

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**MODELOS DE PREDICCIÓN DE BIOMASA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
LECHERA USANDO ÍNDICES DE VEGETACIÓN DE DRONES E IMÁGENES
SATELITALES**

por

María Victoria GONZÁLEZ TECHERA

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniera Agrónoma**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2025**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
"Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**".



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Directora:

Lic. Est. (Mag.) Natalia Berberian

Codirector:

Ing. Agr. (Mag.) Gastón Ortega

Tribunal:

Lic. Est. (Mag.) Natalia Berberian

Ing. Agr. (Dr.) María Virginia Gravina

Ing. Agr. (Mag.) Valeria Maciel Camacho

Fecha:

30 de diciembre de 2025

Estudiante:

María Victoria González Techera

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Sandra y Horacio, por haber confiado en mí, por apoyarme en cada etapa, por ser los cimientos cuando todo parecía inestable. Su resiliencia es un ejemplo para mí, les agradezco profundamente por todo el cariño que siempre me brindaron

A mi hermano menor Juan, por haberme acompañado en este camino, por las noches de estudio compartidas. Saber que mirabas como transitaba este camino siempre me dio fuerzas para seguir.

A mi hermano Mati, por siempre tener la palabra justa y enseñarme que si salís a buscar lo que querés, los sueños se cumplen.

A mi hermana mayor Flor, por mostrarme el camino.

A mi novio Germán, por estar siempre a mi lado. Compartir esta pasión con vos es de las cosas más lindas.

A mi abuela Mirta, por haberme paseado por el parque de esta Facultad cuando era niña, sin saber que un día iba a ser el lugar donde construiría mi carrera profesional. Gracias por los consejos de siempre, sé que estarías muy feliz por este logro.

A mis tutores Nati y Gastón, por haberme permitido realizar esta tesis junto ustedes. Su guía fue fundamental en este proceso, gracias por siempre estar dispuestos a compartir sus conocimientos, los cuales fueron esenciales para la elaboración de este trabajo.

En particular a Nati, por su enorme generosidad, paciencia y apoyo incondicional. Su acompañamiento fue fundamental para que pudiera volver a creer en mí y llegar al final de este camino.

A todo el equipo del DBEC que han sido parte importante en mi formación, aconsejándome y guiándome en cada etapa.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Hipótesis del trabajo.....	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Importancia del forraje en un sistema lechero	14
2.2 Herramientas para el monitoreo de la disponibilidad de biomasa	15
2.2.1 Método directo o destructivo	16
2.2.1.1 Corte y secado	16
2.2.2 Métodos indirectos o no destructivos	17
2.2.2.1 Doble muestreo o método de rendimientos comparativos	17
2.2.2.2 Regla graduada	18
2.2.2.3 Plato de placa ascendente.....	18
2.2.2.4 Pasturómetro C-Dax.....	19
2.2.2.5 Sensores remotos	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Ubicación y período del experimento	24
3.2 Materiales	24
3.3 Metodología experimental	25
3.3.1 A campo.....	25
3.3.2 En laboratorio	26
3.4 Metodología estadística.....	28
3.4.1 Descripción y características de las bases de datos.....	28
3.4.2 Estrategias de análisis	30
3.4.2.1 Análisis de correlación.....	31
3.4.2.2 Modelos de análisis para la predicción de biomasa a nivel de cuadro	32
3.4.2.3 Modelos de análisis para la predicción de la biomasa a nivel de potrero	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37

4.1	Análisis descriptivo	37
4.1.1	Base de datos 1	37
4.1.2	Base de datos 2	39
4.2	Correlaciones entre métodos	40
4.3	Modelos de análisis para la predicción de biomasa a nivel de cuadro	44
4.4	Modelos de análisis para la predicción de biomasa a nivel de potrero	47
5.	CONCLUSIONES	50
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
7.	ANEXO	55

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1 Resumen de los relevamientos de pasturas que conforman la base de datos 1	28
Tabla 2 Nomenclatura y definición de las variables utilizadas.....	29
Tabla 3 Estimación de los efectos fijos de los modelos lineales mixtos ajustados para la biomasa disponible	45
Tabla 4 Indicadores de ajuste y desempeño predictivo de los modelos según método de estimación de biomasa	46

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1 Ubicación del Centro Regional Sur y la distribución de potreros.....	24
Figura 2 Materiales para la recolección del forraje cortado al ras del suelo	26
Figura 3 Submuestras en bandejas colocadas en la estufa para su secado	27
Figura 4 Curvas de densidad de kg_MS_ha y Altura_cm, por recurso forrajero y conjunto total de observaciones	37
Figura 5 Curvas de densidad de RPM y NDVI_dron, por recurso forrajero y total de observaciones.....	39
Figura 6 Boxplots de NDVI_dron, NDVI_sentinel y Altura_CDax, por recurso forrajero y conjunto total de observaciones	40
Figura 7 Diagrama de dispersión entre kg_MS_ha y Altura_cm	41
Figura 8 Diagrama de dispersión entre RPM y la Altura_cm	42
Figura 9 Diagrama de dispersión entre NDVI_dron y RPM	43
Figura 10 Diagramas de dispersión entre Altura_CDax y los NDVI_dron, NDVI_sentinel	44

RESUMEN

La estimación precisa de la biomasa de pasturas es clave para la toma de decisiones en sistemas pastoriles, y requiere integrar información obtenida a distintas escalas espaciales y mediante diversos métodos. En este trabajo se integraron múltiples bases de datos provenientes de experimentos realizados en la Estación Experimental Centro Regional Sur (CRS), que combinan mediciones directas de campo, como ser: altura con regla graduada, altura comprimida mediante plato medidor (RPM) y pasturómetro C-Dax, con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) derivado de imágenes de dron y satelitales. El objetivo fue analizar las asociaciones entre variables estructurales y espectrales de la vegetación y evaluar el desempeño de distintos modelos predictivos de biomasa.

Los resultados evidenciaron asociaciones consistentes y predominantemente no lineales entre las mediciones directas y el NDVI, especialmente en el caso del NDVI obtenido mediante dron, donde se observaron patrones asociados a la saturación del índice y a diferencias en la arquitectura del dosel. Los modelos basados en mediciones directas presentaron mayor capacidad explicativa a nivel de efectos fijos; sin embargo, los modelos construidos a partir de NDVI de dron alcanzaron un desempeño predictivo comparable en validación. Asimismo, el modelo basado en NDVI satelital mostró una mayor estabilidad y un desempeño equivalente o superior al del NDVI de dron, atribuible a su mayor escala espacial y a la atenuación de la heterogeneidad intra-potrero.

En conjunto, los resultados confirman la complementariedad entre mediciones *in situ* y sensores remotos, y destacan el potencial de enfoques integrados para la predicción de biomasa de pasturas, permitiendo conciliar precisión, aplicación a distintas escalas y practicidad operativa en sistemas pastoriles reales.

Palabras clave: forraje, métodos indirectos, NDVI, sensores remotos, sistemas pastoriles

ABSTRACT

Accurate estimation of pasture biomass is essential for decision-making in grazing systems, it requires information obtained at different spatial scales using diverse measurement methods. This study integrates multiple datasets generated from experiments conducted at the Centro Regional Sur (CRS) Research Center, combining direct field measurements, such as: sward height measured with a ruler, compressed height obtained using a rising plate meter (RPM), and C-Dax pasture meter, using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from drone and satellite imagery. The goal was studying the relationships between structural and spectral vegetation variables and performance evaluation of different predictive models of pasture biomass.

Results revealed consistent and predominantly non-linear associations between direct measurements and NDVI, particularly for drone-derived NDVI, where patterns related to index saturation and differences in canopy architecture among species were observed. Models based on direct field measurements showed higher explanatory power at the fixed-effects level; however, models built using drone-derived NDVI achieved comparable predictive performance during validation. In addition, the satellite-based NDVI model exhibited greater stability and performance comparable to or better than the drone-based model, likely due to its broader spatial scale, which attenuates fine-scale within-paddock heterogeneity.

Overall, these findings highlight the complementarity between *in situ* measurements and remote sensing data, and support the use of integrated approaches for pasture biomass prediction. Such integration balances accuracy, applicability across different spatial scales, and practical implementation, offering strong potential to improve grazing management decisions and production planning.

Keywords: forage, grazing systems, indirect methods, NDVI, remote sensing

1. INTRODUCCIÓN

La producción agropecuaria en Uruguay se sustenta principalmente en sistemas pastoriles, los cuales abarcan una amplia extensión territorial conformada por el campo natural, campo natural mejorado, praderas sembradas y cultivos forrajeros anuales. El campo natural, junto con el campo natural mejorado, ocupa aproximadamente el 68,5% de la superficie explotada del país, mientras que las praderas sembradas y cultivos forrajeros anuales representan alrededor del 9,7% (Oficina de Estadísticas Agropecuarias, 2011). En conjunto, estos recursos constituyen el principal soporte de producción pecuaria del país.

Los pastizales naturales del Uruguay, también denominados campo natural, son ecosistemas caracterizados por una elevada biodiversidad vegetal y la provisión de múltiples servicios ecosistémicos, tales como la regulación hidrológica, el secuestro de carbono, el control de la erosión y el mantenimiento de hábitats para numerosas especies (Nabinger et al., 2011). Por su parte, las praderas sembradas, si bien presentan una diversidad biológica menor en comparación con el campo natural, también contribuyen a la provisión de servicios ecosistémicos relevantes, en particular aquellos asociados a la producción forrajera y a la estabilidad de los servicios productivos (Dietl et al., 2009).

Adicionalmente, ambos recursos tienen un rol central en la alimentación de los sistemas de producción pecuaria del país. La producción de carne y leche se desarrolla mayoritariamente bajo esquemas pastoriles, en los cuales el pasto consumido mediante cosecha directa representa la base de la dieta animal.

En particular, el sistema lechero uruguayo tiene una importancia estratégica debido a su perfil exportador, con exportaciones que representan el 70% del volumen producido (*Uruguay lechero*, 2025). En este contexto, la competitividad del sistema depende en gran medida de la eficiencia en los costos de producción, siendo la alimentación el principal componente (Vahidi et al., 2023), ya que representa aproximadamente 65% de los costos totales (Oleggini et al., 2017). La cosecha directa del pasto por los animales es reconocida como la fuente alimenticia de menor costo dentro del sistema productivo, y representa entre el 50 y 75% de la dieta anual de los animales (Aguerre et al., 2017; Oleggini et al., 2017).

Una correcta gestión del recurso forrajero resulta fundamental para preservar los servicios ecosistémicos que este brinda como para la optimización del desempeño productivo de los sistemas pastoriles. En ese sentido, conocer la cantidad y la calidad de la biomasa disponible constituye un aspecto central para tomar decisiones de manejo orientadas a mejorar la eficiencia productiva y la rentabilidad de los sistemas ganaderos pastoriles (*Monitoreo*

satelital..., s.f.). Esta información es especialmente relevante en sistemas lecheros, donde permite ajustar el área destinada al pastoreo, planificar la rotación de potreros y maximizar la eficiencia productiva del sistema (“El INTA presenta una web...”, 2025).

Los métodos tradicionales de cuantificación de biomasa, como la medición de altura de la pastura mediante regla graduada, o el uso de platos medidores (RPM, del inglés Rising Plate Meter) o equipos proximales como el escáner portátil C-Dax, demandan diferentes grados de esfuerzos operativos, pero todos comparten la necesidad de realizar mediciones directas en el potrero. Asimismo, en mayor o menor medida, presentan limitaciones asociadas a la representatividad espacial de las mediciones obtenidas (Arrillaga & Píriz, 2021; Secco, 2025; Susruthan et al., 2025).

En este contexto, los avances tecnológicos recientes han generado alternativas más eficientes y precisas para la estimación de biomasa forrajera. La teledetección permite estimar indirectamente la biomasa vegetal a partir de índices espectrales, entre los cuales se destaca el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, del inglés Normalized Difference Vegetation Index) (Insua & Utsumi, 2016). Dicho índice puede obtenerse a partir de sensores montados en vehículos aéreos no tripulados (UAV del inglés Unmanned Aerial Vehicle) comúnmente denominados drones, o mediante imágenes satelitales, facilitando la cobertura espacial de grandes superficies y reduciendo el esfuerzo de realizar mediciones directas en el campo (Secco, 2025). El NDVI derivado de drones se caracteriza por ofrecer una alta resolución espacial, lo que permite incrementar la precisión de las estimaciones a escala de cuadro de muestreo y generar mapas detallados de la variabilidad espacial de la biomasa y la cobertura vegetal dentro de los potreros (Ribarola & Villanueva, 2023; Viljanen et al., 2018). Por su parte, el NDVI obtenido a partir de imágenes satelitales ofrece una cobertura espacial más amplia y de acceso libre o de menor costo, resultando ser una herramienta particularmente útil para evaluar la disponibilidad de forraje a escala de potrero o de predio completo, sin la necesidad de realizar medidas puntuales en el campo sistema (“El INTA presenta una web...”, 2025).

Diversos trabajos han mostrado que las técnicas de teledetección, tanto a partir de drones como de imágenes satélites, pueden integrarse con mediciones tradicionales para caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la biomasa en pastizales (Vahidi et al., 2023). Sin embargo, estos enfoques suelen evaluarse de manera aislada dentro de cada estudio, utilizando un conjunto fijo de mediciones y un diseño específico. Como resultado, pocas veces se aprovecha de forma conjunta la heterogeneidad presente en múltiples bases de datos generadas con

distintos propósitos, metodologías y niveles de detalle, lo que limita el potencial de estas herramientas para una evaluación más robusta y generalizable.

En este marco, el presente trabajo propone integrar múltiples bases de datos generadas en distintos experimentos realizados en la Estación Experimental Centro Regional Sur (CRS), que combinan mediciones directas de campo, como ser altura con regla, RPM y C-Dax, junto con índices de vegetación derivados de imágenes capturadas a través de drones y satélites. Esta integración permitirá analizar patrones de relación entre variables estructurales y espectrales de la vegetación, más allá del alcance de cada experimento individual, aprovechando la heterogeneidad del conjunto para explorar la consistencia y el potencial predictivo de estas relaciones.

1.1 Hipótesis del trabajo

Hipótesis 1: Las mediciones directas de biomasa de la pastura (altura medida con regla graduada, altura comprimida mediante RPM y pasturómetro C_Dax) y el NDVI derivado de imágenes de dron y satelitales presentan asociaciones consistentes de tipo no lineal en el conjunto de datos analizado.

Hipótesis 2: Los modelos predictivos basados en NDVI obtenido mediante dron alcanzan un desempeño predictivo igual o superior al de los modelos construidos exclusivamente a partir de mediciones directas de campo (regla graduada y RPM).

Hipótesis 3: El modelo predictivo basado en NDVI derivado de imágenes satelitales presenta un desempeño igual o superior al basado en NDVI de dron, debido a que la mayor escala espacial del sensor satelital atenúa la heterogeneidad fina intra-potrero y permite capturar de forma más estable el estado promedio de la vegetación.

1.2 Objetivos

1.2.1 **Objetivo general**

Desarrollar y evaluar modelos de predicción de biomasa de pasturas integrando mediciones directas de campo (regla, RPM y C-Dax) con índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) derivados de sensores remotos (dron e imágenes satelitales), analizando su capacidad para predecir la disponibilidad de forraje en distintos contextos experimentales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Objetivo 1: Analizar las asociaciones entre diferentes métodos directos de estimación de biomasa de pasturas (altura medida con la regla graduada, altura comprimida obtenida con el plato medidor (RPM) y pasturómetro C-Dax) y el NDVI derivado de imágenes de dron y satelitales.
- Objetivo 2: Ajustar y validar modelos predictivos de biomasa de pasturas basados en el NDVI obtenido con dron, comparando su desempeño frente a modelos basados en mediciones directas (regla graduada y RPM), evaluando su capacidad para predecir la biomasa en distintos escenarios.
- Objetivo 3: Comparar el desempeño de un modelo predictivo de biomasa de pasturas basado NDVI de dron con un modelo equivalente basado en NDVI satelital.

2. **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

2.1 **Importancia del forraje en un sistema lechero**

Los sistemas lecheros en Uruguay son predominantemente de base forrajera, sustentados tradicionalmente en el pastoreo de pasturas templadas en estado vegetativo, las cuales se adaptan mejor a las condiciones climáticas del país y representan una alternativa de bajo costo y alto valor nutritivo (Cajarville et al., 2012). Este sistema pastoril se complementa habitualmente con el suministro de suplementos estratégicos, utilizados para corregir desbalances entre la oferta de forraje y los requerimientos nutricionales de las vacas en producción, particularmente en períodos de déficit forrajero o elevada demanda productiva (“La producción de leche en Uruguay”, 2001; Viglizzo, 1981).

De igual manera, Oleggini et al. (2017) destacan el rol central del forraje en los sistemas lecheros, enfatizando que su aporte, tanto en forma de pastoreo directo como de reservas forrajeras, resulta fundamental no solo en la conformación de la dieta, sino también en la estructura de costos y en los resultados económicos generales de las empresas. Los autores señalan que, en los tambos uruguayos, entre el 50 y 75 % de la dieta proviene de forrajes producidos y cosechados dentro del propio establecimiento, y resaltan que la eficiencia en la cosecha de forraje se encuentra estrechamente vinculada con el desempeño productivo y económico del sistema lechero. Si bien no constituye una condición suficiente por sí sola, una adecuada producción y utilización del forraje es considerada necesaria para alcanzar resultados económicos favorables, dado que los costos de alimentación pueden representar hasta el 65 % de los costos totales del tambo (Oleggini et al., 2017).

La gestión del forraje es un proceso que tiene como foco maximizar la cantidad y calidad de pasto producido (Oleggini et al., 2017). Para lograrlo, es clave mantener altas tasas de crecimiento en las pasturas, a través de un manejo adecuado entre la oferta y la demanda de forraje, la cual constituye un factor determinante en los sistemas pastoriles (Lombardo, 2022).

Lombardo (2022) resalta la importancia de conocer las consecuencias de distintos niveles de intensidades de pastoreos. Un pastoreo intenso puede conducir a una disminución en la calidad de la dieta, mientras que pastoreos demasiado aliviados generan pérdidas de crecimiento en el forraje debido al sombreado y al pisoteo. En este contexto, la estimación de biomasa disponible resulta ser una de las prácticas más importantes en el manejo del forraje, ya que es una herramienta clave para la toma de decisiones vinculadas al manejo del pastoreo (Pizzio & Fernández, 2003).

2.2 Herramientas para el monitoreo de la disponibilidad de biomasa

Según Fariña et al. (2017) los establecimientos lecheros operan con el objetivo de transformar pasto en leche, para ello buscan lograr una mayor producción de materia seca del forraje y asegurar su buen aprovechamiento en producción de leche. En este marco, el monitoreo de la disponibilidad de biomasa constituye una herramienta clave para la toma de decisiones de manejo.

Fariña et al. (2017) identifican tres pasos esenciales a implementar para lograr una buena gestión del pasto, los que se conocen como “Las 3 R”: Recorrida, Rotación y Remanentes. Las recorridas son el primer paso, las cuales deberán hacerse de manera semanal para estimar la biomasa disponible por potrero y conocer el crecimiento diario del área total destinada al pastoreo. El segundo paso es ajustar la rotación de manera tal que, mediante el área de pastoreo asignada al rodeo, este consuma la totalidad del crecimiento diario del forraje. Por último, se debe controlar los remanentes para no comprometer el rebrote de las pasturas; en este sentido, se recomienda mantener una altura remanente cercana a 5 cm entre las matas de pasto rechazado y que estas no superen el 15 % del área pastoreada.

El primer paso de la gestión del pasto consiste en conocer la cantidad de forraje disponible. Tal como mencionan Fariña et al. (2017) “no es posible manejar lo que no se observa ni se mide”, (p. 3), resulta fundamental contar con herramientas que permitan evaluar de manera objetiva la disponibilidad de forraje. Esta información es clave para conocer el estado del área de pastoreo y para apoyar decisiones de manejo orientadas a un manejo correcto de las pasturas y los animales (Fariña et al., 2017; Montossi et al., 2013).

Los métodos para cuantificar la disponibilidad de forraje en un potrero son diversos y no es posible identificar un único método como el más adecuado, ya que su elección depende de los objetivos, la mano de obra necesaria para llevar a cabo la actividad y los recursos financieros disponibles (Canseco et al., 2007; Ramos et al., 2021). Al momento de seleccionar un método, este debe representar con precisión el área evaluada para evitar subestimación o sobreestimación de la cantidad de biomasa disponible, las que podrían llevar a comentes errores al momento de tomar decisiones de manejo (Zanine et al., 2006).

Las estrategias para la medición de biomasa pueden clasificarse en dos grupos: método directo o destructivo, que se basa en el corte y levante de la totalidad del forraje presente en un área de muestreo; y métodos indirectos o no destructivos, que no generan daños sobre la pastura y se caracterizan por ser procedimientos más rápidos y con menor demanda de mano de obra (Zanine et al., 2006). Los métodos directos son ampliamente utilizados para calibrar los

métodos indirectos, así como para comparar y establecer asociaciones entre la disponibilidad real de forraje y las estimaciones obtenidas a partir de procedimientos no destructivos. De este modo, es posible respaldar la validez y el uso de métodos indirectos (Canseco et al., 2007).

2.2.1 Método directo o destructivo

2.2.1.1 Corte y secado

Este método se basa en la realización de cortes de forraje utilizando un cuadro de área conocida. Según Irigoyen (2011) los sitios de muestreo deben seleccionarse de manera que sean representativos de la situación promedio de la pastura. En contraste Canseco et al. (2007) consideran que los muestreos deben realizarse completamente al azar y con un número suficiente de repeticiones, o puntos de corte, de modo que cubran adecuadamente toda la superficie del potrero.

El forraje debe cortarse al ras del suelo con el fin de estandarizar la metodología. Posteriormente, las muestras se colocan en bolsas debidamente identificadas según el número de repetición, y posteriormente se determina el peso fresco utilizando una balanza (Canseco et al., 2007). Para conocer el contenido de materia seca de la muestra, se debe realizar la eliminación del agua mediante el secado en estufas u hornos de secado, o bien mediante el uso de hornos microondas, en este último caso se recomienda colocar un recipiente con agua para evitar la incineración del forraje. Una vez completado el proceso de secado, se registra nuevamente el peso de la muestra. El porcentaje de materia seca se calcula mediante el cociente entre el peso seco y el peso fresco, multiplicado por 100. Conociendo el área del cuadro de muestreo, este valor puede extrapolarse al área de interés (Canseco et al., 2007; Irigoyen, 2011).

La determinación de la biomasa mediante cortes constituye el método de referencia y es metodológicamente superior al resto de los métodos de estimación. No obstante, su elevada precisión se alcanza a una escala espacial reducida, correspondiente al área del cuadro de muestreo, lo que limita su representatividad a nivel de potrero. En sistemas pastoriles reales, caracterizados por una marcada heterogeneidad espacial de la biomasa, su utilización como única herramienta resulta operativamente inviable, ya que sería necesaria la recolección y procesamiento de un número elevado de muestras para captar dicha variabilidad y obtener estimaciones representativas a escala productiva (Canseco et al., 2007; Sanderson et al., 2001).

2.2.2 Métodos indirectos o no destructivos

Los métodos indirectos de estimación de biomasa, también denominados métodos no destructivos, se basan en la medición de variables relacionadas con la estructura o el estado del forraje sin necesidad de realizar cortes ni extracciones del material vegetal. A diferencias del método directo, estas técnicas permiten realizar un mayor número de mediciones con menor costo y esfuerzo operativo, manteniendo intacta la estructura vegetal.

Sin embargo, dado que no cuantifican directamente la biomasa disponible, su utilización requiere de procesos de calibración frecuentes mediante esquemas de doble muestreo. En estos esquemas, las mediciones indirectas se ajustan a estimaciones obtenidas a partir del método directo, con el fin de lograr estimaciones confiables de la disponibilidad de forraje (Canseco et al., 2007).

2.2.2.1 Doble muestreo o método de rendimientos comparativos

Haydock y Shaw (1975) desarrollaron este procedimiento con el objetivo de combinar la precisión del método directo con la rapidez y eficiencia de los métodos indirectos. Se basa en la selección de cinco cuadros de referencia que representen un gradiente desde baja hasta alta disponibilidad de forraje, razón por la cual es recomendable realizar una recorrida previa del potrero.

Estos cuadros conformaran una escala visual de rendimiento y es conveniente ubicarlos próximos entre sí para facilitar su consulta durante el muestreo. Posteriormente, se debe recorrer el potrero siguiendo un patrón que permita transitarlo de manera representativa (por ejemplo, en zigzag). Cada cierta cantidad de pasos, se debe dejar caer el cuadro de muestreo y se clasifica la biomasa presente comparándola con la escala de referencia previamente definida.

Una vez cubierto todo el potrero, se procede al corte de los cuadros de referencia, o bien de dos cuadrantes por cada categoría de la escala. Luego, las muestras obtenidas son llevadas al laboratorio para determinar su contenido de materia seca. Esta información se utiliza en conjunto con la frecuencia de aparición de cada escala en el potrero para realizar un promedio ponderado y de esta manera definir la cantidad de materia seca presente en el potrero (Haydock & Shaw, 1975).

2.2.2.2 Regla graduada

La regla graduada es una herramienta simple y ampliamente utilizada para estimar la altura del tapiz y, a partir de ella, la disponibilidad de forraje en un área determinada. Su aplicación se basa en la alta correlación existente entre la altura de la pastura y la biomasa disponible (Virkajarvi, 1999). Para asegurar la consistencia de las mediciones, es importante que la regla toque el suelo y de disponga de manera vertical, para así registrar la altura en el punto donde la primera hoja verde hace contacto con la regla (Montossi et al., 2013).

Entre las principales ventajas de este método se destaca su facilidad de uso, su bajo costo y la posibilidad de obtener resultados de manera inmediata, lo que lo convierte en una herramienta práctica en la gestión del pasto. No obstante, presenta limitaciones relevantes. Por un lado, las mediciones dependen en gran medida de la percepción del observador, lo que puede introducir sesgos y generar variabilidad entre mediciones. Por otro, la técnica no capta cambios en la densidad del forraje, por lo que puede subestimar o sobreestimar la disponibilidad en situaciones de alta heterogeneidad espacial. Además, cuando las mediciones se registran de forma individual, el procedimiento puede volverse laborioso y demandar un tiempo considerable (Montossi et al., 2013)

Para convertir las mediciones de altura en valores de disponibilidad expresados en kg MS/ha es necesario contar con un modelo de regresión. Dichos modelos se obtienen de trabajos de investigación en los que la altura del forraje se haya calibrado, generalmente bajo el esquema de doble muestreo explicitado en la sección 2.2.2.1 (Montossi et al., 2013; Rossetti, 2022).

Virkajarvi (1999) menciona que dichas ecuaciones de regresión no son únicas ni universales, dado que pueden variar entre fechas de medición y condiciones de crecimiento del forraje. En su estudio, reportó una desviación estándar residual promedio de 392 kg MS/ha en el conjunto de las regresiones ajustadas, y concluyó que el hecho de convertir altura en biomasa introduce una fuente adicional de incertidumbre en la estimación de la disponibilidad de forraje.

2.2.2.3 Plato de placa ascendente

Castle (1976) propuso un instrumento de disco que dio origen a los primeros intentos de estimación no destructiva de la biomasa en pasturas mediante dispositivos que integren la altura y la densidad del tapiz. Actualmente conocido como plato de levante, plato de altura comprimida o *rising plate meter* (RPM), es un instrumento compuesto por una varilla estriada y un plato de peso conocido, cuyo desplazamiento vertical permite estimar la altura comprimida del forraje (Bareth & Schellberg, 2018).

La forma en que este método integra simultáneamente, en cada medición, la altura y la densidad de la masa de forraje lo ha convertido en un método indirecto ampliamente utilizado para la estimación de la biomasa disponible en sistemas pastoriles (*Rising Plate Meter*, s.f.). Su funcionamiento consiste en dejar caer el plato sobre la pastura, de modo que este ejerza una presión constante sobre el forraje. Este mecanismo permite considerar la densidad del forraje, superando así una de las limitaciones de la regla graduada. En pasturas más densas, el plato se enfrenta a una mayor resistencia para descender, lo que se traduce en valores más altos de altura comprimida.

El estado fenológico de la pradera también influye en las mediciones realizadas con RPM, ya que el grado de lignificación aumenta la resistencia del forraje al peso del plato. Por esta razón la asociación entre la altura comprimida y la disponibilidad de materia seca suele ser más precisa cuando la pradera se encuentra en estado vegetativo (Canseco et al., 2007; Montossi et al., 2013).

Como el RPM es una medición indirecta de la biomasa disponible, es necesario contar con una ecuación que vincule dicha variable con la disponibilidad de biomasa. Virkajarvi (1999) realizó este ajuste mediante una regresión lineal siempre y obtuvo un coeficiente de determinación de 0,64 y un valor de la desviación estándar residual de 392 kg MS/ha. Estos resultados resaltan la importancia de realizar calibraciones específicas y ajustadas a las condiciones productivas en las que se aplica el método.

2.2.2.4 Pasturómetro C-Dax

El pasturómetro C-Dax es un dispositivo electrónico de arrastre que se acopla a vehículos livianos, como cuatriciclos o tractores pequeños, y permite realizar mediciones de la altura de la pastura mientras es remolcado a velocidades de hasta 20 km/h sobre el área de interés. El equipo presenta un diseño en forma de arco y se encuentra equipado con 18 haces de luz, los cuales son atravesados por el forraje al paso del instrumento. A partir de ello, el sistema registra 200 mediciones de altura por segundo, que luego son procesadas por un software interno para obtener valores promedio representativos de la superficie muestreada (C-Dax, s.f.).

Una de las principales ventajas de este instrumento es la reducción significativa de los tiempos operativos en comparación con otros métodos no destructivos de estimación de biomasa. Schori (2015) señala que, remolcado por un cuatriciclo, el C-Dax puede cubrir más de 100 m² por minuto. En este sentido, Ortega et al. (2023) reportan que es un método que logra una reducción en el tiempo operativo de hasta un 85% respecto al RPM. Adicionalmente, estos

autores destacan que, en comparación con la regla graduada y el RPM, el C-Dax es un método que permite capturar mejor la heterogeneidad espacial del tapiz forrajero.

En el contexto de sistemas pastoriles uruguayos, diversos autores han evaluado y calibrado el uso del C-Dax como estimador indirecto de la biomasa forrajera. Ortega et al. (2023) y Waller (2020) coinciden que el instrumento constituye un buen predictor de la biomasa disponible para distintos tipos de recursos forrajeros.

Ortega et al. (2023) reportan que el ajuste de un modelo de regresión entre el C-Dax y la biomasa disponible como variable de respuesta, a nivel de potrero, presentó un coeficiente de determinación de 0,64 y un valor de error cuadrático medio (RMSE) de 291 kg MS/ha. Los autores sostienen que el C-Dax es un método que tiene gran capacidad de integrar espacial y temporalmente un elevado número de mediciones, por lo cual se adapta a superficies de pastoreo mayores que las de cuadro de muestreo donde no presenta gran precisión. Por su parte, Waller (2020) realizó un estudio de calibración del C-Dax para las condiciones productivas del país, reportando un ajuste (R^2) de 0,40 para la totalidad de los datos y un RMSE de 602 kg MS/ha. En conjunto, estos antecedentes muestran que el C-Dax constituye una herramienta válida para la estimación indirecta de biomasa, aunque su desempeño puede variar según el contexto de aplicación, lo que destaca la importancia de considerar la escala y el diseño de medición al momento de su utilización.

2.2.2.5 Sensores remotos

Todos los métodos descriptos anteriormente requieren mediciones *in situ*, las cuales, en diferentes grados, son laboriosas y presentan dificultades para caracterizar la variabilidad espacial. En este contexto, los avances en la tecnología de sensores remotos han impulsado el desarrollo de cámaras multiespectrales, aptas para la instalación en vehículos aéreos no tripulados (UAV). Estas herramientas han ampliado su uso hacia la monitorización de cultivos y pasturas, permitiendo realizar mediciones rápidas y automáticas de grandes áreas con alta resolución espacial (Insua et al., 2019; Viljanen et al., 2018).

Gonçalves et al. (2023), en su trabajo de revisión, detectaron en los últimos diez años un incremento en el interés por aplicar la teledetección con UAVs para la estimación de la biomasa área en pastizales. Este aumento se explica por el hecho de que estas herramientas pueden ser operadas de forma rápida, sencilla y económica, y además son capaces de recopilar datos de imágenes con altas resoluciones espaciales, espectrales y temporales.

En el contexto de los sistemas pastoriles, la información obtenida mediante sensores remotos se procesa habitualmente a partir de índices de vegetación (IVs), entre los cuales el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es uno de los más utilizados. Estos índices sintetizan el estado del dosel vegetal y se asocian principalmente con el verdor y la actividad fotosintética de la vegetación. Varios estudios han mostrado relaciones positivas con variables productivas, como la biomasa aérea y la altura del forraje, particularmente en pasturas en estado vegetativo (Gonçalves et al., 2023).

Los IVs son combinaciones de bandas espectrales que permiten resaltar características biofísicas de la vegetación. Su uso se ha generalizado en estudios de estimación de biomasa debido a su capacidad para integrarse en modelos que relacionan la respuesta espectral con mediciones de campo de materia seca, índice de área foliar, entre otras variables relacionadas al dosel.

Particularmente, el NDVI constituye uno de los IVs más empleados debido a su simpleza, su capacidad para distinguir la presencia o ausencia de vegetación, así como el estado general de la misma. Este índice se calcula a partir de la reflectancia de la vegetación en dos regiones del espectro electromagnético, el rojo (R), banda donde la clorofila absorbe fuertemente la radiación, y el infrarrojo cercano (NIR), banda donde la vegetación fotosintéticamente activa refleja gran parte de la radiación. El cálculo del NDVI está dado por la siguiente relación entre R y NIR.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Las hojas de las plantas presentan grandes cantidades de clorofila, la cual tiene la característica de absorber un rango amplio del espectro visible y reflejar el no visible. De acuerdo con la ecuación del NDVI (Ec. 1), cuanto más grande es la magnitud de la reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) con respecto a la del rojo (R), más cercano a 1 será el valor del NDVI. En este sentido, valores de NDVI cercanos a 1 indican una gran densidad de vegetación con alto contenido de clorofila, mientras que valores bajos indican escasa cobertura vegetal o superficies sin vegetación (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022).

En la literatura es posible encontrar diversos trabajos que combinan mediciones directas de campo con datos provenientes de sensores remotos para la estimación de la disponibilidad de pastura. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se desarrollan en contextos experimentales específicos, con diseños y objetivos claramente delimitados o centrados en comparaciones puntuales entre tecnologías. En este sentido, Gonçalves et al. (2023), en su trabajo de revisión,

reportan que el NDVI utilizado como predictor de la biomasa aérea en modelos de regresión lineal presentan una relación positiva y significativa, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,60 y 0,80. Los valores más elevados se observan principalmente en estudios realizados sobre forrajes en estado vegetativo y en rangos intermedios de biomasa, mientras que a valores altos de biomasa el índice tiende a saturarse, reduciendo su capacidad para captar variaciones en la disponibilidad de forraje.

En línea con estos resultados, a nivel internacional se han desarrollado estudios que integran sensores terrestres, como el RPM y el C-Dax, con índices espectrales derivados de drones y satélites para el monitoreo de la biomasa en sistemas lecheros. Estos trabajos demuestran que la calibración de los índices espectrales mediante mediciones directas de campo permite generar estimaciones de biomasa confiables. No obstante, dichas estimaciones dependen del contexto productivo y de la escala de análisis considerada (Gargiulo et al., 2023).

En Uruguay, diversos estudios han empleado imágenes obtenidas mediante drones para estimar biomasa y altura de pasturas, calibrando la información espectral y estructural con mediciones directas realizadas mediante regla graduada y RPM (Artola & Pérez, 2024; Ribarola & Villanueva, 2023). Asimismo, se ha utilizado el NDVI derivado de drones en combinación con sensores terrestres, como el C-Dax y RPM, para la calibración y validación de estimaciones de biomasa disponible (Secco, 2025).

Al comparar las tecnologías de teledetección, Repetto (2016) explicó que tanto los drones como los satélites presentan ventajas y desventajas. En particular, destaca que los drones constituyen una herramienta con un alto grado de versatilidad, ya permiten un trabajo más autónomo en función de las necesidades del operador. Los drones posibilitan realizar vuelos en el momento deseado y ajustar variables como la resolución espacial, la altura de vuelo y la frecuencia de adquisición de imágenes. Asimismo, el uso de drones permite efectuar la cantidad de vuelos que el operador considere necesaria. Por otro lado, las imágenes satelitales se adquieren bajo geometrías fijas, dado que capturan la información siempre desde la misma posición orbital, lo cual puede ser considerado una ventaja.

La literatura revisada muestra un amplio desarrollo de metodologías para la estimación de biomasa forrajera mediante la integración de sensores remotos y mediciones directas de campo, con resultados generalmente satisfactorios en contextos experimentales bien definidos. No obstante, la mayoría de los estudios se apoya en calibraciones específicas, asociadas a una única especie forrajera, a escalas espaciales acotadas o a condiciones de manejo particulares. En este marco, se identifica un espacio para avanzar en abordajes integradores que exploren relaciones

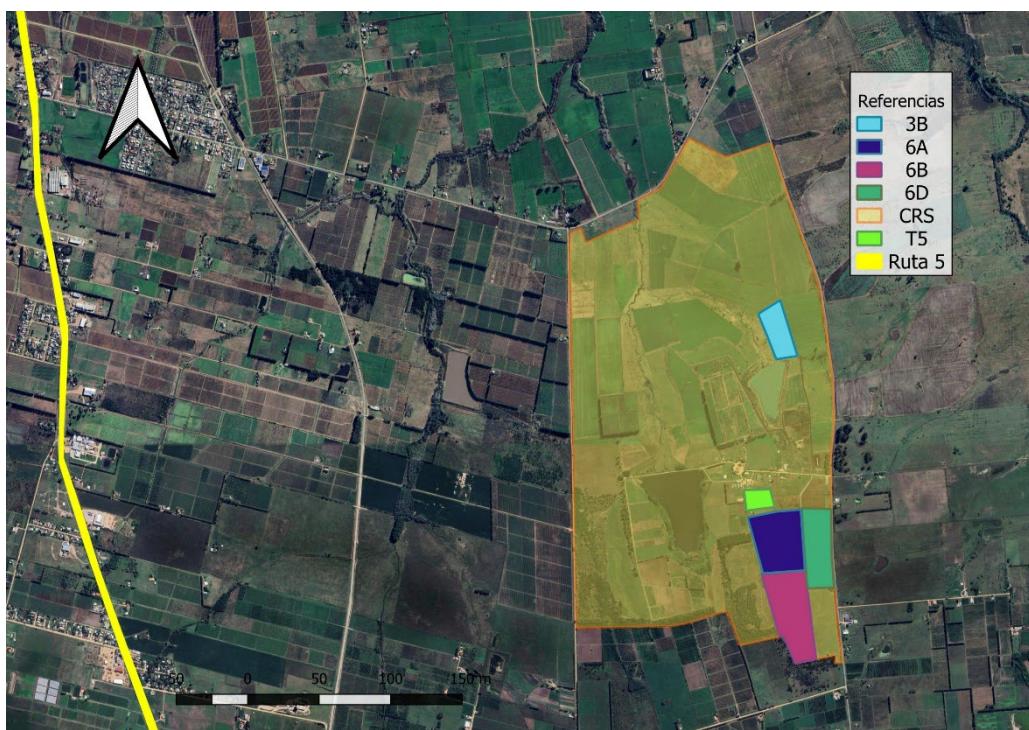
entre variables estructurales y espetrales a partir de conjuntos de datos más heterogéneos, provenientes de distintos experimentos y contextos productivos, con el objetivo de evaluar la estabilidad de dichos vínculos y su potencial de generalización en sistemas pastoriles reales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación y período del experimento

La información analizada provino de una serie de muestreos realizados en el marco de distintos ensayos experimentales llevados a cabo en diferentes años. Todos los ensayos se ubicaron en el Centro Regional Sur (CRS), estación experimental perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, situada en la localidad de Progreso, departamento de Canelones, Uruguay (latitud 34°36'53.28"S, longitud 56°13'00.07"O).

Figura 1
Ubicación del Centro Regional Sur y la distribución de potreros



Nota. Adaptado de Google (2025).

Los datos se recopilaron durante cuatro períodos de aproximadamente tres meses cada uno, comprendidos entre diciembre del 2023 y septiembre del 2025, las mediciones se realizaron con intervalos semanales, en praderas templadas que tienen como base el componente gramínea perenne, el cual se combina en mezcla con leguminosas.

3.2 Materiales

Para la etapa de campo se requirieron los siguientes materiales: una regla graduada y un plato medidor RPM para medir la altura del forraje, cuadros de madera de dimensiones 0,52 ×

0,32 m, etiquetas para identificar las repeticiones, tijera y bolsas identificadas para cortar y trasladar las muestras de forraje.

El instrumento utilizado para obtener las imágenes aéreas fue un dron *DJI Phantom 4 Multispectral*. El dron se encuentra equipado con una cámara especializada con un sensor RGB para tomar imágenes de luz visible y cinco sensores monocromáticos para las imágenes multiespectrales. Asimismo, cuenta con tecnología RTK (del inglés Real Time Kinematic) que permite mejorar la precisión de posicionamiento geográfico (DJI Agriculture, s.f.). No todas las imágenes fueron captadas utilizando una base de navegación cinética satelital en tiempo real para realizar correcciones, por lo tanto, las potenciales ventajas asociadas a esta tecnología no son consideradas en el presente trabajo.

Para la etapa de laboratorio fue necesario contar con una estufa para el secado de las muestras, bandejas de aluminio adecuadas para utilizar en el equipo de secado y una balanza para realizar la medición del peso de las muestras.

3.3 Metodología experimental

3.3.1 A campo

El procedimiento realizado en el campo consistió en una recorrida inicial del potrero para evaluar la altura y cantidad de forraje presente. A partir de esta observación, se definieron cinco niveles de escala (Haydock & Shaw, 1975), donde el nivel uno se asociaba a las zonas con menor altura y cantidad de forraje, e incluso con presencia de suelo desnudo, mientras que el nivel cinco representaba las zonas con mayor altura y cobertura del forraje.

Luego, se realizaron las mediciones con el plato de levante, para asignar los cuadros a un valor de escala adecuado, buscando que cada nivel se encontrara representado la misma cantidad de veces, generando entre cinco y seis repeticiones por nivel de escala. Dentro de cada cuadrante seleccionado, además de la medición de altura comprimida, se realizó la medición de altura con regla graduada, seleccionando de forma completamente al azar cinco puntos, registrando en cada uno de ellos el valor en que la hoja viva más alta (sin manipulación humana) tocarse la regla. Con los registros de los cinco puntos se calculó un valor de altura promedio por cuadro. Por lo tanto, para cada cuadro, correctamente identificado con una letra, se obtuvieron dos mediciones altura promedio: una con plato de levante y otra con regla graduada.

Luego, para cada uno de los cuadros, y previo a la realización del vuelo del dron, se efectuó la programación de dicho vuelo. Para esto, y siguiendo la metodología detallada por Secco

(2025), se utilizó un software llamado DJI GS PRO (DJI, s.f.), en el cual se configuraron los siguientes parámetros: la altura del vuelo a 60 m, solapamiento frontal y lateral de las imágenes del 70%, y captura de imágenes con ángulo a 90°. En cada punto de muestreo (cuadrantes), el dron registró tres imágenes: una en luz visible (RGB), una en rojo (R) y una en infrarrojo cercano (NIR).

Una vez finalizado el vuelo, se realizó el corte del forraje contenido dentro de cada cuadro al ras del suelo. El material cosechado se colocó en bolsas de nylon, debidamente identificadas con la misma letra asignada al cuadro (Figura 2).

Figura 2
Materiales para la recolección del forraje cortado al ras del suelo



Nota. Tomado de Secco (2025).

3.3.2 En laboratorio

Las bolsas de forraje fresco obtenidas en el campo fueron procesadas en el laboratorio con el objetivo de determinar el contenido de materia seca correspondiente a cada muestra. El procedimiento consistió, en primer lugar, en registrar el peso total del forraje levantado en el campo. Posteriormente, la totalidad del forraje o una proporción del mismo (submuestra), dependiendo del tamaño de la muestra, se colocó en una bandeja de aluminio cuyo peso había sido previamente determinado, y se registró su peso fresco.

Una vez completada esta etapa, todas las bandejas se colocaron en la estufa de secado por un periodo de 72 horas (Figura 3).

Figura 3
Submuestras en bandejas colocadas en la estufa para su secado



Transcurridas las 72 horas, y una vez extraída la totalidad del contenido de agua de las submuestras, estas se pesaron nuevamente. A partir de los pesos fresco y seco obtenidos, se realizaron los cálculos para estimar los valores de materia seca correspondientes a cada muestra (Ec. 2).

$$\frac{\text{Peso seco} \times 100}{\text{Peso fresco}} = \% \text{ MS} \quad (2)$$

$$\frac{\text{Peso muestra} \times \% \text{ MS}}{100} = \text{Peso seco total}$$

El procesamiento de las imágenes obtenidas con el dron fue realizado con la metodología implementada por Secco (2025), utilizando el software Agisoft Metashape Professional (Agisoft LCC, 2024) para la generación de ortomosaicos y el cálculo del índice NDVI. El procedimiento incluyó la orientación de las imágenes, la generación de nubes de puntos y la construcción de modelos digitales. Posteriormente, en el software QGis se delimitó el área experimental, se extrajeron los valores de NDVI y se calculó el valor promedio correspondiente a cada área. Los valores así procesados constituyen parte de la base de datos utilizada en el presente trabajo.

3.4 Metodología estadística

3.4.1 Descripción y características de las bases de datos

En este estudio se trabajó con dos bases de datos independientes, cada una destinada a responder objetivos específicos diferentes.

Base de datos 1: Utilizada para abordar los Objetivos 1 y 2, fue construida a partir de la metodología previamente detallada (sección 3.2.1). Esta base reúne la información obtenida en los relevamientos de pasturas, a nivel de potrero, totalizando 1032 cuadros muestreados entre diciembre de 2023 y septiembre de 2025 (Tabla 1). Los relevamientos se realizaron de forma intermitente a lo largo de dicho período, siguiendo los procedimientos estandarizados de medición.

Tabla 1

Resumen de los relevamientos de pasturas que conforman la base de datos 1

Año	Estación	Nº de cortes	ID del Potrero	Recurso forrajero
2023	Verano	60	6 ^a	Festuca
	Invierno	210	T5	Raigrás
		210		Raigrás-Llantén
2024	Verano	60	6 ^a	Festuca
		120	6B	Festuca
		60	6D	Dactylis-Alfalfa
		37	3B	Raigras
2025	Invierno	275	6 ^a	Festuca-Alfalfa

Nota. El potrero T5 estaba dividido en dos partes iguales (Figura 1), hacia el norte se encontró la pradera de Raigrás y hacia el sur la pradera mezcla de Raigrás y Llantén.

Para cada cuadro se registró información espacial y temporal, incluyendo el potrero, la fecha de relevamiento, el año, la estación y los niveles de escala utilizados para dividir el rango de alturas del forraje presente en cada sitio. Asimismo, se registró el recurso forrajero evaluado y se relevaron variables asociadas a la biomasa, tales como la atura medida con la regla y el plato de levante, valores de NDVI obtenidos mediante el dron y los kilogramos de materia seca dentro de cada cuadro, determinados mediante el método directo. Se presenta en una tabla descripción en detalle de todas las variables consideradas en los análisis (Tabla 2).

Para el Objetivo 1, se empleó la totalidad de los datos disponibles en la primera base de datos. En cambio, para el Objetivo 2, se depuro el conjunto de datos, excluyeron todas aquellas filas que presentaban valores faltantes en alguna de las variables de interés, resultando en un subconjunto de datos de 804 observaciones, este procedimiento aseguró que las comparaciones se realizaran sobre el mismo número de observaciones y predicciones.

Tabla 2
Nomenclatura y definición de las variables utilizadas

Códigos	Definición
Altura_CDax	Altura promedio del potrero media con el C-Dax
Altura_cm	Promedio de cinco mediciones de altura del forraje utilizando la regla graduada (cm)
Estación	Estación del año en que se tomaron las mediciones: invierno o verano
Especie	Rg: Raigrás; Da_Aa: Dactylis-Alfalfa; Rg_Ll: Raigrás-Llantén; F_Aa: Festuca-Alfalfa, Festuca
Est_Esp	Combinación única entre la estación y las especies
kg_MS_ha	Biomasa disponible por unidad de superficie, expresada en kg de materia seca por hectárea (kgMS/ha)
NDVI_dron	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada calculado a partir de imágenes del dron
NDVI_Sentinel	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada calculado a partir de imágenes del satélite Sentinel-2
Potrero	Área del establecimiento donde se realizó el muestro
RPM	Altura comprimida del forraje medida con el <i>rising plate meter</i>

Base de datos 2: Utilizada para el Objetivo 3, fue incorporada en este trabajo debido a que se encuentra definida a escala de potrero completo, a la cual se toman las decisiones de manejo, y que además coincide con la escala espacial de los índices NDVI derivados de imágenes satelitales. Esta característica la diferencia de la base de datos utilizada en los Objetivos 1 y 2, la cual se construyó a partir de mediciones realizadas a nivel de cuadrantes dentro del potrero. En este sentido, integra información recolectada sobre potreros completos (3B, 6A, 6B y 6D), incluyendo mediciones de C-Dax y valores de NDVI obtenidos mediante dron y satélite, así como la especie forrajera y la fecha de relevamiento.

Para el año 2023 se dispone de mediciones únicamente correspondientes al día 19 de diciembre, mientras que para el 2024 se cuenta con registros tomados en enero, febrero y marzo. Este conjunto de datos está conformado por un total de 80 observaciones. Es importante señalar que no todas las variables de interés estuvieron disponibles; en varios casos no se registraron valores de altura obtenidos mediante el uso del C-Dax ni de NDVI provisto por el dron. En cuanto al NDVI provisto por el satélite, también se registraron valores faltantes debido a limitaciones en la disponibilidad de imágenes satelitales durante algunas fechas, esto generó

la necesidad de realizar una depuración de la base, eliminando aquellas fechas que presentaban valores faltantes en las variables de interés, el subconjunto de datos resultantes quedó conformado por un total de 31 observaciones.

3.4.2 Estrategias de análisis

En esta sección se presenta la estrategia de análisis estadístico implementada para abordar los distintos objetivos del estudio, describiendo de forma sintética los procedimientos exploratorios, inferenciales y predictivos aplicados, los cuales se desarrollan en mayor detalle en las secciones siguientes.

Previo al análisis inferencial, se realizó una descripción exploratoria de las variables incluidas en ambas bases de datos. Esta etapa comprendió la representación gráfica de las distribuciones empíricas mediante curvas de densidad para la base de datos 1, mientras que en la base de datos 2 las variables se exploraron mediante diagramas de caja (boxplots). En ambos casos, se calcularon de medidas de posición (media, mediana y cuartiles) y de dispersión (desvío estándar y rango intercuartílico), y se identificaron posibles valores atípicos y patrones asociados a la estación, la especie y el potrero.

Objetivo 1: Relación entre diferentes métodos de estimación de biomasa de pasturas

Para cuantificar la relación entre los distintos métodos de estimación de biomasa de pasturas (altura medida con regla graduada, altura comprimida obtenida con el plato medidor (RPM) y pasturómetro C-Dax) y el NDVI derivado de imágenes de dron y satelitales, se evaluaron asociaciones lineales y no lineales mediante los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, respectivamente. Asimismo, se generaron gráficos de dispersión con el objetivo de explorar la forma funcional de cada relación donde se incluyó una línea de tendencia. La evidencia de asociación entre métodos constituyó la base para el desarrollo de los modelos predictivos implementados en la siguiente etapa.

Objetivo 2: Comparación de modelos predictivos de biomasa (regla, RPM y NDVI de dron)

Una vez confirmada la asociación entre los distintos métodos de medición, se desarrollaron modelos de regresión lineal mixta con el objetivo de predecir la biomasa de pasturas (kg MS/ha) a partir del NDVI obtenido mediante dron y de las mediciones de altura, realizadas con regla graduada y plato medidor (RPM).

El uso de modelos mixtos respondió a la estructura jerárquica de los datos, caracterizada por mediciones repetidas en distintos potreros, fechas y escalas espaciales. Esto hizo necesario modelar explícitamente la variabilidad asociada a estas fuentes de heterogeneidad y separar la variabilidad atribuible a factores estructurales del sistema de aquella asociada a los métodos de estimación de biomasa. Asimismo, la disponibilidad de un número suficiente de observaciones permitió calibrar los modelos utilizando un subconjunto de los datos (conjunto de entrenamiento) y evaluar posteriormente su desempeño predictivo sobre los datos no utilizados en el ajuste (conjunto de validación), mediante validación cruzada. Esto permitió comparar los modelos en términos de calidad de ajuste y desempeño predictivo, y evaluar el potencial del NDVI derivado de dron como alternativa a los métodos tradicionales de medición directa. Los supuestos asociados a la distribución de los errores y la dispersión fueron evaluados mediante residuos simulados, empleando el paquete DHARMA (Hartig, 2024), que permitió realizar los diagnósticos adecuados para los modelos propuestos en este objetivo.

Objetivo 3: Comparación de modelos predictivos basados en NDVI de dron y NDVI satelital

En esta etapa se comparó el desempeño de un modelo predictivo de biomasa de pasturas basado en NDVI derivado de dron con otro equivalente basado en NDVI satelital, utilizando información recolectada a una misma escala espacial (potrero completo). Dado que las mediciones correspondieron a observaciones repetidas en el tiempo, los modelos se ajustaron considerando la dependencia temporal entre observaciones. El análisis permitió evaluar si el NDVI satelital, a pesar de su menor resolución espacial, constituye una alternativa viable para la estimación de biomasa a escala de potrero, atendiendo a su capacidad de reproducir los patrones de variabilidad observados y a la calidad de ajuste de los modelos.

3.4.2.1 Análisis de correlación

La asociación entre dos variables cuantitativas puede evaluarse mediante distintos coeficientes de correlación, en función de las características de los datos y de la forma funcional de la relación. Cuando la relación entre las variables es aproximadamente lineal y se cumplen los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, el coeficiente de correlación lineal de Pearson permite cuantificar la intensidad y dirección de dicha asociación. Cuando estos supuestos no se cumplen, o cuando la relación entre variables no es estrictamente lineal, resulta más apropiado el uso de métodos no paramétricos, como el coeficiente de correlación de

Spearman. Este evalúa la relación entre dos variables a partir del orden de los datos, siendo menos sensible a valores extremos y a desviaciones de la normalidad.

En este estudio, para dar respuesta al Objetivo 1, se estudió la asociación entre la biomasa disponible, expresada como producción de materia seca (kg MS/ha), y distintos métodos indirectos de estimación. En primer lugar, se evaluó la relación entre la biomasa y la altura del forraje, medida con el método indirecto más simple, la regla graduada. Posteriormente, se analizaron las asociaciones entre los diferentes métodos indirectos empleados, considerando las comparaciones entre altura medida con la regla (Altura_cm) y altura comprimida obtenida con el plato medidor (RPM), y entre RPM y el índice de vegetación de diferencia normalizada obtenido a partir de las imágenes tomadas por el dron (NDVI_dron).

Dadas las características de las distribuciones observadas y la posible presencia de relaciones no lineales entre los métodos de estimación de biomasa, las asociaciones se cuantificaron mediante el coeficiente de correlación de Spearman. La selección de este método se fundamentó principalmente porque el análisis exploratorio sugirió la existencia de asociaciones no lineales entre algunas de las variables. Adicionalmente, las variables involucradas no cumplieron con los supuestos requeridos para utilizar el coeficiente de Pearson, en particular la normalidad de las distribuciones al considerar todas las especies, lo cual condiciona la normalidad conjunta bivariada y refuerza la conveniencia de emplear un enfoque no paramétrico.

3.4.2.2 Modelos de análisis para la predicción de biomasa a nivel de cuadro

Con el fin de evaluar y comparar el desempeño predictivo de los modelos propuestos para la estimación de la biomasa disponible, se implementó un procedimiento de validación cruzada. Esta estrategia permitió cuantificar la capacidad de cada modelo para predecir la biomasa (kg MS/ha) en datos no utilizados durante su ajuste.

La división del conjunto de datos se realizó mediante el método *holdout*, separando la base de datos en dos subconjuntos mutuamente excluyentes: un conjunto de entrenamiento, que incluyó el 70 % de las observaciones, y un conjunto de validación, compuesto por el 30 % restante (Sharada, 2025). Previo a la partición, los datos se ordenaron según la variable de respuesta con el fin de asegurar que ambos subconjuntos representaran adecuadamente la variabilidad presente en la base completa y evitar sesgos en la distribución de los valores. Como

medida adicional de control, se verificó la conformaron de ambos subconjuntos y la representatividad de las variables incluidas en cada uno de ellos.

Para la predicción de la biomasa disponible, se ajustaron modelos lineales mixtos, seleccionados por su capacidad de combinar efectos fijos y aleatorios, y modelar estructuras de dependencia propias de datos jerárquicos (Gbur et al., 2012). Los efectos fijos corresponden a aquellas variables que son de interés principal para el estudio, mientras que los efectos aleatorios permiten capturar fuentes de variabilidad no explicadas por dichos efectos.

En este trabajo se ajustaron modelos alternativos que consideraron como predictor principal uno de los métodos de estimación de biomasa considerados: altura medida con regla graduada (Altura_cm), altura comprimida (RPM) o NDVI derivado del uso de drones (NDVI_dron), uno por modelo. Asimismo, se incorporó como efecto fijo a la combinación entre estación del año y especie de pastura (Est_Esp), con el fin de contemplar variaciones estacionales y diferencias asociadas al tipo de recurso forrajero.

Los efectos aleatorios incluidos fueron el potrero, la fecha de medición anidada dentro de potrero y la escala de muestreo, esta última fue considerada como un efecto de bloqueo y anidada en potrero. La inclusión de la escala como un efecto bloque se debe a que, en cada instancia de muestreo, el número de cuadros evaluados por nivel de escala fue limitado, generando que las observaciones dentro de un mismo nivel fueran más similares entre sí que respecto a otros niveles. Este efecto fue anidado en el potrero ya que los rangos de altura correspondientes a los distintos niveles de escala se definieron de forma específica para cada potrero, en función de sus características productivas particulares y de las diferencias en alturas máximas observadas entre ellos.

Se ajustaron tres modelos de regresión lineal mixta, todos con la misma estructura general, que se diferencian únicamente en el predictor principal utilizado para la estimación de la biomasa (Altura_cm, RPM o NDVI_dron). La formulación general de los modelos se expresa de la siguiente forma:

$$Y_{ijklmn} = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 Est_Esp_j + \pi_k + \theta_{l(k)} + \varphi_{m(k)} + \varepsilon_{ijklmn} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ijklmn} \stackrel{iid}{\sim} N(0, \sigma^2)$$

Donde:

- Y_{ijklmn} representa la variable de respuesta, biomasa disponible (kg MS/ha), correspondiente a la n-ésima observación.

Los efectos fijos incluyeron:

- X_i : corresponde al i-ésimo método utilizado para estimar la biomasa (Altura_cm, RPM o NDVI_dron), según modelo ajustado
- Est_Esp_j : representa la j-ésima combinación entre estación y especie.

Los efectos aleatorios fueron:

- π_k : el k-ésimo potrero evaluado
- $\theta_{l(k)}$: la l-ésima escala de medición dentro del potrero
- $\varphi_{m(k)}$: la m-ésima fecha de registro dentro del potrero
- ε_{ijklmn} : el término de error

Los efectos aleatorios y el término de error se asumieron independientes e idénticamente distribuidos, siguiendo una distribución normal con media cero y varianzas constantes.

La comparación entre modelos se realizó combinando criterios de ajuste y de desempeño predictivo. En primer lugar, se evaluó el ajuste de los modelos estimados sobre el conjunto de datos de entrenamiento mediante indicadores como AIC (Akaike Information Criterion) y el BIC (Bayesian Information Criterion). Adicionalmente, se calculó el coeficiente de determinación marginal (R^2m) y condicional (R^2c), con el fin de cuantificar la proporción de variabilidad explicada por los efectos fijos y por el modelo completo, respectivamente. Finalmente, la capacidad predictiva de los modelos se evaluó utilizando como indicador el error cuadrático medio de la validación (RMSE_val).

3.4.2.3 Modelos de análisis para la predicción de la biomasa a nivel de potrero

Con el objetivo de identificar métodos que permitan estimar la biomasa disponible reduciendo la demanda de tiempo y mano de obra, se evaluó el desempeño de distintos modelos predictivos basados en índices obtenidos a partir de sensores remotos. En particular, se ajustó un modelo utilizando el NDVI derivado de imágenes satelitales y se comparó con un modelo construido a partir del mismo índice, pero obtenido mediante el dron. En ambos casos, el análisis se realizó a nivel de potrero, por tratarse de una escala operativa relevante para la gestión y toma de decisiones en el establecimiento.

Para disponer de una medición directa de la biomasa disponible (kg MS/ha) a escala de potrero sería necesario realizar la cosecha total del forraje o implementar un esquema de

muestreo intensivo, lo cual no resulta operativo. Por lo tanto, se adoptó un enfoque indirecto para la construcción de los modelos predictivos, utilizando la altura promedio de la pastura, medida a través del pasturómetro C-Dax, como variable de respuesta.

La elección de esta variable se fundamentó en que la altura mediada con el C-Dax constituye un estimador indirecto de la biomasa, ampliamente utilizado en los sistemas pastoriles y que, en este estudio, mostró una asociación significativa con los valores de NDVI obtenidos mediante dron y satélite. Esta asociación fue analizada previamente mediante análisis de correlación en la sección 3.4.2.1.

Se ajustaron dos modelos lineales simples, uno para cada fuente de NDVI (dron y satélite), cuya formulación general fue la siguiente:

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_1 NDVI_i + \beta_2 Especie_j + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Donde:

- Y_{ijk} representa la variable de respuesta, altura promedio de la pastura medida con C-Dax, correspondiente a la k-ésima observación.

Los efectos fijos incluyeron:

- $NDVI_i$: que corresponde al i-ésimo método utilizado para estimar la biomasa (NDVI_dron o NDVI_Sentinel), según modelo ajustado.
- $Especie_j$: que representa la j-ésima especie o mezcla forrajera.
- ε_{ijk} : el término de error

En el término de error no se asume independencia entre los residuos vinculados a mediciones realizadas de forma repetida en el tiempo sobre un mismo potrero.

Dado que las mediciones fueron realizadas de forma repetida en el tiempo sobre un mismo potrero, se evaluó la posible dependencia temporal entre observaciones mediante el ajuste de modelos de mínimos cuadrados generalizados, incorporando distintas estructuras de correlación en el término de error. En particular, se consideraron estructuras autorregresivas de primer orden (AR(1)) y estructuras de correlación dependientes de la distancia temporal (power y exponencial), definidas a nivel de potrero y utilizando el orden cronológico de las fechas de medición como variable temporal.

La necesidad de incluir una estructura de correlación fue evaluada mediante la comparación entre modelos con y sin correlación, utilizando pruebas de razón de verosimilitudes, así como criterios de información (AIC y BIC). En casos de que la inclusión de la estructura de correlación

no aportara mejoras significativas, se optó por trabajar con modelos lineales asumiendo errores independientes.

Se asumió que el vector de errores sigue una distribución normal multivariada, con media cero y matriz de varianzas y covarianzas determinada por la estructura de correlación especificada. El desempeño de los modelos fue evaluado adicionalmente mediante el error cuadrático medio (RMSE) y un coeficiente de determinación (R^2) calculado de forma descriptiva del grado de ajuste global del modelo.

El coeficiente de determinación fue estimado siguiendo la fórmula:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

donde y_i corresponde a los valores observados de la variable de respuesta, \hat{y}_i a los valores ajustados por el modelo y por último \hat{y}_i a la media muestral. Este indicador fue utilizado con fines descriptivos y comparativos.

Para los modelos lineales ajustados bajo el supuesto de independencia, los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron evaluados mediante pruebas de Shapiro–Wilk y Breusch–Pagan, respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis descriptivo

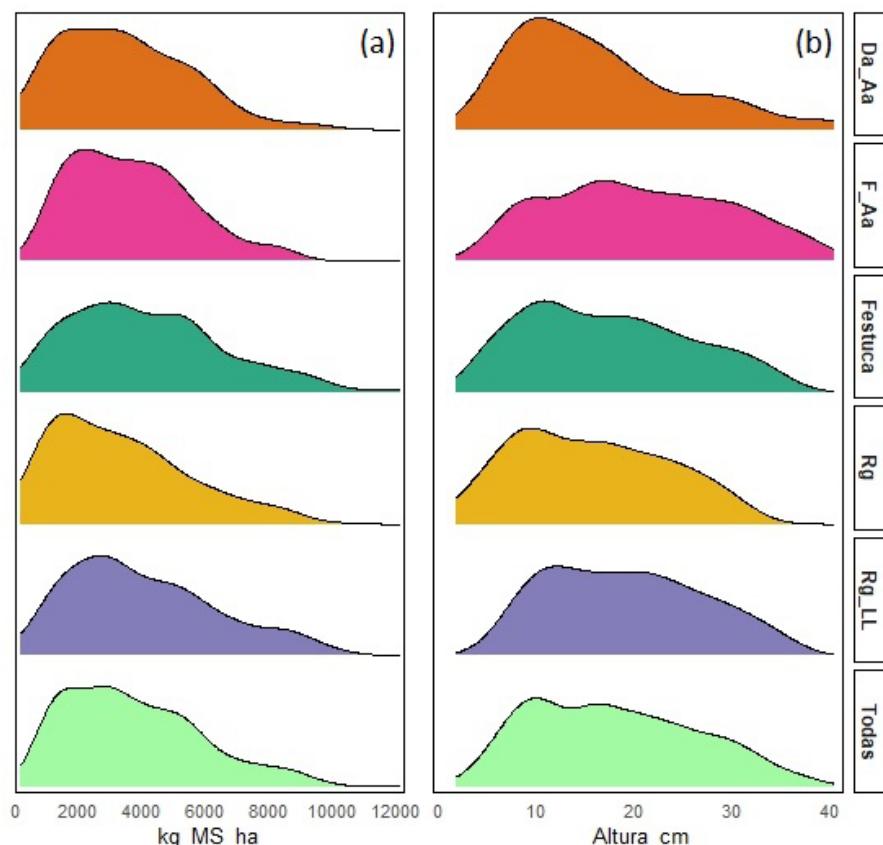
4.1.1 Base de datos 1

A continuación, se presentan los principales resultados del análisis descriptivo de los datos obtenidos en los ensayos, con el propósito de realizar una caracterización general y de su comportamiento según la especie o mezcla forrajera.

La variable disponibilidad de materia seca (kg MS/ha) presentó un amplio rango de valores en el conjunto total de observaciones, con valores que oscilaron entre 200 y 12.152 kg MS/ha. La mediana fue de 3.433 y la media de 3.786 kg MS/ha, con una desviación estándar de 2.200 kg MS/ha, lo que muestra una alta variabilidad en el forraje disponible. El gráfico de distribución empírica de la disponibilidad de materia seca por pastura (Figura 4a) mostró, en todos los casos, una asimetría positiva, con una mayor concentración de observaciones entre 1.500 y 5.000 kg MS/ha y una mayor frecuencia relativa de valores superiores. El análisis descriptivo, diferenciado por recurso forrajero, permitió observar que las disponibilidades máximas registradas para cada potrero se ubicaron entre 9.000 y 12.000 kg MS/ha.

Figura 4

Curvas de densidad de kg_MS_ha y Altura_cm, por recurso forrajero y conjunto total de observaciones



La variable altura del forraje (Altura_cm) presentó valores comprendidos entre 1,8 y 40,6 cm, con una mediana de 17,2 cm y un promedio de 18,15 cm. La desviación estándar fue de 8,56 cm, lo que evidencia una variabilidad moderada en la altura del forraje disponible para pastoreo. El rango intercuartílico (10,8–24,6 cm) muestra que la mayor parte de las observaciones se centraron en alturas típicas de situaciones de entrada a pastoreo. Las curvas de densidad por especie (Figura 4b) presentan un patrón asimétrico hacia la derecha en todos los casos, con una mayor extensión hacia valores altos y una marcada diferencia entre la media y la mediana.

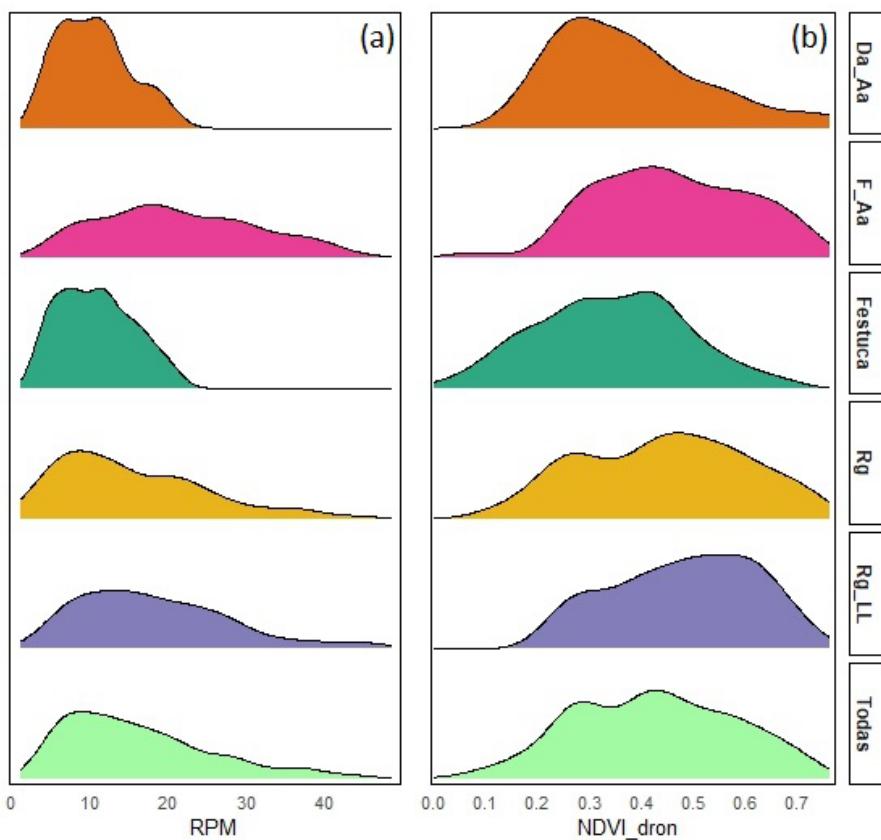
En términos comparativos, las mezclas con leguminosas tendieron a presentar mayores alturas de forraje, especialmente la mezcla Festuca-Alfalfa. Por el contrario, el Raigrás puro presentó las alturas más bajas, mientras que las mezclas Raigrás-LLantén y Dactylis-Alfalfa se ubicaron en posiciones intermedias. En general, las diferencias en las alturas promedio y en los valores extremos pueden atribuirse a la variabilidad natural entre las especies que componen las distintas mezclas.

La variable altura comprimida (RPM), presentó valores entre 1,2 y 51,6 unidades, con una mediana de 14,55 y un promedio de 16,47. La desviación estándar fue de 9,65, lo cual muestra una marcada variabilidad en la resistencia a la compresión de la conopía entre las diversas mediciones. La distribución conjunta de todas las especies, mostró un patrón asimétrico marcado hacia la derecha (Figura 5a), con una mayor concentración de observaciones entre 8 y 25 unidades.

Al analizar las especies individualmente, se observaron diferencias marcadas en la posición y dispersión de las distribuciones. La mezcla Festuca-Alfalfa presentó la distribución más desplazada hacia valores elevados, con media 20,4 y mediana 21,56 unidades, superiores al resto de las especies, así como una mayor dispersión llegando a valores máximos de 51,6 unidades. La mezcla Raigrás-Llantén también mostró una distribución amplia, aunque con un desplazamiento menos pronunciado. Por el contrario, las praderas de Festuca y Dactylis-Alfalfa presentaron distribuciones más concentradas en valores bajos, principalmente entre 6 y 14 unidades, y con menor dispersión.

Figura 5

Curvas de densidad de RPM y NDVI_dron, por recurso forrajero y conjunto total de observaciones



La variable que cuantifica el NDVI obtenido a partir de imágenes del dron, presentó valores comprendidos entre 0 y 0,76 para el conjunto de las observaciones, con un desvió estándar de 0,156. La distribución conjunta de todas las especies mostró un patrón bimodal lo que sugiere la presencia de distintos estados de las praderas en el conjunto de datos de todas (Figura 5b).

Analizando la distribución por especie, se observó que la mayoría de los recursos forrajeros presentaron distribuciones con similares dispersiones. La mezcla Dactylis-Alfalfa presentó la moda más baja del índice 0,28, y en contraste, la mezcla Raigrás-Llantén presentó el valor más alto en 0,56. Tanto la Festuca pura como la mezcla Festuca-Alfalfa presentaron modas en torno a 0,41. Por último, el Raigrás mostró una distribución bimodal, siendo que la moda secundaria asociada a valores más bajos de NDVI (0,27), se corresponde con las mediciones realizadas durante el verano, mientras que la moda principal (0,47) con mediciones efectuadas en invierno.

4.1.2 Base de datos 2

A continuación, se presentan los principales resultados del análisis descriptivo de los datos obtenidos en los ensayos realizados durante el verano de 2024. Las mediciones se realizaron en

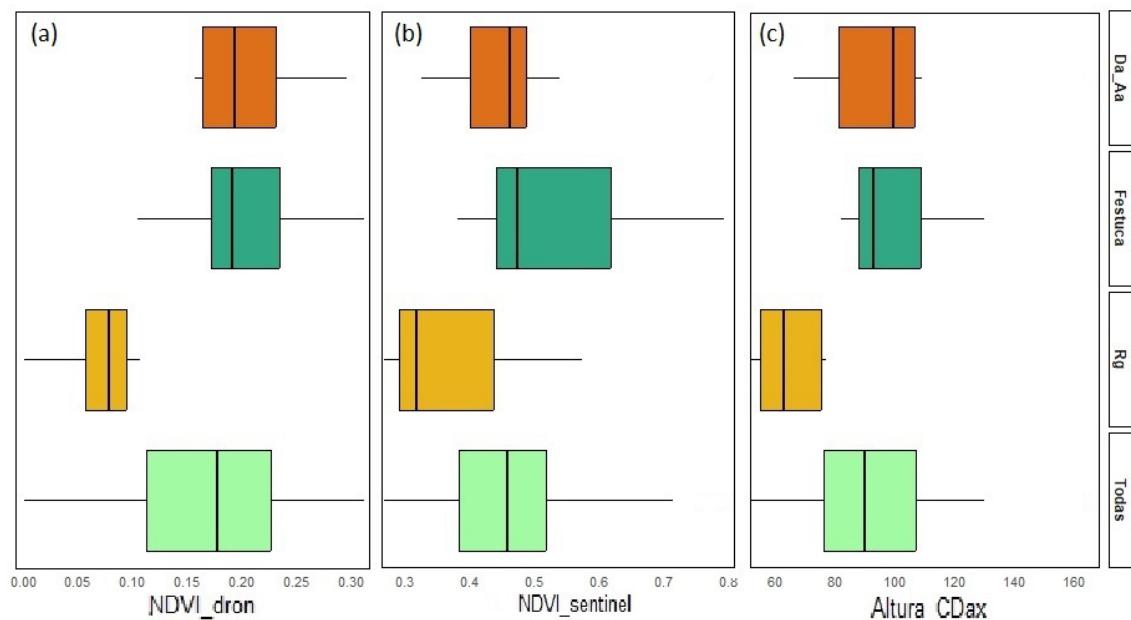
tres praderas: una pradera de Raigrás instalada en el potrero 3B, una pura de Festuca en los potreros 6A y 6B, y una mezcla de Dactylis_Alfalfa instalada en el potrero 6D.

Para el conjunto de todas las observaciones, el NDVI obtenido a partir del dron registró valores entre 0 y 0,312, con una mediana de 0,177 y una media de 0,173, y permitió identificar una distribución asimétrica positiva suave hacia valores elevados (Figura 6a). En relación al NDVI derivado de imágenes satelitales, esta variable presentó valores comprendidos entre 0,267 y 0,792 unidades, con una mediana de 0,458 y una media 0,470, resultando en una asimetría marcada hacia valores altos (Figura 6b). Por último, la altura promedio de la pastura, medida con el C-Dax, presentó valores comprendidos entre 52 y 166 cm, con una mediana de 90 cm y una media de 91,68 cm, el boxplot (Figura 6c) evidenciando una leve asimetría positiva.

Al analizar los boxplot por especie, se observó que el Raigrás presentó para las tres variables analizadas una distribución desplazada hacia valores menores, evidenciada por medianas y rangos intercuartílicos ubicados hacia la izquierda del eje horizontal. Por el contrario, la Festuca y mezcla de Dactylis alfalfa mostraron valores centrales más elevados.

Figura 6

Boxplots de NDVI_dron, NDVI_sentinel y Altura_CDax, por recurso forrajero y conjunto total de observaciones



4.2 Correlaciones entre métodos

Para la base de datos 1, el análisis de correlación entre la biomasa disponible (kg MS/ha) y la altura del forraje medida con la regla, considerando conjuntamente todas las especies y mezclas evaluadas, evidenció una asociación positiva entre ambas variables. El coeficiente de correlación

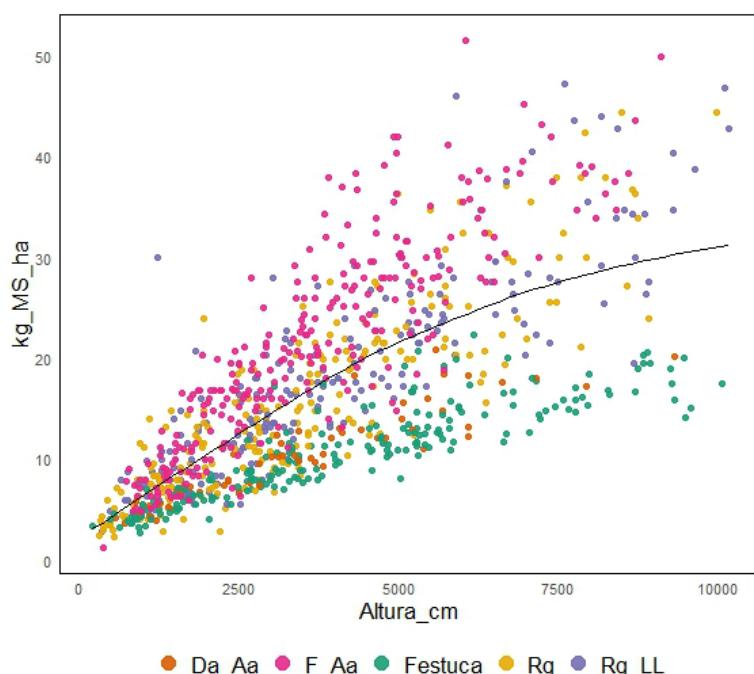
de Spearman fue elevado ($r = 0,775$) y estadísticamente significativo (p -valor < 0,001). En términos generales, estos resultados indican que, a medida que aumenta la altura de la pradera, tiende a registrarse una mayor disponibilidad de materia seca (Figura 7).

Este resultado es consistente con lo reportado por Virkajärvi (1999), quien encontró un coeficiente de correlación de 0,85 entre la altura del forraje y la biomasa disponible. El valor ligeramente superior observado en dicho estudio podría estar asociado a las condiciones de muestreo más homogéneas, dado que se trató de un experimento controlado, con menor variabilidad estructural del tapiz, en comparación con la presente evaluación realizada bajo condiciones productivas reales.

El gráfico de dispersión, en el cual los puntos fueron diferenciados por tipo de pastura, sugiere un patrón creciente con una forma curvilínea de concavidad negativa. Esta forma responde, en parte, a la combinación de múltiples especies y mezclas forrajeras con arquitecturas y relaciones altura-biomasa distintas, más que a la existencia de un único patrón funcional común a todas ellas (Figura 7).

Al desagregar este análisis por especie o mezcla (Figura A1), la asociación positiva se mantuvo, aunque con variación en la magnitud del coeficiente. Las correlaciones oscilaron entre 0,861 y 0,941 según la pastura, lo que confirma que, si bien el patrón general es consistente, la intensidad de la asociación presenta diferencias entre especies y mezclas forrajeras.

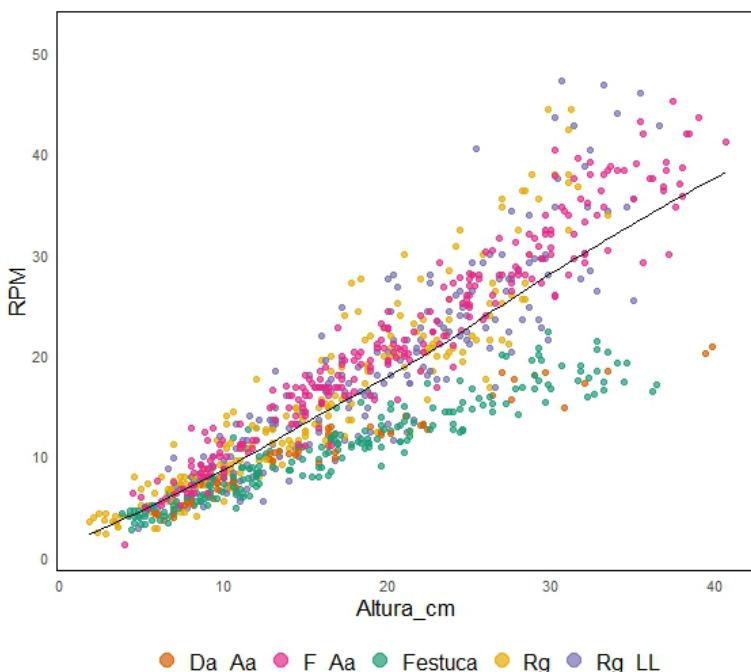
Figura 7
Diagrama de dispersión entre kg_MS_ha y Altura_cm



Al evaluar la relación entre los métodos de estimación de la biomasa que requieren contacto directo con el recurso forrajero, como la altura de la regla (Altura_cm) y la altura comprimida obtenida mediante el plato medidor (RPM), se observó una asociación fuerte y positiva ($r = 0,903$), estadísticamente significativa (p -valor < 0,001). Este resultado indica que ambos métodos de medición describen de forma consistente la variabilidad de la biomasa disponible en el campo (Figura 8). Asimismo, concuerda con lo reportado en estudios previos que comparan métodos indirectos de estimación de biomasa basados en mediciones *in situ*, donde se ha observado una fuerte asociación entre la altura del forraje medida directamente y la estimada con dispositivos como el RPM (Castle, 1976; Virkajärvi, 1999).

A diferencia de la relación entre altura y biomasa, que presentó comportamientos no lineales, el patrón aproximadamente lineal observado entre ambos métodos (altura medida con regla y RPM) sugiere que, dentro del rango de alturas evaluado, la densidad del forraje acompaña de manera relativamente proporcional el incremento en altura. Por otro lado, el hecho de que esta asociación se mantenga elevada al analizarla por especie ($0,923 \leq r \leq 0,973$, Figura A2) refuerza la robustez del RPM como método indirecto aplicable en distintos recursos forrajeros (Canseco et al., 2007; Montossi et al., 2013).

Figura 8
Diagrama de dispersión entre RPM y Altura_cm



En el análisis de correlación de Spearman entre la altura comprimida del forraje (RPM) y el NDVI obtenido mediante el dron (NDVI_dron) se observó una asociación positiva y significativa ($r = 0,763$; p -valor < 0,001). Este resultado se encuentra en concordancia con numerosos

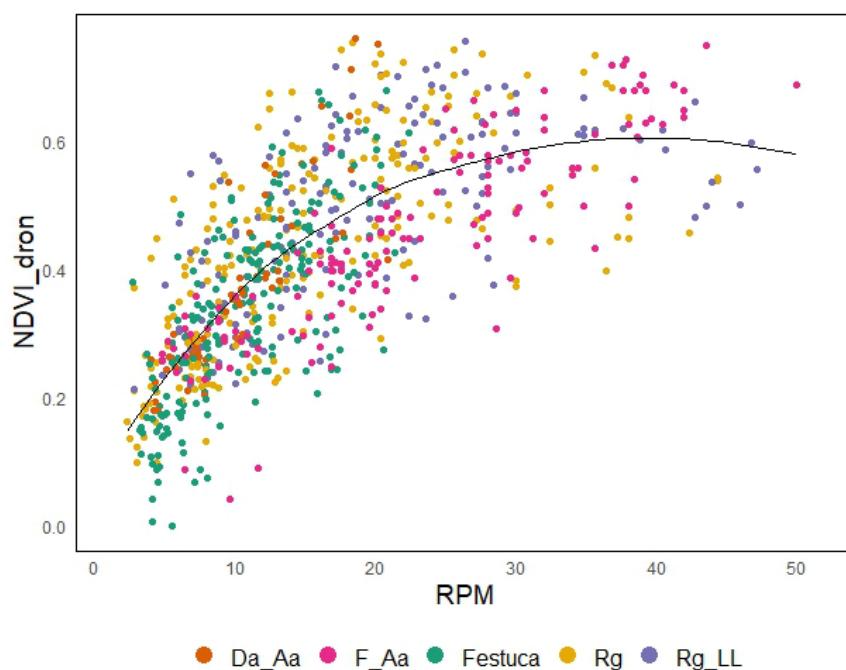
estudios que reportan asociaciones moderadas a fuertes entre índices espectrales y mediciones indirectas de biomasa obtenidas en campo (Gonçalves et al., 2023).

El patón no lineal observado en el diagrama de dispersión (Figura 9) se caracteriza por una saturación del NDVI a valores elevados de RPM, fenómeno ampliamente documentado en coberturas forrajeras densas. En estos casos, el NDVI pierde sensibilidad frente a incrementos adicionales de biomasa o altura del forraje, lo que limita su capacidad para detectar diferencias en tapices cerrados (Gonçalves et al., 2023; Viljanen et al., 2018).

La disminución del NDVI observada a valores de RPM aproximadamente superiores a 40 unidades, particularmente asociada a praderas de Raigrás tanto puras como en mezcla, podría estar vinculada a efectos combinados de saturación espectral, cambios en la arquitectura del dosel. Resultados similares han sido reportados en estudios que integran ambas formas de medición, en los cuales se destaca la necesidad de realizar calibraciones específicas según especie y rango de altura evaluado (Gargiulo et al., 2023).

Al analizar esta relación por tipo de pastura (Figura A3), la asociación positiva se mantuvo en todos los casos, aunque al igual que las correlaciones anteriormente presentadas, se observaron diferencias en su magnitud. Los coeficientes oscilaron entre 0,601 y 0,871 según la especie, lo que indica que, si bien el patrón general es consistente, la intensidad de la asociación varía según el recurso forrajero considerado.

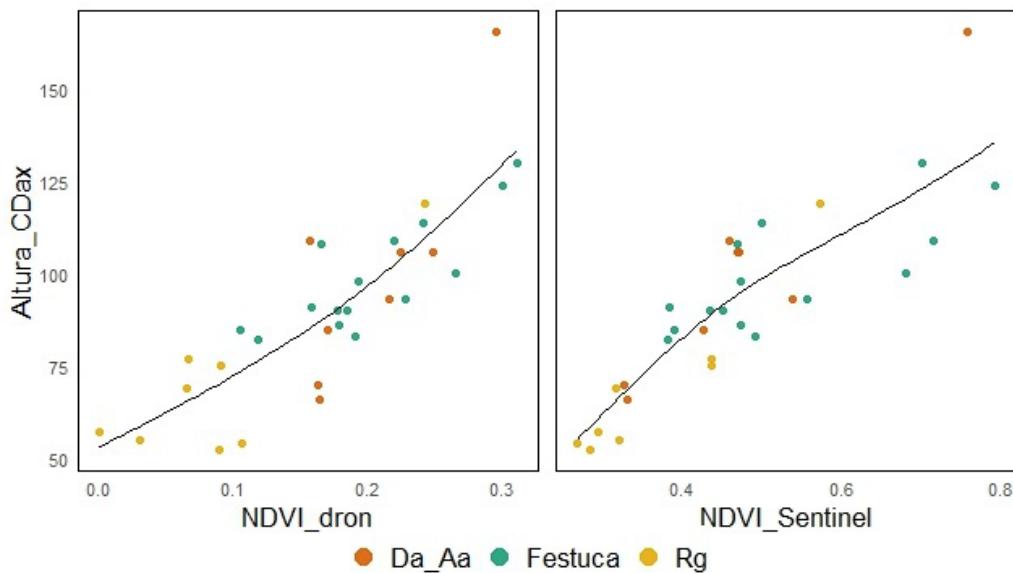
Figura 9
Diagrama de dispersión entre NDVI_dron y RPM



Trabajando con la base de datos 2, se observó a nivel de parcela una asociación positiva y estadísticamente significativa entre los valores de NDVI obtenidos mediante el dron y la altura de la pastura medida con el C-Dax ($r = 0,836$; p -valor $< 0,001$). De manera similar, el NDVI obtenido de imágenes satelitales mostró una asociación positiva y significativa con la altura mediada con el C-Dax ($r = 0,870$; p -valor $< 0,001$) lo que sugiere que, a escala de parcela, ambos sensores presentan una capacidad comparable para describir la estructura de la pastura (Figura 10). Estos resultados son consistentes con los reportados por Bollas et al. (2021) quienes observaron asociaciones positivas y estadísticamente significativas entre índices de vegetación derivados de sensores remotos y variables estructurales de la pastura, tales como la altura y la biomasa. En particular, dichos autores destacan que tanto el NDVI obtenido mediante plataformas UAV, como el derivado de imágenes satelitales, permiten capturar adecuadamente la variabilidad del dosel, aunque con diferencias asociadas a la escala espacial de observación y concluyen que existe una fuerte correlación entre el NDVI de ambas técnicas $0,865 < r < 0,983$.

Figura 10

Diagramas de dispersión entre Altura_CDax y los NDVI_dron, NDVI_sentinel



4.3 Modelos de análisis para la predicción de biomasa a nivel de cuadro

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los modelos mixtos ajustados, incluyendo las estimaciones de los parámetros y los indicadores de ajuste y desempeño predictivo.

Los supuestos de los modelos se evaluaron mediante diagnósticos basados en simulación utilizando el paquete DHARMA, no detectándose desvíos significativos de los supuestos de dispersión, uniformidad ni presencia de valores atípicos obteniendo p-valores superiores al nivel de significancia ($\alpha = 0,05$) en todos los casos, lo que indica que la variabilidad observada es consistente con la esperada bajo los modelos ajustados.

En particular, para el modelo que considera como variable predictora a la altura medida con regla graduada (Altura_cm) se obtuvo un p-valor de 0,67; para el modelo definido para RPM, un p-valor de 0,4; y para el modelo que incluyó NDVI_dron, se obtuvo un p-valor de 0,6, confirmando en todos los casos una dispersión adecuada de los residuos según lo esperado bajo el modelo propuesto (Figuras A4, A5 y A6).

En primer lugar, se presentan las estimaciones de los efectos fijos correspondientes a los modelos lineales mixtos, ajustados para cada método de estimación de biomasa (Tabla 3).

Tabla 3

Estimación de los efectos fijos de los modelos lineales mixtos ajustados para la biomasa disponible

Método	Efecto fijo	Estimación	Error Estándar	Estadístico	p-valor
Altura_cm	Intercepto	-12,79	428,42	$t = -0,03$	0,976
	Altura_cm	212,41	9,43	$t = 22,52$	< 0,001
	Esp_Est	-	-	$\chi^2 = 17,48$	0,0037
RPM	Intercepto	2403,25	769,94	$t = 3,121$	0,004
	RPM	108,15	12,29	$t = 8,801$	< 0,001
	Esp_Est	-	-	$\chi^2 = 20,72$	0,0009
NDVI_dron	Intercepto	3270,3	1045,61	$t = 3,128$	0,004
	NDVI_dron	1511,77	517,8	$t = 2,920$	0,004
	Esp_Est	-	-	$\chi^2 = 5,07$	0,408

Nota. Los efectos Esp_Est fueron evaluados mediante el ANAVA, reportándose únicamente el valor del estadístico χ^2 , no así las estimaciones de cada uno de los niveles.

En el modelo con NDVI_dron, el efecto de la combinación estación-especie no resultó estadísticamente significativo, no obstante, se mantuvo en la especificación del modelo para asegurar que los modelos fuesen comparables por mantener su estructura fija.

Por otro lado, se evaluó el ajuste global y la capacidad predictiva de cada modelo mediante distintos indicadores cuantitativos (Tabla 4).

Tabla 4

Indicadores de ajuste y desempeño predictivo de los modelos según método de estimación de biomasa

Método	AIC	BIC	R ² m	R ² c	RMSE	RMSE_val
Altura_cm	8929,85	8976,97	0,704	0,78	970,1	981,2
RPM	8967,39	9014,52	0,245	0,77	947,2	973,7
NDVI_dron	9013,67	9060,79	0,05	0,81	972,8	968,4

Nota. R²m: coeficiente de determinación marginal; R²c: coeficiente de determinación condicional; RMSE: error cuadrático medio calculado sobre el conjunto de datos de entrenamiento; RMSE_val: error cuadrático medio calculado sobre el conjunto de datos de validación.

En los modelos ajustados para predecir biomasa a nivel de cuadro, el modelo basado en NDVI obtenido mediante el dron mostró que el efecto fijo correspondiente a la combinación estación-especie no resultó estadísticamente significativo. Este resultado puede explicarse por la naturaleza de la información que captan los sensores remotos, los cuales registran la reflectancia del dosel desde una vista aérea y aproximadamente perpendicular a la pastura. El NDVI refleja el verdor lo que se asocia con el vigor del forraje, sin discriminar entre especies con diferentes arquitecturas o densidades del tapiz. En contraste, las mediciones realizadas *in situ* capturan de manera más directa las diferencias estructurales del forraje, lo que explica su mayor sensibilidad para detectar variaciones asociadas a la combinación estación-especie. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en la literatura, donde se destaca que los índices espectrales, si bien presentan asociaciones positivas y significativas con la biomasa, muestran limitaciones para captar variaciones estructurales cuando se los utiliza de forma aislada (Gonçalves et al., 2023; Viljanen et al., 2018).

Al incorporar el NDVI obtenido mediante dron en un modelo que considera efectos aleatorios asociados al potrero, la fecha de medición y la escala espacial, se logró explicar una elevada proporción de la variabilidad total de la biomasa disponible, evidenciado por un mayor valor de R² condicional. Esto se coincide con estudios que señalan que el desempeño de los índices espectrales mejora sustancialmente cuando se integran con información de campo y con diseños que permiten capturar fuentes adicionales de variación inherentes a sistemas pastoriles reales (Gargiulo et al., 2023).

Para los modelos ajustados a partir de las variables Altura_cm y RPM, el componente fijo correspondiente a la combinación estación-especie resultó estadísticamente significativo en ambos casos. Si bien estos modelos explicaron una menor proporción de la variabilidad total de

la biomasa (kg MS/ha) al considerar el modelo completo, al evaluar únicamente la contribución de los efectos fijos, fueron los métodos que mostraron mayor capacidad explicativa. En particular, presentaron coeficientes de determinación marginales de 0,78 y 0,77, para Altura_cm y RPM respectivamente, lo cual confirma que, independientemente del contexto experimental, ambos métodos de predicción constituyen muy buenos predictores de la biomasa disponible.

De manera consistente, Ortega et al. (2023) señalan que, si bien métodos como el RPM o el C-Dax presentan una alta confiabilidad a escala de parcela, su aplicación a grandes áreas resulta limitada desde el punto de vista operativo. En contraste, los sensores remotos permiten cubrir extensiones mayores, aunque con una menor sensibilidad a la estructura del tapiz. Esta complementariedad entre métodos refuerza la importancia de enfoques integrados, como el propuesto en el presente estudio.

4.4 **Modelos de análisis para la predicción de biomasa a nivel de potrero**

Se evaluaron diferentes estructuras de correlación temporal en los modelos, incluyendo estructuras autorregresivas de primer orden (AR(1)) y funciones de correlación dependientes de la distancia temporal (power y exponencial), con el objetivo de determinar la necesidad de modelar la dependencia entre observaciones repetidas en el tiempo.

Para el modelo que contempla como predictora a la variable NDVI_dron, la inclusión de estructuras de correlación no produjo mejoras significativas respecto al modelo que asume errores independientes. La comparación entre modelos con y sin correlación, mediante pruebas de razón de verosimilitudes, arrojó valores no significativos (p -valor = 0,78), indicando que el modelado explícito de la correlación temporal no aportó información relevante. En consecuencia, se decidió trabajar con el modelo lineal que asume errores independientes.

Esta ausencia de correlación puede explicarse por varias razones. En primer lugar, la entrada de vacas a pastorear genera una remoción abrupta de forraje y una alta variabilidad en la estructura de la pastura, lo que tiende a romper la dependencia temporal entre mediciones consecutivas de altura. En segundo lugar, los intervalos de muestreo fueron heterogéneos entre potreros, con lapsos que variaron entre 12 y 20 días, reduciendo la cantidad de observaciones comparables para un mismo lapso temporal y, por ende, la potencia para detectar autocorrelación residual. Finalmente, el NDVI de dron, al presentar alta resolución espacial logra capturar de forma más directa la estructura fina del dosel, explicando gran parte de la variabilidad temporal de la altura y dejando poca dependencia residual que deba ser modelada.

En contraste, para el modelo cuya variable predictora fue NDVI_satelital, la incorporación de una estructura de correlación de tipo exponencial resultó adecuada (p -valor = 0,002), evidenciando una mejora en el ajuste del modelo en comparación con alternativas que asumen independencia o utilizan otras estructuras de correlación.

El NDVI satelital integra información a una escala espacial más gruesa, lo que introduce un mayor grado de suavizado espacial y temporal en la señal. Esta integración puede generar una respuesta más inercial del predictor frente a cambios rápidos en la altura de la pastura, dando lugar a errores con estructura de dependencia temporal que no es completamente capturada por los efectos fijos del modelo. En este contexto, la inclusión de una estructura de correlación en los errores permite modelar adecuadamente esta dependencia residual asociada a la escala y características del sensor satelital.

La comparación entre modelos se realizó utilizando criterios de información (AIC y BIC), medidas descriptivas de ajuste (R^2) y desempeño predictivo (RMSE). Adicionalmente, los supuestos de normalidad de los errores fueron evaluados mediante la prueba de Shapiro–Wilk en todos los modelos, y la homogeneidad de varianzas fue evaluada mediante la prueba de Breusch–Pagan para el modelo lineal seleccionado en el caso de NDVI_dron. Los resultados de estas evaluaciones se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5
Indicadores de ajuste para los modelos propuestos

Modelo	AIC	BIC	R^2	RMSE	Shapiro	Breusch–Pagan
NDVI_dron	255,59	259,89	0,68	13,55	p -valor = 0,23	p -valor = 0,32
NDVI_Sentinel	232,83	238,30	0,73	14,15	p -valor = 0,12	-

Nota. En las pruebas de Shapiro–Wilk (normalidad) y Breusch–Pagan (homogeneidad de varianzas), p -valores $> 0,05$ indican que no se detectaron violaciones significativas de los supuestos del modelo.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que, el modelo basado en NDVI satelital presentó un mejor desempeño global en comparación con el modelo basado en NDVI_dron, evidenciado por menores valores de AIC y BIC, así como un mayor coeficiente de determinación (R^2), lo cual sugiere un mejor ajuste del modelo satelital a los datos observados.

Estos resultados son consistentes con los reportados por Bollas et al. (2021) quienes compararon directamente valores de NDVI obtenidos a partir de imágenes de UAV (drones) y del satélite Sentinel-2. En dicho estudio, los autores observaron que ambas herramientas capturan tendencias similares del NDVI, con un coeficiente de correlación elevado entre ellas,

lo cual indica que, a pesar de la alta diferencia en resolución espacial, ambas técnicas son capaces de describir el estado de la vegetación.

En concordancia con esos hallazgos, los resultados del presente trabajo muestran que el NDVI satelital fue capaz de explicar una proporción ligeramente mayor de la variabilidad de la altura de la pastura a nivel de potrero, lo que podría atribuirse al efecto del promediado espacial propio de las imágenes satelitales. Este efecto tiende a reducir la variabilidad local y el ruido presente en datos de muy alta resolución, como los obtenidos mediante UAV, permitiendo capturar de forma más estable la señal estructural del dosel cuando el objetivo es la predicción a escala de potrero.

El mejor desempeño predictivo del modelo basado en el NDVI de dron, reflejado en un menor RMSE en comparación con el NDVI derivado del satélite, puede interpretarse como una consecuencia de su mayor sensibilidad a variaciones locales del dosel. Esto coincide con lo señalado por Bollas et al. (2021) quienes reportaron una mayor dispersión y rango de valores de NDVI en los datos derivados de UAV en comparación con los satelitales. Esta característica, si bien resulta ventajosa para análisis a escala fina, puede introducir mayor variabilidad en modelos ajustados a escalas espaciales más amplias.

La comparación con estudios previos sugiere que ambas plataformas de teledetección constituyen herramientas válidas y complementarias para la caracterización del estado de la pastura. Mientras que el uso de drones ofrece un alto nivel de detalle espacial y flexibilidad operativa, las imágenes satelitales, como Sentinel-2, proporcionan información más estable y consistente para aplicaciones de monitoreo y modelización a escala de potrero.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que las mediciones directas de biomasa (altura con regla, RPM y C-Dax) y los índices de vegetación derivados de sensores remotos presentan asociaciones consistentes, aunque predominantemente no lineales, cuando se trabaja de forma conjunta un número elevado de observaciones correspondientes a diversas especies y mezclas forrajeras. En particular, las relaciones entre métodos *in situ* mostraron asociaciones fuertes y estables, mientras que las relaciones entre estas mediciones y el NDVI, especialmente el obtenido mediante dron, evidenciaron patrones curvilíneos asociados a fenómenos de saturación del índice en coberturas densas y a diferencias en la arquitectura del dosel entre especies. Estos resultados respaldan la primera hipótesis de trabajo y ponen de manifiesto la importancia de considerar la heterogeneidad estructural del tapiz forrajero y la escala de observación al interpretar relaciones entre variables biofísicas y espectrales.

Al comparar modelos predictivos ajustados con la misma estructura de efectos fijos, variando únicamente el método de estimación de la biomasa, se observó que los modelos basados en mediciones directas de campo (altura con regla y RPM) presentaron una mayor capacidad explicativa a nivel de efectos fijos. Sin embargo, el modelo basado en NDVI obtenido mediante dron mostró un desempeño global comparable. Por lo tanto, si bien las mediciones directas capturan con mayor precisión las variaciones estructurales del forraje, el NDVI de dron logra un desempeño predictivo equivalente cuando se consideran conjuntamente las distintas fuentes de variabilidad, lo que respalda la segunda hipótesis de este trabajo.

Finalmente, el modelo basado en NDVI satelital mostró un desempeño comparable, e incluso superior en términos de estabilidad, al modelo construido a partir del NDVI de dron, lo que apoya la tercera hipótesis planteada. La mayor escala espacial del sensor satelital contribuye a atenuar la heterogeneidad fina dentro del potrero y a representar de forma más robusta el estado promedio de la vegetación.

En conjunto, estos resultados destacan la complementariedad entre los métodos directos de medición y los sensores remotos, y refuerzan la utilidad de enfoques integrados para la predicción de biomasa en sistemas pastoriles reales. Mientras que las mediciones *in situ* permiten capturar con mayor detalle la estructura y densidad del tapiz forrajero, los índices espectrales aportan una visión espacialmente continua y operativamente eficiente. La integración de ambas fuentes de información permite conciliar precisión, escalabilidad y viabilidad operativa, constituyéndose en una herramienta con alto potencial para mejorar la toma de decisiones en el manejo del pastoreo y en la planificación productiva a distintas escalas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agisoft LCC. (2024). *Agisoft Metashape Profesional Edition* (v2.1.2 build 18358) [Software]. <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>
- Aguerre, M., Cajarville, C., La Manna, A., Cavestany, D., Mendoza, A., Mattiauda, D., Carriquiry, M., Repetto, J., Meikle, A., & Chilibroste, 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; Universidad de la República; CONAPROLE; INIA; INALE. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/RevistaEstrategiasdealimentacion.pdf>
- Arrillaga, A., & Píriz, S. (2021). *Comparación del uso de tres métodos para la estimación de biomasa en el área de plataforma de pastoreo* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Artola, I., & Pérez, J. (2024). *Estimación de biomasa de festuca mediante el uso de drone multispectral* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Bareth, G., & Schellberg, J. (2018). Replacing manual rising plate meter measurements with low-cost UAV-derived sward height data in grasslands for spatial monitoring. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 86(3–4), 157–168. <https://doi.org/10.1007/s41064-018-0055-2>
- Bollas, N., Kokinou, E., & Polychronos, V. (2021). Comparison of sentinel-2 and UAV multispectral data for use in precision agriculture: An application from northern Greece. *Drones*, 5(2), Artículo e35. <https://doi.org/10.3390/drones5020035>
- Cajarville, C., Mendoza, A., Santana, A., & Repetto, J. L. (2012). En tiempos de intensificación productiva... ¿cuánto avanzamos en el conocimiento de los nuevos sistemas de alimentación de la vaca lechera? *Veterinaria (Montevideo)*, 48(Supl.1), 35–39. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/AUPA-2012-35-39-Cajarville.pdf>
- Canseco, C., Demanet, R., Balocchi, O., Parga, J., Anwandter, V., Abarzúa, A., Teuber, N., & Lopetegui, J. (2007). Determinación de la disponibilidad de materia seca de praderas en pastoreo. En N. Teuber, O. Balocchi, & J. Parga (Eds.), *Manejo del pastoreo* (pp. 23–49). Gobierno de Chile; Universidad de La Frontera; Anasac; Universidad Austral de Chile; Cooprinsem. <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/18ba30d0-aea8-4fb0-9c82-e4e935fbfbe2/content>
- Castle, M. (1976). A simple disc instrument for estimating herbage yield. *Grass and Forage Science*, 31(1), 37–40. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1976.tb01113.x>
- C-Dax. (s.f.). *Pasture Meter Manual Lift*. <https://www.c-dax.com/product/atv-pasture-measure-rapid-manual-lift>
- Dietl, W., Fernández, F., & Venegas, C. (Eds.), Jorquera, M. (Illus.). (2009). *Manejo sostenible de praderas: Su flora y vegetación*. ODEPA. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2010/02/Manejo_sostenible_de_praderas.pdf
- DJI. (s.f.). *DJI GS PRO* (v2.0.17) [Software]. https://www.dji.com/global/ground-station-pro?site=brandsite&from=insite_search

- DJI Agriculture. (s.f.). *Specs*. <https://ag.dji.com/p4-multispectral/specs>
- El INTA presenta una web para estimar la disponibilidad forrajera. (2025, 30 de julio). *INTA Informa*. <https://intainforma.inta.gob.ar/el-inta-presenta-una-web-para-estimar-la-disponibilidad-forrajera/>
- Fariña, S., Tuñón, G., Pla, M., & Martínez, R. (2017). *Sistema de pastoreo La Estanzuela: Guía práctica para la implementación de un Sistema de pastoreo*. INIA. https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-07/bd%20115_2017.pdf
- Gargiulo, J., Lyons, N., Masia, F., Beale, P., Insua, J., Correa-Luna, M., & Garcia, S. (2023). Comparison of ground-based, unmanned aerial vehicles and satellite remote sensing technologies for monitoring pasture biomass on dairy farms. *Remote Sensing*, 15(11), Artículo e2752. <https://doi.org/10.3390/rs15112752>
- Gbur, E., Stroup, W., McCarter, K., Durham, S., Young, L., Christman, M., West, M., & Kramer, M. (2012). *Analysis of generalized linear mixed models in the agricultural and natural resources sciences*. ASA; CSSA; SSSA. <https://doi.org/10.2134/2012.generalized-linear-mixed-models>
- Gonçalves, C., Kamali, B., Hütt, C., Bareth, G., & Gaiser, T. (2023). A review of estimation methods for aboveground biomass in grasslands using UAV. *Remote Sensing*, 15(3), Artículo e639. <https://doi.org/10.3390/rs15030639>
- Google. (2025). [Facultad de Agronomía, Centro Regional Sur, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 22 de diciembre de 2025, de <https://www.google.com/maps/@-34.6051501,-56.2402547,6854m/data=!3m1!1e3>
- Hartig, F. (2024, 17 de octubre). *DHARMA: Residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models*. CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/DHARMA/vignettes/DHARMA.html>
- Haydock, K., & Shaw, N. (1975). The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 15, 663–670.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463908272.pdf
- Insua, J., & Utsumi, S. (2016). Nuevas tecnologías para el monitoreo de pasturas. *Visión Rural*, 23(115), 9–12. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80888>
- Insua, J., Utsumi, S., & Basso, B. (2019). Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PLoS ONE*, 14(3), Artículo e0212773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>
- Irigoyen, A. (2011). *Presupuestación forrajera*. MGAP. <https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/filemanager/source/2021/Librillos/pdf/Presupuestaci%C3%B3n%20forrajera.pdf>

- La producción de leche en Uruguay. (2001). *Revista del Plan Agropecuario*, (101), 24–25. https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R101/R101_24.pdf
- Lombardo, S. (2022). ¿Cómo utilizar el 90% del pasto? *Revista del Plan Agropecuario*, (168), 50–52. https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/183_2810.pdf
- Monitoreo satelital de cantidad y calidad de biomasa disponible en sistemas ganaderos pastoriles de ALC*. (s.f.). FONTAGRO. <https://fontagro.org/es/proyectos/monitoreosatelital>
- Montossi, F., Pravia, M., Dighiero, A., Porcile, V., Gutiérrez, D., & De Barbieri, I. (2013). Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. *Revista INIA*, (34), 25–29. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-06/revista-INIA-34.pdf>
- Nabinger, C., de Faccio, P., Cassiano, J., Mezzalira, J., Martins, D., & Boggiano, P. (2011). Servicios ecosistémicos de las praderas naturales: ¿Es posible mejorarlos con más productividad? *Asociación Latinoamericana de Producción Animal*, 19(3–4), 27–34. https://www.researchgate.net/publication/288636409_Servicios_ecosistemicos_de_las_praderas_naturales_es_posible_mejorarlos_con_mas_productividad
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2011). *Censo general agropecuario 2011*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/censo-general-agropecuario-2011>
- Oleggini, G., Gallego, F. (Eds.), & Lecuna, C. (Col.). (2017). *El pasto en el tambo*. CONAPROLE. <http://www.eleche.com.uy/files/el-pasto-en-el-tambo?es>
- Ortega, G., Chilibroste, P., Garrido, J., Waller, A., Fariña, S., & Lattanzi, F. (2023). Monitoring herbage mass and pasture growth rate of large grazing areas: A comparison of the correspondence, cost and reliability of indirect methods. *Journal of Agricultural Science*, 161(4), 502–511. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000333>
- Pizzio, R., & Fernández, G. (2003). *Clase demostrativa para estimar disponibilidad forrajera*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/148-estimar_disponibilidad.pdf#:~:text=Porqu%C3%A9%20medimos%20DISPONIBILIDAD%20La%20estimaci%C3%B3n%20de%20la,sobre%20ajustes%20de%20carga%2C%20descanso%20y%20suplementaci%C3%B3n
- Ramos, B. L., Cruz, N., Pires, A. J., Sousa, B. M., Jardim, R., Fries, D., Dias, D. L., & Bonomo, P. (2021). Métodos de avaliação em pastagens com ou sem animais. *Pubvet*, 15(12), 1–18. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v15n12a995.1-18>
- Repetto, J. (2016, 7 de marzo). *Drones: Beneficios reales y potenciales para los cultivos. Sobre la Tierra*. <https://sobrelatierra.uba.ar/drones-beneficios-reales-y-potenciales/>
- Ribarola, J., & Villanueva, C. (2023). *Cuantificación de biomasa en pasturas a partir de imágenes tomadas por drones* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Rising Plate Meter*. (s.f.). Pasture.io. <https://pasture.io/rising-plate-meter>

- Rossetti, N. (2022). *Evaluación de métodos de estimación de forraje aplicados al manejo de pasturas* [Trabajo final de grado, Pontificia Universidad Católica Argentina]. Repositorio Institucional UCA. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/19602>
- Sanderson, M., Rutz, C., Fultz, S., & Rayburn, E. (2001). Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agronomy Journal*, 93(6), 1281–1286. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.1281>
- Schori, F. (2015). Sward surface height estimation with a rising plate meter and the C-Dax Pasturemeter. En A. van den Pol-van, H. Aarts, A. De Vliegher, D. Reheul, & J. A. Reijneveld (Eds.), *Grassland and forages in high output dairy farming systems* (Vol. 20, pp. 310–312). EGF. https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed_Matter/Proceedings/EGF2015.pdf#page=329
- Secco, J. J. (2025). *Utilización de drones en la estimación de parámetros para la gestión de sistemas pastoriles* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/51937>
- Sharada, R. (2025, 17 de septiembre). *Introduction of Holdout Method* [Publicación en un foro en línea]. GeeksforGeeks. <https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering/introduction-of-holdout-method/>
- Susruthan, V., Donaghy, D., Kenyon, P., Sneddon, N., & Cartmill, A. (2025). Measuring herbage mass: A review. *Agronomy*, 15(10), Artículo e2264. <https://doi.org/10.3390/agronomy15102264>
- Uruguay lechero*. (2025). INALE. <https://www.inale.org/uruguay-lechero/>
- Vahidi, M., Shafian, S., Thomas, S., & Maguire, R. (2023). Pasture biomass estimation using ultra-high-resolution RGB UAVs images and deep learning. *Remote Sensing*, 15(24), Artículo e5714. <https://doi.org/10.3390/rs15245714>
- Viglizzo, E. (1981). *Dinámica de los sistemas pastoriles de producción lechera*. Hemisferio Sur.
- Viljanen, N., Honkavaara, E., Rooth, N., Hakala, T., Niemeläinen, O., & Kaivosoja, J. (2018). A novel machine learning method for estimating biomass of grass swards using a photogrammetric canopy height model, images and vegetation indices captured by a drone. *Agriculture*, 8(5), Artículo e70. <https://doi.org/10.3390/agriculture8050070>
- Virkajarvi, P. (1999). Comparison of three indirect methods for prediction of herbage mass on timothy-meadow fescue pastures. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 49(2), 75–81. <https://doi.org/10.1080/09064719950135579>
- Waller, A. (2020). *Análisis de metodología para el monitoreo de pasturas en predios comerciales* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/32561>
- Zanine, A., Santos, E., & Ferreira, D. (2006). Principais métodos de avaliação de pastagens. *Redvet*, 7(11), 1–13.

7. ANEXO

Figura A1

Diagrama de dispersión entre kg_MS_ha y Altura_cm por recurso forrajero

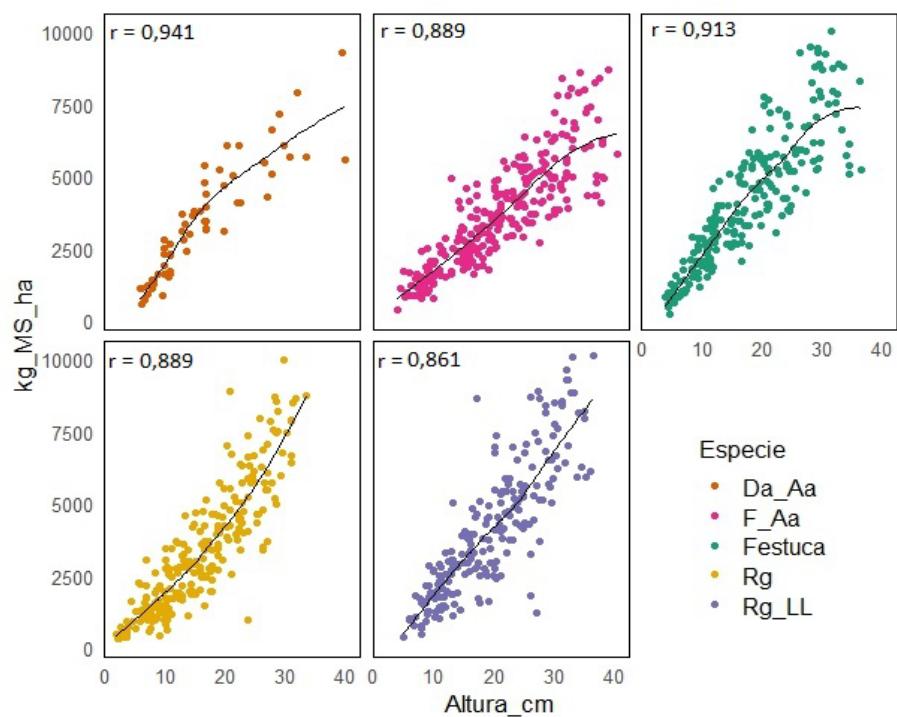


Figura A2

Diagrama de dispersión entre RPM y Altura_cm por recurso forrajero

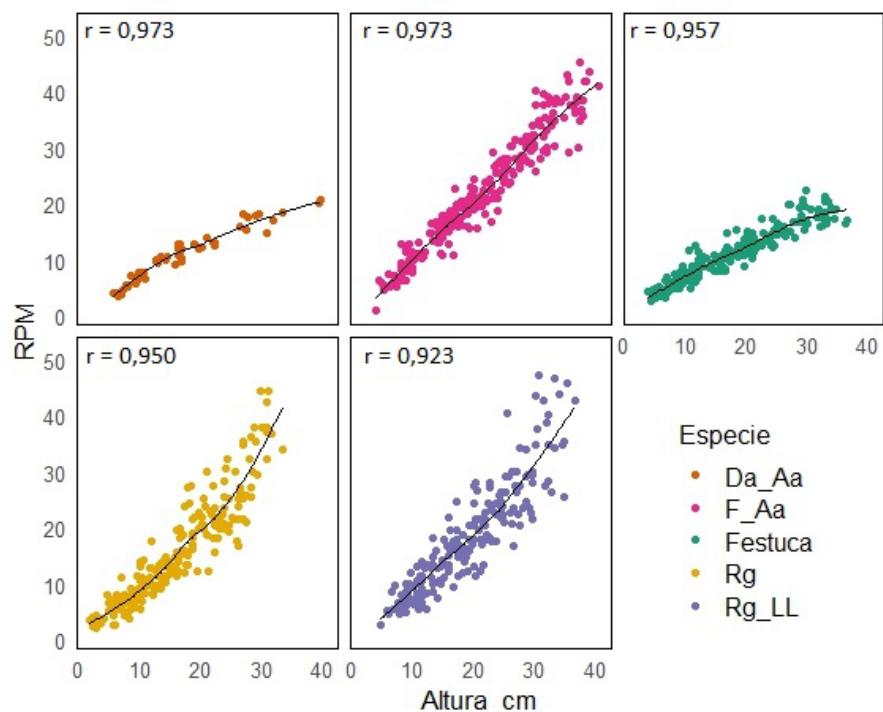
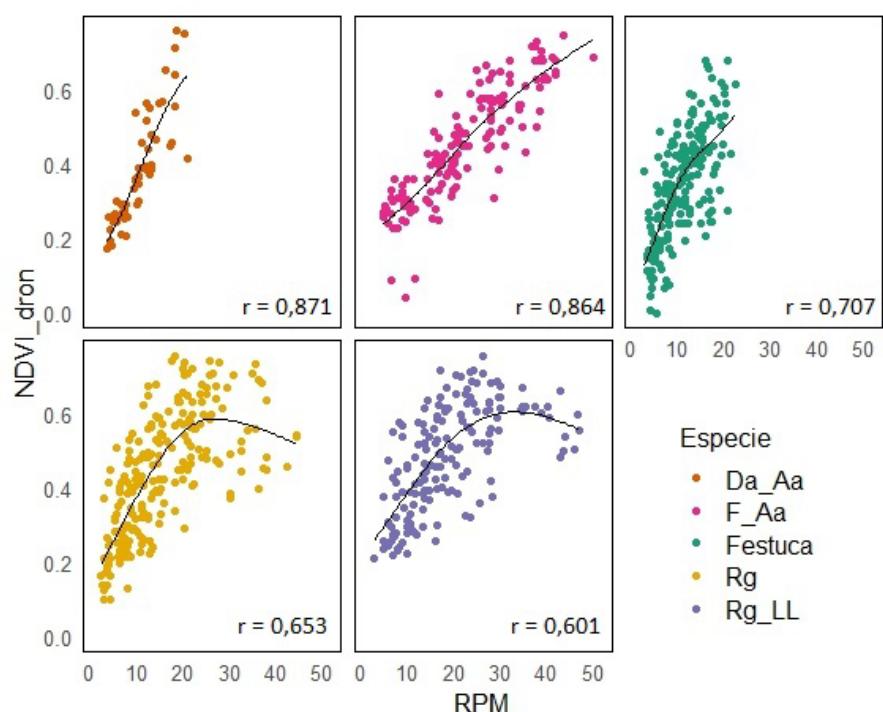


Figura A3

Diagrama de dispersión entre NDVI_dron y RPM por recurso forrajero

**Figura A4**

QQ-plot de los residuos del modelo mixto ajustado para Altura_cm

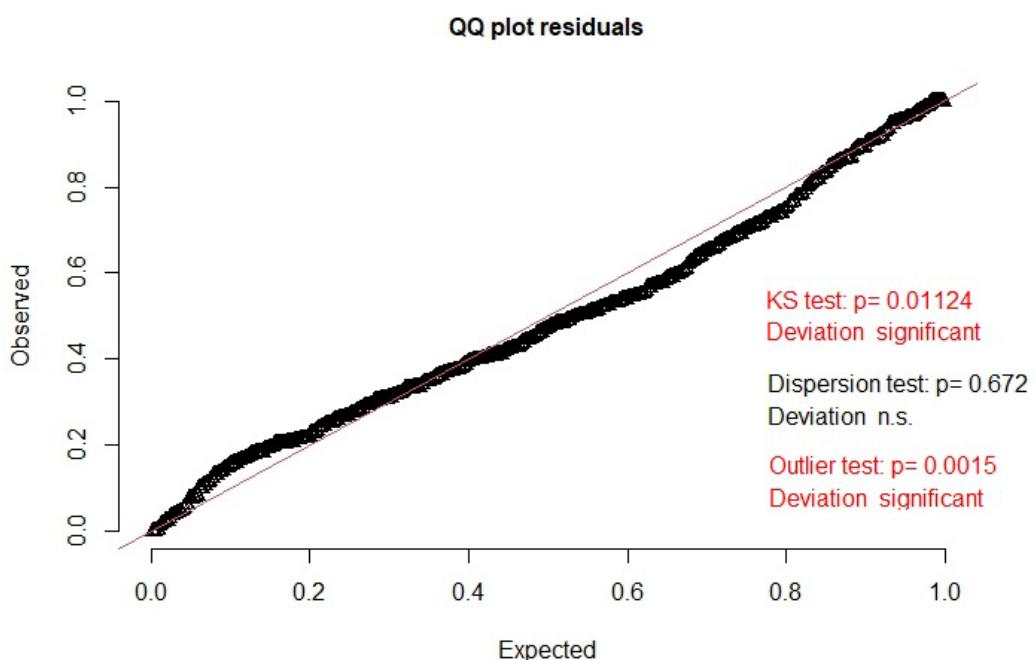
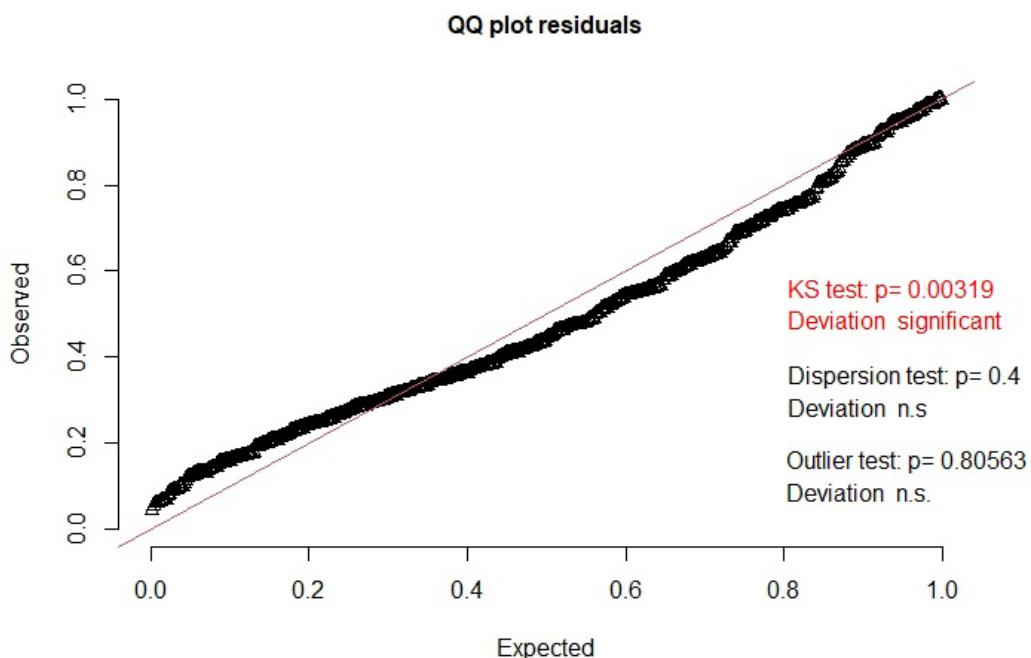


Figura A5

QQ-plot de los residuos del modelo mixto ajustado para RPM

**Figura A6**

QQ-plot de los residuos del modelo mixto ajustado para NDVI_dron

