un 11% de las estimaciones con el dron se diferenciaron en más de ± 500 kg MS, de las cuales la mayoría pertenecían a situaciones de post-pastoreo (baja disponibilidad) con mayor porcentaje de material senescente. Esto se explica porque el NDVI registrado por el dron solo considera la cantidad de tejido vivo (verde) mientras que la altura del C-Dax no discrimina entre material vivo y muerto (Insua & Utsumi, 2017).

A nivel nacional, existen pocos trabajos donde se estudie y especifique la metodología de trabajo de investigación con drones. En 2018, Rodríguez y Triñanes, evaluaron la posibilidad de estimar la altura de la pastura a través de los modelos digitales generados a partir de fotos tomadas por dron. Los resultados fueron inconcluyentes, generalmente el dron sobreestimaba la altura comparada con la regla (promedio por parcela). Al comparar dos alturas (20 y 30 m), no se pudieron observar diferencias, ya que ambos presentaron problemas para estimar la altura, sobre y subestimando en distintos casos, sin algún patrón aparente. Concluyeron que los drones tienen gran potencial para la generación de modelos digitales de la vegetación, y se debe seguir

trabajando para lograr una metodología eficaz para su implementación. Cabe destacar que el dron utilizado presentaba limitantes, como el patrón de vuelo y la cámara utilizada (8MP), la cual fue colocada en el dron sin autoestabilizador que asegurara calidad de imágenes.

2.3.4. Comparación entre métodos sobre la practicidad de aplicación

En la actualidad el C-Dax se destaca como el método que permite obtener información de forma rápida con mínimo tiempo de trabajo e independientemente de la persona a cargo de las mediciones (Cuadro No. 3).

Tabla 3

Comparación práctica de métodos

Métodos	Doble muestreo	RPM	Regla graduada	Estimación visual	C-Dax	Corte	Dron
Tiempo de trabajo	+++	++	++	++	+	++++	+
Calibración	++	++	+	+	+	-	+
Independencia del criterio del medidor	++	+++	+++	+	++++	++	++++
Equipamiento	+	++	+	-	+++	++	+++
Rapidez en obtener información	++	++++	+++	++++	++++	+	+++
Capacitación	++	+	+	+++	+	+	++++

Nota. Adaptado de López y Sosa (2019).

Es relevante para los sistemas contar con herramientas objetivas, precisas, rápidas y flexibles, de bajo costo relativo y de uso eficiente de la mano de obra, para el manejo adecuado de pasturas y animales ya que tienen un importante impacto en la productividad e ingreso del sistema productivo (Montossi, 2013). Se debe resaltar que no existe un único método para medir pasturas, y entender el funcionamiento de cada uno permite entender las posibles fuentes de error de los mismos. En un esquema de planificación, los métodos indirectos para medir biomasa que existen actualmente hacen que sea un trabajo laborioso, que requieran demasiado tiempo y logrando un bajo

número de medidas exceptuando el C-Dax. El dron por su parte tiene el potencial de aportar un mayor número y tipo de medidas (altura, NDVI, distribución espacial) sobre toda la superficie evaluada, sin necesidad de estar presente en el potrero. Esto hace que se evalúe como herramienta para el monitoreo de pasturas y facilitar las tareas de campo al momento de la planificación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

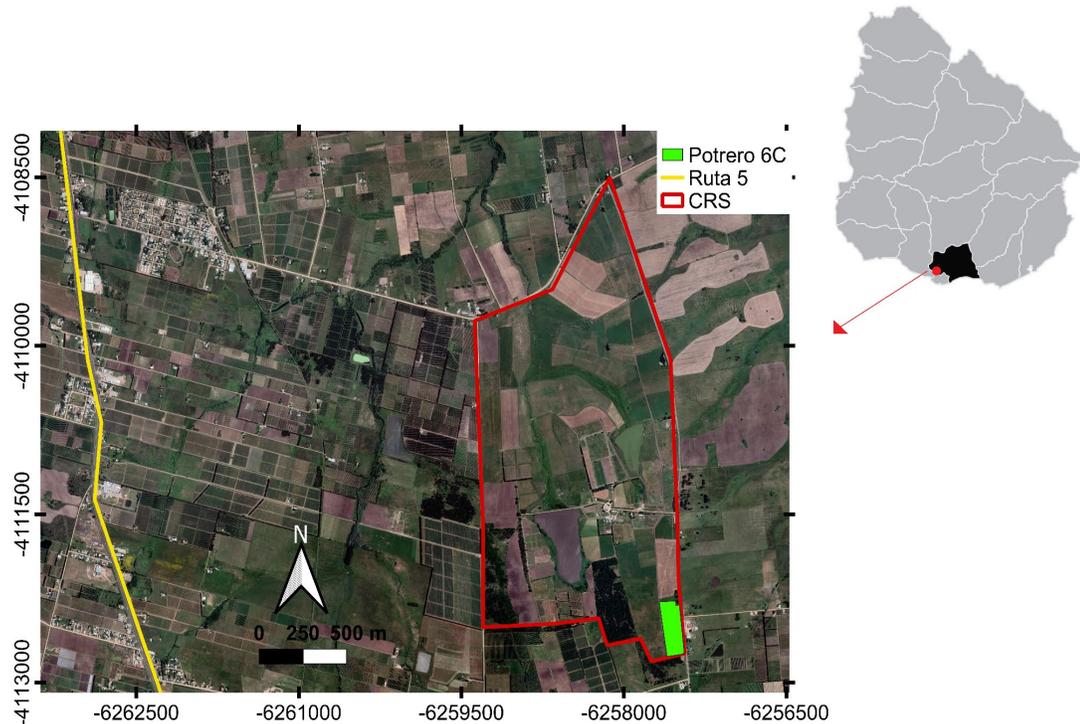
3.1. CONDICIONES EXPERIMENTALES

3.1.1. Lugar y periodo experimental

El experimento se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía (Progreso, Canelones, Uruguay) en el potrero 6C (Latitud 34°37'17.40"S Longitud 56°12'38.21"O) (Figura 2). El periodo experimental comprendió desde el 1 de julio de 2021 hasta el 15 de octubre del mismo año.

Figura 2

Ubicación nacional y regional del área experimental



Nota. Adaptado de Google (2022). SRC EPSG:32721 - WGS 84 / UTM zone 21S - Proyectado.

3.1.2. Información meteorológica para el año 2021

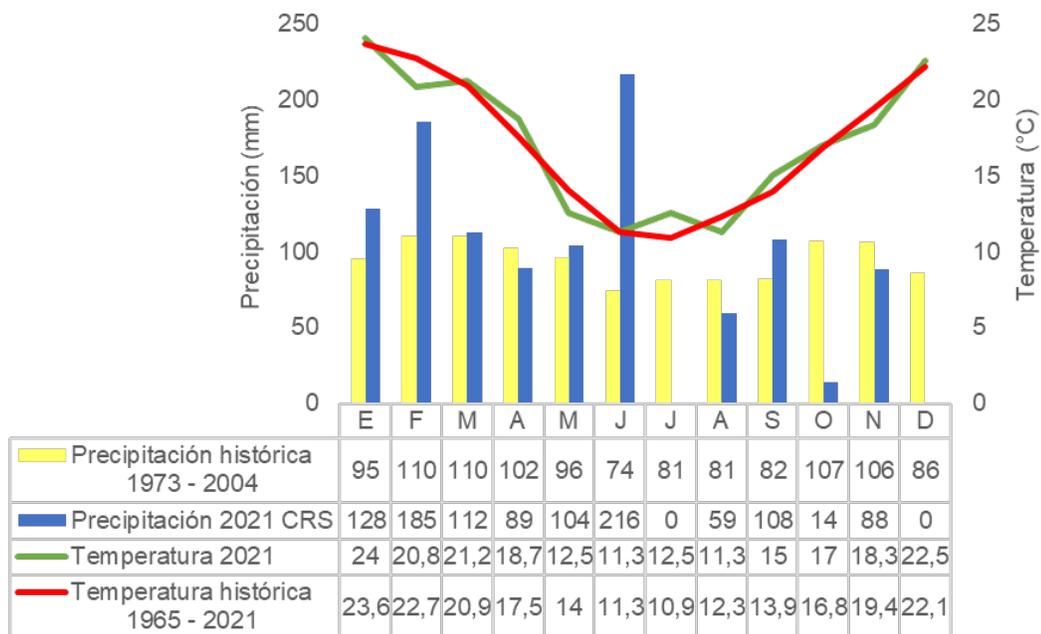
Como se observa en la figura No. 3, durante la primera mitad del año, la temperatura (línea verde) presentó un comportamiento similar a la temperatura histórica (línea roja), exceptuando los meses de febrero y mayo

dónde estuvo por debajo de ese promedio; las precipitaciones (barras azules) fueron superiores al promedio histórico (barras amarillas) en toda la primera mitad del año, destacándose un principio de invierno en el mes de junio con precipitaciones que superan 2,8 veces el promedio histórico . En lo que respecta a la segunda mitad del año, la temperatura presentó valores superiores al promedio histórico durante los meses de julio y septiembre, siendo para el resto de los meses un comportamiento similar a la media histórica. Las precipitaciones por su parte sufrieron una disminución en la primavera de 85 mm, dado principalmente por un octubre muy “seco”. Este comportamiento y observando la escasez de precipitaciones en julio y octubre ya venían anunciando el efecto del fenómeno Niña, que se predecía por encima del 50 % de probabilidad a principios de la primavera. Al observar el comportamiento dentro del período de estudio de este trabajo comprendido de julio a octubre, podemos destacar la fuerte disminución de precipitaciones dado que en dicho periodo fueron 170 mm inferiores al promedio histórico, lo que consecuentemente termina afectando directamente a la producción de las pasturas.

Dado que el Centro Regional Sur sólo toma datos de precipitación, la precipitación histórica, temperatura histórica y temperatura del año 2021 se tomaron de la localidad más cercana, como lo es la estación meteorológica de INIA Las Brujas (Figura 3).

Figura 3

Precipitaciones y temperatura del año 2021 en comparación a serie histórica de INIA Las Brujas



Nota. Adaptado de INIA (s.f.a.). Se seleccionaron los datos históricos promedio de 30 años mensuales de precipitaciones y temperaturas, y los datos de La Estanzuela para esas mismas variables del año 2021.

Para poder generar una metodología que permitiera medir la disponibilidad de biomasa con el dron, se utilizaron los siguientes materiales: dron, celular y/o tablet, regla, RPM, pasturómetro C-Dax, tractor para desplazar el C-Dax, estacas, bidones blancos reciclados, tijera de esquila, círculo de hierro de 30 cm de diámetro, cuadro de hierro de 20x50 cm, cinta métrica, bolsas de nilón, estacas, estufa para secado de muestra, balanza, bolsas de papel, bandejas, y computadora (Anexos A y B).

3.1.3. Dron

Se trabajó con un dron DJI Mavic 2 Pro (Figura 4) el cual cuenta con una cámara UHD (ultra HD 5472 x 3648) que permite crear imágenes con una resolución espacial de 2,16 cm² por pixel a una altura de vuelo de 60 m (DJI, s.f.) (Anexo E).

Figura 4

Mavic 2 Pro DJI



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

3.1.4. Pastura

Se trabajó sobre una pastura de segundo año a base de festuca cv. Fortuna (*Festuca arundinacea*), trébol blanco (*Trifolium repens*) y lotus (*Lotus Corniculatus*). A pesar de que se trataba de una pastura mixta, esta se constituía principalmente de festuca con pocos ejemplares de leguminosas.

El manejo de la fertilización se basaba en aplicar unos 30 kg de N/há luego de cada pastoreo, lo que para el año en evaluación resultó en un total de 200 Kg N/ha. En cuanto al pastoreo, el mismo se realizaba con el objetivo de maximizar la producción y longevidad de la pastura, para ello se mantenían remanentes que no afectarían la persistencia (+5cm).

Al inicio de la primavera se realizó el control temprano de floración mediante corte mecánico, con el objetivo de evitar la floración de la pastura y por esta vía lograr un horizonte de pastoreo más vegetativo.

3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental consistió en la calibración de la regla y el RPM, el análisis de imágenes obtenidas por el dron y la comparación entre los métodos de medición.

3.2.1. Calibración de regla y RPM

La calibración de ambos instrumentos se realizó un doble muestreo de Haydock y Shaw (1975) con el objetivo de determinar la biomasa disponible de forraje (kgMS/ha). Para ello, sobre la pastura del potrero 6C, se determinaron visualmente cinco escalas, por altura y densidad; utilizando un

cuadro de 50*20 cm se recolectó el forraje dentro del cuadro cortando con tijera al ras del suelo. Por escala de altura se realizaron tres repeticiones y dicho procedimiento se repitió dos veces por semana. De esta forma se estima el total de biomasa disponible, por lo que se debe tener en cuenta que al cortar al ras parte del estrato inferior (por debajo de los 2 cm) se encuentra fuera del horizonte de pastoreo e ingresan tallos y restos secos que no son consumidos por el animal.

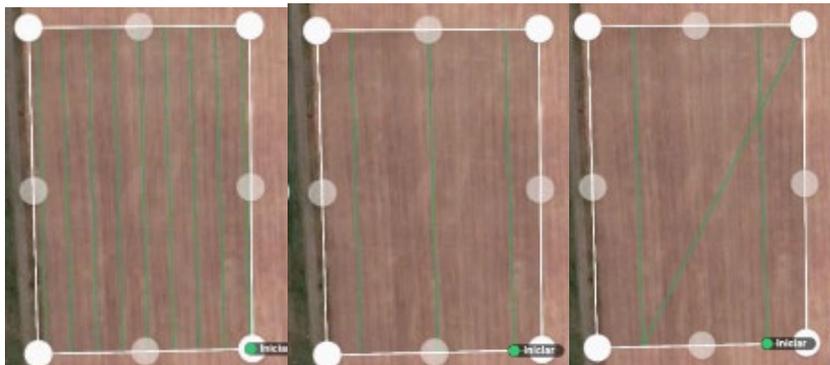
Las muestras se secaron en estufa de aire forzado a 60°C durante 48 horas para la determinación de materia seca (Anexo D). Los resultados de altura y biomasa se ordenaron y analizaron en Excel resultando en una regresión lineal entre altura de RPM y regla con la cantidad de biomasa disponible (kgMS/ha). La predicción de la producción de kgMS/ha con la regla y RPM se estimaron con un total de 150 cortes (ver figuras No. 9 y No. 10 en capítulo 4).

3.2.2. Planificación de vuelo con el dron

Se realizaron vuelos dos veces por semana durante el periodo de estudio, a tres alturas distintas: 20, 60 y 100 m. Se voló haciendo un “zig-zag” sobre el área de estudio (Figura 5), de tal forma que se cubriera la totalidad de la superficie. Las imágenes se tomaban con un 75 % de solapamiento frontal y 70 % de solapamiento lateral, con la finalidad de que se logre generar un mosaico continuo (ortomosaico). Durante el período de estudio, hubo vuelos suspendidos por razones meteorológicas (nubes y/o viento principalmente) y por la situación sanitaria CoVid-19.

Figura 5

Recorrido del dron sobre el área de estudio



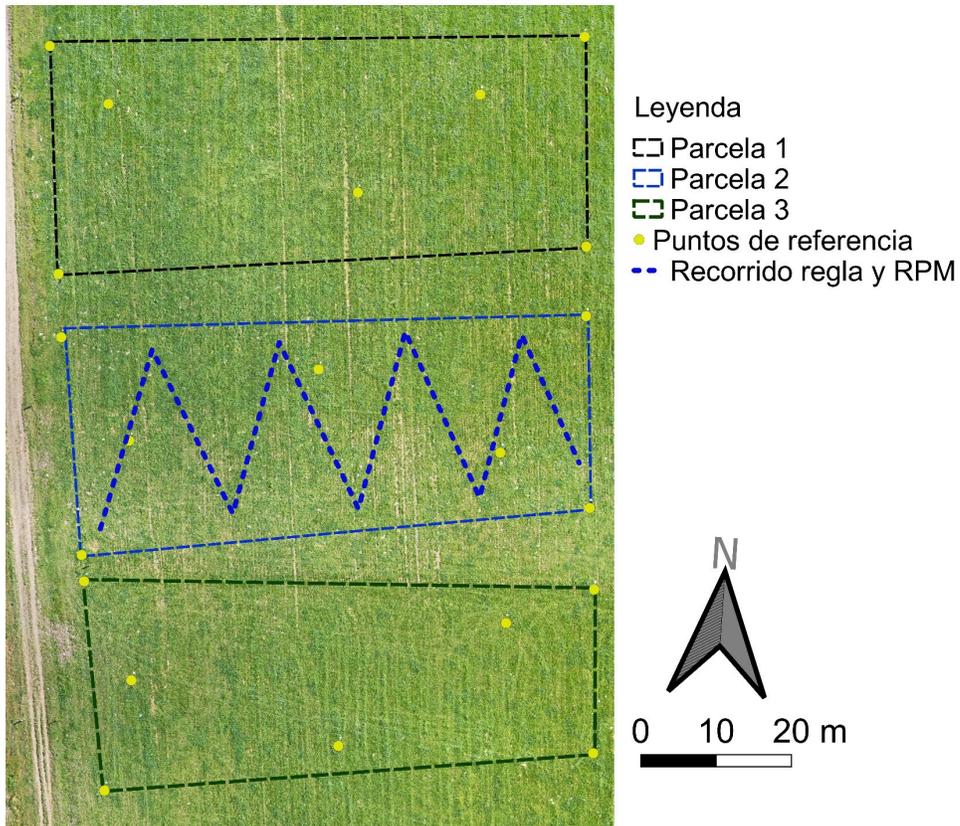
Nota. Captura de la aplicación de vuelo DronDeploy a 20, 60 y 100 m respectivamente.

A partir de las imágenes obtenidas por el dron se crearon los ortomosaicos y los modelos de elevación digital (DEM). Tanto los

ortomosaicos como los DEM se procesaron luego en QGis (versión 3.18.3), y los datos extraídos fueron analizados en Excel.

3.3. ARREGLO EXPERIMENTAL

La unidad experimental estuvo constituida por 3 parcelas de 0,25 ha., las cuales se consideraron como diferentes entre sí dado que el pastoreo se realiza por las vacas lecheras del tambo del CRS y generan una desuniformidad en la estructura de la pastura. Las parcelas fueron identificadas geográficamente en primera instancia, y luego se vio pertinente la utilización de marcadores en el terreno (bidones blancos reutilizados) (Anexo C), los cuales se observan en los ortomosaicos, estos marcadores se usaron como puntos de referencia donde se realizaron mediciones de regla y RPM dos veces por semana en conjunto con los vuelos. Cada “parcela” consta de 7 puntos de referencia, 4 en cada vértice del rectángulo y 3 en su interior como se observa en la Figura 6.

Figura 6*Arreglo espacial del ensayo*

Los tratamientos consistieron en: método visual, doble muestreo con regla graduada, RPM, pasturómetro C-Dax, y dron Mavic para estimar biomasa a partir de las imágenes tomadas con la cámara RGB. La comparación entre métodos se realizó mediante regresiones lineales.

Las parcelas fueron pastoreadas, cada una de ellas, con pastoreo rotativo. Se utilizaron cargas variables debido a que las parcelas formaban parte de otro ensayo, donde pastoreaban sistemas con cargas de 1,9 vacas/ha y 2,9 vacas/ha. El momento de pastoreo se designaba en función de la disponibilidad de biomasa, donde se ingresaba con una altura aproximada de 25 cm (3500 - 3800 kgMS/há) y se salía con una altura remanente promedio de 7 cm (1100 - 1200 kgMS/há).

3.3.1. DETERMINACIONES EN LA PASTURA

En cada parcela se realizaron las siguientes mediciones previo a cada vuelo (Tabla 4).

Tabla 4*Mediciones realizadas en las parcelas.*

Método	Lugar	N° medidas	Frecuencia	Variable
C-Dax	parcela	200/s	1 vez por semana	h mm
Regla	parcela	75	1 vez por semana	H cm / Kg MS ha
Regla	punto de referencia	5	2 veces por semana	H cm / Kg MS ha
RPM	parcela	75	1 vez por semana	H de RPM / Kg MS ha
RPM	punto de referencia	1	2 veces por semana	H de RPM

La estimación de biomasa con C-Dax fue programada, pero se terminó descartando dado que se presentaron varios problemas técnicos y no se lograron realizar la mayoría de las mediciones.

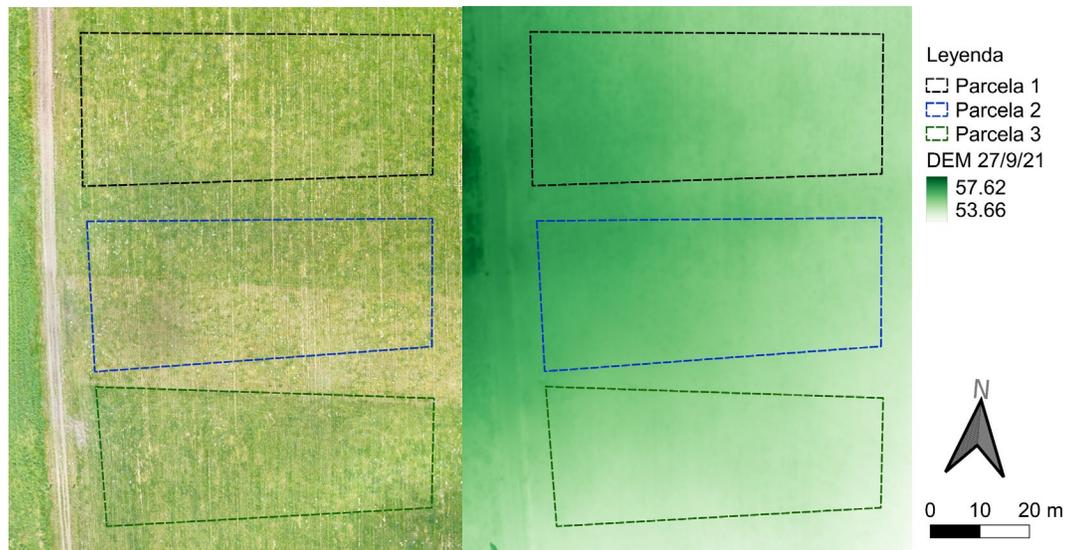
3.4. EL DRON COMO HERRAMIENTA PARA LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMSA

Previo a cada vuelo con el dron, se verificó que las condiciones meteorológicas, la posición de los satélites y el nivel de radiación ultravioleta (la cual afecta las brújulas del dron), fueran adecuadas para que no generen interferencia o afecten los vuelos. Para esto nos guiamos a través del programa "UAV Forecast" que evalúa todas las condiciones antes mencionadas.

La medición de pasturas, se basó en el procesamiento de las imágenes obtenidas por el dron, las cuales permitieron obtener ortomosaicos y DEMs (Figura 7).

Figura 7

Vista comparativa entre ortomosaico y DEM



Nota. A partir de imágenes tomadas con el dron Mavic 2 Pro para la fecha 27/9/2021.

La cantidad de imágenes afecta directamente la memoria (almacenamiento) necesario para poder guardar y procesar las imágenes (Tabla 5), aunque luego de crear los DEM y ortomosaicos, estas pueden ser borradas y así liberar espacio. La memoria ocupada por estos archivos es de aproximadamente 600 MB para los ortomosaicos y 30 MB para los DEM. Dado que no se encontraron diferencias entre los ortomosaicos a 20 y 60 m de altura de vuelo, se optó por trabajar con las imágenes de vuelos a 60 y 100 m, ya que bajaba considerablemente el número de imágenes a procesar, el tiempo de vuelo y espacio de memoria utilizado.

Tabla 5

Memoria ocupada (gigabytes) por fotos promedio para cada altura de vuelo

Altura de vuelo (m)	20	60	100
Gigabytes	4	1.2	0.8

Figura 8

Ortomosaico de vuelo a 60 m (Á. cubierta= 2,6 ha) sobre ortomosaico de vuelo a 100 m (Á cubierta= 6,5 ha)



A mayor altura de vuelo la cámara es capaz de captar una mayor área, disminuyendo la cantidad de fotos para cubrir un mismo espacio y por ende también disminuye la cantidad de memoria necesaria. Como contraparte la resolución por pixel también es menor lo que afecta en el grado de detalle que se obtiene en el ortomosaico (Figuras 8 y 9, y Tabla 6).

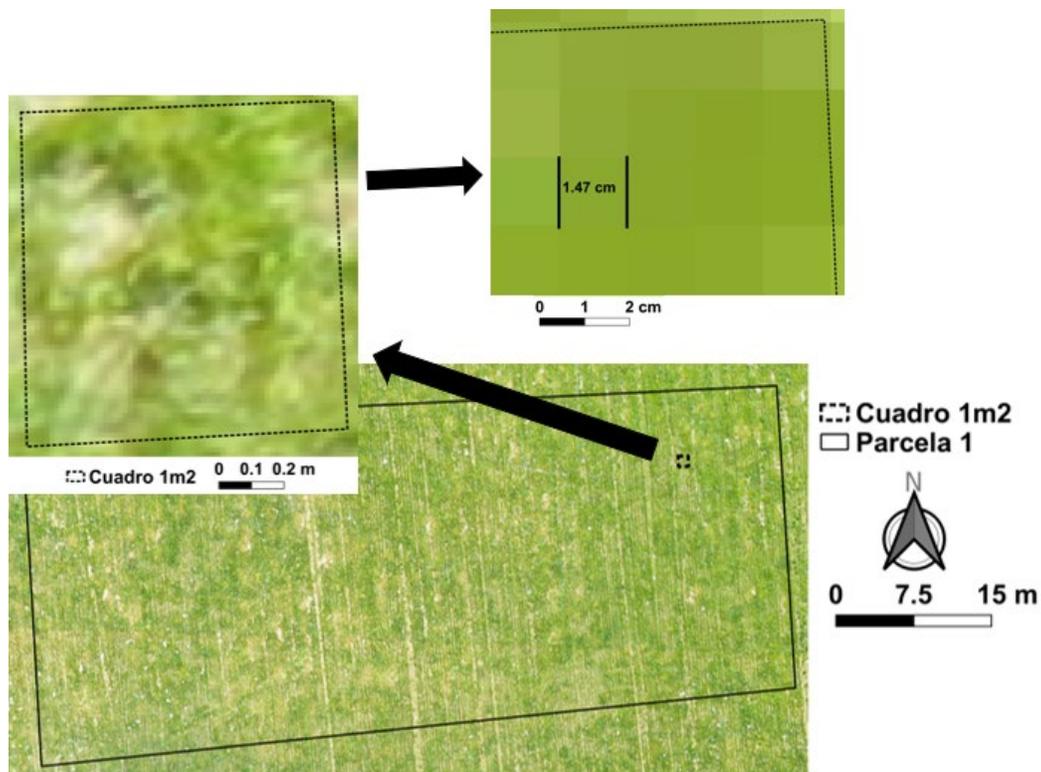
Tabla 6

Cantidad de fotos promedio para cada altura de vuelo

Altura de vuelo (m)	20	60	100
Cantidad de fotos	350	90	60

Figura 9

Vista ampliada del ortomosaico desde parcela al tamaño del pixel



Nota. Para vuelos de 60 m de altura, el lado de cada pixel mide 1,47 cm, en el caso de los vuelos a 100 m de altura, el lado de cada pixel equivale a 2,5 cm.

A partir de los DEM y ortomosaicos, se evaluaron distintas metodologías para poder determinar cuál lograba mejores resultados y facilitaba el proceso de análisis de la información. A continuación, se desarrollará la metodología utilizada en este trabajo.

3.5. METODOLOGÍA

3.5.1. Clasificación supervisada de ortomosaicos (CS)

Los ortomosaicos generados se analizaron en las bandas de RGB (visible), los cuales están compuestos por distintas bandas de colores por pixel y permiten diferenciar e identificar zonas del terreno con intensidades de color diferentes asociadas a diferentes alturas de la vegetación, suelo desnudo o bosteo de los animales. Los ortomosaicos obtenidos con las imágenes del Mavic 2 Pro tiene una gran calidad y con un elevado grado de detalle debido a sus potentes cámaras en 4K y la utilización del perfil de color Dlog-M de 10 bits. Para poder procesar la información que brindan las bandas de colores se

utilizó la herramienta de QGis “clasificación semi-automática”, en el que se le “enseña” cómo “visualizar” el ortomosaico según los criterios que se deseen, en este caso, con base en las mediciones que se hicieron a campo en los puntos georreferenciados (4 a 7 puntos por parcela, por fecha) y lo observado en el ortomosaico (suelo desnudo, bostas). A partir de las mediciones a campo de los puntos georreferenciados se plantearon “clases”, en rangos de altura de regla y de RPM los cuales dependen de cada situación de vuelo, por lo que ese aspecto no se logró estandarizar. Una vez generadas las clases, se marcaban áreas de entrenamiento (del tamaño del área del plato del RPM) en el ortomosaico para que el programa los tuviera de referencia y fuera aprendiendo. Estas áreas se marcaron al lado de cada punto de referencia (bidones) siguiendo la misma metodología que se realizó a campo. El aplicar esta metodología permitió pasar de 75 medidas (a campo) por parcela que equivalen a 0,03 medidas/m² con regla o RPM a tener más de 6 medidas/m², equivalente a unas 15.000 medidas por parcela. Esto es de gran importancia dado que la metodología permite ampliar considerablemente el número de medidas en la parcela, reduciendo significativamente el esfuerzo físico (Tabla 7).

Tabla 7

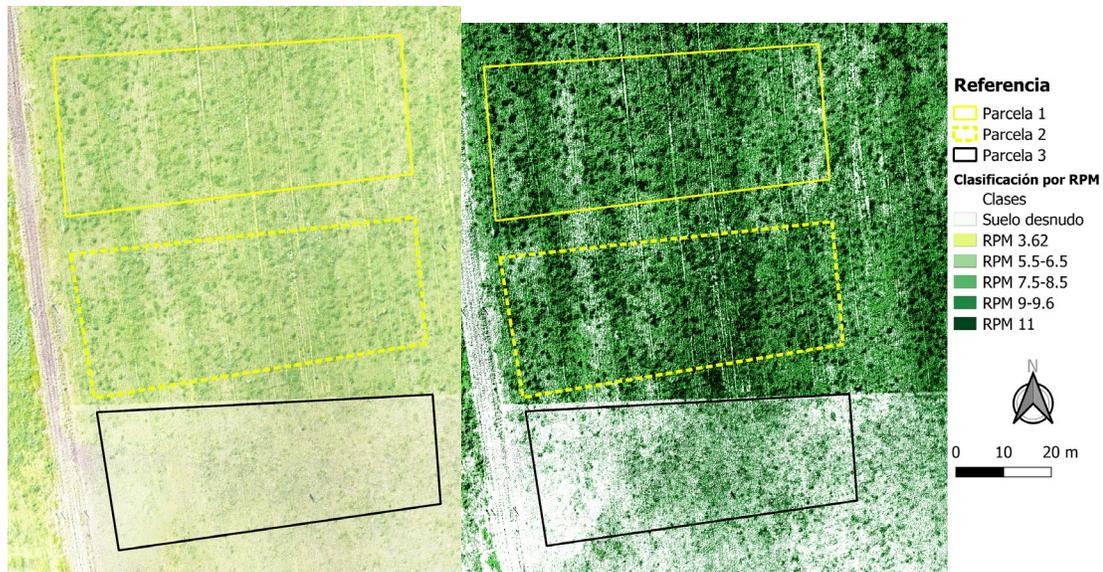
Número de medidas por área.

	CS 60 m	CS 100 m
N° pixeles/m²	3800	1500
N° pixeles/área del plato	613	241
N° de medidas/m²	6,20	6,22

Al finalizar, el ortomosaico queda totalmente clasificado con un promedio de 9 clases, con 3 áreas de entrenamiento por clase (Figura 10).

Figura 10

Ortomosaico RGB (izquierda) y ortomosaico con clasificación supervisada con las clases de RPM para ese ortomosaico



Una vez clasificado se procedió a obtener el área ocupada por cada clase dentro de las distintas parcelas. Las clases pertenecientes a altura, fueron multiplicadas por el porcentaje de ocupación y se sumaron (suma prorrateada), dando como resultado un valor promedio de regla y de RPM por parcela, el cual fue utilizado para obtener el dato de kgMS/ha a partir de las ecuaciones de calibración de cada herramienta obtenidas durante el trabajo. Con el fin de corregir los kgMS/ha teniendo en cuenta el área de suelo desnudo y bostas, se restó el área ocupada por las mismas (en porcentaje) del total del área de la parcela (Anexos F, G, H e I) presentando altos ajustes para la regla y ajuste medio en el caso del RPM. A modo de ejemplo: Parcela con 3000 kg MS/ha con 2% del área ocupada por suelo desnudo y bostas, la biomasa disponible sería el 98% del total, por lo tanto $3000 \times 0.98 = 2940$ sería la biomasa disponible corregida.

El análisis de la información se realizó a través de regresiones en el cuál correlaciona la biomasa obtenida en kg/MS/ha a través de la CS y la biomasa obtenida por la metodología tradicional utilizada para realizar esa CS (regla o RPM). A su vez se tuvo en cuenta el efecto otros factores que afectan esos resultados como pueden ser la altura de vuelo, brillo de las imágenes, número de medidas, etc.

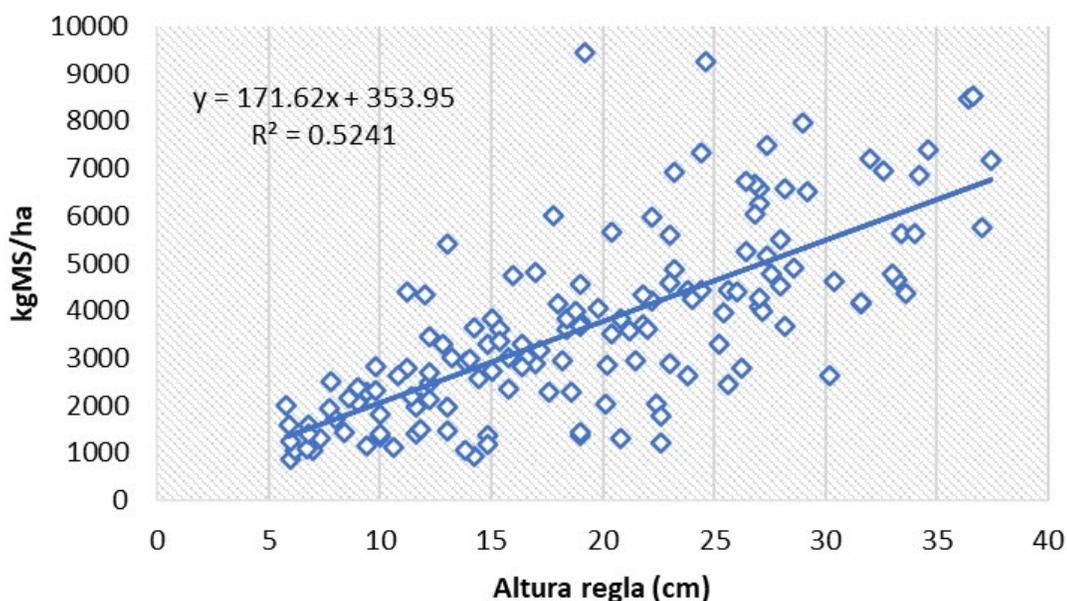
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALIBRACIÓN DE REGLA Y RPM

A continuación, se presentan datos de 150 cortes realizados para la calibración de la regla en un rectángulo de 50*20 cm de área (Figura 11).

Figura 11

Relación entre altura de regla (cm) y biomasa disponible (kgMS/ha) desde el 21/8 al 18/10 con 150 mediciones



La relación entre la altura y biomasa fue explicada por una regresión lineal con un $R^2=0,5241$, inferior a lo mencionado por Montossi et al. (2013) el cual indica que, para Uruguay, en festuca las correlaciones son entre 0,72 y 0,85 para el período otoño-invierno-primavera. Parte de la variación puede estar explicada debido a que el período evaluado en este trabajo, no contiene la estación de otoño y prácticamente tampoco la estación de invierno dado que los datos presentados son de finales de agosto en adelante. Por otra parte, los datos considerados por Montossi et al. (2013) son para pasturas puras de festuca y en este trabajo se evaluó en una pastura de festuca en mezcla con leguminosas. A su vez, la festuca fue evaluada en situaciones de pre y post pastoreo, en estado vegetativo y reproductivo, y con un total de mediciones mayor (150 mediciones) que el evaluado por Montossi et al. (2013) que sólo tuvieron 12 mediciones promedio entre pre y post pastoreo.

El resultado obtenido por centímetro de altura de la pastura fue de 171,62 kgMS/ha. La mayor cantidad de datos y con menor dispersión de los mismos, se logró en alturas menores a los 18 cm por lo que se puede deducir que por debajo de esta altura se obtuvo una mejor estimación sobre la producción de forraje. Para alturas mayores a los 18 cm el aumento de dispersión se podría deber a un efecto de la estructura de la planta, similar a lo mencionado por Waller (2020) en el que parece ser que la festuca tiene mayor densidad vertical.

En la Tabla 8 se puede observar las alturas en cm de regla, promedio de 75 medidas realizadas por parcela y por fecha. Estas alturas fueron sustituidas en la ecuación de calibración, para estimar la disponibilidad de biomasa por parcela.

Tabla 8

Altura promedio (cm) de 75 medidas y desvío estándar de regla por parcela y por fecha

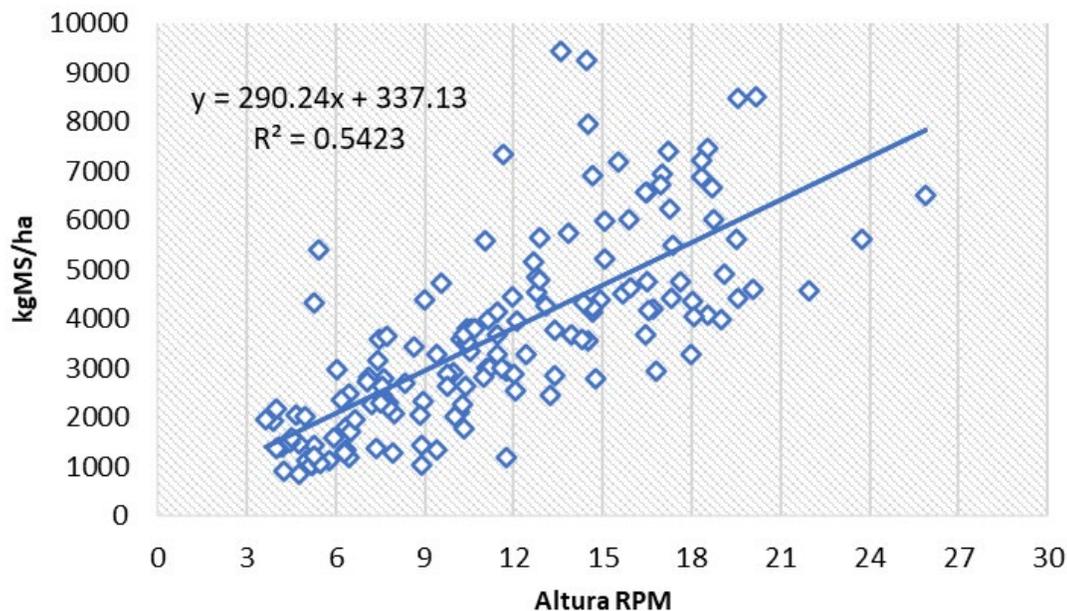
Fecha	Parcela 1	Desvío	Parcela 2	Desvío	Parcela 3	Desvío
6/8/2021	18.19	6.64	16.19	7.00	16.73	8.12
13/8/2021	15.92	5.92	17.88	7.16	7.72*	2.92
23/8/2021	17.71*	6.35	17.16*	6.52	15.88	6.30
24/9/2021	18.96	4.59	16.23	3.96	18.57	4.50
27/9/2021	23.51	4.66	23.79	4.96	22.93	5.41
4/10/2021	27.76	7.40	26.96	8.49	28.80	7.14

Nota. *Post-pastoreo.

Las alturas promedio y los desvíos, permite visualizar la heterogeneidad de la pastura y la altura que se manejaba para realizar los pastoreos, se debe tener en cuenta que por la metodología de medición utilizada puede existir un sesgo en el valor de medición por parte de la persona que tomó las medidas a campo. Analizando los datos post pastoreo, los remanentes eran bastante más altos de los recomendados por Perrachón (2015), el cual indica que para un buen manejo estas alturas deben ser de aproximadamente 10 cm, altura lograda únicamente en la parcela 3 en el pastoreo realizado el 13/8, se debe a que el manejo del pastoreo era laxo con el fin de dejar altos remanentes para lograr mayores producciones de biomasa y afectar lo menos posible el stand de plantas por sobrepastoreo.

Figura 12

Relación entre la altura de RPM y biomasa disponible en kgMS/ha desde el 21/8 al 18/10 con 150 mediciones



Los datos obtenidos con el RPM se concentraron en valores menores a 13 (Figura 12), logrando también así una menor dispersión de los mismos. Por cada punto de incremento en el RPM se estimaron unos 290,24 kg/MS con un $R^2 = 0,5423$, siendo un coeficiente de determinación medio, un poco por debajo a lo logrado por Montossi (2013) que llegaron a un $R^2 = 0,614$. Se debe tener en cuenta que manejaron un mayor número de mediciones $n=1345$ frente a 150 generadas en este trabajo y se consideraron aproximadamente 13 pasturas diferentes en distintos predios, con distintos manejos, estaciones y estados fenológicos de la pastura. Este trabajo si bien se realiza en un mismo predio, está considerando dos situaciones diferentes de pastoreo, por la carga animal utilizada, así como también situaciones en pre pastoreo como en post pastoreo, también está considerando dos estaciones del año y diferentes estados fenológicos de la planta, por tanto, todos estos factores contribuyen al efecto de la dispersión de datos e influyendo en el R^2 obtenido. Otra fuente de variación entre los resultados obtenidos, es el RPM utilizado dado que es posible que en el trabajo de Montossi (2013) haya utilizado más de uno, y estos varían en su peso, y por ende afectan directamente sobre la fuerza de compresión y por consecuencia afecta la variable densidad. A pesar de que las ecuaciones de ambos gráficos sólo predicen con aproximadamente un 50% de la variabilidad existente, se considera que es bastante representativa ya

que existen varios factores que afectan en el momento de cuantificar la disponibilidad de biomasa, algunos de ellos ya fueron mencionados anteriormente.

En la Tabla 9 se puede observar las alturas del RPM, promedio de 75 medidas realizadas por parcela y por fecha. Al igual que con la regla, estas alturas fueron sustituidas en la ecuación de calibración, para estimar la disponibilidad de biomasa por parcela (Figura 14).

Tabla 9

Altura promedio (cm) de 75 medidas de RPM por parcela y por fecha

Fecha	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3
6/8/2021	10.19	10.53	9.53
13/8/2021	9.48	10.8	7.08*
23/8/2021	9.44*	8.92*	8.77
24/9/2021	10.99	10.03	10.5
27/9/2021	9.38	8.96	9.1
1/10/2021	11.3	10.07	10.96
4/10/2021	10.84	10.16	10.93
8/10/2021	10.48	9.68	10.25

Nota. *Post-pastoreo.

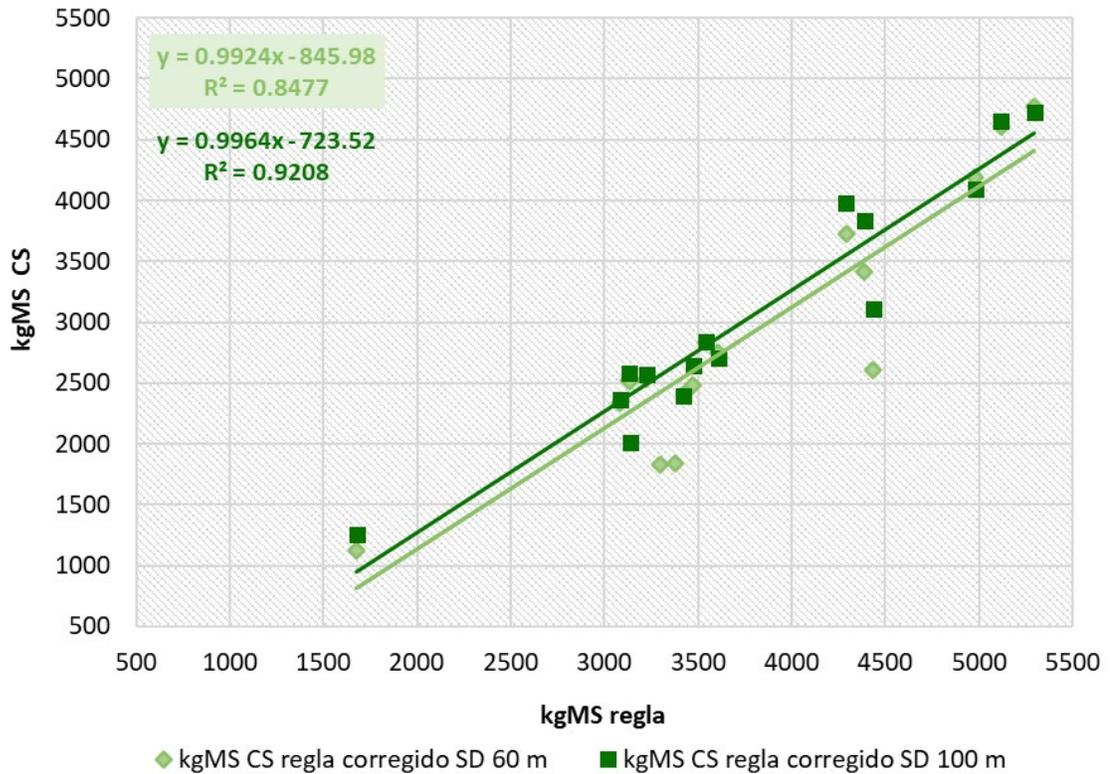
Observando los datos promedios, las alturas obtenidas por el RPM son menores a las obtenidas por la regla. Esto es esperable ya que con la técnica de la regla se toma la medida de la hoja más alta que esté tocando, y en el caso del RPM este comprime la mata por ende su medida de altura está teniendo en cuenta dos variables, la altura y densidad como lo indica Michalk y Herbert (1977), por tanto, el peso del instrumento es un factor importante a tener en cuenta ya que va a afectar directamente estas variables. De todas formas, las alturas obtenidas con RPM (Tabla 9) tuvieron un comportamiento similar a las obtenidas por regla (Tabla 8).

4.2. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE ORTOMOSAICOS

A partir de las medidas tomadas con regla y con CS (clasificación supervisada), se observó que existe una relación lineal positiva, representada por una ecuación con un alto ajuste ($R^2=0.8477$) para los vuelos a 60 m de altura y de ($R^2=0.9208$) para vuelos de 100 m de altura (Figura 13).

Figura 13

Relación entre los kg/MS obtenidos a través de la regla (promedio de 75 medidas) y la clasificación supervisada corregida por suelo desnudo, para vuelos de 60 y 100 m de altura



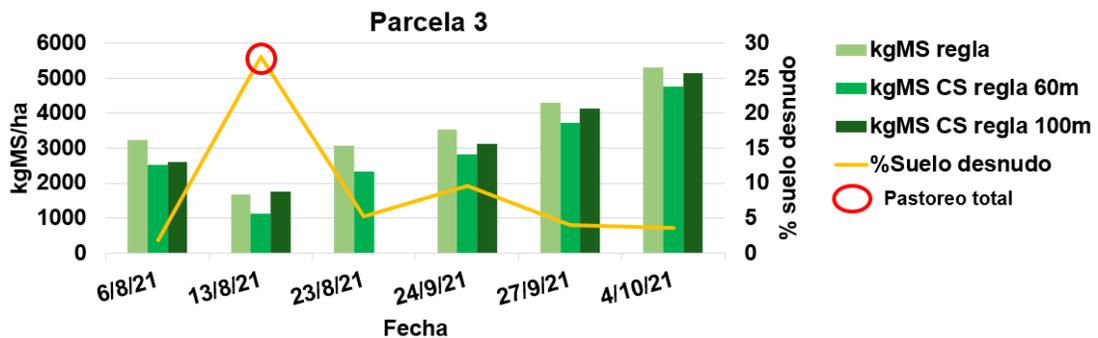
En lo que refiere a la CS, a una altura de vuelo de 60 m, el suelo desnudo y bosteo (SD) en promedio representa el 7,2 % y en los vuelos de 100 m representa un 7,6 %. Esta diferencia puede deberse a la diferencia en resolución de los ortomosaicos, en donde la resolución a los 60 m es mayor que a los 100 m (2,94 cm²/pixel y 5 cm²/pixel respectivamente) captando mayores diferencias en el primer caso, también puede existir diferencias debido al brillo de las imágenes, ya sea por la altura como también así el momento de vuelo, dado que en ciertas ocasiones existieron diferencias de varios minutos e incluso algunas horas entre vuelos, afectando así el ángulo con el que ingresa la luz en la cámara y como se refleja sobre la pastura, generando pequeñas diferencias en la CS (Figura 14).

El mayor ajuste a alturas de vuelo de 100 m, puede deberse a que se logra una menor discriminación de la densidad y distribución de alturas de la pastura en el terreno, al igual de lo que sucede con la regla la cual no

contempla la densidad y está condicionado por el operario que toma las medidas, al igual que menciona Millapán (2006), tampoco se visualiza claramente el bosteo como si sucede en vuelos a 60 m. Esto mismo podría explicar el comportamiento similar encontrado en la clasificación con el RPM.

Figura 14

Biomasa disponible (kgMS/ha) de la parcela 3, por fecha de medición, estimado con regla (promedio de 75 medidas) y con clasificación supervisada (CS) con altura de vuelo de 60 y 100 m



En la Figura 14 y Tabla 10, los datos presentados corresponden a la parcela 3, debido a que las tres parcelas tuvieron un comportamiento similar en cuanto a biomasa disponible estimada y tasas de crecimiento. En la Figura 14 se puede observar que la CS, tanto para 60 m como a 100 m de altura de vuelo, subestima en comparación a la biomasa obtenida con regla en 630 kg/MS/ha y 160 kg/MS/ha respectivamente. Estas diferencias son explicadas a causa de que la CS a 60 m, logra captar la variabilidad tanto en altura de la pastura como espacial de toda el área bajo estudio y también es ajustado por el % de suelo desnudo (%SD), en cambio la CS a 100 m tiene un comportamiento similar al de las 75 medidas tomadas con regla, ya que como se mencionó anteriormente la mayor altura de vuelo interfiere en la calidad de imagen afectando negativamente al momento de discriminar %SD (a esta altura no se logran captar las bostas) y diferencias en altura de la pastura.

Tabla 10

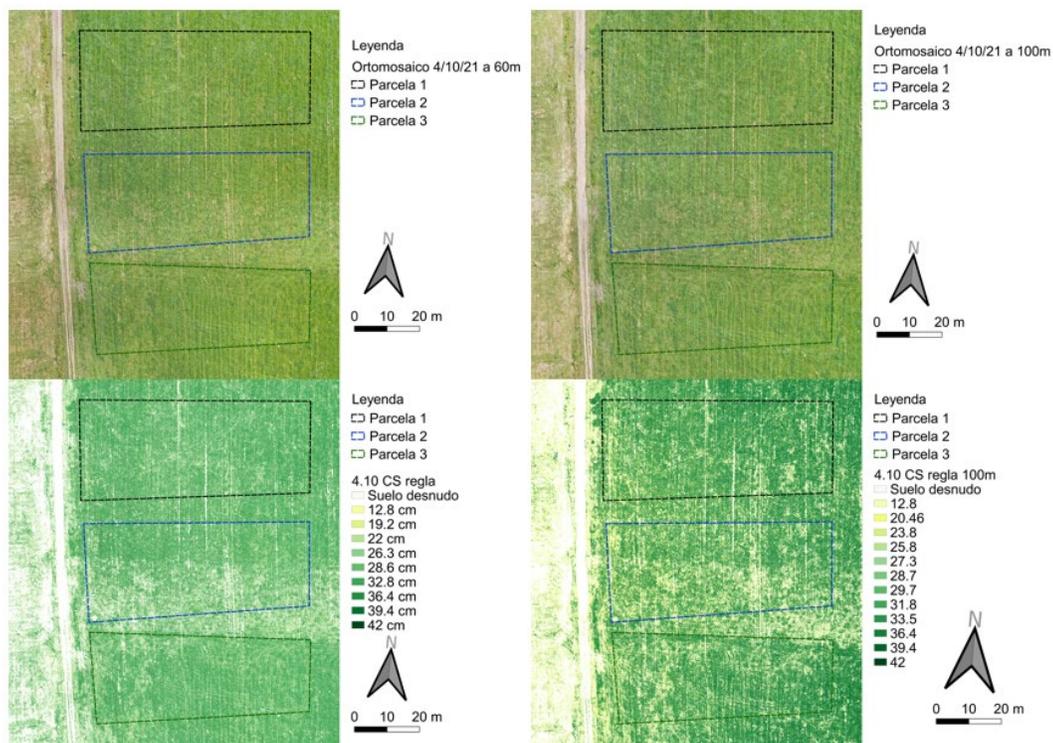
Estimación de la tasa de crecimiento en kg/MS/ha/día y forraje desaparecido en kgMS/ha para cada método de medición, entre las fechas del 13/8 y 24/9

	Regla	CS 60 m	CS 100m
Diferencia de altura (cm)	10.85	9.17	8.07
Biomasa desaparecida (kgMS/ha)	1863	1711	1385
TC (kgMS/ha/d)	44	41	33

En la Tabla 10 se observan las tasas de crecimiento y forraje desaparecido según el método utilizado las cuales se asemejan a las reportadas por García (2003) para la estación de primavera. Para realizar esta estimación, debido a que el pastoreo fué a inicios del período y luego no se realizaron más pastoreos (situación similar en las tres parcelas), se utilizó la biomasa estimada del 13/8 como post pastoreo y la del 24/9 como pre pastoreo, fecha elegida debido a que corresponde a 42 días post pastoreo. El forraje desaparecido en el pastoreo correspondiente a la fecha del 13/8 logra ser captado por cualquiera de las metodologías utilizadas, pero los resultados obtenidos con las CS independientemente de la altura de vuelo, también subestima en comparación a la regla, dónde se tiene una diferencia notoria con la CS a 100 m, lo que sigue confirmando que a mayor altura de vuelo es menor la capacidad de discriminar alturas de la pastura como lo reportan DiMaggio et al. (2020). Como es esperable, el pastoreo es acompañado por un aumento en el % SD, aunque cabe resaltar que el alto porcentaje (28%) puede deberse, además del pastoreo, por la ubicación de la parcela 3, ya que la portera de ingreso estaba por la esquina superior izquierda provocando un sector de mayor pisoteo y bosteo incidiendo directamente sobre este parámetro. Entre el 23/8 y 24/9 nuevamente se visualiza el aumento de suelo desnudo que puede ser explicado por el efecto del cambio de estructura de la pastura. A modo general, las CS supervisadas permiten estimar la biomasa total y el forraje desaparecido, en cuanto a las tasas de crecimiento no se encontraron mayores problemas cuando estas fueron estimadas con intervalos de 40 días post pastoreo. Para entender las diferencias estimadas entre la regla y las CS, es necesario tener en cuenta los factores que están incidiendo en cada altura de vuelo.

Figura 15

Ortomosaicos y sus respectivas CS con regla para alturas de vuelo de 60 y 100 m

**Tabla 11**

Porcentaje de área ocupada para suelo desnudo y clases de altura de pastura, para CS realizada con regla a alturas de vuelo de 60 y 100 m

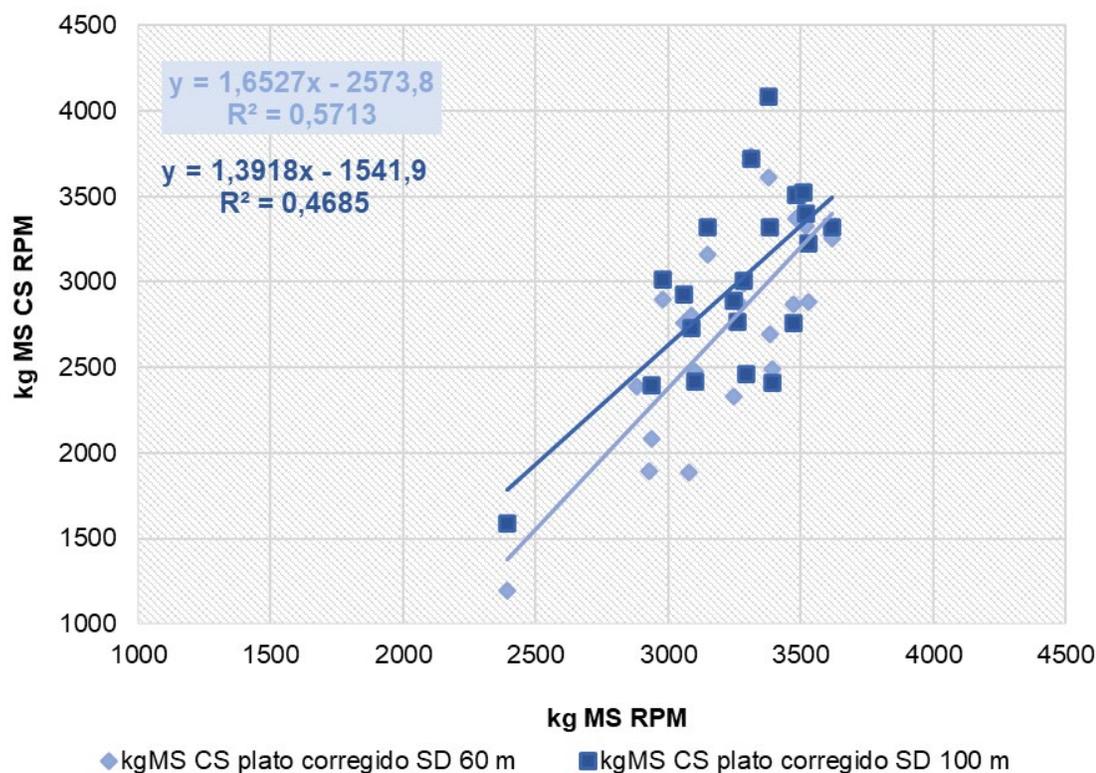
Altura de vuelo	% de área ocupada	
	60m	100m
Suelo desnudo (SD)	12	9
>13	4	12
15-20	2	
20-25	25	13
25-30	15	19
30-35	35	25
35-40	6	22
42	1	1

Observando la Figura 15, se puede apreciar que la CS a 100 m en comparación a la CS de 60 m, tiene una tonalidad de verde más oscuro

haciendo referencia a pasturas de mayor altura, y mayor cantidad de área en amarillo que representa una biomasa baja a muy baja. Cuantitativamente se observa, en la Tabla 11 como la CS a 100 m tiende a acumular mayor área en los extremos más bajos y altos de las clases definidas, dado que para alturas < 13 cm sobrepasa en 8 % el área ocupada y para alturas > a 35 cm sobrepasa en un 16 % el área ocupada en comparación a la CS de 60 m. Si se observa la CS a 60 m esta tiene una distribución más pareja en cuanto al área ocupada entre las diferentes clases. Las diferencias encontradas darían indicio de cuáles serían los rangos de altura adecuados para estimar biomasa disponible según la altura de vuelo, seguramente cuando se encuentre en una situación de post-pastoreo o una pastura en estado reproductivo (mayor altura) la CS a 100 m sobreestime, siendo recomendable utilizar la CS a 60 m, por otra parte para rangos intermedios (15-35 cm) o pasturas más homogéneas es posible que la CS a 100 m permita tener una rápida y adecuada estimación de la biomasa disponible.

Figura 16

Relación entre los kg/MS obtenidos a través del RPM (promedio de 75 medidas) y la CS RPM corregida por SD, para vuelos de 60 y 100 m de altura

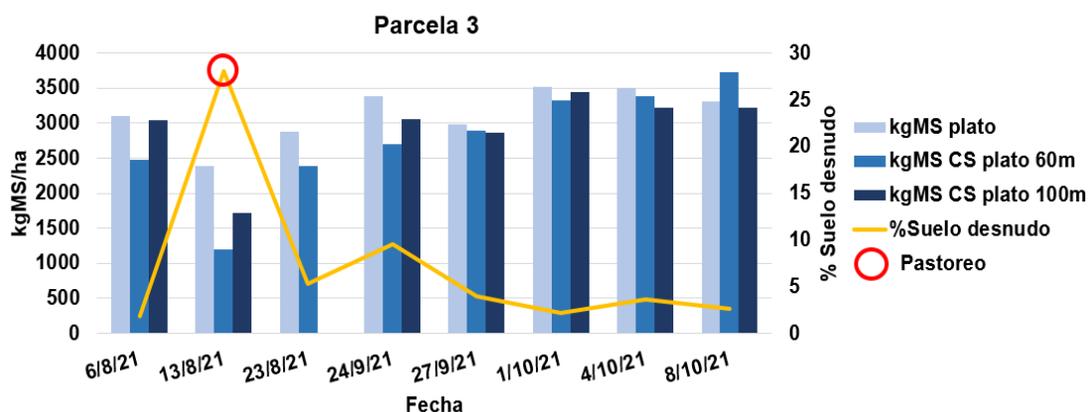


La relación entre las CS a partir del RPM y el promedio de las 75 medidas obtenidas con RPM, ambos por parcela y por fecha, tienen una

relación lineal positiva con un ajuste de $R^2=0.5713$ para alturas de vuelo de 60 m y de $R^2=0.4685$ para alturas de vuelo de 100 m, el cuál es sensiblemente menor al obtenido con regla (Figura 16). Como ya fue mencionado, los vuelos de mayor altura como los de 100 m, generan una menor capacidad de discriminar variabilidades de alturas y densidad de la pastura, por tanto, esto explicaría porque los vuelos a 60 m tienen un mayor ajuste con el RPM, pero también se sospecha que como el RPM toma datos de dos variables, altura y densidad a través de la compresión, es más difícil el ajuste, dado que el dron capta la densidad a través de las bandas de color en el pixel. Otro factor a tener en cuenta es que se pueden lograr iguales valores de altura de RPM con distintos valores de altura y densidad de plantas debajo del plato, por lo que, al momento de realizar la CS, con este método no es posible captar esa variabilidad.

Figura 17

Producción en kg/MS de la parcela 3, por fecha, medido con RPM (promedio de 75 medidas) y con CS RPM a una altura de vuelo de 60 m y 100 m.



En lo que refiere a las medidas tomadas por parcela con el RPM, se realizaron en un mayor número de fechas, pero estas tuvieron un comportamiento similar a los resultados obtenidos con regla. La CS con RPM en promedio subestima en comparación al RPM, independientemente de la altura de vuelo. El promedio de las tres parcelas indica que a vuelos a 60 m se subestiman 201 kg/MS/ha y a vuelos de 100 m se subestiman 481 kg/MS/ha (Figura 17). Estas diferencias pueden estar dadas por que la CS es capaz de captar con mayor facilidad, el suelo desnudo que queda en todo el terreno y en el caso del RPM son pocas medidas al azar las cuales pueden ser sesgadas por el operario (Tabla 12).

Tabla 12

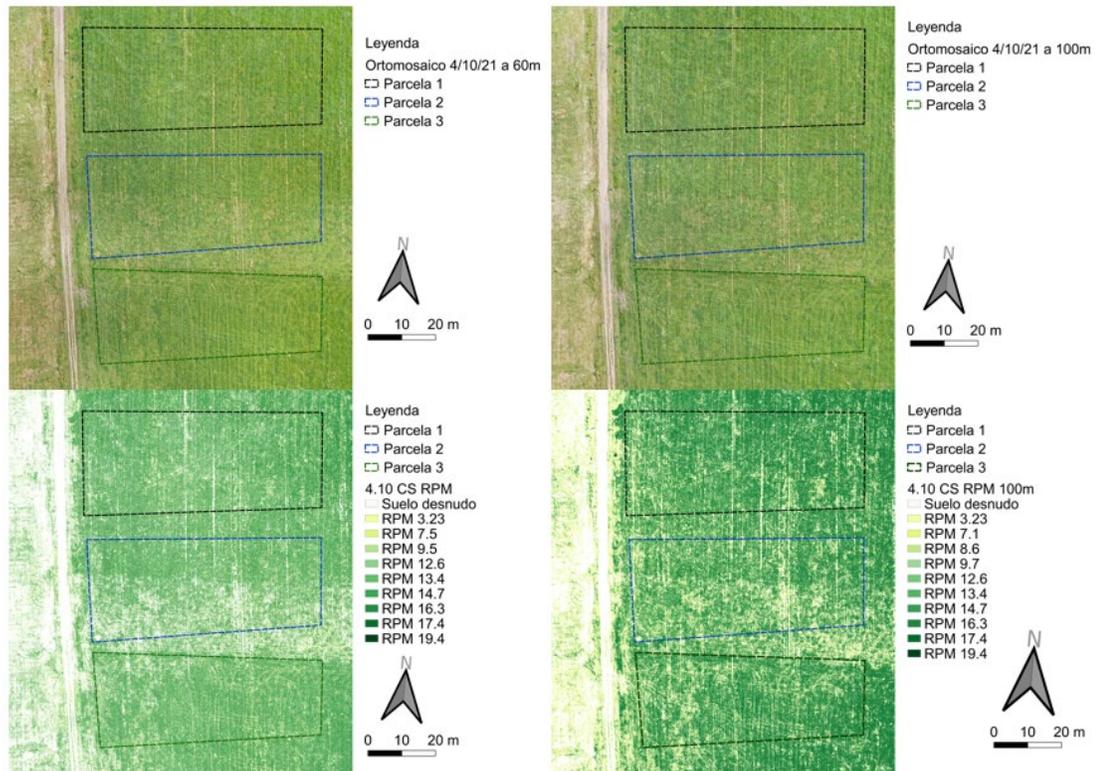
Estimación de la tasa de crecimiento en kg/MS/ha/día y forraje desaparecido en kgMS/ha para cada método de medición, entre las fechas del 13/8 y 24/9.

	RPM	CS 60 m	CS 100m
Diferencia de altura (h de RPM)	3,42	4,55	5,02
Biomasa desaparecida (kgMS/ha)	993	1340	1502
TC (kgMS/ha/d)	24	32	36

Para estimar las tasas de crecimiento que se observan en Tabla 12, se utilizó la misma metodología que en la regla. Tanto las diferencias en altura como en las tasas de crecimiento estimadas son menores a las que se logran cuando se utiliza la regla para la CS. En tanto el forraje desaparecido tiende a aumentar a medida que la CS con RPM es estimada a una mayor altura de vuelo, comportamiento inverso a lo logrado con regla. Al observar el desaparecido estimado a partir de la CS, independientemente de la altura de vuelo, sobrestima al estimado por el plato, inverso a lo que sucede en promedio, si bien no está claro por qué sucede esto, es importante observar que la Figura 16 en la cual se visualiza la dispersión y variabilidad de los datos, siendo posible que en promedio la CS subestima pero al analizar un periodo específico, en este caso del 13/8 al 24/9 podría estar sobreestimando, por lo que se destaca la importancia de seguir trabajando en esta línea y seguir utilizando puntos de control a campo como lo mencionan DiMaggio et al. (2020).

Figura 18

Ortomosaicos y sus respectivas CS con RPM para alturas de vuelo de 60 y 100 m

**Tabla 13**

Porcentaje de área ocupada para suelo desnudo y clases de altura de pastura, para CS realizada con RPM a alturas de vuelo de 60 y 100 m.

Altura de vuelo	% de área ocupada	
	60m	100m
Suelo desnudo (SD)	14	10
>5	9	15
5-10	24	18
10-15	32	15
15-20	21	42

La Figura 18 y Tabla 13 muestran como la CS con RPM a 60 y 100 m, al igual de lo que sucede con la CS con regla, se tiende a acumular mayor área en los extremos más bajos y altos de las clases definidas, confirmando lo que se mencionó anteriormente de que a mayor altura de vuelo se afecta la calidad

de imagen y es menor la capacidad de discriminación de alturas de la pastura, bosteo y suelo desnudo.

A modo general, con la experiencia generada en este trabajo de investigación y el análisis de los resultados obtenidos, permiten inferir que la mejor altura de vuelo para realizar la CS es a 60 m, debido que permite discriminar visualmente mayor cantidad de variables sobre el terreno (bosteo, variabilidad de alturas y densidad de la pastura), lo que explicaría con mayor grado de detalle las diferencias de estimación. Esta altura de vuelo es similar a las utilizadas por Michez et al. (2019) y Batistoti et al. (2019) en sus trabajos. Cuando se pasan a vuelos de mayor altura la cámara del dron ocupa mayor área desde un mismo punto inicial, por lo tanto, trabajar con mayores alturas de vuelo permite abarcar más área sobre el terreno (Figura 8), con menor cantidad de imágenes (Tabla 6) y menor cantidad de memoria utilizada, pero como contrapartida se pierde el grado de detalle que se observa en vuelos de menor altura. De todas formas, incluso con vuelos a 100 m de altura, las imágenes aportan información muy valiosa ya que los pixeles alcanzan escalas muy pequeñas de apenas centímetros (Figura 9) y es la gran diferencia que presenta con sistemas como los satelitales, que como menciona (Ortega, 2019) sus pixeles alcanzan escalas de varios metros cuadrados e incluso hectáreas. Independientemente de la altura de vuelo, la utilización de imágenes obtenidas por drones permite recabar rápidamente información detallada a campo. La utilización de mayores alturas de vuelo no significa directamente un ahorro de batería dado que es muy dependiente de las condiciones climáticas (principalmente viento en cada estrato de altura de vuelo) pero puede presentar ventajas cuando el viento no está presente. y con alto grado de detalle a diferencia de los métodos tradicionales de estimación de biomasa.

Más allá del ajuste que se logró entre la biomasa obtenida por CS y la regla, o RPM, se debe tener en cuenta el ajuste obtenido entre la altura y biomasa de la herramienta que se utilice para obtener la información a campo la cual se utilizara para realizar la CS. Por tanto, para realizar un buen análisis se debe tener en cuenta todos los factores antes mencionados y que se está trabajando con dos correlaciones en paralelo. Por ejemplo, se obtuvieron mayores ajustes en la CS cuando se utilizó la regla para extraer los datos a campo, pero ésta tuvo menor correlación entre la altura y biomasa disponible que el RPM, por otro lado, el RPM tiene un mayor ajuste con la biomasa disponible pero cuando se lo utiliza en la CS este logra un ajuste medio lo que podría deberse a que está contemplando mayor variabilidad, por lo que un menor ajuste sería esperable (Figuras 11,12,13,16). La metodología de CS se

asemeja más a lo evaluado por Insua y Utsumi (2017) dónde evaluaron la correlación entre biomasa y el NDVI logrando valores de $R^2= 0,8$ con un $n=72$, y lo compararon con las medidas de regla y pasturómetro donde el promedio de medidas logró diferencias menores a 310 kg/MS/ha. En este trabajo se reporta que utilizando la CS a 60 m de altura valores de $R^2= 0.84$ cuando se utiliza la regla y un $R^2= 0.57$ cuando se utiliza el RPM. A diferencia del NDVI que sólo mide la disponibilidad de tejido vivo, la CS permite evaluar tanto el material vivo como muerto o senescente. Las diferencias entre las medias de biomasa obtenida con CS utilizando la regla en comparación a las 75 medidas del potrero, son menores a 650 y 900 kgMS/ha según la altura de vuelo (100 y 60 m respectivamente). Para el caso del RPM, las diferencias entre las medias de biomasa obtenidas con 75 medidas de RPM por potrero y la CS fue de 230 y 500 kgMS/ha para las alturas de vuelo de 100 y 60 m respectivamente. Esto es destacable, dado que estas diferencias no representan grandes problemas para la estimación de biomasa en la práctica. El contar con esta información permite estandarizar valores en comparación a otros métodos, por ejemplo, si se utiliza la regla como método de referencia, en una situación de pastura similar a la de este trabajo, el aplicar la CS a 60 m permite inferir de antemano que esta metodología subestima 650 kg/MS/ha en promedio y a su vez suma un montón de ventajas como ya fueron mencionadas en el capítulo 2. Este método, permitió obtener información de distribución espacial y cuantificación de la superficie ocupada de las distintas alturas de pasturas que hasta el momento no se había logrado con otras herramientas de medición de pasturas, así como también el área ocupada por suelo desnudo y bosteo de los animales. Por otra parte, no permitiría realizar mediciones solamente con el dron (ya que se sigue dependiendo de medidas sobre la superficie del terreno), pero contribuye de forma complementaria a las herramientas ya existentes y utilizadas para la cuantificación de la biomasa. En cuanto a su aplicabilidad está sujeto a contar con un dron, una computadora y una regla o RPM ya que para el procesamiento y análisis de la información se utilizaron programas de acceso gratuito y libre para cualquier usuario, como lo son Excel, Agisoft Photoscan para el procesamiento de imágenes y creación de los ortomosaicos y la herramienta de clasificación supervisada de Qgis. Las principales “limitantes” serían acceder a un dron con las características mencionadas (sección 3.2.1) y la capacitación del usuario para el procesamiento y análisis de la información.

4.3. VENTAJAS, LIMITANTES Y VISTA A FUTURO

La experiencia en este trabajo permitió inferir algunas ventajas, limitantes y lineamientos en los cuales seguir a futuro; para continuar aprendiendo de esta nueva herramienta con gran potencial.

Como ventajas, el dron toma miles de medidas de la superficie las cuales cubren todo el terreno, a diferencia de la metodología de la regla graduada o el RPM donde se toman pocas medidas al azar y estas son dependientes del operario. La capacidad de alcance entre el operador y el dron de aproximadamente 7km, permitiría relevar la información desde la propia oficina generando grandes ahorros de tiempo, mano de obra y costos en combustible para el traslado como también lo menciona Ruales (2018). Esta experiencia, también permitió verificar que el uso del dron puede ser utilizado para otras funciones como contabilizar el número de animales, verificar el estado de los bebederos, incluso se logró verificar a campo que permite realizar el arreo de ganado, etc., características también mencionadas por Moran et al. (2001), Hunt et al. (2005), Hardin y Hardin (2010), Laliberte et al. (2010), Laliberte et al. (2011a), Laliberte et al. (2011b), como se cita en Rowbottom (2015). Al tener un peso total de 1490 gr es de fácil transporte comparado con otras herramientas de medición como el C-Dax (DJI, s.f.). López y Sosa (2019) mencionan que el C-Dax necesita de un vehículo para ser transportado, sumado al costo del vehículo, el costo de combustible y mantenimiento, el dron logra una reducción de costos considerable en comparación.

Algunas de las limitantes encontradas pueden ser solucionadas a futuro con el avance de la tecnología, por ejemplo, el precio del dron es relativo y a pesar que no es caro para las funciones que ofrece, puede ser una limitante para implementarlo en algunos sistemas de producción si por ejemplo lo comparamos con la regla graduada que se consigue a muy bajo costo. A nivel de campo, las baterías se descargan muy rápido; en nuestro caso las parcelas eran de 0,25 ha y para poder tomar la cantidad de fotos que cubrieran todo el terreno eran necesarias aproximadamente dos baterías en Mavic Pro. La cantidad de baterías utilizadas también dependen de la altura de vuelo dado que los vuelos más bajos (20 m) el dron toma una mayor cantidad de imágenes y con mayor detalle, por lo que pasa mayor tiempo suspendido en el aire para cubrir una misma área. En el caso de los vuelos más altos (100 m) la cantidad de fotos es sustancialmente menor y aunque pasa menor tiempo suspendido en el aire para cubrir una misma área, este tiene mayor esfuerzo contra las

corrientes de aire para mantenerse estable por lo que también genera grandes consumos de batería.

Otra limitante son las brújulas del dron, la cuales en varias ocasiones tuvieron dificultades para calibrarse, obteniendo datos con considerable variabilidad en metros sobre nivel del mar cuando se mueve de un punto "A" a un punto "B", pero esas diferencias no se visualizan en el terreno. Como esta variabilidad dependía de los días y del grado de nubosidad, concluimos que puede existir algún efecto de la luz ultravioleta incidente en el momento del vuelo que afecta a los campos electromagnéticos y este a las brújulas, sin que el programa UAV Forecast lo detecte. Este inconveniente fue la gran limitante para estimar biomasa a través de la altura obtenida por los DEM (Anexo J). Como solución a este inconveniente se cree que con el uso del RTK (Real Time Kinematic) dónde se aplican antenas sobre el terreno y a través de la señal del GPS, GLONASS y/o Galileo, se pueden realizar correcciones y devolver datos más exactos (precisión 3D de 5 mm) de la localización del terreno (Batistoti et al., 2019). En este trabajo no fueron utilizados ya que no se contaba con el equipo.

Al momento de procesar los datos los archivos eran muy grandes, lo que dificultó el procesamiento de datos en computadora y fue necesario la utilización de discos externos de memoria dada la gran cantidad de información que se extrae. Por último, y no menor, la utilización del dron y las metodologías que se puedan emplear o las que se desarrollaron en este trabajo de investigación necesitan de personal capacitado, ya que se debe manejar un mayor nivel de información y programas informáticos pudiendo presentar algunas dificultades al momento de emplearlo.

Este trabajo demuestra el potencial que tiene el dron como herramienta para el monitoreo de pasturas. Con vista al futuro, las posibles actividades a realizar podrían ser, por ejemplo: calibrar el dron durante varios años, variar estaciones y recursos forrajeros para poder generar una ecuación promedio o por estación que sea más precisa, ya que es conocido que la cantidad de materia seca por cm de la pastura depende de la estación del año, estado fenológico, efectos climáticos, sanidad, etc. A tener en cuenta a futuro, el uso del RTK para poder mejorar la geolocalización ya que como la pastura se mide en cm con un poco variación aumenta el error de la estimación; esto en teoría nos permitiría realizar las mediciones de altura de la pastura a través de los DEM. Otra alternativa sería previo a cada vuelo marcar puntos de referencia de un área práctica y conocida (ej. cuadro utilizado en la calibración) visible desde la imágenes tomadas por el dron, para que luego de cada vuelo

medir y cortar la biomasa, metodología realizada y explicada por DiMaggio et al. (2020). Por último, sería interesante la comparación con otros drones, dado la gran variabilidad en cuanto a accesorios y precios que existe en el mercado.

La calibración del dron, al igual que para los métodos ya existentes, sus ecuaciones no son universales y deben ser evaluadas en los distintos ambientes.

5. CONCLUSIONES

Aunque la herramienta ya está difundida en otras partes del mundo para el monitoreo de las pasturas, y que exista información nacional no concluyente, se cree que es el primer trabajo que se acerca al objetivo de validar el dron como herramienta para la medición del pasto e implementar su uso en una condición de medición para una situación de pastoreo real. Con los resultados de este trabajo, la metodología empleada utilizando las imágenes obtenidas por el dron como una herramienta más para la medición de biomasa, no sustituye a las metodologías ya existentes y descritas anteriormente, sino que las complementa. Se logró demostrar que es posible estimar biomasa a través de imágenes obtenidas por drones, logrando correlaciones de R^2 medios a altos con las estimaciones obtenidas por herramientas tradicionales como RPM o regla graduada. También se logró aportar información muy valiosa como la distribución y variabilidad espacial de la pastura, así como el porcentaje de área ocupada por suelo desnudo, la cual a diferencia de estimarla de forma visual cuyo valor depende de la persona que realiza la evaluación, esta metodología permite estimarlo de forma objetiva. Fue posible estimar altura y biomasa únicamente a partir de las imágenes obtenidas por el dron, pero no fue posible incorporar el DEM para dicha variable. Esta restricción fue solucionada utilizando puntos de muestreo en el campo, medido con regla y RPM para la realización de la CS. Este trabajo permitió un acercamiento y entendimiento del uso de la herramienta en sistemas pastoriles y generar información para poder validar el uso del dron para la estimación de biomasa en Uruguay, de todas formas, es necesario seguir estudiando a futuro y mejorar la calibración de la misma.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Aguerre, M., Cajarville, C., La Manna, A., Cavestany, D., Mendoza, A., Mattiauda, D., Carriquiry, M., Repetto, J., Meikle, A., & Chilbroste, P. (2017). Estrategias de alimentación de vacas lecheras en pastoreo: ¿Qué hemos aprendido de los sistemas comerciales y qué hemos generado desde la investigación en Uruguay? ANII; Udelar; Conaprole; INIA; CRI.
<http://inia.uy/Publicaciones/Paginas/publicacionAINFO-57907.aspx>
- Baeza, S., Paruelo, J., & Ayala, W. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 48-59.
<http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v15n2/v15n2a06.pdf>
- Batistoti, J., Marcato, J., Itavo, L., Matsubara, E., Gomes, E., Oliveira, B., Souza, M., Siqueira, H., Salgado, G., Akiyama, T., Gonçalves, W., Liesenberg, V., Li, J., & Dias, A. (2019). Estimating pasture biomass and canopy height in brazilian savanna using UAV Photogrammetry. *Remote Sensing*, 11(20), Article e2447.
<https://doi.org/10.3390/rs11202447>
- C-Dax. (s.f.). *Pasture meter manual lift*. <https://www.C-Dax.com/product/pasture-meter-manual-lift>
- Cangiano, C. A. (Ed.). (1997). *Producción animal en pastoreo*. INTA.
- Carámbula, M. (1991). *Aspectos relevantes para la producción forrajera*. INIA; CSIC.
- Carriquiry, M. (2013). Cadena de la carne vacuna. En M. Vasallo (Ed.), *Dinámica y competencia intrasectorial en el agro* (pp. 35-52). Udelar.
https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/3870/1/Fagro_Vasallo_2012-03-13_webO.pdf

- Chilibroste, P., & Battegazzore, G. (2014). *Proyecto Producción Competitiva 2014*. Conaprole.
- Chilibroste, P., & Battegazzore, G. (2019). *Proyecto Producción Competitiva 2013- 2018: Dinámica bio-económica de los sistemas de producción de leche*. Conaprole.
- Cooperativa Nacional de Productores de Leche. (2009). *Incorporación de las TICs en el proceso de gestión, monitoreo y control de sistemas pastoriles de producción de leche*.
<http://www.spluy.com/documentos/proyectosejecutados/informeincorporaciondelastics.pdf>
- DiMaggio, A. M., Perotto-Baldivieso, H. L., Ortega-S., J. A., Walther, C., Labrador-Rodriguez, K. N., Page, M. T., De la Luz Martinez, J., Rideout-Hanzak, S., Hedquist, B. C., & Wester, D. B. (2020). A pilot study to estimate forage mass from unmanned aerial vehicles in a semi-arid rangeland. *Remote Sensing*, 12(15), Article e2431.
<https://doi.org/10.3390/rs12152431>
- DJI. (s.f.). *Mavic 2: Specs*. <https://www.dji.com/mavic-2/info>
- Fernández, H. H. (2005). *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
- Galli, J. (2004). *Planificación forrajera*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/86-planificacion_forrajera.pdf
- Ganguli, A. C., Vermeire, L. T., Mitchell, R. B., & Wallace, M. C. (2000). Comparison of four non-destructive techniques for estimating standing crop in shortgrass plains. *Agronomy Journal*, 92(6), 1211-1215.

- García, A. J. (2003). *Crecimiento y calidad de gramíneas forrajeras en La Estanzuela*. INIA.
- Garrido, J. M. (2019). *Calibración y comparación de diferentes métodos de estimación de forraje disponible* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibrí.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29341>
- Google. (2022). [Facultad de Agronomía, Centro Regional Sur, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 20 de noviembre de 2022, de
<https://www.google.com/maps/@-34.6051501,-56.2402547,6854m/data=!3m1!1e3>
- Haydock, K. P., & Shaw, N. H. (1975). A comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 15(76), 663-670.
- Ibericadron (s.f.). Mavic 2 Pro. <https://www.ibericadron.com/tienda/dji/mavic-2-pro/dji-mavic-2-pro/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (s.f.a.). *Banco de datos agroclimáticos*. <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (s.f.b.). *Sistema de seguimiento de la productividad forrajera del campo natural (versión preliminar)*.
<http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20Direcci%C3%B3n%20Nacional/Paruelo%20-%20Productividad%20campo%20natural/M%C3%A1s%20informaci%C3%B3n.pdf>

- Insua, J. R., & Utsumi, S. (2017). *Nuevas tecnologías para el monitoreo de pasturas*. Sitio Argentino de Producción Animal.
https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/indice_verde/49-drones_en_ganaderia.pdf
- Krishna, K. R. (2018). *Agricultural drones: A peaceful pursuit*. Apple Academic Press.
- López, J., & Sosa, O. (2019). *Uso de herramientas alternativas en el monitoreo del forraje* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibrí.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29403>
- Mannetje, L. (2000). Measuring biomass of grassland vegetation. En L. Mannetje & R. M. Jones (Eds.), *Field and laboratory methods for grassland and animal* (pp. 151-177). CABI.
- Martínez, M. H., & Reyes, E. B. (2020). *Detección del forraje existente en praderas con imágenes adquiridas por drones* [Trabajo final de grado, Instituto Tecnológico de Huejutla]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México.
<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/1133>
- Michalk, D. L., & Herbert, P. K. (1977). Assessment of four techniques for estimating yield on dryland pastures. *Agronomy Journal*, 69(5), 864-868.
- Michez, A., Lejeune, P., Bauwens, S., Lalaina Herinaina, A., Blaise, Y., Castro Muñoz, E., Lebeau, F., & Bindelle, J. (2019). Mapping and monitoring of biomass and grazing in pasture with an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 11(5), Article e473.
<https://doi.org/10.3390/rs11050473>

- Michez, A., Lejeune, P., Knoden, D., Cremer, S., Decamps, C., & Jérôme, B. (2020). Can low-cost unmanned aerial systems describe the forage quality heterogeneity? Insight from a Timothy Pasture case study in Southern Belgium. *Remote Sensing*, 12(10), Article e1650. <https://doi.org/10.3390/rs12101650>
- Millapán, L. (2006). *Estimación de biomasa aérea en pasturas templadas* [Trabajo final de grado, Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2014millapanluisorlando>
- Moliterno, E. (1997). Estimación visual de la disponibilidad de forraje. *Cangué*, (9), 32-36.
- Mondelli, J. (2014). *Intensificación de la producción ganadera: Estudio de las características productivas en el litoral oeste del Uruguay* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibrí. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/27999>
- Montossi, F. (Ed.). (2013). *Invernada de precisión: Pasturas, calidad de carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental (GIPROCAR II)*. INIA <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2559/1/18429280114125310.pdf>
- 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 Babieri (Eds.), *Tecnologías de engorde de corderos pesados sobre pasturas cultivadas en Uruguay* (pp. 159-182). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7645/1/st-206-2013.-p.159-182.pdf>

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Anuario Estadístico Agropecuario 2021*. MGAP.
<https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2021/LIBRO%20ANUARIO%202021%20Web.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>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *Producción lechera*. <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/es/>
- Ortega, 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]. Colibrí.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29887>
- Perrachón, J. (2010). *Instalación de praderas*. Instituto Plan Agropecuario.
<http://www.eleche.com.uy/media/content/audio/source0000000011/AUD0000010000000274.pdf>
- Perrachón, J. (2015). *Instalación y manejo de praderas: Manejo de pasturas*. Instituto Plan Agropecuario.
<https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/filemanager/source/2021/Librillos/Librillo%20Instalaciones%20y%20manejo%20de%20praderas.pdf>
- Piñeiro, G., Oesterheld, M., & Paruelo, J. M. (2001). Estimación de la productividad y la biomasa aérea de pasturas templadas de Sud América mediante imágenes satelitales. *Revista Argentina de Producción Animal*, 21(1), 129-130.

- Quinodoz, J. E. (2004). *Criterios para la presupuestación del pasto*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/15-manejar_recurso_mas_barato.pdf
- Rennie, G. M., King, W. M., Puha, M. R., Dalley, D. E., Dynes, R. A., & Upsdell, M. P. (2009). Calibration of the C-Dax rapid pasture meter and the rising plate meter for kikuyu-based Northland dairy pastures. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 71(1), 49-55.
<https://www.nzgajournal.org.nz/index.php/ProNZGA/article/view/2779/2407>
- Reyes, C., Hepp, C., & Naguil, A. (2017). *Método directo para la mediación de materia seca y disponibilidad de forraje en praderas a pastoreo*. INIA. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/66866>
- Rodríguez, G., & Triñanes, I. (2018). *Uso de un UAV para estimar la altura del forraje* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibrí.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/28827>
- Rowbottom, M. (2015). *Potential of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and remote sensing to accurately estimate pasture biomass in intensively grazed dairy pastures* [Trabajo final de grado]. University of Western Australia.
- Ruales, D. (2018). *Pertinencia del uso de drones en la caracterización geoespacial del módulo dos junta de agua de riego de la comuna Morlán, Imbabura* [Tesis de maestría, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio UTN.
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7880>

- Rueda-Ayala, V., Peña, J. M., Högling, 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), Article e535.
<https://doi.org/10.3390/s19030535>
- Sanderson, M. A., Rotz, A. A., Fultz, S. W., & Rayburn, E. B. (2001). Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agronomy Journal*, 93(6), 1281-1286. <https://pubag.nal.usda.gov/download/26919/pdf>
- Schori, F. (2015). Sward surface height estimation with a rising plate meter and the C-Dax Pasturemeter. *Grassland Science in Europe*, 20(1), 310-312.
https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed_Matter/Proceedings/EGF2015.pdf#page=329
- 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
- Severova, V. (1997). *Clima del Uruguay*. Red Académica Uruguay.
https://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/Uy_c-info.htm
- Waller, A. (2020). *Análisis de metodología para el monitoreo de pasturas en predios comerciales* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibrí.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/32561>

7. ANEXOS

Anexo A. Estimación de biomasa con C-Dax.



Anexo B. Materiales utilizados para la determinación de biomasa disponible.
(RPM, regla, círculo, varillas).



Anexo C. Utilización de varillas de plástico y bidones blancos reutilizados, para georeferenciar la parcela y utilizarlos como puntos de referencia.



Anexo D. Muestras de pasturas en horno, para determinación de MS.



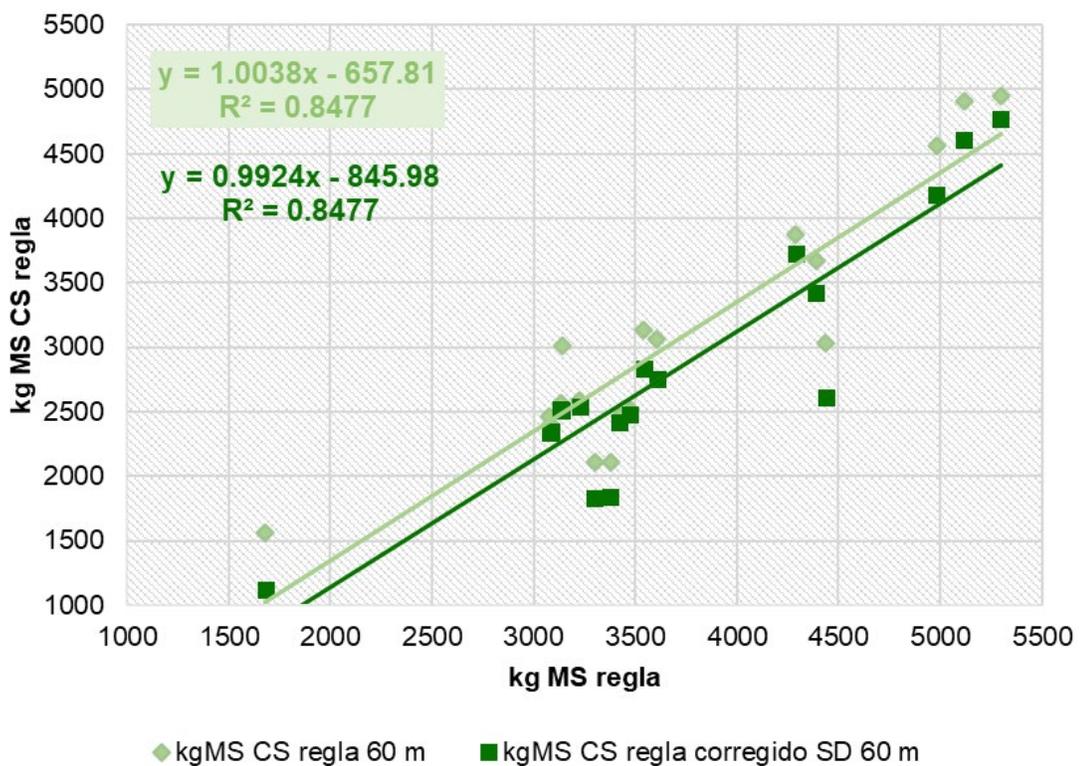
Anexo E. Descripción completa del Mavic 2 Pro

El Mavic 2 Pro cuenta con multirrotores, es un cuadricóptero ya que consta de 4 motores y tiene mecanismos auto estabilizantes y sensores que evitan colisiones y autoajusta la iluminación de la cámara. Está especializado en captura de imágenes (20 MP) y videos (4K) de alta calidad, y precisión. Sus cámaras son Hasselblad Sensor 1" CMOS, con una apertura variable F2.8/F11 y una resolución máxima 5472 x 3648 (JPG y DNG) lo que permite utilizar un perfil de color Dlog-M de 10 bits y registrar hasta mil millones de colores, a diferencia de los perfiles de 8 bits que sólo captan 16 millones de colores. Las baterías permiten realizar vuelos de 31 minutos y con alcance de hasta 18 km teniendo total control del dron, lo que permite cubrir extensas áreas (DJI, s.f.).

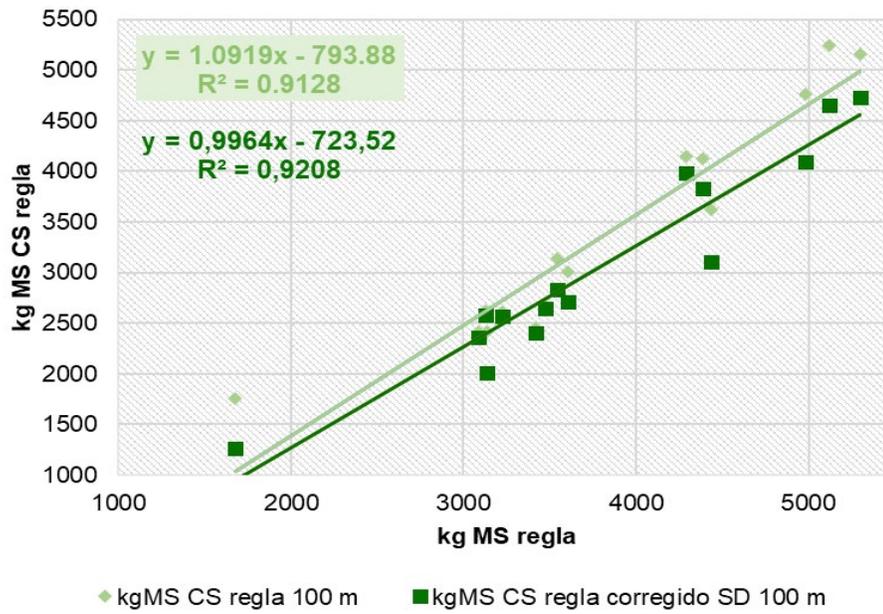
Bibliografía Anexo E

DJI. (s.f.). *Mavic 2: Specs*. <https://www.dji.com/mavic-2/info>

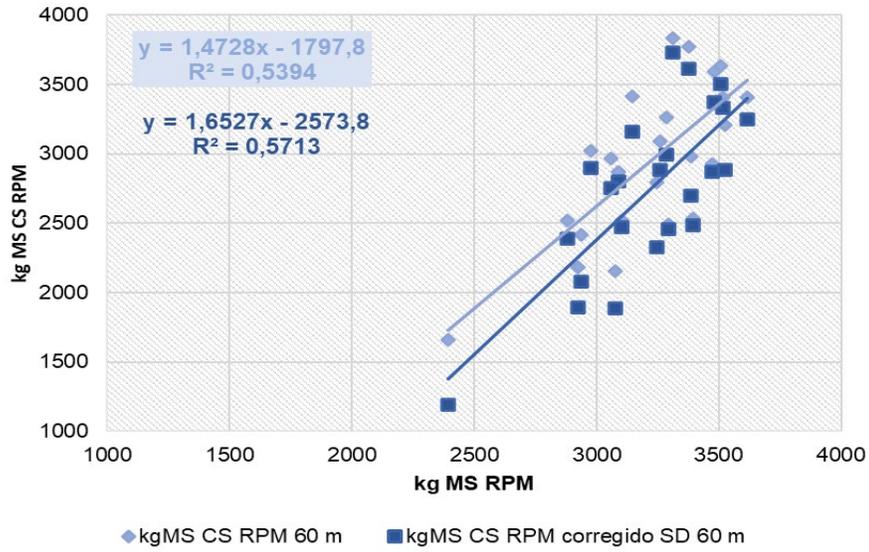
Anexo F. Relación entre la biomasa de la clasificación supervisada con regla a 60m y el corregido por suelos desnudo y bosteo.



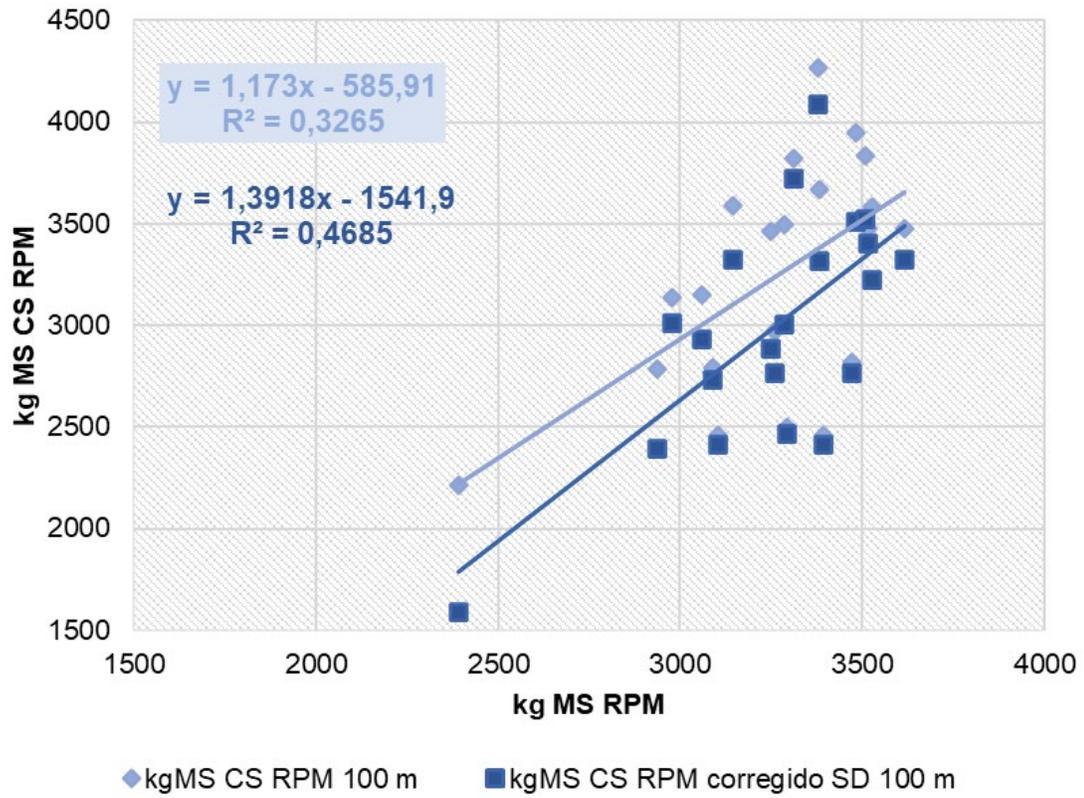
Anexo G. Relación entre la biomasa de la clasificación supervisada con regla a 100 m y el corregido por suelos desnudo y bosteo.



Anexo H. Relación entre la biomasa de la clasificación supervisada con RPM a 60m y el corregido por suelos desnudo y bosteo.



Anexo I. Relación entre la biomasa de la clasificación supervisada con RPM a 100 m y el corregido por suelos desnudo y bosteo.



Anexo J. Metodologías probadas para el análisis de datos.

Estimación de la altura de la pastura a través de los DEM

Con el fin de lograr una metodología similar a la de Batistoti et al. (2019), pero sin el uso de la tecnología RTK, se obtuvieron las imágenes de las diferentes parcelas y se crearon los DEMS. La idea inicial era restar la altura de cada punto georreferenciado obtenida a través del DEM de la superficie de la pastura, con el DEM correspondiente a la topografía del terreno y de esta forma obtener la diferencia de altura.

La primera dificultad encontrada es que el trabajo se inició cuando la pastura de festuca de 2do año ya estaba instalada en la parcela, por lo que no podíamos generar el DEM de la topografía del terreno sin la pastura, con una escala similar a la obtenida por los drones. La posibilidad de obtener estos datos era mediante una rotativa a muy baja altura lo que perjudica la pastura de segundo año, por lo que se descartó como solución.

Este dato es necesario dado que los puntos de altura georreferenciados que se obtienen del dron son sobre la elevación a nivel del mar (m.s.n.m) y al realizar los vuelos sobre la pastura, se obtienen datos de la superficie que representa la altura de la pastura más la elevación del terreno sobre m.s.n.m.

Cabe destacar que ya existen modelos digitales del terreno (DEM) que se pueden conseguir vía web, pero los que están disponibles para Uruguay se encuentran en una escala mayor a la que utiliza el dron y por lo tanto no es posible utilizarlo.

Otro inconveniente es que las alturas obtenidas por el dron entre fechas e incluso horarios sean con distintos intervalos en un mismo punto georeferenciado. Esa variación se debe a la calibración de la brújula, el ángulo en que le llega la señal desde el satélite e interferencias geomagnéticas. A su vez, se encontró que los DEM de distintas fechas no coincidían cuando se superponen para realizar la resta de alturas, es decir no estaban alineados, por lo que al hacer la resta no sería con los mismos puntos de georeferenciación. Para realizar la alineación tampoco es posible la utilización de puntos visuales de referencia sobre el terreno, dado que al crear los DEMs estos se tornan invisibles.

Con el objetivo de poder realizar una comparación de las alturas entre distintos vuelos, se realizó una normalización. De todas formas, no se lograron

resultados prometedores dado que lo obtenido no coincidía con los datos recabados a campo (regla y RPM), similar a lo obtenido por Rodríguez y Triñanes (2018) en un trabajo similar.

Al no obtener resultados con la normalización se pasó a probar otro método, el cuál llamamos “nivel cero”.

Nivel cero

Consistió en realizar un análisis a través de Excel tomando los datos de altura del DEM correspondiente al primer vuelo (fecha 1/7/2021), ya que en ese momento se encontraba poca biomasa disponible con baja altura, para tomarlo como topografía del terreno. Se restaron los valores de los DEMs de fechas posteriores al “nivel cero 1/7/2021” para lograr obtener la diferencia de altura, pero en este caso tampoco se obtuvieron resultados coherentes a las estimadas a campo, por lo que se continuó a probar otro método.

Pronóstico lineal

Llevando el vuelo a “nivel cero” (altura 1/7/2021) se hizo un “pronóstico lineal” en el Excel, dónde se intentó transpolar los datos de regla de los puntos de referencia, hacia todo el terreno de forma “lineal” (similar a utilizar una regla de tres). Como resultado obtuvimos que el promedio del dron siempre da por debajo del promedio medido con regla dentro de la parcela, lo que puede estar causado por:

- La cantidad de datos del dron
- La ubicación y representatividad de los puntos de referencia
- La cantidad de datos tomados con la regla y forma en la que fueron medidos

Este método suma los errores obtenidos por la regla más los del dron, dando diferencias de 40 cm entre fechas consecutivas, lo cual no eran coincidentes con lo visualizado a campo.

Bibliografía Anexo J

Batistoti, J., Marcato, J., Itavo, L., Matsubara, E., Gomes, E., Oliveira, B., Souza, M., Siqueira, H., Salgado, G., Akiyama, T., Gonçalves, W., Liesenberg, V., Li, J., & Dias, A. (2019). Estimating pasture biomass and canopy height in brazilian savanna using UAV Photogrammetry. *Remote Sensing*, 11(20), Article e2447. <https://doi.org/10.3390/rs11202447>

Rodríguez, G., & Triñanes, I. (2018). *Uso de un UAV para estimar la altura del forraje* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.