

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

USO DE UN UAV PARA ESTIMAR LA ALTURA DEL FORRAJE

por

Guillermo RODRÍGUEZ BIANCO  
Ignacio TRIÑANES MORIXE

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2018

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. Oscar Bentancur

-----  
Ing. Elc. (MSc.) Juan Cardelino

-----  
Ing. Agr. (PhD.) Martín Durante

Fecha:

6 de noviembre de 2018.

Autores:

-----  
Guillermo Rodríguez

-----  
Ignacio Triñanes

## AGRADECIMIENTOS

A nuestros tutores, Pablo Soca y Gastón Notte, por la oportunidad, el apoyo y el aguante que tuvieron para que pueda salir este trabajo de tesis.

A Andrés Pías, por el gran aporte que realizó para que se pudiera concretar esta tesis.

Al grupo de lechería, en especial a Matías Oborsky y Pamela Giles, por permitirnos realizar los experimentos en donde ellos estaban llevando a cabo su tesis de maestría y por el apoyo que nos brindaron.

A Oscar Bentancur por el apoyo y recomendaciones que nos brindó.

Particular agradecimiento para Carlos J. Badin por su enorme contribución en el procesamiento de imágenes digitales.

Especial agradecimiento a nuestras familias y amigos por todo el apoyo que nos brindaron a lo largo de todos estos años de estudio.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
I. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
II. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
A. RAZONES E IMPORTANCIA DE ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD .....	3
B. RELACIÓN PLANTA-ANIMAL .....	5
C. ESTRUCTURA DE LA COBERTURA EN 3D. ....	8
1. <u>Estructura horizontal</u> .....	8
2. <u>Estructura vertical</u> .....	9
3. <u>Heterogeneidad espacial</u> .....	10
D. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE FORRAJE .....	11
1. <u>Método de cortes</u> .....	13
2. <u>Estimación visual</u> .....	13
3. <u>Altura</u> .....	14
a. Regla graduada.....	14
b. Pasturómetro (en inglés, weight-disc rising plate meter).....	14
c. Otros métodos.....	15
4. <u>Capacímetro</u> .....	17
5. <u>Sensores remotos o radiómetros</u> .....	18
a. Sensores satelitales.....	19
b. Sensores UAV. ....	20
E. COMPARACIÓN DE MÉTODOS.....	22
F. GANADERÍA DE PRECISIÓN.....	25
G. HIPÓTESIS.....	26
III. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	27
A. DESCRIPCIÓN DEL DRON, CÁMARA Y COMPUTADORA COMPLEMENTARIA UTILIZADOS .....	27
B. METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE ALTURA .....	29
1. <u>Estacas</u> .....	29
2. <u>Mapping 3d</u> .....	32
C. EXPERIMENTOS.....	35

1. <u>Calibración</u> .....	36
2. <u>Ajuste metodológico</u> .....	36
a. 1ª. etapa: evaluación metodologías .....	37
b. 2ª. etapa: ensayo abril .....	38
3. <u>Experimento central</u> .....	40
a. Diseño experimental y tratamientos .....	40
b. Animales y manejo .....	41
c. Características de los vuelos y desempeño del dron .....	42
d. Altura y disponibilidad de forraje .....	42
e. Alturas de vuelo .....	43
f. Versiones de los modelos digitales .....	44
g. Escalas de evaluación .....	44
h. Análisis estadísticos .....	45
IV. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	46
A. <u>AJUSTE METODOLÓGICO</u> .....	46
B. <u>EXPERIMENTO CENTRAL</u> .....	50
1. <u>Efecto de la escala en la estimación de la altura</u> .....	50
a. A nivel de parcela .....	50
b. A nivel de punto de muestreo .....	51
c. A nivel de punto de escala.....	56
2. <u>Árbol de regresión</u> .....	61
3. <u>Discusión general de la metodología mapping 3d: como estimador de la altura de la pastura</u> .....	63
V. <u>CONCLUSIONES</u> .....	68
VI. <u>RESUMEN</u> .....	72
VII. <u>SUMMARY</u> .....	74
VIII. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	75
IX. <u>ANEXOS</u> .....	86

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características de los vuelos y desempeño del dron.....	42
2. Versiones logradas correctamente según tratamiento y altura de vuelo...	44
3. Comparación de altura de regla vs. altura estimada con técnica de Estacas realizado a partir de dos cámaras (RGB y RGB).....	46
4. Comparación de altura de regla vs. altura estimada con técnica de Mapping 3d realizado a partir de dos cámaras (RGB y NGB).....	48
5. Dimensiones reales y estimadas por Mapping 3d de dos cajas.....	48
6. Promedios de altura (cm) estimada con técnica de Mapping 3d para los tratamientos de junio y octubre a nivel de parcela.....	50
7. Número de observaciones, media y desvío de las medidas regla para cada tratamiento en junio.....	53
8. Promedio de altura (cm) estimada con la técnica de Mapping 3d para el tratamiento de junio a nivel de parcela.....	53
9. Número de observaciones, media y desvío de las medidas regla para cada tratamiento en octubre.....	54
10. Promedio de altura (cm) estimada con la técnica de Mapping 3d para el tratamiento de octubre a nivel de parcela.....	54
Figura No.	
1. Modelo de ecosistema pastoril.....	4
2. Relación entre consumo de forraje, característica de la pastura y métodos de asignación de pastura.....	6
3. Módulo de control aéreo.....	28
4. Campo de visión (FOV) de la cámara Raspberry PI.....	29

5. Estaca con franjas intercaladas.....	30
6. Ubicación del dron para la captura correcta de cada estaca.....	31
7. Forma en la que realiza el recorrido el dron .....	33
8. Ancho y largo capturado en cada foto.....	33
9. Mapa de ubicación del área bajo estudio en el potrero “la crianza” .....	38
10. Croquis de bloques y tratamientos ubicados en el potrero 7a.....	39
11. Croquis de bloque y tratamientos (en color) estudiados en junio y octubre...	41
12. Ilustración de la forma en que se representaron los puntos de escala a nivel de campo (filas) y sus repeticiones (columnas), para su correcta identificación.....	43
13. Foto digital tomada por el UAV para la metodología estacas.....	47
14. Nube de puntos y Mapping 3d de las cajas.....	49
15. Ejemplo de puntos de muestreo.....	52
16. Gráfico de línea.....	57
17. Puntos 1 y 5.....	58
18. Histogramas correspondientes a los vuelos de junio.....	59
19. Histogramas correspondientes a los vuelos de octubre.....	60
20. Árbol de partición de la regresión.....	63

## I. INTRODUCCIÓN

Las pasturas en Uruguay representan el principal recurso forrajero en la base alimenticia de los sistemas de producción pecuaria. La mayoría de los sistemas de producción de leche y carne son esencialmente pastoriles. En particular en la lechería el pasto de cosecha directa representa entre el 48 y 54 % de la dieta de los animales en el año (Aguerre et al., s.f.). Por lo tanto, en un contexto internacional, tanto el rubro lechero como ganadero, deberían ser competitivos, ya que los costos de producción son relativamente bajos, explicados en parte por la alta participación del forraje en la dieta de los animales (Chilibroste et al. 2011, Montossi et al. 2013a).

Sin embargo, para mantenerse competitivo en una industria agrícola cada vez más globalizada es necesario mejorar para producir, conservar y manejar eficientemente el pasto. Esto implica, aumentar la producción y utilización del forraje, incrementando de esta forma la persistencia de las pasturas y disminuyendo los costos de producción.

La estimación exacta de la biomasa del recurso forrajero permite tomar decisiones críticas sobre la gestión del pastoreo y la presupuestación de dicho recurso.

Existen distintos métodos para la estimación de la cantidad de forraje por unidad de superficie, los cuales se pueden clasificar en métodos directos (cortes) o indirectos (estimación visual, altura de regla, bastón medidor, medidor de disco de levante, métodos satelitales, Montossi et al., 2013a).

A pesar de la relevancia que presentan las pasturas en los sistemas de producción de Uruguay y el reconocimiento por parte de los productores de los beneficios que trae aparejado la gestión de las pasturas, los métodos de medición de biomasa existentes han sido poco adoptados por los responsables de los sistemas ganaderos-lecheros, debido a imprecisiones, limitaciones de tiempo y costos laborales.

Los avances recientes en la detección remota utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV) livianos están ofreciendo una opción alternativa usando imágenes digitales y software de computadora. Los UAV potencialmente pueden proporcionar a investigadores y técnicos un dispositivo de detección remoto portátil que permite la recopilación de datos de bajo costo, cuando y donde sea necesario.

Este trabajo de tesis surge a partir de un proyecto surge a partir de un proyecto multidisciplinario que integra conocimientos y técnicas tanto del área de Ingeniería en Computación como de la Agronomía, con el fin de proponer metodologías que faciliten la toma de decisiones y colaboren con la automatización de la información.



El objetivo general de este trabajo es validar un método de procesamiento de imágenes obtenidas por un UAV para estimar la altura de las pasturas.

Objetivos específicos:

- 1- Evaluar dos metodologías distintas para estimar la altura de las pasturas a partir de imágenes digitales.
- 2- Analizar las estimaciones de altura a diferentes escalas espaciales.
- 3- Explorar el potencial del procesamiento de imágenes como fuente de información para la investigación y gestión de los sistemas pastoriles.

## II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### A. RAZONES E IMPORTANCIA DE ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD

La producción lechera en el Uruguay aumentó a una tasa del 5,3 % entre 2002 y 2014 (INALE, 2014) mientras que la tasa de reducción en el número de explotaciones estuvo alrededor del 3% anual, derivando en sistemas de producción de mayor escala (INIA, 2017). Dicho incremento de producción se dio en base a un aumento en los litros por hectárea a partir de mayor carga (vacas masa/hectáreas vaca masa) y producción individual (litros/vaca masa/año), mientras que la superficie de producción se redujo en un 20% (Chilibroste 2015, MGAP. DIEA 2016). Este aumento en la producción fue posible debido a incrementos en el suministro de concentrados y reservas de forraje.<sup>1</sup>

En los sistemas productivos lecheros la alimentación y el concentrado representan el 75% de los gastos económicos de alimentación, principal gasto directo en una empresa lechera (INIA, 2017).

La utilización de pasturas, definida como la materia seca (MS) anual total de pastos por hectárea consumida por los animales (Future Dairy, 2011), es un factor primordial relacionado con la rentabilidad de los sistemas basados en pasturas (Holmes, 2002). Sin embargo, a nivel comercial se identifican bajos niveles de utilización del forraje producido, vinculados a bajas cargas de los sistemas más que a problemas de producción (Chilibroste, 2011).

Los productores lecheros con acceso a asesoramiento no han logrado superar los 3 tt/MS/ha/año de pastura consumida por pastoreo directo (Chilibroste, 2015). Sin embargo, de acuerdo a las producciones estimadas por la plataforma de seguimiento forrajero Satelital de Conaprole, para praderas de 2°. año en todo el país, la misma se encuentra en el entorno de los 10,5 y 12,5 tt/MS/año (promedio 2011-2016), encontrándose hacia el sur del Río Negro mayores producciones con respecto a la región Norte.

El 50 % de la variabilidad en el resultado económico depende de la producción de pasto. Análisis de registros obtenidos en el marco de un proyecto de largo plazo llevado adelante por el Área de Producción Primaria y Relaciones Cooperativas de CONAPROLE, muestran que las estrategias de intensificación basadas en un incremento de la biomasa producida en la rotación pastura-cultivos han sido exitosas desde el punto de vista económico-financiero (Chilibroste et al., 2009); mientras que las que se han

---

<sup>1</sup> Ortega, G.; Chilibroste, P.; Lattanzi, F. s.f. Aplicación de sistemas de percepción remota para el monitoreo, evaluación y gestión de los recursos forrajeros en los sistemas pastoriles de producción de leche del Uruguay (sin publicar).

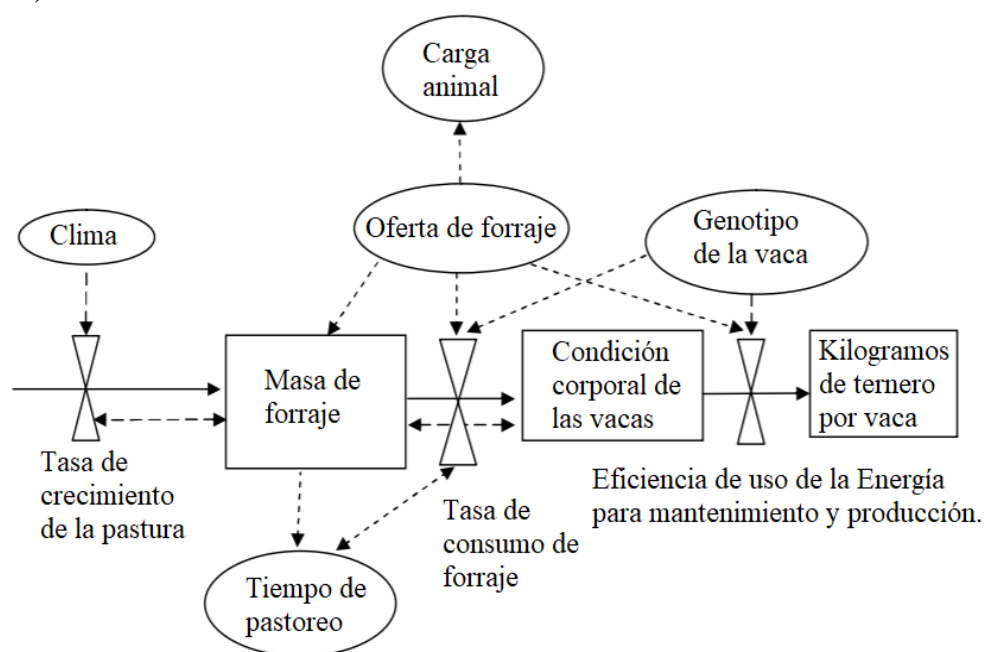
basado en el uso de concentrados sin incrementos proporcionales en la producción de biomasa han tenido resultados más pobres y un mayor nivel de exposición a variaciones de relaciones de precios y/o clima.

Las mediciones de disponibilidad de materia seca (MS) son esenciales para determinar la carga y ganancia animal de un sistema productivo, la productividad de las pasturas, y para evaluar distintas estrategias de manejo de pasturas y animales (Mannetje, 2000).

La fitomasa es definida por Hodgson (1990) como la cantidad total de forraje que existe por unidad de superficie, medida por corte a nivel del suelo o a un nivel de referencia que debe ser explicitado. Normalmente se expresa en kg MS/ha.

Conocer la biomasa disponible en un sistema, en un momento dado, utilizando métodos de muestreo con el mayor nivel de precisión, permite obtener datos sobre el rendimiento, la cantidad de forraje aprovechable y la dinámica de crecimiento de los pastos (Mónaco et al., 2015). Cualquier error en la estimación de la cantidad de biomasa implica pérdidas productivas y económicas para el sistema de producción (Sanderson et al., 2001)

Según modelo del ecosistema pastoril, la oferta de forraje es una de las variables de estado del sistema. La oferta de forraje permite al mismo tiempo controlar tres procesos: 1) producción de forraje, 2) consumo de forraje y 3) la eficiencia de uso del forraje por el animal ya que afecta la partición mantenimiento-producción (Do Carmo et al., 2013).



Las variables “estado” se expresan en rectángulos, las líneas continuas representan flujo, las “mariposas” representan control del flujo y las variables de decisión o manejo se representan con círculos ovalados, las líneas punteadas indican retroalimentación de las tasas de flujo por efecto de la variable estado.

Figura No. 1. Modelo de ecosistema pastoril.

Fuente: Do Carmo et al. (2013).

Este trabajo se relaciona con el mencionado modelo conceptual por tratarse de una metodología o tecnología que permite cuantificar la masa de forraje, y por lo tanto permitiría mejorar su producción, consumo y utilización. Esto significaría también un cambio cualitativo ya que en caso de funcionar correctamente permitiría que ciertos sistemas productivos comiencen a cuantificar dicha variable de estado de los sistemas ganaderos pastoriles y basar sus medidas de manejo en base a información.

## B. RELACIÓN PLANTA-ANIMAL

En el caso de Uruguay, donde predomina el sistema pastoril, éste se sustenta en función de la cantidad y calidad de forraje producido, de la capacidad del animal para cosecharlo y utilizarlo eficientemente y del manejo que el productor haga de los recursos a su disposición (Peyraud y Delaby, 2001).

La altura no deja de ser el indicador más útil para propósitos de manejo ya que con mucha facilidad ayuda a predecir la respuesta ya sea del animal como de la pastura (Hodgson, 1990) y al mismo tiempo es considerada como la variable de la pastura más directamente asociada al peso de bocado y al consumo de forraje diario (McGilloway et al., 1999). Otro parámetro importante es la disponibilidad de la pastura, que, junto a variaciones en su estructura, hacen que se le presente al animal un tapiz con determinadas características, que se relacionan con cambios en comportamiento ingestivo (Acosta et al., 2006).

La relación entre consumo de materia seca y la cantidad de forraje se observa en la figura 2. En esta curva se distinguen 2 zonas:

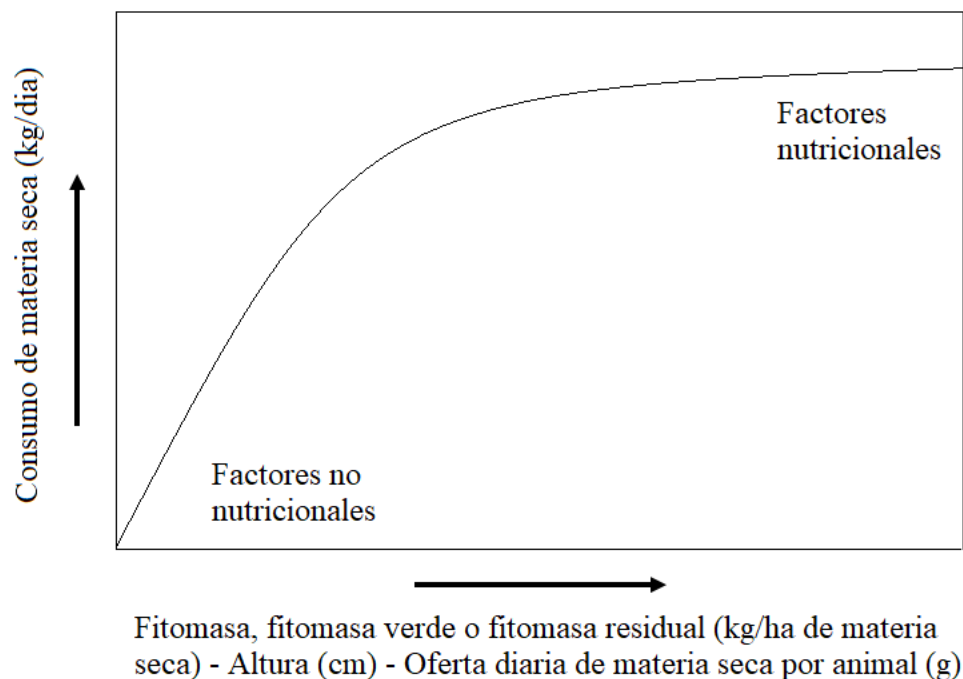


Figura No. 2. Relación entre consumo de forraje, característica de la pastura y métodos de asignación de pastura.

Fuente: Cangiano (1996b).

La regulación por factores nutricionales no fue abordada en este trabajo. Las limitantes no nutricionales son aquellas que se producen limitando la capacidad de cosecha del animal (Cangiano, 1996b).

En condiciones de pastoreo el consumo puede ser expresado como el producto de la tasa de consumo (g/minuto) y el tiempo de pastoreo efectivo (minutos). La tasa de consumo a su vez puede ser descompuesta como el producto entre tasa de bocados (bocados/minuto) y peso de cada bocado individual (g, Hodgson, 1990).

El tiempo de pastoreo está limitado por la división del tiempo entre las distintas actividades que realiza el animal (Cangiano, 1996b). Los animales difícilmente pueden superar tiempos de pastoreo de 10 a 11 horas diarias (Stakellum y Dillon, 1989). La tasa de bocado tiene como límite lo que le permite su anatomía bucal. Por estas razones el factor que determina mayormente el consumo en pastoreo es el peso de bocado

(Chilibroste, 1998). La altura de forraje parece ser la característica con mayor incidencia que tiene sobre el peso de bocado en las gramíneas de zonas templadas (Hodgson, 1990). En cambio, al trasladarse a zonas tropicales tiene mayor efecto la densidad foliar de canopeo ( $\text{g/cm}^3$ ) y la relación hoja/tallo (Stobbs, 1973).

El peso de cada bocado se compone del volumen de forraje cosechado por el animal y la densidad del horizonte de pastoreo. El volumen cosechado en un bocado individual va a ser resultado de la profundidad de pastoreo (plano vertical) y del área que el animal es capaz de cubrir con la lengua (Chilibroste, 1998).

La profundidad de pastoreo es una fracción aparentemente constante de la altura del forraje disponible u ofertado, esta fracción es cercana al 50%. La profundidad del bocado está regulada por altura de la lígula o por el largo de la lámina. La profundidad final o total alcanzada por el animal puede ser el resultado de una o varias defoliaciones sucesivas en el mismo sitio de pastoreo (Galli, 1996).

En pasturas en estado vegetativo o con tallos reproductivos pequeños, el tamaño de bocado se incrementa al incrementarse la altura (Forbes 1988, Arias et al. 1990) siendo este el principal componente del comportamiento ingestivo en pastoreo que influye en el consumo (Mursan et al., 1989).

Hodgson, citado por Cangiano (1996a) afirma el concepto que el consumo de materia seca disminuye marcadamente cuando la asignación de forraje es menor que el doble del consumo potencial pero no apoya la idea de que el consumo se acerca a un máximo cuando la asignación es tres a cuatro veces mayor al consumo.

El efecto de la densidad se observa en el comportamiento, cuando se enfrenta a animales a pasturas con la misma disponibilidad, pero está construida de manera distinta entre % de cobertura y altura. Se ha observado que animales que pastorean pasturas más heterogéneas o con mayores % de suelo desnudo y con manchones más altos logran mayor consumo que los que pastorean pasturas con mayor cobertura, pero más cortas. El impacto combinado de disponibilidad y altura puede observarse en el trabajo presentados por Laca et al. (1992).

Cangiano (1996a) plantea que en sistemas de pastoreo rotativo la fitomasa inicial debería ser superior a 2.200 kg MS/ha (más de 11 cm de altura) y la oferta por animal de 40-50 kg MS/día. En pasturas cortas (1500 kg MS/ha) las vacas lecheras no pueden alcanzar altos consumos, porque el peso de bocado promedio es muy pequeño, aunque se le asigne un área u oferta diaria de forraje por animal alta.

Wade (1991) obtuvo una mejor explicación del consumo en raigrás perenne cuando, además de la oferta por animal y por día (en este caso área asignada) consideró la fitomasa inicial en su análisis.

El consumo se ve restringido cuando las alturas son muy bajas y los mecanismos de compensación no son suficientes. Hodgson (1990) indica que, para los ovinos el consumo se restringe cuando la pastura está por debajo de los 6 cm; y para los vacunos, cuando está por debajo de los 9 cm. El estrato inferior a 5 cm representa el menos disponible para el animal, porque con alturas menores no tendrá posibilidades físicas de cosechar la cantidad de forraje que necesita dentro del tiempo de pastoreo (Laca y Ortega, 1995).

Una de las áreas clave sobre la cual hay que trabajar, es sin duda la referida a la interfase animal-pastura, de manera de integrar (mediante modelos mecanicistas) los procesos ingestivos y digestivos que ocurren a diferentes escalas de tiempo y espacio (Demment et al., citados por Cangiano, 1996b). Para lo que se debería poner énfasis en un enfoque multidisciplinario a fin de optimizar los resultados y tomar decisiones sobre bases más sólidas. En síntesis, las características de las pasturas que más relacionadas están con la producción animal son la altura, la cantidad, la densidad y la foliosidad (Fernández, 2005).

### C. ESTRUCTURA DE LA COBERTURA EN 3D

La estructura de la pastura es la principal determinante del Índice de Área Foliar (IAF, [m<sup>2</sup> de hoja/m<sup>2</sup> de suelo]), y es usualmente definida y medida como la distribución y arreglo de las partes de plantas por encima del suelo dentro de una comunidad. Es el medio principal por el cual los administradores pueden influir en la producción animal (Hodgson 1990, Hodgson e Illius 1998). La estructura de la pastura puede ser analizada en dos dimensiones: vertical y horizontal (Laca y Lemaire, 2000). Dentro de los factores que pueden afectar la estructura del tapiz en praderas, García (1995) menciona, el tipo de pastura, manejo del pastoreo, la estación del año, edad de la pastura y las condiciones de fertilidad.

#### 1. Estructura horizontal

En la dimensión horizontal, en cuanto a sus principales componentes asociados con la pastura, se pueden encontrar variaciones en la densidad de los macollos, en la composición de la comunidad, en la altura y en la masa de forraje (Gordon et al., 2006). La estructura horizontal está principalmente determinada por la defoliación selectiva de los animales, generando sitios en la pastura que presentan una frecuencia de pastoreo mayor que otros (Stuth, 1991). Gibb y Ridout (1988) mostraron que las pasturas bajo pastoreo tenían una distribución de dos alturas del pasto bien diferenciadas, con zonas más altas y otras más bajas. Esto puede deberse a que el ganado evita el pastoreo cerca de los depósitos fecales, creando así un componente relativamente alto y no pastoreado del pasto y un componente de pastoreo más corto (Forbes y Hodgson, 1985), aunque también podría

relacionarse con diferencias en la tasa de crecimiento entre áreas que habían recibido orina y las que no (Matches, 1992). En sitios con superior preferencia de los animales la vegetación es generalmente baja, compuesta principalmente por láminas, mientras que los sitios de menor preferencia presentan vegetación más alta y elevada presencia de material senescente (Carvalho et al., 2001). La estructura horizontal también es reflejo de diferentes condiciones de recursos tróficos en el plano horizontal, como la fertilidad y disponibilidad hídrica (Laca y Lemaire 2000, Carvalho et al. 2001). La estructura horizontal afecta la competencia entre plantas, el comportamiento ingestivo y selección de forraje por los animales, por ejemplo, afectando el patrón espacial de la composición botánica, cantidad de forraje removido y proporción de plantas muertas por disturbios (Laca y Lemaire, 2000).

## 2. Estructura vertical

En el caso de la dimensión vertical, dentro de sus principales componentes asociados con la pastura, está la altura del forraje y la distribución de los componentes, tales como láminas, tallos y material muerto, o especies en los diferentes estratos de la pastura, con variaciones en la densidad y composición de especies (Gordon y Benvenuti, 2006).

La estructura vertical está relacionada con la distribución del IAF en el perfil de la pastura (Laca y Lemaire, 2000), y varía a lo largo del tiempo, ya que cambia con el estado vegetativo o reproductivo de las plantas. En cada estado, la materia seca de las plantas presenta diferentes proporciones de hojas, tallos, inflorescencias y material muerto en el perfil (Carvalho et al., 2001).

Hodgson (1985) indica que la mayor biomasa se encuentra en la parte inferior del perfil de la pradera la cual se encuentra compuesta principalmente por tallos y material senescente, mientras que en la parte superior la biomasa es más baja debido a que se compone principalmente de hojas vivas. En general existe acuerdo para pasturas templadas, que la masa de bocado y la tasa de consumo aumentan con el incremento de la altura de la pastura, teniendo influencia en el consumo de forraje por los animales en pastoreo y por ende en la performance animal (Forbes, 1988).

La estructura de la pastura es uno de los principales factores determinantes de la productividad primaria y secundaria de los sistemas pastoriles. La misma, está relacionada con el crecimiento de forraje, ya que la estructura es el resultado de diferencias en el patrón de crecimiento de las plantas individuales, y diferencias en la estructura generada afectan la tasa a la cual los recursos son adquiridos por las plantas y por ende el crecimiento de la pastura como un todo (Laca y Lemaire, 2000).



### 3. Heterogeneidad espacial

Los sistemas pastoriles se caracterizan por una gran complejidad, al sumarse la heterogeneidad natural, con variaciones en el espacio y el tiempo en la distribución de distintos factores bióticos (cantidad y calidad de forraje) y abióticos (agua, topografía, abrigo y sombra), y las restricciones impuestas por el manejo humano (Bailey et al., 1996).

El concepto de heterogeneidad espacial es la presencia de diferentes valores de un descriptor medido en diferentes lugares a un mismo tiempo (Laca y Lemaire 2000, Adler et al. 2001). Un aspecto característico de la vegetación es la diferencia entre sitios en la presencia y ausencia o abundancia relativa ya sea de especies o formas de vida que la componen. Esta variación, denominada heterogeneidad espacial de la vegetación, puede ser percibida a diferentes escalas de observación (Lezama s.f., Adler et al. 2001).

El concepto de escala espacial de observación presenta por un lado una dimensión llamada extensión o amplitud espacial de las observaciones y por el otro lado comprende una dimensión llamada resolución que refiere al tamaño de cada observación. La extensión espacial refiere a cuanto se distribuyen las observaciones de vegetación en el espacio, pudiendo ser esta de una amplitud acotada, como serían un conjunto de observaciones dentro de un parche de pastos altos de pocos metros cuadrados. En contraposición, la amplitud puede ser de alcance regional, abarcando varios kilómetros cuadrados (Lezama, s.f.). Un parche se define como la unidad de variabilidad comúnmente encontrada dentro de una unidad de paisaje (O'Regain y Schwartz, 1995).

Cuando se observan grandes extensiones geográficas se realizan con tamaños de observación de baja resolución y cuando se propone hacer observaciones de la heterogeneidad a nivel de micrositio se tienen que emplear grillas con celdas de pocos centímetros (Lezama, s.f.).

La variabilidad espacial en composición y cantidad de forraje afectan el comportamiento animal y la relación entre la cantidad de forraje promedio por unidad de área y la performance animal. De hecho, el comportamiento en pastoreo y la selectividad pueden generar, mantener, o reducir la heterogeneidad de las pasturas (Laca, 2009). Incluso en pasturas monoespecíficas se forma un mosaico de parches cortos intensamente pastoreados con baja cantidad de forraje, parches altos sin pastorear o ligeramente pastoreados con alta cantidad de forraje y una zona de transición con altura, utilización y cantidad de forraje intermedia (Hirata, 2002).

La variabilidad temporal y espacial a menudo interactúan creando un mosaico de parches que varían en el tiempo y en el espacio (O'Regain y Schwartz, 1995). A nivel de potrero, los parches ocurren como resultado del pastoreo selectivo causado por diferencias en el forraje de los micrositios; una vez que los parches han sido formados pueden gobernar el patrón de pastoreo (Carvalho et al., 2001). La proporción relativa de parches

con diferente nivel de utilización cambia de acuerdo a la estación, el sistema de pastoreo y la carga animal (Cid y Brizuela, 1998).

A pequeña escala (ejemplo, el potrero) cambios en la disponibilidad y accesibilidad de los parches de pastoreo determinan cambios en la conducta animal, tasa de consumo, y consecuentemente en la performance (Gregorini et al., 2011).

#### D. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE FORRAJE

Tradicionalmente, la estimación de la materia seca (MS) disponible se realizó a partir de recolección a mano o mecánica de forraje cortando en un área conocida por el uso de un rectángulo de corte. A pesar de que este método es muy preciso, requiere bastante tiempo en el proceso de medición, va acompañado de técnicas de laboratorio laboriosas y demanda de un muestreo intenso para obtener estimaciones confiables (Brummer et al., 1994).

Los métodos para medir la fitomasa aérea actualmente existentes en una superficie determinada se pueden clasificar en directos e indirectos. Los métodos directos implican un muestreo destructivo (corte parcial o total de la muestra de forraje), ya sea manual o mecánico; mientras que los métodos indirectos están basados en el uso de técnicas no destructivas donde se miden o estiman algunas variables de la vegetación que se pueden relacionar con la cantidad, entre las cuales se encuentran la estimación visual (altura, densidad, composición), el uso de pasturó metro o disco (altura y densidad), el uso del capacímetro, la regla graduada o bastón aforado y el empleo de imágenes satelitales, entre otros (t Mannetje, citado por Mendoza y Lascano 1986, Cangiano 1996a, Paruelo et al. 2000).

A su vez los distintos métodos existentes también se pueden clasificar como invasivos y no invasivos. Esto implica que para realizar las mediciones de materia seca algunos métodos requieren del contacto directo con la pastura, denominándose como invasivos.

La técnica de cortar y pesar, es el método más preciso de estimar la cantidad de forraje, pero, habitualmente se necesita de un gran número de muestras para obtener estimaciones confiables o representativas del área en evaluación. Además de ser una técnica destructiva, puede insumir costos y tiempo, así como también, eliminar una porción significativa de la vegetación (Laca et al. 1989, Fernández 2005).

Las pasturas, debido a su composición (botánica), de la estación del año y del manejo previo (Cangiano, 1997), así como de la presencia de animales (orina y heces), pueden resultar un sistema biológico altamente variable (Fernández, 2005). A medida que su variabilidad es mayor, las dificultades para la medición de la fitomasa aérea aumentan

(Cangiano, 1997). La precisión de la estimación depende del número de muestras y este aumenta considerablemente a medida que la pastura es más heterogénea (Tsutsumi et al., 2007).

En cambio, a partir de los métodos indirectos se puede realizar un mayor número de muestras en un tiempo más corto, por lo que resultan una técnica más rápida que los directos. Esto posibilita que se muestre una mayor proporción del potrero, con la consecuente disminución del error de muestreo y con un esfuerzo igual o menor (Cangiano, 1997). Los métodos no destructivos, básicamente, han surgido en respuesta a las desventajas que ofrecen los métodos destructivos (Mendoza y Lascano, 1986).

En general la mayoría de los métodos se basan en el concepto de doble muestreo, lo que implica contar con dos tipos de muestras. Por un lado, se obtiene una muestra precisa de la fitomasa aérea a través del corte directo (destructiva) y por otro lado una muestra que provee datos de alguna variable altamente correlacionada con la cantidad, como por ejemplo una estimación visual de la fitomasa o altura de forraje (no destructiva). La altura es una de las variables más usadas y que mejor se correlaciona con la fitomasa aérea (Cangiano 1997, Moliterno 1997).

El método de doble muestreo más utilizado es el propuesto por Haydock y Shaw (1975); en éste, el forraje disponible se estima visualmente mediante 50 o más marcos por hectárea, colocados en forma aleatoria o siguiendo una división transversal al potrero o a la parcela transepto; en ello se da una calificación de 1 a 5, donde 1 representa menos forraje y 5 más forraje. Se utilizan como referencia cinco puntos previamente seleccionados y debidamente identificados, los cuales representan la escala o rango (1 a 5) que contiene las variaciones del forraje disponible en la pastura. Una vez hechas las lecturas visuales, los puntos o marcos de referencia se cortan, se pesan y se secan. Con los valores del forraje disponible en los cinco marcos, se construye una regresión lineal ( $y = a + bx$ ) que sirve para estimar la disponibilidad del forraje ( $y$ ) partiendo de las lecturas visuales ( $x$ ) (Mendoza y Lascano, 1986).

La desventaja que presenta la técnica de doble muestreo, es que depende de cuan bien correlacionado están los valores obtenidos mediante ambos tipos de muestreo. El uso de ecuaciones universales no es recomendable, debido principalmente a la variabilidad y cambios entre y dentro de las pasturas y entre estaciones y años, por lo que deben realizarse calibraciones periódicas (Cangiano, 1997).

El doble muestreo es un método laborioso y puede ser poco preciso cuando resulta imposible obtener un adecuado número de muestras representativas, lo que depende del tiempo involucrado en este proceso (Spada y Cangiano, 1991). Este método constituye habitualmente el método de referencia o comparación (Millapán, 2006).

## 1. Método de cortes

El método que brinda mayor exactitud en la determinación de biomasa aérea es el corte, secado y pesado de muestras, denominado comúnmente método de cortes (Millapán, 2006).

El método de corte puede ser total o parcial. Para el primer caso se realiza el corte total de forraje de una superficie determinada y su posterior cuantificación, pesándolo (por ejemplo: silo, heno, parcelas). Con este método no hay errores de muestreo, pero el procedimiento no es adecuado para hacer comparaciones con situaciones que incluyan animales en pastoreo. Para el método parcial, se muestrea una cierta superficie característica de acuerdo a ciertos criterios preestablecidos y luego se extrapola el dato a dimensiones más grandes. Como solamente se corta una pequeña parte de la superficie, hay que tener en cuenta que una estimación de esta naturaleza está sujeta a error (error de muestreo). El número de muestras a tomar depende de la variabilidad de la vegetación y del grado de precisión exigido (Cangiano, 1997).

## 2. Estimación visual

La estimación visual de la disponibilidad de forraje, en términos de materia seca disponible por unidad de superficie, sin el uso de una base objetiva de referencia y sin entrenamiento en su medición, puede inducir al error (Montossi et al., 2013a).

Para realizar una correcta estimación de la biomasa aérea se requiere más que una simple mirada al potrero. Se recomienda recorrer el potrero en forma sistemática de manera similar a como se haría con los otros tipos de muestreo. Es posible desarrollar la habilidad de realizar estimaciones visuales, pero se requiere de un cierto tiempo y esfuerzo, así como también de una calibración cada vez que se hace una serie de estimaciones. Esta técnica presenta la ventaja de que no se requiere de ningún equipamiento especial y las estimaciones son realizadas rápidamente (Fernández, 2005).

Cuando los volúmenes de pasto son menores o se trata de una pastura compuesta de varias especies, se suele cometer grandes errores. De lo contrario, cuando los volúmenes de pasto son grandes, se suele estimar con bastante certeza (Sciaretta, 2012). Es por eso que los observadores requieren de un entrenamiento inicial en sus estimaciones, conclusión que se abordó en Australia a partir de un uso extensivo de esta técnica. Si no se tiene un entrenamiento inicial se tiende a sobrestimar la altura y a subestimar la densidad de la pastura. Es un método que debe ser calibrado regularmente con mediciones por corte y debe tenerse un conocimiento del rango de kg/ha de pasto con que puede encontrarse, ya que hasta observadores experimentados pueden tener alguna deriva en sus estimaciones (Fernández, 2005).

### 3. Altura

La altura es importante por su implicancia en el manejo de pastoreo y por lo tanto su incidencia en la producción animal, independientemente de su relación con la fitomasa aérea (Cangiano, 1997).

Existen diferentes formas e instrumentos para medir la altura.

#### a. Regla graduada

Quizás el método empírico básico para estimar la fitomasa de una pastura es convertir la altura media de las plantas en kilos por hectárea. Esta medición es más exacta en pasturas cortas, de densidad uniforme y composición botánica simple (Cangiano, 1997).

La altura de la pastura ha sido identificada en varios países como una herramienta accesible para productores y técnicos que permite mejorar la eficiencia de la producción forrajera y animal. Entre sus ventajas se destacan, la sencilla aplicación; fácil aprendizaje por parte los potenciales usuarios; muy bajo costo y provee información inmediata. Esto permite tomar rápidas decisiones para el manejo adecuado de pasturas y animales. Una correcta estimación de la altura de la pastura requiere de 20 a 40 mediciones por potrero, lo que depende, entre otros, de a) tamaño de potrero, b) heterogeneidad de la pastura, c) estación del año, que influye sobre la relación verde/seco y proporciones de tallo/hoja de las pasturas y f) experiencia medidora (Montossi, 2013b).

Dentro de los métodos indirectos de estimar la fitomasa uno de los más empleados es en base a la altura del forraje. Dado que existe una estrecha relación entre la altura y la disponibilidad de la pastura, se han desarrollado una serie de ecuaciones que integran estas dos variables. Dichas ecuaciones se calculan realizando una regresión lineal entre la fitomasa estimada por el método anterior de corte del forraje y el promedio de 2 mediciones de la altura de la pastura en dos puntos diferentes dentro de cada rectángulo de corte (Reinoso, 2006).

El inconveniente de este método, es que las ecuaciones de relación no pueden ser extrapoladas a regiones, condiciones o pasturas diferentes a las cuales fueron calculadas (Montossi, 2013b).

#### b. Pasturómetro (en inglés, weight-disc rising plate meter)

Instrumento que integra altura de forraje y la densidad de la pastura en una única medida, denominada “altura del forraje comprimido” (Montossi, 2013b). Existen diversos

tipos de pasturómetros. En general están compuestos de un eje por el que se desliza un plato de una superficie, forma, material y peso determinados (Fernández, 2005).

El principio de este método es que la biomasa de una pastura podría estar relacionada con la densidad y la altura de sus componentes individuales (Mannetje, 2000). Al igual que los demás métodos debe ser calibrado para cada situación forrajera. Una vez conocida la relación entre la altura de forraje comprimida y la materia seca disponible, la medición en el campo mediante el aparato permite conocer una estimación del forraje disponible (Montossi, 2013b).

### c. Otros métodos

En los últimos años, tras la necesidad de contar con una herramienta sencilla para la estimación de disponibilidad, es que se han desarrollado otros métodos alternativos. Se busca medir la altura del forraje, pero en base a distintos criterios.

#### C-Dax

El Pasturemeter CDAX se desarrolló en Nueva Zelanda como una alternativa que tiene el potencial de proporcionar estimaciones rápidas y precisas de la biomasa de las pasturas, comercialmente denominado como Rapid Pasture Meter (C-DAX Systems Ltd, Palmerston North, Nueva Zelanda). Este dispositivo determina la altura media del pasto a través de rayos de luz interceptados por sensores equidistantes. El mismo es acoplado detrás de un cuatriciclo permitiendo obtener numerosas lecturas de la cobertura de la pastura (200/segundo) y se puede utilizar a velocidades de hasta 20 km/h. El C-Dax es capaz de reducir el error del operador debido a la mínima implicación manual en la medición de pastura, sin embargo, se indica la necesidad de ecuaciones de calibración específicas de la región ya que el uso de las ecuaciones de calibración suministradas por la industria induce a un error sistemático (King et al., 2010).

En Uruguay el C-DAX está siendo evaluado y calibrado por parte del INIA (La Estanzuela) y Fagro (Centro Regional Sur, CRS).

A su vez, en Australia han desarrollado un dispositivo similar al descrito anteriormente denominado Ellinbank Automatic Pasture Reader (Departament of Primary Industries (DPI) Victoria, Ellinbank, Australia). Este dispositivo a diferencia del anterior el sensor utiliza ondas de sonido (Millapán, 2006).

#### Escáner láser

Existen sensores activos como el LIDAR, el cual utiliza un láser para obtener datos de altura y poder generar modelos 3D. Estos dispositivos son mayormente utilizados

en la producción forestal y a su vez son muy costosos (St-Onge y Achaichia 2001, Anthony et al. 2014). Por otro lado, Anthony et al. (2014) demostraron la viabilidad de utilizar un escáner láser de bajo costo para estimar la altura en un cultivo de maíz a través de un UAV, para evaluar el desarrollo y salud de los cultivos.

#### Modelos digitales de vegetación de grano ultra fino

Según Dandois y Ellis (2010), las medidas de alta resolución espacial de la estructura de la vegetación en tres dimensiones (3d) son esenciales para la estimación precisa de la biomasa de la vegetación. Dichos autores demostraron el potencial de una nueva tecnología para la detección remota de la estructura de la vegetación, que combina las cámaras digitales convencionales, las plataformas aéreas (UAV) y el software de código abierto para producir nubes de puntos 3d multiespectrales de alta resolución espacial. Investigaron el potencial de combinar tecnologías de UAV y Structure from Motion (SfM) para permitir mediciones baratas de vegetación 3d en paisajes. Los resultados muestran que cuando se logra obtener un Digital Terrain Modelo (DTM por sus siglas en inglés) de alta calidad o el dosel de la vegetación es relativamente homogéneo la estimación de altura es adecuada y se aproxima al valor de estimación del LIDAR.

En otro estudio, relacionado a la agricultura de precisión, Bendig et al. (2014) presentaron un método simple para estimar la biomasa de un cultivo de cebada basado en la altura de la planta derivada de los modelos de superficie del cultivo. Demostraron que las imágenes rojas, verdes y azules (RGB) capturadas por un UAV son muy adecuadas para derivar la altura de la planta de cebada ( $r^2$  0,92). La misma se puede modelar con una precisión muy alta para diferentes etapas de crecimiento, usando imágenes de alta resolución (1 cm/pixel). Para la obtención de las imágenes utilizaron un UAV multi-rotor MK-Oktokopter desarrollado por HiSystems, realizando los vuelos automáticamente y utilizando una cámara digital Panasonic Lumix GX1 de 16 MP, contando con un estabilizador. La altura de vuelo fue de 50 m y las imágenes obtenidas de tipo nadir. La generación de los modelos digitales se realizó con el software Agisoft Photoscan y para la georreferenciación de datos se utilizó un GPS diferencial HiPer Pro Topcon.

En un trabajo realizado por Zahawi et al. (2015), evaluaron si las mediciones a través de imágenes digitales capturadas por un UAV y su respectivo procesamiento, son un sustituto rentable de las medidas de campo tradicionales. Las mediciones fueron realizadas sobre un bosque tropical. Como resultado obtuvieron que las estimaciones de altura de los árboles a través del procesamiento de las imágenes estuvieron altamente correlacionadas con las mediciones de campo ( $r^2$  0.85).

Por otra parte, Cunliffe et al. (2016), utilizaron un UAV para adquirir fotos aéreas y el software Agisoft Photoscan para generar modelos digitales de la vegetación en 3 dimensiones, usando fotogrametría de estructura en movimiento o SfM. Utilizaron un hexacoptero 3D Robotics Y6 equipado con un receptor de GPS y una cámara digital

Canon S100 (12.1 MP). La cámara fue controlada por el software ArduCopter y los vuelos fueron programados utilizando el software Open Source Mission Planner realizándose a una altura de 15-20 m. La cámara fue disparada por el piloto automático de acuerdo a la distancia recorrida, logrando 70% de superposición hacia adelante y 65% en los laterales. Ajustaron la velocidad de vuelo de la plataforma para asegurar un intervalo mínimo entre dos imágenes consecutivas de 2,5 s. Utilizaron imágenes tanto nadir como no nadir (convergentes), estas inclinadas 45° aproximadamente, para la elaboración de los modelos digitales. Las imágenes fueron georreferenciadas utilizando marcas geolocalizadas con un GPS diferencial. Obteniéndose de esta forma modelos que describen la estructura de la vegetación. Dichos modelos logran representar las matas de césped de tan solo unos pocos cm<sup>3</sup>. Los resultados de este trabajo demuestran que los UAV de bajo costo y la fotogrametría (SfM) pueden producir datos biofísicos de grano ultrafino (pixel de 1 cm<sup>2</sup>). Las nubes de puntos que obtuvieron mediante el procesamiento de las imágenes adquiridas por el UAV, produjeron representaciones fotorrealistas de la estructura biótica tridimensional, a través de una gama de escalas, desde alturas de pasto de 20 mm hasta árboles de varios metros. Estos autores sugieren que la altura máxima de plantas individuales no es la mejor métrica para evaluar la calidad del Canopy Height Modelo (CHM por su sigla en inglés), particularmente en los ecosistemas de pastizal. La recopilación de datos de referencia apropiados con los que evaluar los CHM derivados de SfM es un gran reto y este problema se agrava por las dificultades para obtener la altura de la copa espacialmente referenciada con observaciones compatibles con los CHM de grano muy fino. Las hojas más altas de las plantas herbáceas son generalmente demasiado pequeñas y móviles para ser representadas en modelos de altura de la copa de UAV, SfM y LIDAR. El volumen foliar es con frecuencia un predictor más preciso de la biomasa sobre el suelo (AGB) que la altura máxima de la planta. Los fuertes coeficientes de determinación ( $r^2$  de 0,64 a 0,95) indican que a partir de los volúmenes de vegetación estimado se puede inferir la biomasa sobre el suelo, posteriormente la biomasa subterránea y las reservas de carbono asociadas.

#### 4. Capacímetro

Este instrumento aparte de ser complejo, requerir calibración y es caro y ha sido criticado por su mal desempeño en la estimación de la disponibilidad de pastura (Fernández, 2005).

Las técnicas disponibles han sido revisadas por varios autores según Mendoza y Lascano (1986), entre los cuales se menciona a Tucker (1980) y a Angelone et al. (1980). Los medidores electrónicos de capacitancia, miden los cambios en capacitancia debidos al tamaño, es decir, a las propiedades aislantes (dieléctricas) del cuerpo situado entre dos electrodos. La constante dieléctrica del agua es mucho mayor que la de la celulosa de los tejidos vegetales. La técnica está sujeta a problemas de calibración ya que factores ambientales como el rocío y la humedad del suelo o los diferentes porcentajes de humedad



interna de la vegetación, introducen errores de mediciones (Mendoza y Lascano, 1986). Por lo tanto, para su uso debe ser calibrado en condiciones locales, ya que también se ve afectado por el tipo de pastura, estación de crecimiento y relación entre material vivo y muerto de la pastura (Spada y Cangiano, 1992). La principal ventaja del sistema electrónico es que usa la densidad de la pastura más que la altura para la estimación de la cantidad de pasto. Esto significa que, aunque la pastura puede tener la misma altura que otra especie, la materia seca puede diferir significativamente. Esta diferencia es captada por el capacitómetro (Fernández, 2005).

##### 5. Sensores remotos o radiómetros

Los sensores remotos son instrumentos que miden la energía reflejada o emitida por los objetos sin entrar en contacto físico con ellos. Son el elemento clave de un sistema de teledetección, el que requiere a su vez de una fuente de energía y de una superficie que interactúe con esa energía. Los sensores remotos pueden generar como producto final una imagen o datos numéricos que pueden representarse mediante gráficos (Kemerer, 2011).

De acuerdo al origen de la fuente de energía, los sensores remotos se pueden clasificar en dos tipos, pasivos y activos. Los pasivos son aquellos que detectan la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales. Los activos son aquellos que poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación por ejemplo un radar.

Los sensores activos, lógicamente, más flexibles, puesto que no dependen tanto como los primeros de las condiciones exteriores al sistema sensor-tierra (Chuvieco, 2010).

Los sensores son capaces de detectar variaciones de color en la superficie del suelo en correspondencia con la intensidad de radiación que emiten las especies vegetales dentro de ciertos rangos del espectro electromagnético (Sciaretta, 2012). Uno de los índices utilizados ampliamente derivados de los sensores remotos es el Índice de Vegetación Verde o Normalised Difference Vegetation Index (NDVI por sus siglas en inglés de, Tucker, 1979). Este tiene una correspondencia directa con la interceptación de radiación y actividad fotosintética del canopy vegetal por lo que, con una correcta calibración del mencionado índice con los datos de campo se puede estimar producciones de materia seca en amplias áreas y de manera continua. Un alto índice verde significa una mayor interceptación de radiación solar y una mayor producción forrajera (Sciaretta, 2012).

Los sensores remotos pueden ser transportados tanto, por satélites, drones u/o vehículos terrestres.

#### a. Sensores satelitales

Actualmente se están evaluando nuevas tecnologías de información, como sensores remotos e información geográfica satelital como herramientas para estimar la cobertura de forraje a tiempo real en grandes extensiones de territorio y a bajo costo (Montossi, 2013b). El sistema de imágenes satelitales permite estimar la productividad forrajera en grandes extensiones en forma confiable y con alta frecuencia, además de cuantificar variaciones intra e interanuales de producción de los principales recursos forrajeros (Cangiano y Brizuela, 2011). Es de suma utilidad cuando se requiere conocer producciones a gran escala y con los grandes avances que ha tenido la informática en los últimos años se hizo posible una mejora determinante en el método de estimación. Tal es así que, hoy en día se trabaja con imágenes en alta definición (que tienen mayor cantidad de píxeles), mejorando su calidad y con una mayor periodicidad en la obtención de estas (Sciaretta, 2012).

Existen actualmente diferentes plataformas de seguimiento forrajero. En el año 2011, Conaprole junto a otras instituciones públicas tanto de Uruguay (Facultad de Agronomía, Facultad de Ciencias y ANII) como el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART) comenzaron un proyecto con el objetivo de implementar un sistema de seguimiento forrajero para los productores. Hoy en día en el sistema hay 77 productores y 433 potreros (Chilibroste, 2009). También existen al menos otras dos plataformas de seguimiento forrajero que surgen de diferentes proyectos. A través de un proyecto INIA-FPTA con LART se implementó un sistema de seguimiento en unidades de campo natural, lo cual está generando información para 20 establecimientos ubicados en distintas regiones desde 2008. Los resultados son volcados a la base de datos y puestos a disposición de los usuarios de dos maneras. A nivel de establecimiento y lote para los productores que contribuyen al proyecto (llamados usuarios registrados) y a nivel regional para cualquier usuario (acceso libre). Por otra parte, el Plan Agropecuario a través de un convenio con LART-IFEVA y Facultad de Ciencias generaron una plataforma de seguimiento forrajero similar a los anteriormente descritos. Desde 2011 vienen trabajando sobre distintos predios que se ubican en todo el país. Comenzaron a realizar mediciones mensuales que le permiten al productor tener otra fuente de información para tomar decisiones prediales (Pereira, s.f.).

En Australia y Nueva Zelanda existen plataformas de seguimiento forrajero similares a las existentes en Uruguay y la región. Se ha demostrado, a través de 'Pasture from Space', que los productores de ovejas de Australia Occidental pueden obtener un mayor aprovechamiento de las pasturas y obtener ganancias cuando se les proporciona información sobre la oferta y crecimiento de las pasturas (Edirisinghe et al., Gherardi y Oldham, Edirisinghe et al., Hill et al., citados por Rowbottom, 2015).

Se ha evaluado la aplicación de 'Pasture from Space' para su uso en la industria láctea de Australia y Nueva Zelanda, pero problemas con la cobertura de nubes, baja

resolución espacial (250m x 250m), entrega oportuna de datos, estimación exacta de pastizales y estructuras apropiadas de apoyo para la interpretación de los datos han visto una baja adopción (Eastwood y Kenny, Eastwood et al., Mata et al., citados por Rowbottom, 2015).

Las imágenes satelitales de alta resolución se utilizan ahora con más frecuencia para estudiar las variaciones en cuanto a las condiciones del cultivo y del suelo. Sin embargo, la disponibilidad y los costos a menudo prohibitivos de tales imágenes sugeriría un producto alternativo como los vehículos aéreos no tripulados (Zhang y Kovacs, 2012).

#### b. Sensores UAV

La teledetección, a través de UAV es una técnica emergente que puede tener múltiples aplicaciones en el sector agrícola (Rowbottom, 2015). Específicamente, las imágenes tomadas por plataformas de teledetección de baja altitud, o pequeños sistemas aéreos no tripulados, son una alternativa potencial dado su bajo costo de operación (en comparación con otras plataformas de teledetección), por su alta resolución espacial-temporal (ideal para la identificación dentro de la variación de campo), flexibilidad de despliegue, capacidad de cubrir grandes áreas y permiten utilizar sensores o dispositivos que no son efectivos en otras plataformas de teledetección (versatilidad) ya que permiten operar cerca de los cultivos (Zhang y Kovacs, Anthony et al., David, Moran et al., Hunt et al., Hardin y Hardin, Laliberte et al., Laliberte et al., Laliberte et al., citados por Rowbottom, 2015).

Los UAV tienen el potencial de superar aquellas limitaciones que poseen las plataformas satelitales tales como, los problemas de cobertura de nubes, permitir la adquisición de datos oportunos y flexible con una participación laboral limitada, lo que podría ayudar a adoptar métodos de estimación de biomasa más objetivos dentro del sector (Rowbottom, 2015).

Según Zhang y Kovacs (2012) de acuerdo a una revisión completa sobre la aplicación de los UAV para la agricultura de precisión indican que, para proporcionar un producto final confiable a los productores, se requieren de avances en el diseño de plataformas, producción, estandarización de georreferenciación de imágenes y mosaico, y flujo de trabajo de extracción de información. Además, sugieren que tales esfuerzos deben involucrar al productor, particularmente en el proceso de diseño de campo, adquisición de imágenes, interpretación y análisis de imágenes.

Rowbottom (2015), planteó como objetivo determinar el potencial de las imágenes de percepción remota obtenidas a través de un UAV como medio para estimar con precisión la biomasa de las pasturas. La hipótesis del trabajo es que el rendimiento del UAV sería similar al de un método tradicional de estimación, como el Rising Plate

Meter (RPM). Utilizó una cámara Canon Powershot S110 modificada para obtener Near Infrared Spectroscopy (NIR) de 12 MP, dicha cámara fue montada en un dron de ala fija Parrot-SenseFly eBee, la cual capturó en tres bandas espectrales de verde (510-680 nm), rojo (575-690 nm) e infrarrojo cercano (800-1060 nm). Comparó la capacidad predictiva y estimadora de varios índices vegetales calculados con los espectros capturados. En su trabajo Rowbottom también realizó normalizaciones radiométricas usando cuadrados de 50x50cm de blanco imperturbable y placas de teflón. Otro estudio que realizó fue comparar entre distintos formatos de las imágenes. Tanto los índices vegetales como sus normalizaciones fueron comparadas con la biomasa y la altura. La biomasa fue medida mediante RPM con cortes para establecer la relación de Kg/cm. Las mediciones fueron realizadas en 2 fechas, sobre una pastura de *Lolium multiflorum* y *trifolium repens*. Realizó un análisis de regresión para probar la relación entre la biomasa de pastura y la altura, y encontró una fuerte relación lineal entre la altura de los pastos y la biomasa para 14/05/2015 ( $r^2=0.66$  con  $RMSE=702$  kg MS/ha). Observó una relación lineal deficiente a partir del análisis de regresión el 16/06/2015 con  $r^2=0,27$  y  $RMSE=305$  kg DM/ha. Los modelos estadísticos para ambas fechas fueron significativos ( $p < 0,05$ ) y los resultados mostraron variaciones grandes dentro de la estación tanto para la biomasa como para la altura. La normalización no modificó las correlaciones entre biomasa e índices vegetales para la mayoría de los casos. En algunos casos incluso disminuyó la correlación y aumentó los errores cuadráticos. Obtuvo mejor resultado al usar el formato de imágenes jpeg por sobre el RAW (formato de archivo digital de imágenes que contiene la totalidad de los datos de la imagen tal y como ha sido captada por el sensor digital de la cámara). Se encontró que el modelo estadístico para RPM, basado en la altura de la pradera, tenía mayor capacidad para explicar la variación en la biomasa de pasto ( $r^2=0,66$ ) el 14/05/2015, así como mayor capacidad predictiva ( $RMSE=702$  kg MS/ha,  $P < 0,001$ ) en comparación con el mejor índice vegetal, el DVI ( $r^2=0,42$ ,  $RMSE=914$  kg MS/ha,  $P < 0,001$ ). Se encontró un resultado similar en términos de técnica preferida para el 16/06/2015, aunque la capacidad predictiva fue más baja en la estación con RPM ( $r^2=0.27$ ,  $RMSE=573$  kg MS/ha,  $P < 0.001$ ) - realizando el mejor IV (Índice Vegetal), GDI ( $r^2=0,16$ ,  $RMSE=630$  kg DM/ha,  $P=0,003$ ). Este estudio demostró que el UAV puede usarse para estimar y espaciar la biomasa de las praderas mientras que evita los problemas asociados con otras plataformas de teledetección. Concluye que los UAV tienen su propio conjunto de limitaciones, pero no hay duda que esas restricciones serán mejoradas debido a un desarrollo rápido de las tecnologías asociadas a los UAV y sensores. Según Rowbottom (2015), se requieren de más estudios para evaluar otros UAV y sensores que puedan dirigirse específicamente a las necesidades de la industria láctea.

## E. COMPARACIÓN DE MÉTODOS

Los factores que pueden afectar la medición de un método en particular son diversos, ya que va a depender en primera instancia en qué principio se basa cada uno,

determinando así su desempeño frente algunas situaciones. En general hay métodos que se adaptan de mejor forma frente algunas situaciones en comparación con otros.

Lo ideal sería disponer de una ecuación universal de predicción de estimación de disponibilidad de materia seca que contemplara todas las situaciones de pasturas, estaciones y demás factores. Es lógico que ello no ocurra en los sistemas pastoriles del mundo por la importante cantidad de factores que afectan estas asociaciones (Montossi, 2013b). La calidad de la información dependerá de lo estrecha y poco variable que sea la relación entre la cantidad de forraje en la pastura y la medida realizada (Burgueño, 1997).

En Uruguay, a través de distintos proyectos se han calibrado y validado algunos de los métodos ya descriptos en capítulos anteriores para ciertas situaciones.

Según Montossi (2013b) es posible estimar con un grado medio a alto de precisión la disponibilidad de forraje a través del uso de la regla graduada o por el plato de levante para la mayoría de las pasturas mejoradas utilizadas en Uruguay. Para el caso de la regla graduada, tras una serie de trabajos de validación de tecnologías realizado por INIA en estaciones experimentales y/o en predios ganaderos, en el marco de un convenio con Central Lanera Uruguay, permitió disponer de una base única, cubriendo una amplia gama de opciones forrajeras, estaciones del año, y de mediciones realizadas previo o posteriormente al pastoreo. Esta información fue utilizada para formular ecuaciones de predicción para 12 opciones forrajeras (6 gramíneas y 6 leguminosas). El nivel de precisión para este caso fue medio a alto ( $r^2$  de 0,54 a 0,88, Montossi et al., 2013a).

Sin embargo, en un trabajo de tesis realizado por Millapán (2006) en la Provincia de Buenos Aires donde se calibraron y validaron tres métodos de estimación de la cantidad de forraje en praderas mixtas, los cuales fueron estimación visual, pasturómetro y la regla graduada, concluyó que la precisión de la calibración del método estuvo afectada por la estación considerada. La validación con una ecuación por estación sugiere que el método más preciso fue la estimación visual. En cambio, la validación con una ecuación para todo el periodo sugiere que todos los métodos fueron poco precisos. La validación con una ecuación de calibración por estación corroboró que la precisión del método está asociada a la estación considerada. Mientras que la estimación visual y el pasturómetro fueron métodos relativamente precisos, la regla graduada fue muy poco precisa.

En Argentina, más precisamente en la EEA Balcarce se compararon dos metodologías para estimar la disponibilidad de forraje en parcelas pastoreadas, encontrándose que se pueden obtener buenas estimaciones de la cantidad de forraje mediante cortes de la pastura o con estimaciones visuales, ya que entre ambas determinaciones existe una alta correlación (Assuero et al., 1989).

Por otro lado, en Uruguay también se calibró y validó el método del plato de levante en el marco del proyecto de GIPROCAR II (Montossi, 2013b), llevado adelante

por INIA y FUCREA. Se recolectaron muestras de 15 tipos de pasturas diferentes en 10 establecimientos. En este trabajo se buscó abarcar toda la variabilidad existente posible para lograr una mejor calibración, considerando distintas localidades y ambientes para así ajustar ecuaciones predictivas que fueran aplicables a distintas condiciones. Se reconoce que existen factores que están incidiendo en el grado de precisión de las ecuaciones, fundamentalmente el tipo de pastura y en algunos casos específicos la estación del año. Luego de tres años de evaluación, se demuestra que es posible utilizar ecuaciones generales con un grado de ajuste medio a alto ( $r^2$  de 0,61 a 0,54) para verdes de invierno (raigrás o avena; mezcla avena + raigrás) y pasturas cultivadas (leguminosas, gramíneas, o gramíneas + leguminosas).

En un estudio con el objetivo de calibrar una sonda de capacitancia comercial para la medición y cartografía del rendimiento de materia seca en pasturas mediterráneas, se usaron ecuaciones de regresión para relacionar la masa de materia seca directamente medida con las estimaciones indirectas obtenidas usando una sonda de capacitancia Grassmater II. En dos de las tres localizaciones del experimento en pasturas mediterráneas típicas, los coeficientes de regresión fueron altos ( $r^2 = 0,90$  P: 0,01 en gramíneas y  $r^2=0,87$  P: 0,001 en mezcla botánica heterogénea). En las leguminosas, el coeficiente de regresión fue moderado ( $r^2=0,48$  P: 0,05). Los resultados indican que la sonda de capacitancia junto con un receptor GPS podría apoyar la gestión específica del sitio de pastos que sería útil en grandes áreas (Serrano et al., 2011).

En Chile, un estudio donde se compararon métodos indirectos de estimación de la disponibilidad de forrajes en praderas permanentes señala que el pasturómetro fue más confiable ( $r^2>0,70$ ) con respecto a una regla graduada y un bastón de capacitancia (Demagnet y Canseco, 2006).

Un estudio en Argentina evalúa y compara varios métodos (corte, pasturómetro, regla graduada y estimación visual) durante un periodo de un año para tres tipos de pasturas: 1) mezcla de alfalfa, festuca y cebadilla criolla; 2) alfalfa pura y 3) avena pura. Los autores concluyeron que todos los métodos tuvieron buena precisión, y que no hubo subestimación ni sobrestimación de la fitomasa aérea (Bisio et al., 2001).

En cuanto a los trabajos mencionados en el capítulo anterior de los modelos digitales de vegetación de grano ultra fino, se presenta como una nueva y promisoría tecnología de bajo costo, no destructiva y no invasiva, que permite caracterizar la vegetación. Esto significa que a través de la obtención de simples imágenes digitales se puede estimar adecuadamente la biomasa en distintas escalas espacio-temporales. Permitiendo espaciar la biomasa con precisión, y apreciar su evolución a través del tiempo.

Se necesitan herramientas objetivas, precisas, rápidas y flexibles, de bajo costo relativo y de uso eficiente de la mano de obra para el manejo adecuado de pasturas y

animales, dado que éstas tienen un importante impacto en la productividad e ingreso del sistema productivo (Montossi et al., 2013a).

Las diferentes técnicas de estimación de disponibilidad se diferencian entre sí en la forma de realizar tal estimación, pero comparten todas algunos principios generales.

Toda técnica de estimación de disponibilidad de materia seca debería basarse en tres términos que son fundamentales considerar. Los términos a tener en cuenta son la exactitud, precisión y el sesgo. La exactitud de una medida es la proximidad de esta medida a su valor real. Por ejemplo, la precisión de usar una regla para medir longitud sería mejorada si permite un error sistemático en la regla, o se eliminan los errores de paralaje (Cayley y Bird, 1996).

El error de paralaje es un error sistemático que un observador comete cuando no mira perpendicularmente la escala de un instrumento que está usando. Es decir, por ejemplo, cuando lee la altura en una regla la escala debe estar perpendicular a su visión (o sea de frente y a la altura de sus ojos). Esto evita que el observador sobre/subestime el valor por realizar una mirada oblicua. Un error sistemático es aquel que se produce de igual modo en todas las mediciones que realiza de una magnitud (altura, temperatura). Puede estar originado en un defecto del instrumento, en una particularidad del operador o del proceso de medición. Este error no disminuye al aumentar el tamaño de la muestra. Está implícito en el diseño del estudio, y resulta difícil de corregir en la fase analítica. Determina lo que se conoce como validez interna del estudio. Se puede prevenir su aparición a través de un buen diseño del estudio (UGR, 2008).

La fitomasa aérea pueden estimarse en forma indirecta ya sea visualmente o mediante el uso de instrumentos tales como reglas y bastones graduados, láminas o discos, medidor de capacitancia y más recientemente aquellos que contemplen la absorción y reflexión de la luz en equipos montados en aviones o satélites. Cualquiera sea la sofisticación de la tecnología, los métodos son indirectos y dependen de la exactitud de la calibración (Cangiano, 1997).

López y González (s.f.) mencionan que la exactitud de las estimaciones puede verse afectada por muchos factores, tales como la densidad y el estado de crecimiento de las plantas (Mosquera et al., 1991), la estación (Phillips y Clarke 1971, Powell 1974, Vartha y Matches 1977, Bransby et al. 1977), composición de especies de la pradera (Castle, 1976) y manejo (Powell, 1974).

La precisión en un sentido técnico se distingue de la precisión en que se refiere a la fiabilidad de estimar un valor mediante mediciones repetidas. La estimación de la media derivada de las muestras tiene su propio error estándar, y cuanto menor es el error estándar de la estimación, mayor es la precisión. Por regla general, la precisión de una estimación

será mayor si se toman más muestras que si cada muestra se mide con mayor precisión (Cayley y Bird, 1996).

La precisión de la estimación depende del número de muestras y este aumenta considerablemente a medida que la pastura es más heterogénea (Tsutsumi et al., 2007). Si la media de un conjunto de muestras difiere de manera sistemática de la media de la pastura en su conjunto, se dice que la muestra está sesgada. Los conceptos de precisión y sesgo siempre deben tenerse en cuenta al momento del muestreo (Cayley y Bird, 1996).

## F. GANADERÍA DE PRECISIÓN

La ganadería de precisión (GP) es una visión del futuro de la producción de carne, leche, lana y servicios ecológicos en sistemas pastoriles e institucionales similares a los de Uruguay. Esta visión sirve para integrar conocimiento, prácticas e investigación con un objetivo general de mejorar múltiples aspectos de la ganadería moderna (Laca, 2008).

Gracias a la difusión y uso generalizado de las tecnologías de geo posicionamiento satelital (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG) han contribuido al desarrollo de nuevas herramientas para investigar y manejar la distribución espacial del pastoreo en sistemas ganaderos extensivos (Cibils y Brizuela, 2009).

Laca (2008) plantea que la ganadería de precisión es la integración del comportamiento animal, tecnología electrónica inalámbrica y sistemas de decisión para manejo de ganado en pastoreo. Mientras que el manejo tradicional del ganado en pastoreo se basa en conceptos de equilibrio, capacidad de carga anual y homogeneidad espacial, la GP integra heterogeneidad, efectos no lineales, dinámica de desequilibrio dirigida por eventos discretos y efectos de escala. Para lograr esto combina múltiples sensores, sistemas de decisión y actuantes para simultáneamente obtener beneficios ecológicos, económicos y sociales. Dicho esto, es fundamental utilizar el conocimiento sobre el comportamiento animal.

El manejo de la distribución de animales en pastoreo, particularmente en ambientes de pastizal natural, continúa siendo un desafío para técnicos y productores (Holechek et al., 2004). La distribución espacial del pastoreo tiene amplia repercusión sobre un ecosistema de pastizal natural porque altera procesos críticos como la productividad primaria, la descomposición de materia orgánica y, en consecuencia, el ciclado de nutrientes a través del sistema (Hobbs 1996).



## G. HIPÓTESIS

La hipótesis es que el modelo digital generado a partir del procesamiento de imágenes estima correctamente la altura de la pastura.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: \beta_1 = 0 \\ H_a: \beta_1 \neq 0 \end{array} \right.$$

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se desarrolló a partir de la integración de dos áreas de conocimiento, Ingeniería en Computación y Agronomía. El equipo que conformo el área de Ingeniería en Computación tuvo como objetivo lograr un correcto armado y funcionamiento del UAV para poder obtener imágenes adecuadas, mientras que el equipo de Agronomía se encargó de la validación del UAV como estimador de altura.

Para una mejor comprensión de los materiales y métodos utilizados en el trabajo, se comienza describiendo en la sección A del presente capítulo el UAV, la cámara y computadora complementaria que permitieron la obtención de imágenes.

Luego se describen en la sección B las metodologías propuestas para estimar la altura de la pastura, las cuales se denominaron, Estacas y Mapping 3d. La evaluación se llevó a cabo en base a comparar los valores estimados por las distintas metodologías con los valores medidos a campo de regla, plato y/o doble muestreo.

Por último, en la sección C se describe el proceso de trabajo, lo cual justifica presentar en forma cronológica las diferentes etapas que atravesó el mismo. Las etapas se denominaron: calibración, ajuste metodológico y experimento central.

#### A. DESCRIPCIÓN DEL DRON, CÁMARA Y COMPUTADORA COMPLEMENTARIA UTILIZADAS

El proyecto se realizó con un dron de la marca 3D Robotics modelo Iris + (About 3DR).

Para la selección del sensor se eligió aquella cámara que mejor se adaptaba para la aplicación del Mapping 3d con el dron (ítem 2 sección C). La mejor opción teniendo en cuenta los requerimientos y recursos disponibles, fue utilizar la Raspberry PI Camera.

La cámara seleccionada, es más liviana, accesible y se encuentra disponible en formatos color (RGB) e infrarrojo (NGB). Como desventaja, tiene una resolución de 8 MP y necesita estar conectada con una mini computadora Raspberry PI para funcionar. Esta computadora se incorporó a la estructura del dron como una segunda computadora, además de la placa controladora que ya trae el propio dron. La computadora complementaria permite la comunicación con la placa controladora del dron facilitando la integración de la cámara al sistema. A su vez, permitió el manejo tanto de la cámara como del dron desde un único punto de acceso. Además, debido a que se contó con un dispositivo inteligente a bordo con su propio sistema operativo (Linux), este proporciono la opción de programación y automatización de procesos. En consecuencia, se creó una

aplicación que tiene control tanto del dron como de la cámara a bordo desde cualquier dispositivo o plataforma, ya sea, notebooks, tabletas, celulares (Pías, 2017).

El dron por sí solo no podría alejarse de su base a más de un 1km, ya que perdería la señal y por ende la comunicación. La computadora complementaria permitió que el enlace permanezca entre el dron y su estación de control y por lo tanto no se pierda comunicación.

Otras funciones que podrían realizarse debido a la integración de la computadora complementaria serían las de procesamientos de datos a tiempo real durante el vuelo, transferencia de fotos georreferenciadas o videos.

Para poder realizar la integración de todos los componentes adicionales al dron, se diseñó la arquitectura del sistema, de manera de no afectar el desempeño del dron, denominado módulo de control aéreo se observa en la figura 3. El cual está compuesto por, la computadora complementaria, la cámara, un banco de poder externo (batería) y los cables USB para alimentar a la computadora.



Figura No. 3. Módulo de control aéreo.

Cabe aclarar que, el cambio de cámaras, entre la de color y la infrarroja debe realizarse manualmente y a su vez, no se cuenta con soporte giratorio ni estabilizador para la cámara. Por lo tanto, la misma queda ubicada en posición fija de forma tal que el lente siempre apunta directamente hacia abajo.

Para una correcta obtención de las imágenes georreferenciadas se debe definir un modelo matemático para el posicionamiento del dron, en cuanto a latitud, longitud y altitud de acuerdo a cada metodología (Sección B).

Cabe aclarar que el dron vuela hacia adelante y la cámara como ya se mencionó antes, se encuentra en una posición fija en el módulo de control aéreo.

La cámara tiene un campo de visión o Field of View (FOV) que determina el tamaño de captura definido por ángulos predeterminados. Para la Raspberry PI Camera los ángulos son de  $62,2^\circ$  de ancho y  $48,8^\circ$  de largo.



Figura No. 4. Campo de visión (FOV) de la cámara Raspberry PI.

## B. METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE ALTURA

Para estimar la altura de las pasturas se emplearon dos metodologías, estacas y Mapping 3d.

### 1. Estacas

Se utilizaron 30 estacas de 75cm de altura y 4cm x 4cm de lado, enterradas 15cm, quedando 60cm por encima del nivel del suelo. Fueron pintadas de color blanco y azul, en franjas de 5cm de altura intercaladas ver figura 5. Se ubicaron en puntos estratégicos del potrero de forma tal de abarcar la variabilidad de alturas existentes.



Figura No. 5. Estaca con franjas intercaladas.

Con esta metodología se pretendió que el UAV capture imágenes georreferenciadas para su posterior análisis. Para eso el UAV fue guiado a partir de coordenadas que indican la posición de determinados puntos de muestreos (estacas) en el potrero. El objetivo fue lograr que el dron capture fotografías donde se visualice la pastura que rodea cada estaca graduada e inferir a través de la imagen la altura de la pastura.

La idea original para esta metodología fue que se pueda procesar la imagen directamente o estimar por observación y a juicio de experto la disponibilidad de materia seca a partir de la imagen. Sin embargo, debido a lo novedoso de la temática y por falta de información, se decidió proponer otra alternativa de fácil implementación y bajo costo.

Debido a la posición de la cámara (apuntando hacia abajo), surgió la necesidad de evaluar en qué ubicación debe estar el UAV al momento de capturar la foto, con el fin de obtener una correcta imagen, en la que se pueda visualizar la estaca y la pastura que la rodea, para así poder estimar la altura. Lograr una correcta imagen, implica que la foto no debe ser tomada a mucha distancia de la estaca ni tampoco directamente sobre la misma, ya que no resultaría útil para poder inferir la altura. Para poder calcular la mejor posición del UAV para capturar la foto, se tuvo en cuenta, aparte del ángulo de visión de la cámara, la altura del dron y de las estacas. En la figura 4 se muestra el campo de visión de la cámara, la mejor ubicación para visualizar la estaca de la mejor forma en la foto, es cuando la estaca se encuentra próxima a una de las paredes laterales de la pirámide. Para poder lograr una correcta imagen, la estrategia consistió en indicarle a la cámara que capture la fotografía cuando la estaca se sitúa en un extremo respecto del largo de la escena tomada como se muestra figura 6.

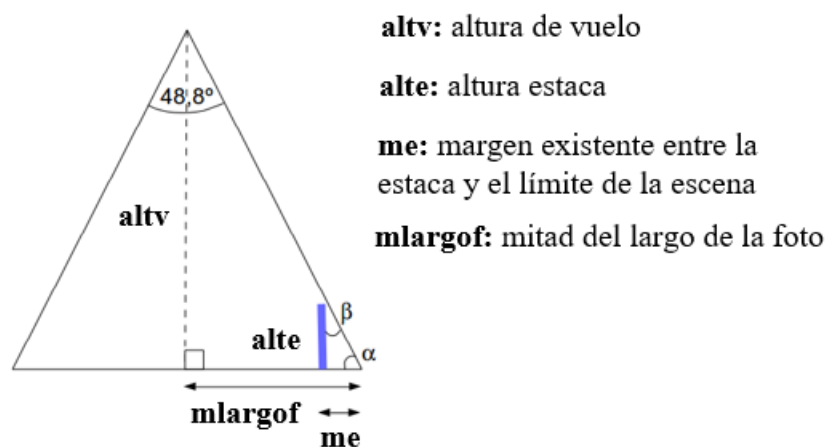


Figura No. 6. Ubicación del dron para la captura correcta de cada estaca.

Para poder lograr eso, fue necesario emplear algunas reglas de trigonometría. La altura del UAV ( $altv$ ) es una variable independiente mientras que la altura de la estaca ( $alte$ ) es una variable fija y conocida (60 cm por encima del nivel del suelo). Conociendo

estos datos se puede determinar las incógnitas  $m_e$  y  $m_{largoF}$ . Una vez conocidos estos valores, se debió determinar la distancia ideal a la cual debió ser capturada la fotografía, la cual ( $DistE$ ) resulta de la diferencia entre  $m_e$  y  $m_{largoF}$ .

En primer término, determinar el ángulo:

$$\beta = \text{ánguloFLargo}/2 = 48,8^\circ/2 = 24,4^\circ$$

$$\alpha = 90 - \beta = 65,6^\circ$$

Luego se calcula  $m_e$ :

$$\tan \alpha = m_e / \text{alte}$$

$$m_e = \text{alte} / \tan \alpha = 0,27 \text{ m}$$

A partir de experimentos realizados, se pudo comprobar que de acuerdo a la altura de vuelo ( $altV$ ) solicitada el dron se aproxima en un rango de  $\pm 0,5$  m respecto de lo estipulado. A su vez considerando que la cámara estaba acoplada debajo del dron, se tiene en cuenta la distancia existente entre la cámara y el centro del dron. En consecuencia, la altura real ( $altr$ ) a considerar es:  $altr = altv - 0,5 - 0,2$ .

A partir de este resultado, se puede calcular  $m_{largoF}$  de esta manera:

$$m_{largoF} = altr / \tan \alpha$$

Finalmente,  $DistE$  se calcula así:

$$DistE = m_{largoF} - m_e$$

Los recorridos fueron predeterminados a partir de coordenadas relativas con respecto al punto de partida del dron. Por cada estaca se determinó capturar 3 fotografías, una inmediatamente antes de llegar a la estaca, otra sobre la estaca y otra después de la misma.

La evaluación de esta técnica se realizó por un lado a partir de los softwares correspondientes (desarrollados por el departamento de Ingeniería Biológica) en dos etapas, la primera de ellas consistió en, evaluar de cuántas de las imágenes obtenidas la estaca es captada (tasa de acierto), mientras que en la segunda etapa se evaluó la concordancia entre las franjas azules visibles a campo con las reconocidas por el algoritmo del procesamiento de imágenes (lectura de franjas correctas). Por otro lado, se evaluó la correlación existente entre el promedio de altura de regla (cm) y la altura (cm) que se estimó a partir de las imágenes obtenidas con dos cámaras distintas (RGB y NGB).

## 2. Mapping 3d

Los modelos digitales de vegetación de grano ultra fino o SfM (Structure from Motion) o Mapping 3d adquiridos por un UAV, actualmente son utilizados para estudiar la vegetación de los ecosistemas dominados por árboles. Algunos trabajos, han sugerido que los modelos SfM a partir de imágenes adquiridas por un UAV, aun no eran adecuados

para medir la estructura de plantas pequeñas, tales como gramíneas debido a limitaciones con la exactitud de los modelos (Zahawi et al., 2015).

La metodología de Mapping consistió en representar la pastura mediante modelos digitales 3d, generados a partir de imágenes georreferenciadas obtenidas por un UAV. Para poder lograr los modelos digitales, es necesario que las fotografías presenten un cierto solapamiento entre ellas (superposición de fotos) y contar con un software responsable de procesar las imágenes. El software seleccionado para este proyecto fue el Agisoft Photoscan, el cual, a partir de una investigación realizada por Pías (2017), se consideró como el que se adaptaría mejor.

Con esta técnica se pretendió cubrir toda el área en estudio y el recorrido se debió hacer en zigzag, donde el dron se movió en dos direcciones como muestra la figura 7. La altura de vuelo (altv) y el porcentaje de solapamiento (solp: 0-1) son variables independientes.

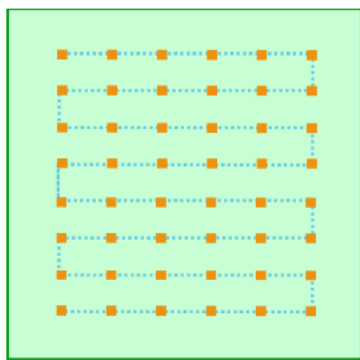


Figura No. 7. Forma en la que realiza el recorrido el dron.

De acuerdo al valor de las variables independientes se modificó el número de fotos obtenidas, lo cual se explica porque la altura de vuelo determinará el rango de largo y ancho que puede cubrir una foto y a su vez el solapamiento incidirá en el tamaño de los incrementos en el recorrido del dron para cubrir el largo y ancho del área en estudio.

A través de reglas trigonométricas se puede determinar de acuerdo a cierta altura y solapamiento el área que cubrirá una foto y cuántas serán necesarias para cubrir la superficie bajo estudio.

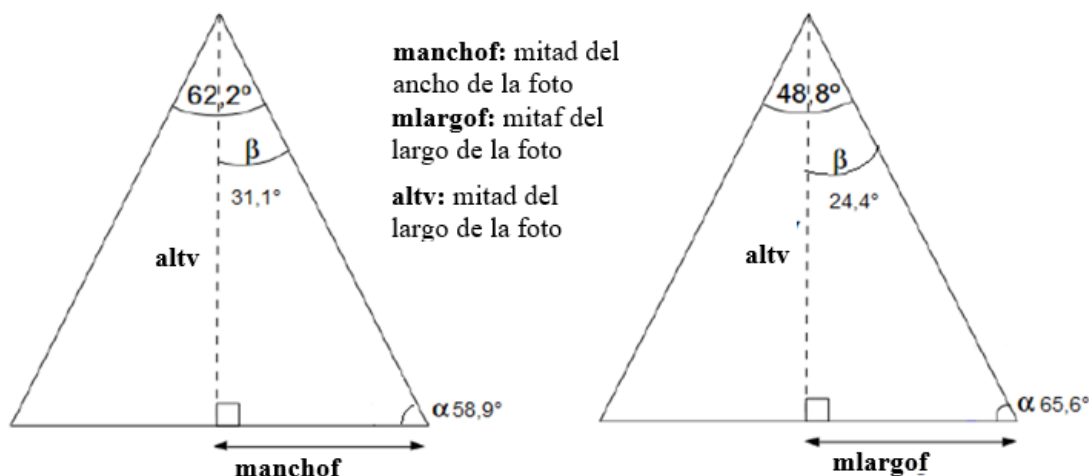


Figura No. 8. Ancho y largo capturado en cada foto.

A partir de experimentos realizados, se pudo comprobar que de acuerdo a la altura de vuelo ( $altV$ ) solicitada el dron se aproxima en un rango de  $\pm 0,5$  m respecto de lo estipulado. A su vez considerando que la cámara estaba acoplada debajo del dron, se tiene en cuenta la distancia existente entre la cámara y el centro del dron. En consecuencia, la altura real ( $altr$ ) a considerar es:  $altr = altv - 0,5 - 0,2$ .

Para conocer qué porción del terreno cubre un cuarto de la foto se debe calcular  $mlargoF$  y  $manchoF$ .

$$\beta = \text{ángulo de ancho} / 2 = 62,2^\circ / 2 = 31,1^\circ \quad \beta = \text{ángulo de largo} / 2 = 48,8^\circ / 2 = 24,4^\circ$$

$$\alpha = 90 - \beta = 58,9^\circ \quad \alpha = 90 - \beta = 65,6^\circ$$

$$\text{manchof} = altr / \tan \alpha \quad \text{mlargof} = altr / \tan \alpha$$

Luego, para conocer la separación en metros que existe entre foto y foto se debe aplicar el porcentaje de solapamiento.

$$\text{inclargof} = (\text{mlargof} * 2) * (1 - \text{solp})$$

$$\text{incanchof} = (\text{manchof} * 2) * (1 - \text{solp})$$

Para esta técnica se utilizó la máxima resolución para lograr alta calidad y precisión al momento de recrear las pasturas en formato tridimensional.

Según Pías (2017) se determinó que la mejor opción para construir los DSM y DTM es el software Agisoft PhotoScan Professional versión 1.2.6. Los modelos de altura de Superficie y Terreno, son exportados en formato .tiff al software específico de manejo de información geográfica (QGIS versión 2.18.5 with GRASS 7.2.0).



Para la elaboración de los modelos digitales el procedimiento consiste en:

- cargar las fotos de cada vuelo al software Agisoft Photo Scan.
- posteriormente realizar la alineación de las fotos, que consiste en ordenar las fotos de acuerdo a la posición que fueron tomadas.
- a continuación, se realiza la referenciación con los puntos de apoyo para mejorar la precisión tanto de los modelos digitales como del orto mosaico. Dichos puntos de apoyo fueron identificados mediante marcas de cartones con nylon de distintos colores, y fueron georreferenciados con el GPS Garmin a nivel de suelo. Los puntos de apoyo fueron colocados en zonas con baja o nula cobertura de vegetación ya que son utilizados como puntos de suelo para la generación de los modelos. Una vez identificados todos los puntos de apoyo en cada una de las fotos en la que aparecen, se vuelve a alinear las mismas (Cunliffe et al., 2016).
- posteriormente el programa construye consecutivamente las nubes densas de puntos, la malla y el Modelo Digital de Superficie (DSM). Este último incluye las superficies de vegetación al igual que infraestructura humana como bebederos, alambrados, y cualquier objeto que se encuentre en la zona cubierta por las imágenes. A su vez como producto de este procesamiento se genera un orto mosaico, que consiste en la organización de imágenes georreferenciadas pertenecientes a la zona de estudio, organizadas como mosaico, en el cual se corrigen distorsiones geométricas y a su vez está orto rectificado. La orto rectificación elimina las distorsiones geométricas y de escalas inherentes en las fotografías producto de imperfecciones del sensor, variaciones topográficas y la curvatura de Tierra. El resultado de este proceso es una imagen con la precisión cartográfica y escala invariable de un mapa/plano, pero con nivel de detalle de una fotografía (Geosoluciones, s.f.).
- terminado dicho proceso, se pasa a generar el Modelo Digital de Terreno (DTM). El primer paso trata en realizar la clasificación de puntos de suelo, para el cual son utilizados los puntos de apoyo y el algoritmo del programa. Dicho algoritmo subdivide el área de trabajo en celdas, y evalúa la distancia, altura y ángulo entre los puntos de dicha celda. El programa construye la malla, utilizando los puntos anteriormente clasificados como suelo, generando el DTM.
- para el procesamiento georreferenciado se utilizó el software QGIS versión 2.18.5 with GRASS 7.2.0. En dicho programa al DSM se resta el DTM, para poder obtener la altura estimada del canopeo o CHM. Para lograr una comparación más precisa, se representa en el software cada una de las

muestras o mediciones tomadas a campo además de comparar el valor promedio de la parcela.

- para obtener los datos de altura en cada uno de los niveles de resolución trabajados (parcela y puntos de muestreo) se usó la herramienta Python de QGIS, que permite realizar dicho proceso de forma segura, ordenada y automatizada. La información obtenida es exportada en formato de tabla a Excel para su posterior análisis.

Todo el procesamiento es realizado en computadores personales, ya que se considera que la Raspberry PI no es capaz de realizar dicho proceso de manera eficiente.

### C. EXPERIMENTOS

Los experimentos se llevaron a cabo en la Udelar, Fagro. EEMAC, ubicada en la ruta 3 km 363,5 Paysandú – Uruguay (32 ° 22' S - 58 ° 03' W) durante los meses de enero, abril, junio y octubre.

La EEMAC se encuentra sobre la unidad de suelos San Manuel, formación Fray Bentos (sedimentos limosos con niveles calcáreos), siendo los suelos dominantes Brunosoles éutricos típicos y Solonetz Solodizado melánicos (blanquéales) según Carta reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano et al., 1976, escala 1:1000000).

#### 1. Calibración

En primer término, se procedió a la calibración del dron, la cual fue abordada principalmente por el equipo de Ingeniería (Pías, 2017) que consistió en evaluar:

- dos cajas contenedoras del módulo de control aéreo (versión 2 y 4). Dichas cajas tienen como objetivo principal servir de receptáculo al módulo de control aéreo como se muestra en la figura 3, protegiéndolo de las condiciones climatológicas, como viento, polvo, etc.
- recorridos optando entre tomar fotos en movimiento o no.
- diferentes alturas (10, 20, 30 y 40m).
- distintas velocidades de vuelo (2 y 6 m/s).
- distintos niveles de solapamiento (0,5 y 0,8). El solapamiento es la superposición de fotos; requisito necesario para generar modelos 3d.

Los principales indicadores de optimización estimados fueron el tiempo de vuelo y los niveles de batería consumidos en distintas combinaciones de las variantes anteriormente mencionadas. Esto permitió comprender el funcionamiento del dron, como

también detectar y corregir errores de todo tipo en el sistema, a través del simulador o vuelos reales a menor escala (Pías, 2017).

Posteriormente de la calibración y antes de definir el experimento central fue necesario realizar algunos experimentos previos (ajuste metodológico) para mejorar la obtención de la información, validar el funcionamiento del sistema y aplicar mejoras que beneficien la performance de los recorridos y la aplicación de las distintas metodologías.

El ajuste metodológico se llevó a cabo una vez que se contaba con una versión estable del sistema y el dron calibrado. Con el objetivo de tener una primera aproximación a la generación de los modelos digitales a través del Agisoft PhotoScan, del procesamiento de datos mediante el uso del Qgis y al análisis de datos.

## 2. Ajuste metodológico

El ajuste metodológico abarcó dos etapas, la primera etapa consistió en evaluar las dos metodologías (Estacas y Mapping 3d) en el mes de enero y la segunda etapa, realizada en abril, fue evaluar la performance del UAV y realizar una primera aproximación a la generación de los modelos digitales, el procesamiento y análisis de datos.

Dichas evaluaciones se realizaron en dos potreros diferentes, la evaluación de las metodologías se realizó en el potrero denominado “la crianza” (Latitud: -32.379724°- Longitud: -58.047024°), mientras que la segunda etapa se llevó a cabo en el potrero “7 A” (Latitud: -32.378678° Longitud: -58.041997°).

### a. 1<sup>er</sup>. etapa: evaluación metodologías

El objetivo fue determinar qué combinaciones de tipo de cámara (RGB-NGB) y metodología aplicada son las más adecuadas para obtener resultados precisos en base a los métodos de Estacas y Mapping 3d.

El potrero “la crianza” corresponde a un campo natural restablecido perteneciente al área destinada al Tambo de la Estación Experimental. Debido a que el experimento se realizó en verano (enero 2017) se encontró alta proporción de restos secos y de malezas como *Eringium horridum*. Dentro de la superficie total del potrero (3,8 ha) el experimento abarcó un área de 0,6 ha se muestra en la figura 9. El área seleccionada permitió realizar recorridos extensos, permitiendo hacer notorios los detalles, ventajas y desventajas de distintas configuraciones y el estudio de indicadores de rendimiento sobre situaciones reales.



Figura No. 9. Mapa de ubicación del área bajo estudio en el potrero “la crianza”.

Las estacas se colocaron de manera que abarquen toda el área seleccionada y a su vez representen toda la variabilidad de altura existente en la misma. Las estacas fueron georreferenciadas con un GPS Garmin, para definir recorridos y a su vez poder identificar cada estaca. A cada estaca se las calificó y adjudicó un punto de escala visual (del 1 al 5) de acuerdo a la cantidad de pasto que presentaba cada una y se registró altura de pasto con regla tomando como referencia la máxima concentración de hojas. Luego de realizados los vuelos, aplicando la técnica de doble muestreo (Haydock y Shaw, 1975) se cortaron cuadros de 30x30 cm de la pastura donde se encontraban las estacas, identificando cada muestra con el punto de escala correspondiente. Las muestras fueron pesadas en fresco, secadas en estufas (60 °C a temperatura constante durante 48 horas y luego pesadas en seco para poder determinar la cantidad de forraje (Kg MS/ha) disponible.

Para el Mapping 3d se realizó un vuelo a una velocidad de 6 m/s y a una altura de 36 m por cada tipo de cámara (RGB y NGB) utilizada. La evaluación en general

consistió en comparar altura de regla (cm) y disponibilidad de MS (kg) en cada punto de muestreo contra lo estimado por las fotos (Estacas) y los modelos (Mapping 3d).

Dados los malos resultados obtenidos en este experimento la metodología Estacas fue suprimida para el resto de los experimentos, conservando únicamente la metodología de Mapping 3d que presentó resultados alentadores.

b. 2<sup>a</sup>. etapa: ensayo abril

Dicho experimento tuvo como objetivo evaluar la performance del dron y realizar una primera aproximación a la generación de los modelos digitales, el procesamiento y análisis de datos.

Para evaluar qué tan precisos son generados los modelos digitales, en este experimento se evaluó la capacidad del Mapping 3d para identificar un cuerpo con volumen y caras sólidas. Para esto se colocaron en las distintas parcelas cajas de cartón de distinto alto, largo y ancho. A su vez, estas cajas sirvieron como punto de apoyo para la generación del modelo 3d del pasto.

El ensayo se llevó a cabo en el potrero “7 A” que corresponde a una pastura monoespecífica de Festuca (*Festuca arundinaceae*). La pastura fue sembrada el 19/05/2016 a una densidad de 10 kg/ha de Festuca cv. Fortuna. Se trabajó durante el periodo comprendido entre el 1 y el 7 de abril del año 2017 en el potrero 7A sobre condiciones experimentales pre existentes, las cuales se describen con más detalles ítem a sección 3. Se realizaron los vuelos para dos bloques (6 parcelas). El área total abarcada en estas pruebas fue de 1.2 ha (superficie c/bloque: 0,6 ha). Cabe aclarar que al momento de realizar el ensayo no se diferenciaban los tratamientos ya que todos se encontraban con el mismo nivel de altura de la pastura (pre-pastoreo).



T6= remanente 6 cm; T9= remanente 9 cm; T12= remanente 12 cm.

Figura No. 10. Croquis de bloques y tratamientos ubicados en el potrero 7A.

Los vuelos se realizaron durante el 1 al 7/04, a una altura de 36 m, a una velocidad de 6 m/s y un solapamiento del 70%. Fueron obtenidos 6 modelos digitales. Los errores para los días 3 y 5/04 se debieron a un problema de alineación de fotos a la hora de la realización de los modelos por parte del software AgiSoft PhotoScan. Para el caso del día lunes 3/04 se alinearon 157 fotos de un total de 183, lo que provocó que una zona bajo estudio del modelo se pierda. En cambio, para el día miércoles 5/04 no se alinea ninguna foto y por lo tanto no se puede obtener el modelo. Las causas de la no alineación de las fotos en el modelo se desconocen.

Para los 4 días en que se generaron correctamente los modelos, se exportaron en formato .tiff hacia el Qgis. En este último se recortó el área que corresponden a los a las 6 parcelas para extraer los datos de altura (cm) de la superficie bajo estudio. El Qgis nos permitió obtener las alturas (cm) promedios para cada tratamiento dentro de cada bloque y poder compararlos con los datos medidos a campo con regla y plato de levante.

### 3. Experimento central

En la figura 11 se presenta el lugar del experimento se realizó en el potrero “7 A”, mismo potrero donde se realizó el ensayo de abril, realizándose los vuelos en junio y octubre.

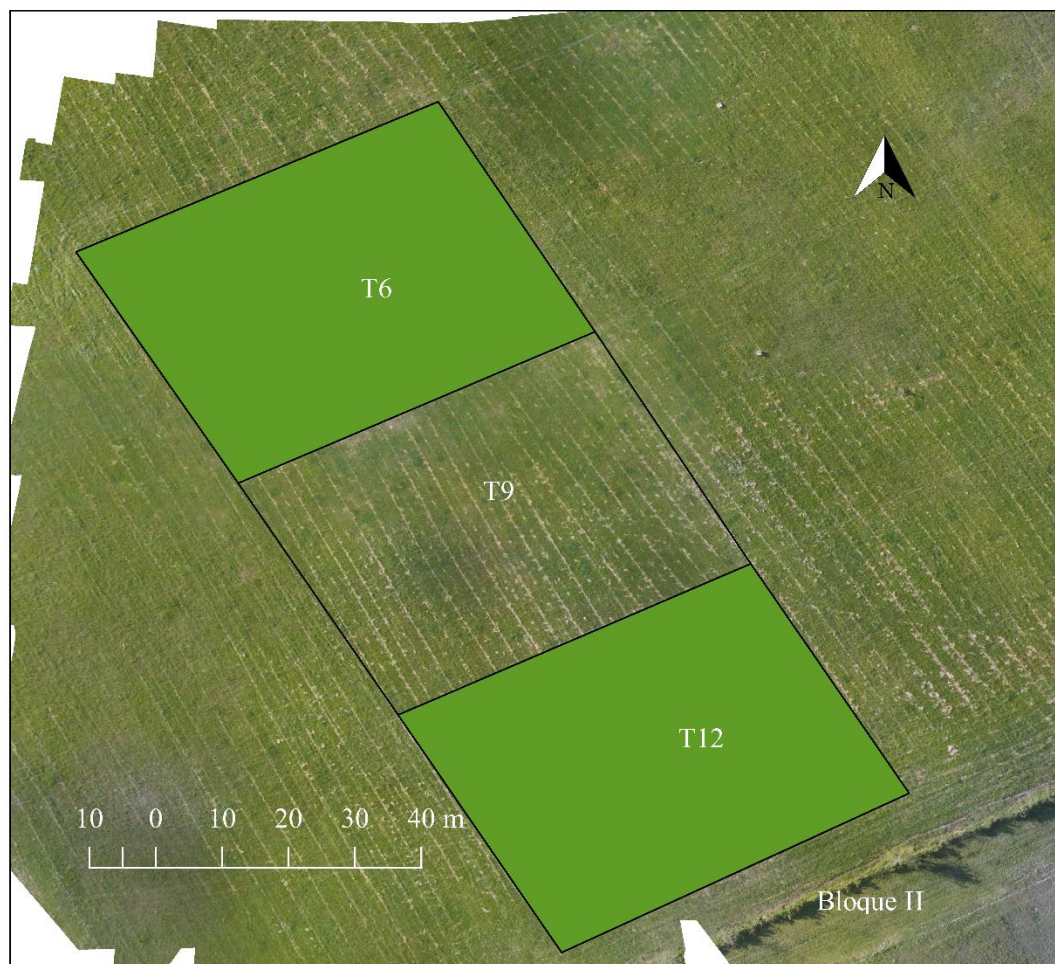
#### a. Diseño experimental y tratamientos

Se llevó a cabo sobre un experimento diseñado para evaluar el efecto de la intensidad de pastoreo sobre la cantidad y producción de forraje, la producción diaria (litros/vaca/día), peso (kg PV/vaca), condición corporal (CC) y composición de leche mensual para un grupo determinado de animales durante todo el experimento. Se evaluaron 3 tratamientos y 4 réplicas (bloques) en los cuales asignaron 3 animales por tratamiento. Los tratamientos consisten en tres intensidades de pastoreo, 6 (t6), 9 (T9) y 12 (t12) y 9, 12 y 15 centímetros de altura de remanente para otoño y primavera respectivamente. El ingreso al pastoreo fue con 18-20 cm de altura con la pastura en estado de tres hojas.

Cada bloque tiene una superficie de 0,6 ha y se subdivide para cada tratamiento en parcelas de 50x40 m lo que resulta en una superficie de 0.2 ha.

A diferencia de abril, se trabajó en un mismo bloque durante las dos estaciones en los tratamientos más contrastantes, con 6 y 12 cm de remanente en otoño pasando a 9 cm y 15 cm en primavera





T6= remanente 6 cm; T9= remanente 9 cm; T12= remanente 12 cm.

Figura No. 11. Croquis de bloque y tratamientos (en color) estudiados en junio y octubre.

#### b. Animales y manejo

Se utilizaron 3 vacas Holando por parcela durante todo el experimento (otoño y primavera).

En el otoño las vacas realizaron el pastoreo entre el ordeño de la mañana (5:00 hs) y la tarde (14:00 hs), realizando un único pastoreo diario entre los ordeños. Durante el resto del día las vacas permanecieron encerradas con suministro de suplemento y agua *ad libitum*. Sin embargo, en la primavera la dieta se basó 100 por ciento en pastura de festuca en doble pastoreo en el día.



c. Características de los vuelos y desempeño del dron

En el cuadro 1 se resume la información sobre los vuelos realizados los cuales fueron realizados a una velocidad de 6 m/s y las imágenes obtenidas con la cámara tienen una resolución de 3280x2464 pixeles.

Cuadro No. 1. Características de los vuelos y desempeño del dron.

Fecha	Trat.	Alt. vuelo (m)	Umbral	T. (s)	Dis. (m)	Uso batería (%)	No. fotos	Hora vuelo
13/06/17	T12	20	0,9	510,21	590,92	45	97	15:20-15:28
		30	0,9	220,6	375,81	19	36	15:19-15:22
14/06/17	T6	20	0,9	439,61	606,27	39	97	11:27-11:34
		30	0,9	248,91	416,45	22	41	11:26-11:30
02/10/17	T6	20	1	477,99	598,7	41	97	13:37-13:45
		30	1	242,1	420,13	21	41	13:37-13:40
03/10/17	T6	20	0,9	443,72	607,25	39	97	11:16-11:23
		30	2	219,89	425,68	20	41	17:50-17:53
05/10/17	T12	20	2	392,69	631,95	35	97	11:25-11:31
		30	2	178,74	396,63	16	36	11:24-11:27

Trat.= tratamiento; T6= remanente 6 cm; T12= remanente 12 cm; Alt. vuelo= Altura de vuelo; T.= tiempo de recorrido; Dis.= Distancia recorrida; No. fotos= número de fotos.

Se obtuvo el número de fotos esperadas.

El umbral, representa el error de posicionamiento en metros que puede existir entre el dron y una posición de interés (por ejemplo, posición de captura de la imagen), el valor estipulado fue de 0,9 pero se modificó a 1 y 2 debido a las condiciones de viento existentes.

El uso de la batería se ubicó entre 35 y 45% para los vuelos a 20 y entre 16 y 22% para los vuelos a 30m. Los horarios en que se realizaron los vuelos fueron variados dadas las condiciones de viento.

d. Altura y disponibilidad de forraje

Se colectaron registros de altura de la pastura considerando como referencia la máxima concentración de hojas, variando el número de registros según el nivel de escala. A nivel de parcela se colectaron 30 registros de altura de la pastura siguiendo recorridos prefijados y a nivel de cuadrado de muestreo 5 mediciones ubicados en cada uno de las

esquinas y el centro. Para evitar el error de paralaje las mediciones las realizó siempre el mismo operador con el mismo instrumento y criterio (altura de la máxima concentración de hojas (UGR, 2008).

La cantidad de forraje se estimó en base a la técnica de doble muestreo (Haydock y Shaw, 1975). Se utilizaron 5 puntos de escala con 9 repeticiones por punto, sumando en total 45 registros por parcela. Las muestras consistieron en cuadrados de 30x30 cm cortados al ras del suelo, que fueron secadas en estufas a 60 ° C durante 48 horas para determinar materia seca. Luego se determinó la relación entre altura y cantidad de forraje disponible (kg MS/cm/ha).

Para poder identificar cada uno de los puntos muestreo en las imágenes obtenidas por el dron, se utilizaron cartones con combinaciones de formas geométricas y colores. Esto nos permitió obtener la ubicación geográfica de forma precisa, haciendo posible la identificación de las muestras tomadas a campo y en los modelos digitales. Las marcas se hicieron de un tamaño que permite ser reconocibles en el modelo con las formas se identifica a cada punto de la escala visual, mientras que con los colores se identifica a cada repetición como se muestra en la figura 12.

	Blanco	Negro	Azul	Rojo	Amarillo	Rosado	Naranja	Celeste	Rojo-blanco
1									
2									
3									
4									
5									

Figura No. 12. Ilustración de la forma en que se representaron los puntos de escala a nivel de campo (filas) y sus repeticiones (columnas), para su correcta identificación.

#### e. Alturas de vuelo

Dado que se cuenta con dos baterías y considerando que una batería alcanza para registrar un bloque, se utilizó una batería para cada altura. En el experimento realizado en

la segunda etapa del ajuste metodológico se utilizó una altura de vuelo de 36 m con una resolución de 2 cm/pixel, por lo tanto, se vio como interesante evaluar otras alturas de vuelo que produzca modelos con mayor resolución. Por lo tanto, para las mediciones realizadas en el experimento central (junio y octubre), se evaluaron alturas de vuelo de 20 y 30 m.

f. Versiones de los modelos digitales

Se decidió realizar para cada tratamiento y altura de vuelo 3 versiones (V1-V2-V3) de los modelos digitales de manera de poder evaluar la fiabilidad de dichos modelos. Se generaron 25 modelos de un total de 30 propuestos. En el caso particular de octubre se intentó realizar dos fechas de vuelos para cada altura, lográndose para el caso de t6, mientras que para el caso del t12 se concretó una única fecha de vuelo debido a las condiciones de viento existentes. El cuadro 2 se muestra en forma esquemática lo anteriormente dicho para facilitar la comprensión.

Cuadro No. 2. Versiones logradas correctamente según tratamiento y altura de vuelo.

	junio				octubre					
	T6		T12		T6				T12	
	14-jun.		13-jun.		02-oct.		03-oct.		05-oct.	
Alt. vuelo (m)	20	30	20	30	20	30	20	30	20	30
Mod. dig.	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1	V1
	V2	V2	V2	V2		V2	V2	V2		
	V3	V3	V3	V3	V3	V3	V3	V3		

Alt. vuelo= altura de vuelo; Mod. dig. = modelo digital; T6= remanente 6 cm; T12= remanente 12 cm; V1= primera versión; V2= segunda versión; V3= tercera versión.

g. Escalas de evaluación

Se evaluó la técnica de Mapping 3d a distintos niveles de escala.

- A nivel de parcela se realizó la comparación entre el promedio de altura de 30 mediciones de regla con el promedio de altura estimado por Mapping 3d. El promedio de los modelos digitales es producto de 5 y 12 millones de pixeles que constituyen la parcela según la altura de vuelo, a 30 y 20 m respectivamente.
- Para el segundo nivel de escala analizado, puntos de muestreo, se comparó el promedio de altura de regla con la estimación de altura de Mapping 3d

para cada uno de los 45 puntos de muestreo. Se trabajó con las versiones de los modelos que presentaban mayor correlación y coeficiente de Pearson a la hora de estimar la altura a nivel de puntos de muestreo. Para realizar el promedio de regla se consideraron cinco mediciones por cuadrado de muestreo. El número de píxeles para cada punto de muestreo para los vuelos a 20 y 30 metros se encuentran en el entorno de 450 y 200 respectivamente.

- En el nivel de punto de escala, se comparan los promedios de altura de regla contra los promedios de altura de los modelos (cm) para cada uno de los puntos de escala. El promedio de altura de los modelos para cada punto de escala surge de agrupar los 45 puntos de muestreo con su correspondiente punto de escala. Los resultados para todos los puntos de escala se muestran a través de gráficos de línea para poder visualizar el comportamiento de los modelos. Posteriormente, se analizó en más detalle los puntos de escala más contrastante (1 y 5), los mismos se muestran con histogramas de manera de poder visualizar, si los modelos detectan la variación de altura (cm) que se pudo observar a nivel de campo. Se trabajó con las versiones de los modelos que presentaban mayor correlación y coeficiente de Pearson a la hora de estimar la altura a nivel de puntos de muestreo.

#### h. Análisis estadístico

Para las comparaciones se utilizaron regresiones lineales simples. Las variables más importantes fueron identificadas mediante un árbol de partición de la regresión. El cual ordena y clasifica las variables de acuerdo a su importancia en explicar las variaciones. Se consideró como variable de respuesta o dependiente, la diferencia entre la altura real y estimada. Las ocho variables independientes fueron, seis continuas (altura de vuelo, tratamiento, velocidad de viento promedio, velocidad de viento máxima, radiación y umbral), una nominal (versión) y una ordinal (hora).

El análisis de datos se realizó a través dos softwares estadísticos; para el análisis de regresión lineal simple se utilizó XLSTAT 2017, para realizar los histogramas y árbol de regresión se usó JMP 2018.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### A. AJUSTE METODOLÓGICO

Para estacas se obtuvo un 60% de tasa de acierto, esto significa que en un 60% de las imágenes tomadas por el UAV la estaca fue captada. Otro indicador tomado para evaluar esta metodología fue, lectura de franjas correctas que dio un 10% a 20%. Esto significa que el algoritmo empleado no logró en todos los casos determinar de forma correcta la cantidad de marcas azules visibles. Esto implica que se reduce el número de muestreos propuestos reduciendo así la precisión de la información, no cumpliendo con los objetivos buscados. Los resultados de Estacas no fueron buenos porque se implementó utilizando técnicas básicas se tuvo poco tiempo de programación, ajuste, calibración y pruebas para su desarrollo (Pías, 2017). En el cuadro 3 se observan los resultados en función de los dos tipos de cámara utilizados (NGB-RGB), se encontraron diferencias para esta metodología. Al igual que en Mapping 3d los mejores resultados se obtuvieron con la cámara RGB.

Cuadro No. 3. Comparación de altura de regla vs. altura estimada con técnica de Estacas realizado a partir de dos cámaras (RGB y NGB).

	Puntos de escala					R <sup>2</sup>	ρ
	1	2	3	4	5		
<b>Altura regla(cm)</b>	4,1	6,4	10,7	14	14,8	-	-
<b>Estacas RGB (cm)</b>	10	13,3	17,8	30	36,7	0,9	0,95
<b>Estacas NGB (cm)</b>	16,7	38,9	27,8	20	26,7	-0,07	0

ρ= coeficiente de correlación de Pearson; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación.

Por otro lado, en cuanto a las estacas graduadas que se utilizaron para el experimento, se piensa que el diseño no fue del todo acertado para campo natural por las pocas divisiones que presentaban. En un principio las estacas fueron diseñadas para ser utilizadas en pasturas sembradas, donde la variabilidad espacial de alturas es menor en comparación con un campo natural, ya que éste presenta una gran heterogeneidad de especies, las cuales generan que en un determinado espacio existan muchas alturas diferentes. Por ejemplo, para una determinada estaca en esas condiciones podía darse que

no se presentara la misma altura de pasto en todos los lados de la estaca. En cambio, en pasturas sembradas la heterogeneidad espacial de alturas es más marcada, pudiendo identificar un mosaico de parches fácilmente en un área determinada.

A su vez se cree que la metodología de estacas requiere de más trabajo que otras técnicas ya existentes para la medición de altura de forraje no cumpliendo con el objetivo implícito de reducir mano de obra y tiempo para la estimación de la disponibilidad. Las estacas deben permanecer en un lugar fijo y eso implica un mantenimiento de las mismas complejizando el método.

Esta técnica requiere de una alta precisión siendo muy dependiente del sistema GPS a utilizar. Principalmente afecta la captura de las imágenes. Para la realización de este experimento al no contar con un sistema de GPS preciso, se resolvió suministrando los datos de ubicación a través de coordenadas relativas en metros a partir del punto de partida del UAV. Esta solución implicó mucho trabajo ya que se realizó con brújula y cinta métrica.

De todas formas, en el marco de este trabajo, esta metodología permitió tener un primer acercamiento al problema y profundizar el conocimiento sobre el dron.



Figura No. 13. Foto digital tomada por el UAV para la metodología estacas

Con el Mapping 3d se obtuvieron distintos resultados al comparar los dos tipos de cámaras (RGB-NGB) se observan en el cuadro 4. Se obtuvieron mejores resultados para el caso de la cámara RGB, obteniendo un coeficiente de correlación y de determinación de 0,74 y 0,56 respectivamente. En el cuadro 4 se observan los valores

obtenidos con la cámara NGB el coeficiente de correlación y determinación resulto inferior.

Cuadro No. 4. Comparación de altura de regla vs. altura estimada con técnica de Mapping 3d realizado a partir de dos cámaras (RGB y NGB).

	Puntos de escala					R <sup>2</sup>	ρ
	1	2	3	4	5		
<b>Altura regla(cm)</b>	4,1	6,4	10,7	14	14,8	-	-
<b>Mapping RGB (cm)</b>	3,8	5,4	9,2	6,1	14	0,56	0,75
<b>Mapping NGB (cm)</b>	2,9	7,1	8	0,8	12,3	0,09	0,3

ρ= coeficiente de correlación de Pearson; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación.

En el ensayo realizado en abril dentro del potrero 7a se obtuvieron para el caso de la regla graduada valores de coeficiente de Pearson de 0,38 con un r<sup>2</sup> de 0,15, mientras que para el plato de levante el coeficiente de Pearson fue de 0,25 y un r<sup>2</sup> de 0,06 en anexo 2.

En el cuadro 5 y figura 14 se muestran los resultados que se obtuvieron para las cajas de cartón por parte del Mapping 3d, siendo en general muy similares a las medidas de regla. Observándose, salvo una excepción donde existió una sobrestimación del valor (en el ancho de la caja negra), en el resto, las medidas subestiman la realidad.

Cuadro No. 5. Dimensiones reales y estimadas por Mapping 3d de dos cajas.

Caja	Dimensión	Altura real (cm)	Altura Mapping (cm)
<b>Rosada</b>	Altura	28	22,9
	Largo	59	56,4
	Ancho	40	39,3
<b>Negra</b>	Altura	48,5	44,2
	Largo	59	48,4
	Ancho	41	47,8

En la figura 14 se muestran dos visualizaciones distintas de una caja de cartón, resultantes del Mapping 3d. Dichas visualizaciones se tratan de la nube de puntos (izquierda) y el modelo 3d (derecha) vistas de manera isométrica.

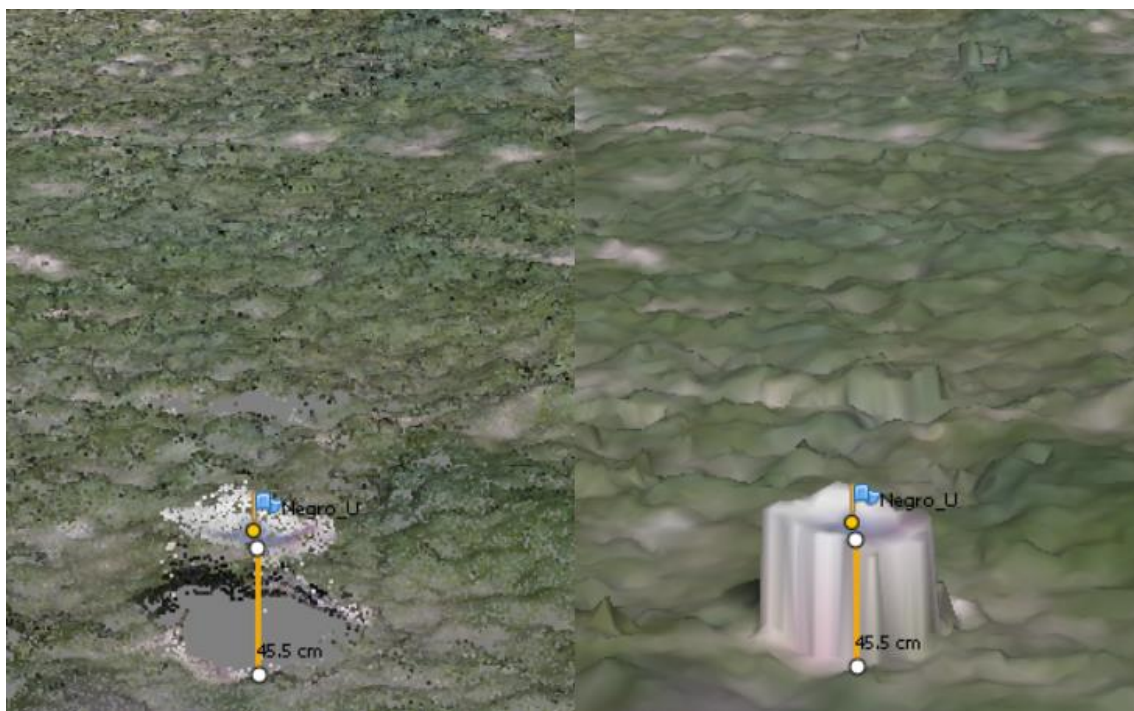


Figura No. 14. Nube de puntos y Mapping 3d de las cajas.

En abril, la correlación observada es muy baja ( $r^2 = 0,25$ ), no siendo la esperada. Cabe recordar que esta evaluación correspondió a la etapa previa a definir el experimento central, por lo tanto, tenía el objetivo de evaluar performance del dron y a su vez permitir realizar una primera aproximación al procesamiento de los datos. El área abarcada por cada modelo en este caso, corresponde a 2 bloques, siendo seis veces más de superficie con respecto al experimento central de junio-octubre. Para poder abarcar los dos bloques se realizaron dos vuelos a 32 m de altura, con una superposición de fotos de 70% y se utilizaron 6 puntos de apoyo, de los cuales dos fueron las cajas evaluadas en esta etapa. A su vez, las evaluaciones se realizaron antes de que inicie el experimento de lechería, por lo que aún no habían ingresado los animales a pastorear y la pastura se encontraba a una altura de entrada de aproximadamente de 15 cm, no existiendo diferencias entre tratamientos en cuanto a altura de pasto (pre-pastoreo). Cabe mencionar que para lograr generar la misma altura de entrada a la pastura en todas las parcelas se cortó con rotativa todos los bloques días previos al inicio del experimento de lechería. Eso generó que al momento de realizar los vuelos para obtener los modelos existiera gran cantidad de restos secos en las parcelas, factor que se cree pudo haber incidido en los valores tan bajos obtenidos. El promedio de altura de la pastura estimado por los modelos en abril fue de 3,2 cm siendo 6 veces menor que la altura real (15 cm). Sin embargo, los resultados



obtenidos para las cajas de cartón que fueron colocadas en las parcelas de forma de evaluar un objeto con caras sólidas y fácilmente medibles, se asemejan a las dimensiones reales de las mismas.

## B. EXPERIMENTO CENTRAL

### 1. Efecto de la escala en la estimación de la altura

#### a. A nivel de parcela

Las evaluaciones realizadas en junio y octubre se hicieron cuando los animales habían sido retirados de la parcela, habiendo dejado los remanentes correspondientes a cada tratamiento (post-pastoreo).

El cuadro 6 presenta la altura a campo medida con regla y la estimada por el Mapping, ambas calculadas como promedio de toda la parcela. Teniendo en cuenta las diferentes combinaciones de alturas de vuelo y tratamientos.

En junio a nivel de parcela los modelos no detectaron diferencias entre los distintos tratamientos, dado que arrojó similar valor de altura promedio en el tratamiento de 6 cm como en el de 12 cm, existió mínima diferencia entre los mismos. Para ambos tratamientos el valor de altura estimado en los vuelos a 30 metros resultó inferior que, a 20 metros. Sin embargo, en octubre sucedió lo contrario y en general los modelos tienden a acercarse y/o sobrestimar al valor de regla.

En octubre se observaron mayores valores promedio de altura estimada en los vuelos del día 2 con respecto al 3, siendo más variables y sobre estiman la altura de la parcela. Cuando se compara dentro de cada fecha entre las distintas alturas de vuelo, se observa que el día 2 la altura estimada a 20 metros es mayor que a 30 metros siendo contrario en el día 3. El 5 de octubre para el t12 se comporta de la misma forma que el 3 de octubre, donde la altura estimada a 30 metros es mayor que a 20 metros. Siendo ambos valores más altos que la medición a campo.

Cuadro No. 6. Promedios de altura (cm) estimada con técnica de Mapping 3d para los tratamientos de junio y octubre a nivel de parcela.

Mes de vuelo	junio		octubre		
Tratamiento	<b>T6</b>	<b>T12</b>	<b>T6</b>		<b>T12</b>
Altura de regla (cm)	7,5	13,8	7,0		14,3
Fecha de vuelo	14-jun.	13-jun.	02-oct.	03-oct.	05-oct.

Altura de vuelo (m)		20	30	20	30	20	30	20	30	20	30
Mapping 3d (cm)	V1	3,2	3,2	3,6	2,3	11,9	7,0	4,5	5,9	14,4	26,6
	V2	3,5	3,1	3,4	1,9		6,7	3,9	6,5		
	V3	3,5	3,0	3,7	2,4	14,1	19,5	4,4	6,1		
Prom. Mapping (cm)		3,4	3,1	3,6	2,2	13,0	11,1	4,3	6,2	14,4	26,6

T6= remanente 6 cm; T12= remanente 12 cm; V1-V2-3= versiones de los modelos digitales.

Cuando la altura de pasto es mayor (t12) se produce una estimación más heterogénea, produciéndose sobre y subestimaciones.

Los valores de altura estimada por parte de los modelos a nivel de parcela no fueron buenos, dado que los mismos en términos absolutos en la mayoría de los casos son distintos al valor de regla. Además, no se logró identificar un patrón claro de los resultados que respondan a alguna variable en particular.

En cuanto a la altura de vuelo, no fue posible afirmar con cual se obtienen mejores resultados, ya que se obtuvieron buenos y malos resultados con ambas alturas de vuelo. A su vez, entre distintas versiones no se observaron grandes diferencias excepto, en el vuelo a 30 m el 2 octubre sobre el t6 donde se observan valores dispares entre las versiones.

#### b. A nivel de punto de muestreo

Con respecto al análisis del punto anterior, en este caso se pretendió abordar un análisis más detallado (menor nivel jerárquico) de la zona de estudio. Se presentan los resultados obtenidos de altura de regla y altura estimada por los modelos (cm) para los 45 puntos de muestreo. Con el fin de poder analizar los valores de los modelos a un nivel de escala más específico y lograr tener una mejor ubicación de los datos. El estudio a nivel de punto de muestreo permitió realizar evaluaciones en determinadas áreas dentro de la parcela.

En base a las diferencias encontradas entre las distintas versiones que se observan en anexos 3 y 4, se decidió analizar aquellas versiones que presentaron mayor correlación con el valor de regla.

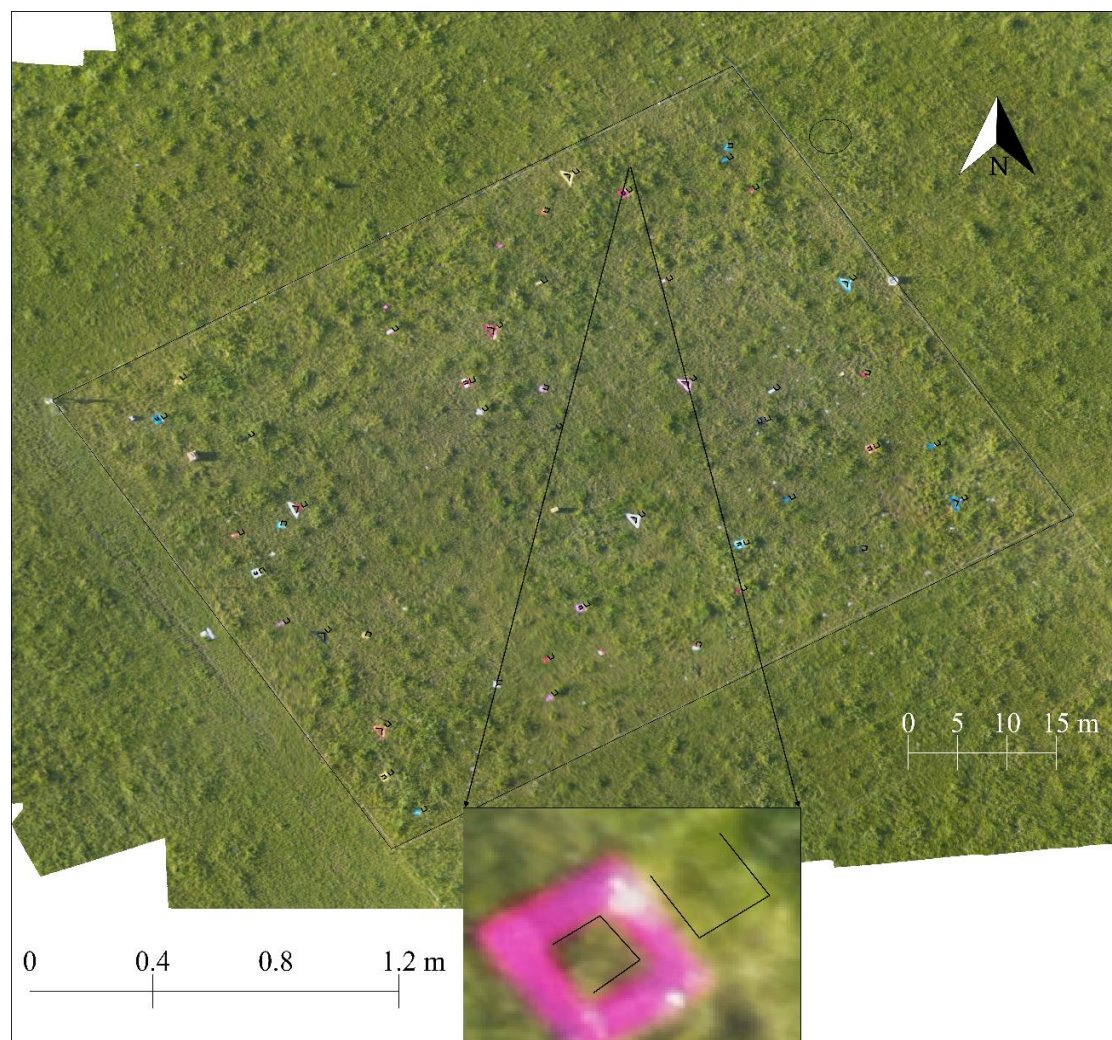


Figura No. 15. Ejemplo de puntos de muestreo.

El cuadro 8 presenta los resultados de junio y se divide en 2 partes, en la primera se presenta los valores de media y desvío para describir estadísticamente cada una de las variables. En la segunda, se muestra los valores de coeficiente de correlación, coeficiente de determinación y p-valor, para analizar la correlación entre las variables de interés.

En el cuadro 10 se observan las medias de la altura estimada del t6 son mayores y más próximas al valor real de la misma, sin importar la altura de vuelo en comparación a los valores obtenidos en t12. En contrapartida, se registró un mayor valor de desvío estándar en las estimaciones realizadas en t6 comparada con t12. Además, los desvíos de

las estimaciones del t6 son mayores que el desvío de las medidas de regla, mientras que para t12 sucede todo lo contrario.

Cuadro No. 7. Número de observaciones, media y desvío de las medidas regla para cada tratamiento en junio.

	junio	
	T6	T12
n	45	45
Media (cm)	8,32	9,64
Desv. estándar	3,76	5,51

n= número de casos; Desv= desvío; T6= tratamiento remanente 6 cm; T12= tratamiento 12 cm remanente.

Con respecto a los coeficientes de correlación obtenidos los datos muestran mayores valores en t6 comparado con t12. Otro aspecto a destacar es que los valores de correlación dentro del t6 fueron mejores para los vuelos a 20 que a 30 metros. En cambio, no se observó el mismo resultado en t12 donde los mismos fueron más variados.

No hay diferencia en la resolución de los modelos digitales (DSM y DTM) y orto mosaico entre los modelos de t6 o t12, dicha diferenciación se dio relativo a la altura de vuelo.

Cuadro No. 8. Promedio de altura (cm) estimada con la técnica de Mapping 3d para el tratamiento de junio a nivel de parcela.

Tratamiento	Jun.			
	T6		T12	
Altura de vuelo (m)	20	30	20	30
Fecha de vuelo	14-jun.		13-jun.	
Versión	V3	V3	V3	V1
Altura de regla (cm)	8,32		9,64	
n	45			
Media (cm)	5,7	5,25	3,64	2,19
Desv. estándar	5,93	5,13	4,68	2,52
Coef. correlación	0,74	0,69	0,60	0,43
R <sup>2</sup>	0,55	0,48	0,36	0,18
R <sup>2</sup> ajustado	0,54	0,47	0,34	0,16
P-valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,004

DSM y DTM (cm/pixel)	1,24	1,93	1,32	2,05
Ortho mosaico (cm/pixel)	0,62	0,96	0,66	1,03

T6= remanente 6 cm; T12= remanente 12 cm; V1-V3= versiones de los modelos digitales; DSM= modelo digital de superficie; DTM= modelo digital de terreno.

En el cuadro 10 se muestran los resultados de octubre, el mismo presenta la misma lógica que el cuadro 8, con la diferencia que en octubre para el caso del t6 se realizaron dos fechas de vuelos para cada altura.

En términos generales al comparar t6 con t12, en el tratamiento de menor altura se obtuvieron valores de media más cercanas a la media de regla independientemente de la altura de vuelo. Comportamiento similar al obtenido en junio. Considerando las distintas alturas de vuelo, en el t6 se observa que las medias son más homogéneas que para el t12, ya que el t12 a 30 metros la media aumenta en gran medida.

Los desvíos en t6 son menores que t12, situación opuesta a lo que sucedió en junio. Se observaron grandes diferencias entre los desvíos a 20 con respecto a 30 m de altura de vuelo, siendo estos últimos más altos en ambos tratamientos. Se observó que los desvíos en todas las versiones de todas las alturas de vuelo son mayores que las medidas a campo para t12 se observan en los cuadros 7, 8, 9 y 10, sin embargo, para el t6 ocurre que las versiones tienen desvíos menores que la medida de regla a campo.

Cuadro No. 9. Número de observaciones, media y desvío de las medidas regla para cada tratamiento en octubre.

	octubre	
	T6	T12
n	45	45
Media (cm)	6,77	12,5
Desv. estándar	13,8	6,56

n= número de casos; Desv= desvío; T6= tratamiento remanente 6 cm; T12= tratamiento 12 cm remanente.

Tanto para el coeficiente de correlación y r2 se obtuvieron resultados similares para ambos tratamientos y alturas de vuelo excepto para el t12 a 30 metros que es considerablemente más bajo. Cabe resaltar que en los vuelos a 20 metros se obtuvieron los mejores valores.

Cuadro No. 10. Promedio de altura (cm) estimada con la técnica de Mapping 3d para el tratamiento de octubre a nivel de parcela.

Tratamiento	octubre			
	T6		T12	
Altura de vuelo (m)	20	30	20	30
Fecha de vuelo	03-oct.	03-oct.	05-oct.	
Versión	V1	V1	V1	V1
Altura de regla (cm)	6,77		12,51	
n	45			
Media (cm)	7,23	10,46	19,79	34,83
Desv. estándar	8,45	10,45	11,28	28,97
Coef. correlación	0,72	0,65	0,72	0,23
R <sup>2</sup>	0,52	0,43	0,52	0,05
R <sup>2</sup> ajustado	0,51	0,41	0,51	0,03
P-valor	<0,0001	<0,0001	0,005	<0,0001
DSM y DTM (cm/pixel)	1,29	1,96	1,28	2,04
Ortho mosaico (cm/pixel)	0,65	0,98	0,64	1,02

T6= remanente 6 cm; T12= remanente 12 cm; V1= versiones de los modelos digitales; DSM= modelo digital de superficie; DTM= modelo digital del terreno.

En cada parcela se colocaron 45 puntos de muestreo de 30x30 cm y se tomaron 5 medidas de altura de regla por cada punto, totalizando 225 mediciones por parcela. Esto supera lo recomendado por Montossi (2013b); el cual sugiere que para obtener una correcta estimación de la altura de la pastura se requiere de 20 a 40 mediciones como mínimo. La ubicación de los puntos de muestreo se realizó siguiendo recomendaciones de la técnica de doble muestreo propuesta por Haydock y Shaw (1975). Se establecieron 5 puntos de escala y 9 repeticiones de cada uno. El criterio para definir los puntos de escala fue principalmente en base a la altura de la pastura. Los puntos de muestreo fueron distribuidos por toda la parcela intentado abarcar toda la variabilidad posible considerando las distintas zonas topográficas.

En cuanto a los resultados obtenidos en comparación a nivel de parcela se puede decir que los valores de los modelos en general mejoran si se analizan los datos a una escala más específica. Esto pudo deberse a un posible efecto de filtrado de datos extremos dentro de los cuadrados de 30x30 cm, ya que fuera de los mismos fue posible observar valores extremos negativos.

En particular, en junio se observó que para el tratamiento de menor altura (t6) la media estimada por el modelo a 20 m es de 5,7 cm ( $r^2$  0,55) y a 30 m de 5,25 cm ( $r^2$  0,48), siendo estos valores muy próximos al valor de regla (8,32 cm). Como se observa no existió diferencias para ese tratamiento a distintas alturas de vuelo. Sin embargo, cuando se analizan los valores para el tratamiento de mayor altura de la pastura (t12), sucede que los modelos subestimaron el valor de regla y el valor del tratamiento de menor altura de pasto (t6). Existiendo una mínima diferencia entre las alturas de vuelo, no pudiendo identificar si dicha diferencia corresponde a un efecto de altura de vuelo o versión del modelo utilizado.

Por otro lado, en octubre sucedió que en el tratamiento de menor altura de la pastura (t6) se comporta de forma similar que, en junio para el mismo tratamiento, ya que los modelos tienden a estimar la altura de regla con bastante exactitud. Evidenciando de alguna forma, que a menor altura de la pastura los modelos tienden a describir mejor la realidad. Para este caso las correlaciones de las medias correspondientes a la altura de vuelo a 20 m y 30 m fueron de  $r^2$  0,52 y 0,43 respectivamente, siendo similares a las de junio, pero con un desvío estándar mayor (el doble). Para el t12 sucedió lo contrario a junio ya que los valores observados sobrestimaron el valor de regla para ambas alturas de vuelo, mostrando un mayor valor de sobrestimación para 30 m de altura que a 20 m, mostrando la primera diferencia dada por la altura de vuelo. Las correlaciones alcanzadas mostraron dicha diferencia, ya que para 20 m de altura el  $r^2$  es de 0,52, asemejándose a valores anteriormente mencionados, mientras que para 30 m de altura el valor de  $r^2$  es de 0,05.

### c. A nivel de punto de escala

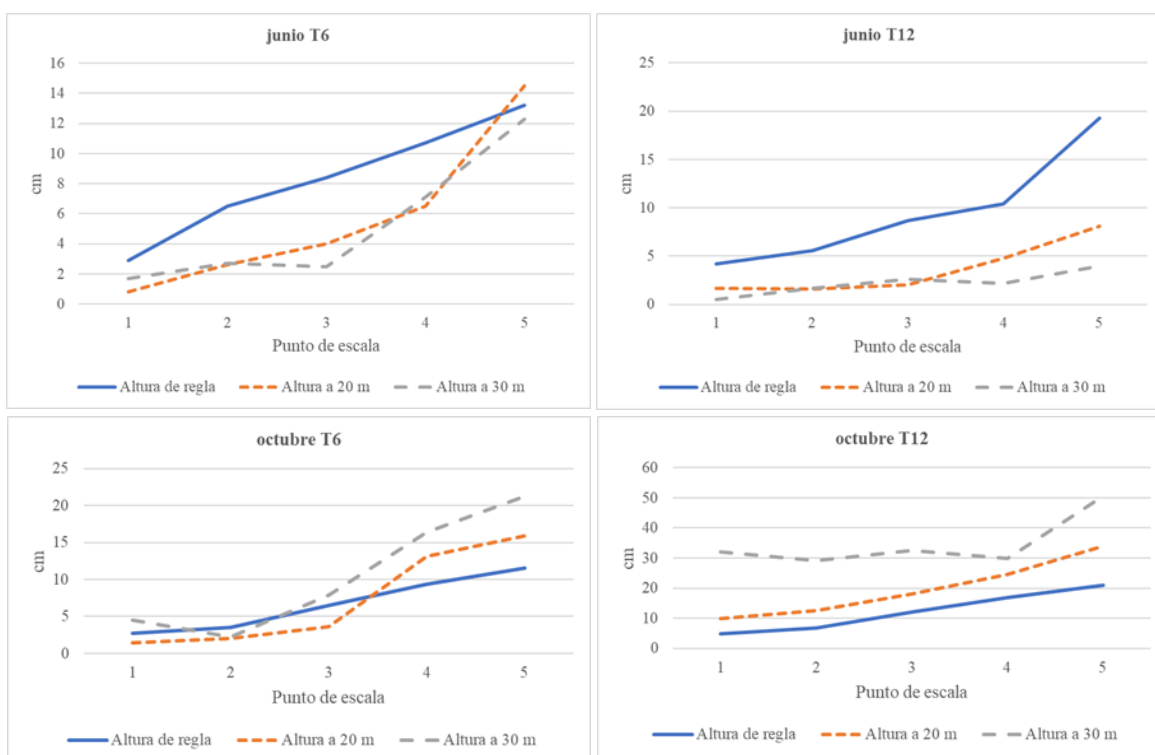
En este caso se agruparon los puntos de muestreo de acuerdo al punto de escala correspondiente, y se comparó la altura promedio de regla con el estimado promedio por el Mapping 3d. Se evaluó si los modelos digitales eran capaces de diferenciar o distinguir los distintos puntos de escala. Los valores analizados en esta sección corresponden a los evaluados a nivel puntos de muestreo con la diferencia que para este caso se ordenaron en base a los puntos de escala a los que pertenecían. De manera de poder visualizar lo anteriormente dicho se muestran los resultados a través de gráficas de líneas.

En general se observó que en junio los puntos de escala son subestimados sin importar altura de vuelo o tratamiento, situación totalmente opuesta lo que sucedió en octubre donde fueron sobreestimados los puntos de escala en casi todas las situaciones. Además, se puede apreciar que en todos los casos independientemente de la estación, tratamiento y altura de vuelo, los modelos siempre tienen un comportamiento lineal y creciente. Esto reflejó que los modelos lograron representar parcialmente los cambios de altura que se presentaron a lo largo de la escala utilizada con distintos grados de exactitud.



En cuanto a las alturas de vuelo, una vez más se observó que no existió un efecto de la misma en la estimación de los modelos.

Los modelos tendieron a representar (o captar) las variaciones de los puntos de escala excepto para el t12 en junio, ya que ambos modelos no detectaron diferencias de altura hasta el punto 3 de la escala. A partir del punto 3 el vuelo a 20 m captó mejor el cambio de altura ya que presentó una recta con una pendiente mayor que a 30 metros. Otra situación en la que uno de los modelos no acompañó el cambio de altura en la pastura fue en el t12 en octubre. Donde el vuelo a 30 metros no varió su estimación de altura hasta llegar al punto de escala 4, cabe destacar que realizó sobre estimación a lo largo de todo el rango trabajado.



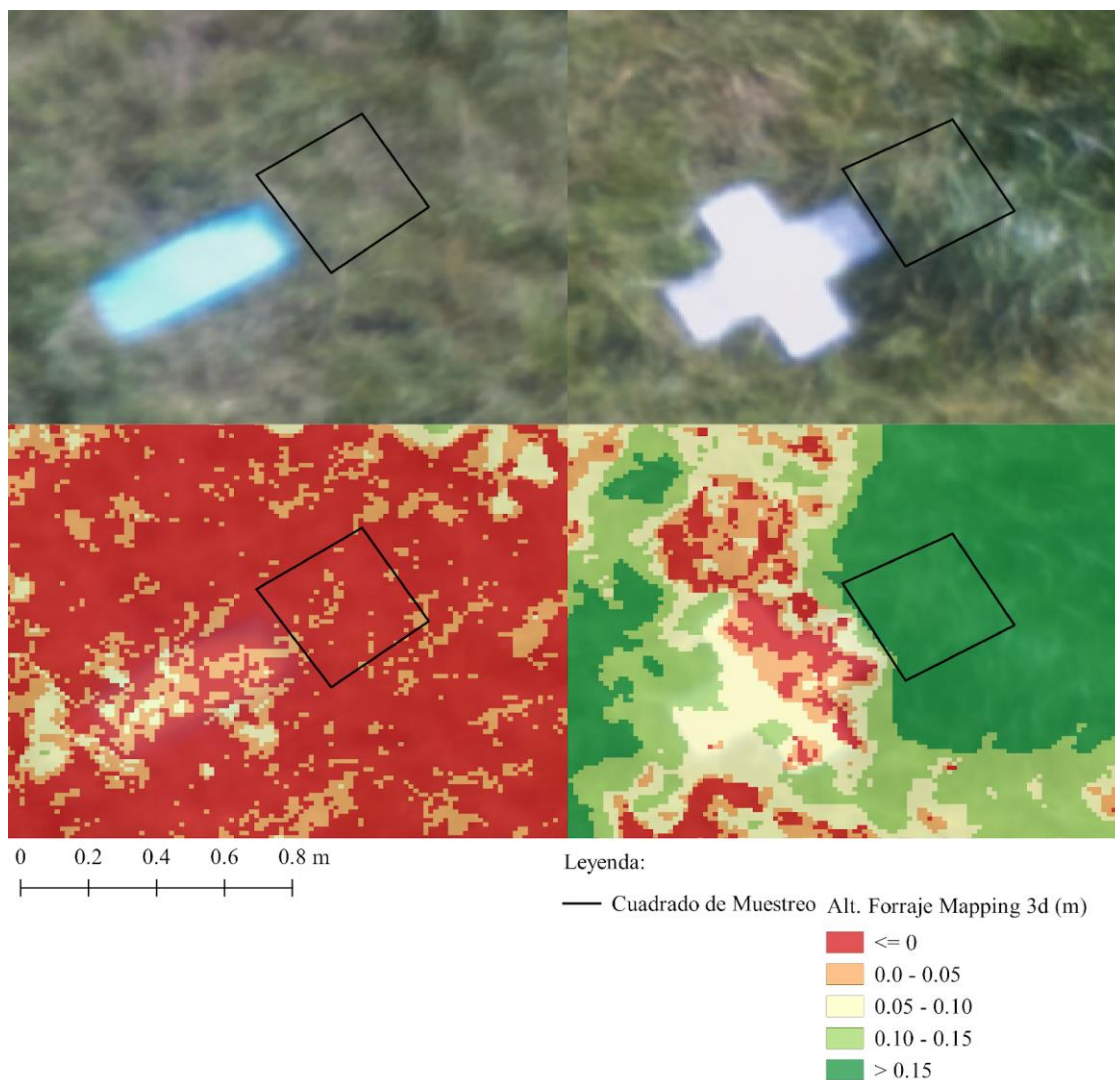
Muestra: la altura de regla, y las estimaciones de Mapping en los vuelos a 20 y 30 para cada fecha y tratamiento.

Figura No. 16. Altura de regla, Mapping a 20 y 30 metros de altura de vuelo para cada uno de los 5 puntos de escala.

Se siguió analizando los datos a nivel de puntos de muestreo, pero con aquellos valores más extremos, por lo tanto, se seleccionaron los datos correspondientes a los puntos de escala 1 y 5. Los datos reflejaron que para el punto de escala 1, el cual representa a la altura de pasto más baja, los modelos tendieron a subestimar el valor de regla mientras



que para el punto de escala 5, el cual representa la mayor altura de pasto, los modelos tendieron a sobrestimar el valor de regla. Esto se evidenció un comportamiento similar de los modelos a la hora de representar los tratamientos (t6 y t12).



Arriba los orto mosaicos y abajo sus correspondientes mapas de altura de pasto.

Figura No. 17. Puntos 1 y 5.

Para junio en ambos tratamientos y ambas alturas de vuelo, la mayoría de los datos se concentraron entre el cero y el mínimo valor observado a campo, para los dos puntos de escala; mientras que, en octubre, sucedió lo contrario. En general los datos para los dos tratamientos y las dos alturas de vuelo se concentraron a partir del valor máximo observado a campo hacia arriba, mostraron una sobrestimación del valor para ambos puntos de escala. Los valores correspondientes al punto de escala 1, presentaron más

porcentaje de datos negativos, mientras que para el punto de escala 5 no sucedió lo mismo, siendo escasos o nulos los valores de altura negativos. Por otro lado, en la mayoría de los casos sucedió que el mayor porcentaje de los datos se encontraron por debajo del valor máximo observado a campo en anexos 5 y 6.

Otro aspecto a destacar fue que los puntos de escala 1 fueron estimados como de menor altura que los puntos de escala 5, en concordancia con la realidad.

A partir de los histogramas se observaron las distribuciones de todos los valores correspondientes a cada pixel que componen los modelos digitales. Las distribuciones en junio presentaron un comportamiento más sesgado hacia los valores de regla obtenidos a campo en comparación a octubre donde la distribución de los valores no evidenció un sesgo claro.

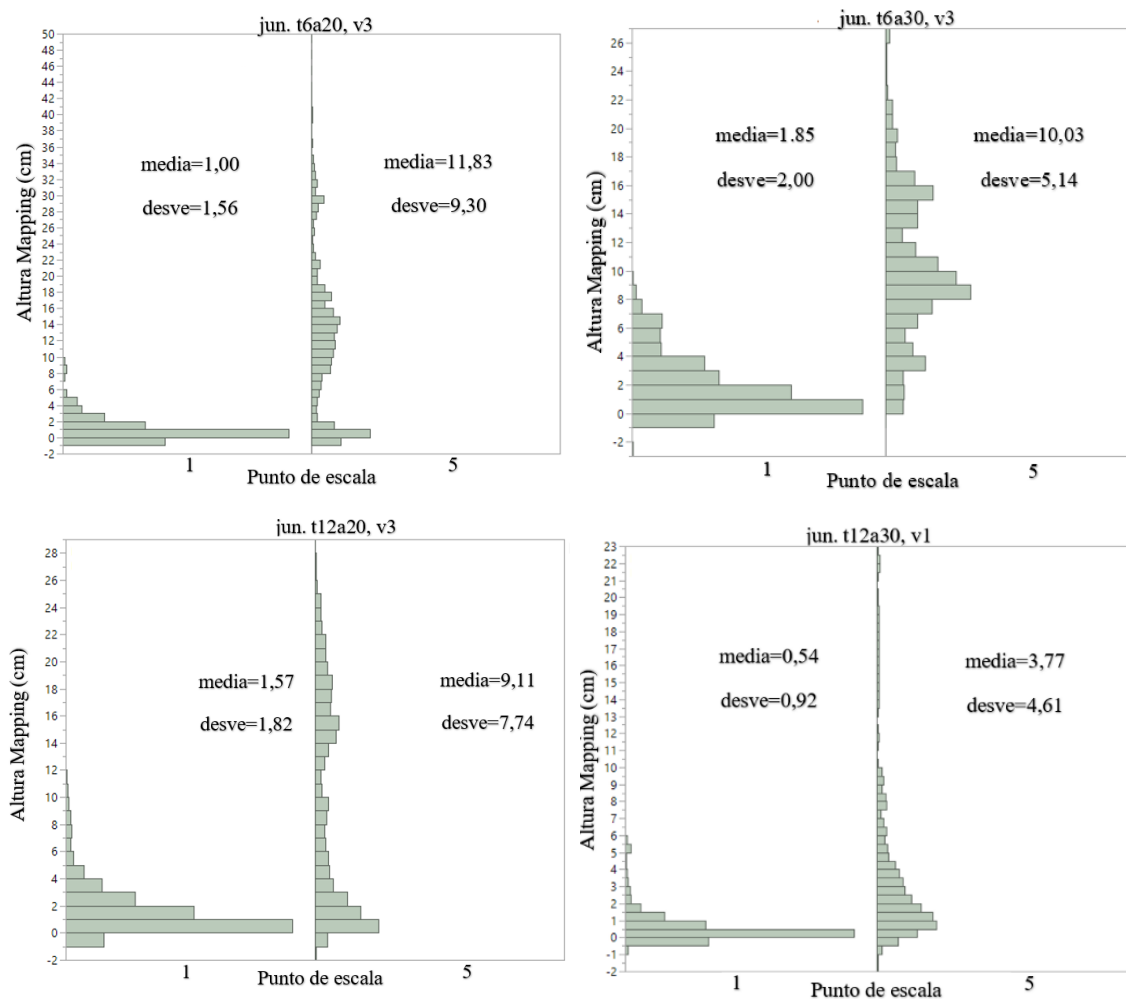


Figura No. 18. Histogramas correspondientes a los vuelos de junio.

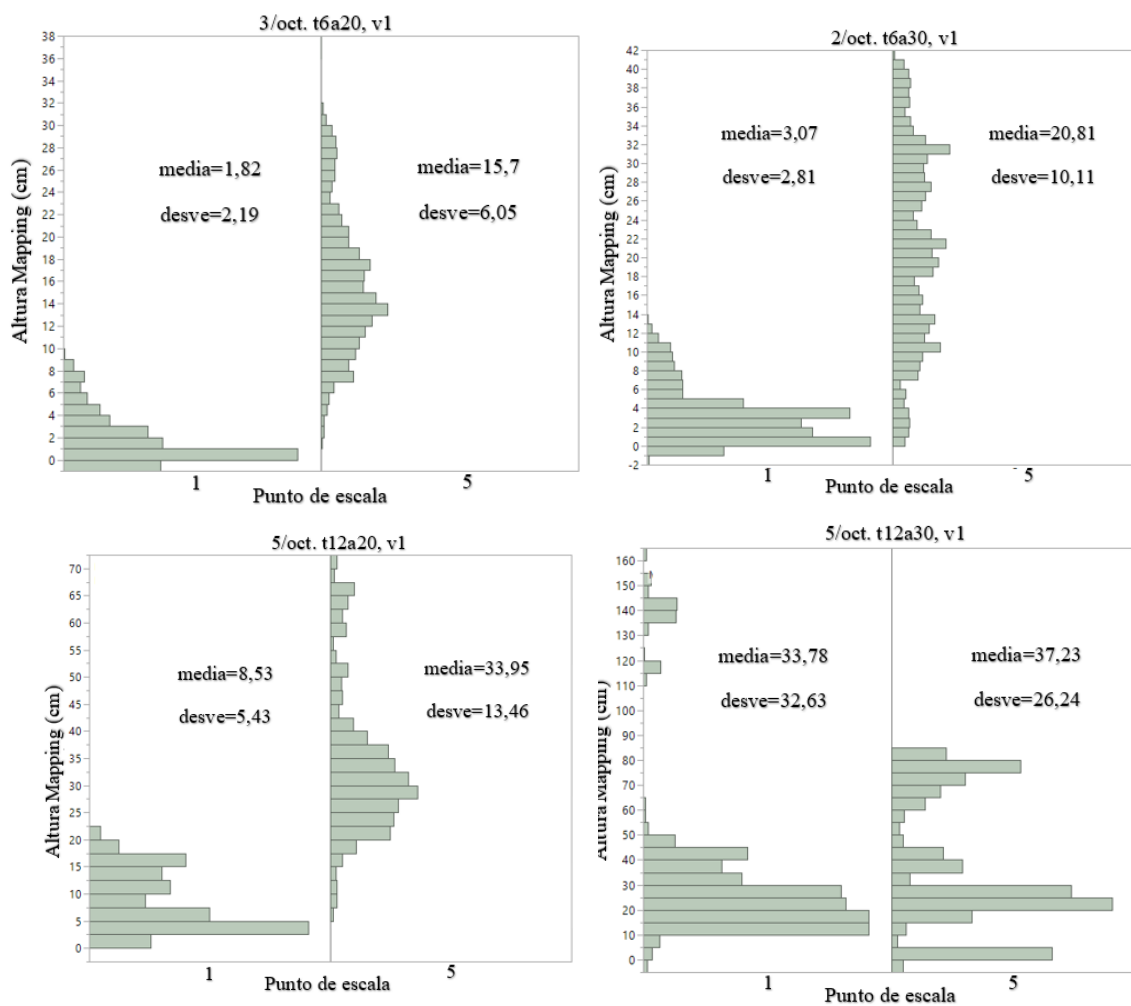


Figura No. 19. Histogramas correspondientes a los vuelos de octubre.

En términos generales al pasar de un análisis a nivel de parcela a un nivel más específico, fue posible afirmar que los valores mejoran considerablemente pero no se logra identificar un patrón claro del comportamiento de los datos en cuanto a estaciones, tratamientos, altura de vuelos y versiones de los modelos. Por esto se creyó necesario seguir analizando los datos e involucrar otras variables que podrían estar explicando el comportamiento de los modelos.

## 2. Árbol de regresión

Se evaluaron todos los factores involucrados al momento de realizar los modelos, para eso se realizó un análisis a través de un árbol de regresión en la figura 20. El árbol

muestra que a nivel general se produjo una sobrestimación muy pequeña de 0,5 cm con un desvío de 13 % al considerar todos los datos y variables involucrados.

La primera variable explicativa más importante resultó el umbral, la misma se divide en dos grupos discriminados. Uno conformado por los umbrales 1 y 2 los cuales sobrestimaron la altura real en un promedio de 7.0 cm, mientras que el otro grupo integrado por el umbral 0.9 subestimó la altura de regla en 3.8cm. Quedando así dos grupos bien diferenciados; por un lado, en la derecha del árbol se observó una tendencia a subestimar, y la de la izquierda tiende a sobrestimar. La rama de la derecha del árbol de clasificación y regresión (umbral=0,9) se diferenció además por tener promedios y desvíos menores que la rama izquierda (umbral=1 y 2). Estos dos grupos de variables explicativas distintas que comparten únicamente la altura de vuelo en el nivel 3.

El grupo del umbral 0.9 presento como variables explicativas a, *velvientomax* y *velvientoprom*.

En el grupo de los umbrales 1 y 2 se encontraron a las variables: radiación, versión, tratamiento y nuevamente versión. Este dato coincide con lo planteado con Pías (2017) de que el umbral correcto es menor a 1.

Dentro de la rama derecha (umbral=0,9) la primera variable de separación fue la velocidad máxima del viento, generando 2 grupos, el grupo con velocidades de viento máxima mayores o iguales a 14.5 m/s y el otro grupo integrado por velocidades menores a 14.5 m/s. El grupo de menores velocidades de viento tuvo mayores promedios de sobrestimación que en el grupo de mayores velocidades, siendo este un resultado inesperado. El nodo de mayor velocidad de viento ( $\geq 14.5$ ) se dividió en 2 grupos de acuerdo a velocidad del viento promedio. En este caso se produjo una sobreestimación con viento mayores o iguales a 8 m/s, sin embargo, con vientos menores a 8m/s subestimaron a la altura real. Dentro del grupo de velocidad de viento menor a 8m/s surgió como variable discriminante la altura de vuelo, generando dos grupos discriminados. Estos se separaron de acuerdo a las alturas de vuelo, 20 y 30m, subestimando en ambos casos. A menor altura de vuelo se observó un menor promedio de subestimación, pero un mayor desvío al comparar con los vuelos de mayor altura.

Por otro lado, la rama de la izquierda formada por los umbrales 1 y 2, tuvo como primera variable discriminatoria la radiación, produciendo 2 grupos bien diferenciados. El grupo de menor radiación ( $< 300 \text{ w/m}^2$ ) con una subestimación de 0.97cm, y otro de mayor radiación ( $\geq 300 \text{ w/m}^2$ ) con sobreestimaciones de 10 cm.

Dentro de los de mayor radiación ( $\geq 300 \text{ w/m}^2$ ) el modelo presentó a la versión como variable discriminatoria, conformando 2 grupos, uno formado por las versiones 1 y 3 y el otro por la versión 2. Ambos grupos sobrestimaron la altura real, siendo la versión 2 el grupo que presenta el menor promedio (2.6 cm) contra las versiones 1 y 3 (11.8 cm).

A partir del grupo correspondiente a las versiones 1 y 3 surgió como variable de separación la altura de vuelo. Definiendo por un lado los vuelos a 30 m y por otro los vuelos a 20 m. Los vuelos a menor altura presentaron menor promedio de la altura estimada (9.1 cm) en comparación con los de mayor altura (14.4 cm), tratándose de sobrestimaciones en ambos casos.

A su vez el nodo que integró a la mayor altura de vuelo se separó en base a los tratamientos estudiados. El tratamiento que presentaba mayor altura de pasto tiene mayor promedio de sobre estimación y también presentaba mayor variabilidad que se observó en el mayor desvío comparado con el tratamiento de menor altura de pasto.

Por último, la variable versión fue encontrada como variable discriminante, pero en este caso separando la versión 1 y 3 en grupos diferentes. Siendo la versión 3 el grupo que presentó un mayor valor de sobre estimación y desvío en comparación a la versión 1. Igualmente se consideró que en el conjunto de datos evaluados dicha variable tiene un poder discriminante mucho más bajo que el resto.

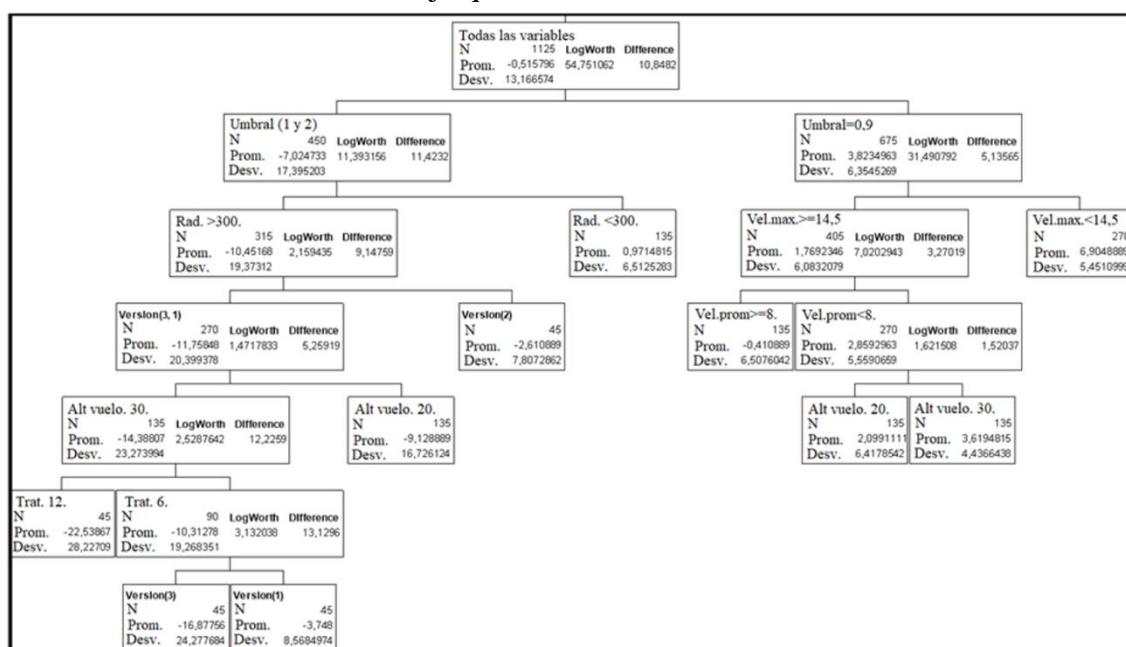


Figura No. 20. Árbol de partición de la regresión.

El árbol de regresión permitió analizar todas las variables en su conjunto e identificar al umbral como la variable más importante en la obtención de los resultados. Cuando se exigió al UAV que capturara la imagen en determinada posición con bajo margen de error (menor umbral), el viento apareció como la primera variable que afecta la obtención de buenos resultados. Sin embargo, cuando el margen de error permitido es mayor (mayor umbral), el viento no apareció como variable explicativa.

### 3. Discusión general de la metodología Mapping 3d: como estimador de la altura de la pastura

La técnica de Mapping 3d en comparación a otras técnicas tradicionales o actuales no es destructiva ya que no implica corte directo de la pastura (t Mannetje, citado por Mendoza y Lascano, 1986), por otro lado, se considera que es una técnica no invasiva como lo puede ser el C-DAX (C-DAX Systems Ltd, Palmerston North, Nueva Zelanda), el cual requiere de un contacto directo con la pastura. Otra característica del Mapping 3d es que no es una técnica laboriosa, no se requiere de bastante tiempo para la medición obteniendo un gran número de muestras en poco tiempo, no va acompañado de técnicas de laboratorio laboriosas y tiene mínima implicación manual permitiendo reducir el error del operador.

Según Cangiano (1997) la medición con altura de regla es más exacta en pasturas cortas, densidad uniforme y composición botánica simple. El Mapping 3d tuvo un comportamiento similar al mencionado por Cangiano (1997) para la regla, ya que se obtuvieron mejores resultados en pasturas monoespecíficas en comparación a los obtenidos en campo natural y a su vez el Mapping fue más exacto en las estimaciones cuando la pastura presentaba menor altura.

Para la técnica de Mapping 3d se requirió mayor número de fotos y un consumo de batería levemente mayor con respecto a la metodología de estacas, sin embargo, permitió cubrir una mayor extensión y brinda una visión unificada del área bajo estudio.

Con respecto a dicha metodología existen trabajos similares, pero tienen diferencias metodológicas y/o de materiales utilizados, que se muestran a continuación.

Se utilizó una cámara RGB de 8 MP ya que se obtuvieron mejores resultados que con la cámara NGB en la experiencia de enero. Dandois y Ellis (2013), Bending et al. (2014), Cunliffe et al. (2016), usaron cámaras RGB, pero de distintas resoluciones 16-12-10 MP respectivamente, tratándose de cámaras de mayor capacidad a la utilizada. Rowbotton (2015) usó una cámara RGB modificada para obtener NIR (rojo e infrarrojo cercano). En el caso del solapamiento, Cunliffe et al. (2016) fijaron 70% en sentido longitudinal y 65% en el lateral, siendo ambos similares al 70 % utilizado. La única fecha en la que se usó una superposición de 60% no fue posible realizar los modelos digitales correspondientes. No se puede afirmar que la superposición fue la única causa.

Los trabajos revisados tienen distintos criterios para marcar los lugares en los que tomar las imágenes. Cunliffe et al. (2016) utilizaron un criterio de velocidad y tiempo para disparar la cámara, la velocidad fue regulada para que dos fotos consecutivas tuvieran una separación entre sí de 2.5 segundos. En este caso se realizó la captura de las imágenes

similar al resto de los trabajos citados en el que usan aplicaciones o programas que determinan el sitio de cada toma fotográfica y usan las coordenadas geográficas para disparar las fotos. Debe considerarse que se estableció un umbral para controlar el error de posicionamiento del GPS del dron lo que permitió cierta flexibilidad para completar los recorridos.

La posición y sistema de sujeción de la cámara apuntando directamente al suelo no fue acertado. Dado que al trasladarse entre la ubicación de 2 fotos consecutivas el dron se inclinó hacia adelante, haciendo que las fotos puedan ser tomadas en momentos en que el cámara no esté apuntando directamente al suelo. Dichas fotos pueden ser tomadas en el momento incorrecto a causa del umbral, en los casos en que este sea igual o mayor a 1m. En este trabajo se utilizaron imágenes perpendiculares al suelo (imágenes nadir) al igual que todos los trabajos encontrados. A diferencia, de los trabajos citados no se utilizó estabilizador de cámara para lograrlo. Al no utilizar estabilizador puede suceder que el dron tome la foto antes de detenerse y la imagen no sea totalmente nadir, esto implicó que las imágenes no sean la más óptimas para generar los modelos correctamente. Gracias al uso de un estabilizador Cunliffe et al. (2016) sumaron imágenes no nadir, que denominaron convergentes para mejorar la calidad de los modelos obtenidos. El uso del estabilizador permitiría tomar fotos nadir en movimiento con las características buscadas.

La técnica de Mapping es menos dependiente del sistema de GPS con respecto a la metodología Estacas. Sin embargo, como norma general en la mayoría de los trabajos mencionados en la revisión se utilizan GPS diferenciales, ya sea para la generación de los modelos como para la evaluación de los mismos. Se utilizó un GPS común para georreferenciar los puntos de apoyo. Dichos puntos de apoyo fueron distribuidos con el criterio de abarcar toda la superficie estudiada, para representar la secuencia topográfica, y su ubicación, en lugares con escasa o nula vegetación con suelo descubierto. Ya que dichos puntos representan los puntos de suelo para la generación de los modelos digitales. El número fue de 6 puntos de apoyo en el caso de abril, para un único modelo que abarcaba 2 bloques, y en el caso de junio-octubre 4 puntos de apoyo por parcela (1 bloque tiene 3 parcelas). No se pudo identificar como afectan los puntos de apoyo en la generación de los modelos.

Las alturas de vuelos utilizadas en este trabajo son comparables con las mencionadas en los trabajos citados, a excepción de Bending et al. (2014) que volaron a 50 m de altura siendo casi el doble que el resto.

Se procuró volar siempre entorno al mediodía solar para mejorar las condiciones de radiación y luz. También se intentó volar en condiciones de bajo viento. No hay información en la bibliografía revisada para poder comparar, pero se realizan los vuelos con criterios similares.

Al agrupar los trabajos que realizan modelos digitales en estratos similares a la pastura, Cunliffe et al. (2016) quienes trabajaron entre otros estratos, a nivel de pasturas naturales de gramíneas y a Bending et al. (2014) en cebada. Rowbotton (2015) trabajó sobre pasturas, pero realiza estimaciones a partir de índices vegetales obtenidos a partir de una cámara RGB modificada para obtener imágenes con infrarrojo cercano.

Los modelos son obtenidos a partir de imágenes digitales, a excepción de Cunliffe et al. (2016) que realizaron el modelo digital de suelo a partir de LIDAR.

Los resultados para las correlaciones entre altura de pasto medida con regla con lo obtenido por el Mapping se encontraron dentro de los rangos citados en la bibliografía como son:  $r^2$  0,64 a 0,95 logrados por Cunliffe et al. (2016),  $r^2$  0,85 mencionados por Zahawi et al. (2015),  $r^2$  0,92 obtenido por Bending et al. (2014) y  $r^2$  0,27 a 0,66 por Rowbotton (2015).

Los resultados se obtuvieron con un equipo tecnológicos que no es el mejor que puede obtenerse en el mercado. Se cree que se pueden obtener mejores resultados con un dron y cámaras de mayores tecnologías.

Este trabajo se basó en comparar la altura de forraje medida a campo con el estimado por el modelo, no se cuenta con información de calidad para evaluar los modelos digitales en sí, ya sea el de suelo (DSM) o superficie (DTM). El modelo de suelo es el que es más evaluado en distintos trabajos, utilizando para esto GPS diferenciales o profesionales con margen de error de cm en la vertical. No se dispone con información para analizar o verificar los modelos dados los márgenes de error del GPS utilizado. Este error también se arrastra en la generación de los modelos, ya que se usa como insumo puntos de apoyo obtenidos con GPS común con errores del orden de metros en la vertical.

El muestreo de la pastura a campo se realizó con el criterio de distribuir todos los puntos de escala en toda la superficie de forma aleatoria. Se distribuyeron 9 repeticiones por cada uno de los 5 puntos de escala dentro de la zona de estudio. La superficie abarcada fue muy grande, por lo que el volumen de información generada impide ser manejada en el software GIS usado.

Para Cunliffe et al. (2016) no es bueno analizar datos de altura individual para evaluar la calidad del modelo de altura del pasto (CHM por su sigla en inglés) en ambientes de pastizal, la mejor metodología es por parches. La recopilación de datos de referencia apropiados con los que evaluar los CHM derivados de SfM es un gran reto y este problema se agrava por las dificultades para obtener la altura de la copa espacialmente referenciada con observaciones compatibles con los CHM de grano muy fino. Las hojas más altas de las plantas herbáceas son generalmente demasiado pequeñas y móviles para ser representadas en modelos de altura de la copa a partir de UAV con SfM y LIDAR. El volumen foliar es con frecuencia un predictor más preciso de la biomasa sobre el suelo



(AGB) que la altura máxima de la planta. Los fuertes coeficientes de determinación ( $r^2$  de 0,64 a 0,95) indican que a partir de los volúmenes del canopeo estimado se puede inferir la biomasa sobre el suelo, posteriormente la biomasa subterránea y las reservas de carbono asociadas.

En la revisión bibliográfica se mencionan otros programas para la realización y análisis de los modelos digitales, pero no se señalan grandes diferencias en la calidad de la información generada.

Alternativamente, se han propuesto enfoques híbridos combinando DSM derivados de SfM con DTM derivados de otras técnicas de estudio, tales como LIDAR (Dandois y Ellis 2013, Lisein et al. 2013, Dandois et al. 2015, Puliti et al. 2015) o GNSS observations (Zahawi et al., 2015). Tales enfoques híbridos son prometedores, aunque la escala de medida de los CHM derivados usando dichos enfoques está limitada por la exactitud del co-registro de los DSM derivados de SfM con los DTM.

En términos generales se obtuvo una sobrestimación de la altura de regla, y se piensa que la razón es que el DTM esté subestimado (más bajo de lo que debería ser) dada la acumulación de errores (precisión del GPS, errores en las fotos) y dificultades implícitas (clasificación en puntos suelo y no suelo). Los resultados erráticos de la tecnología, y la presencia de buenos resultados se intuye como una metodología promisoría para estimar la altura del forraje.

## V. CONCLUSIONES

Se cumplió con el objetivo de evaluar dos metodologías para estimar la altura de las pasturas a través de un UAV. Se logró con éxito la definición de los recorridos a realizar, los vuelos controlados con el dron, la captura de imágenes georreferenciadas y el procesamiento de datos.

Con la metodología de Estacas no se obtuvieron buenos resultados. Se realizó utilizando técnicas básicas, no contó con tiempo suficiente de programación, ajuste, calibración y pruebas para su desarrollo. A su vez, desde el punto de vista agronómico dicha técnica no cumple con el objetivo de minimizar el trabajo.

El potrero donde se realizó esta experiencia (“la crianza”) correspondiente a un campo natural restablecido no fue un buen escenario para realizar las primeras evaluaciones de las metodologías, ya que presenta gran diversidad de especies y estructuras vegetativas, generando así gran heterogeneidad tanto en el plano vertical como horizontal. Conformando un área de elevada complejidad en cuanto a la gran diversidad de alturas presentes, dificultando la obtención de resultados claros. Igualmente, fue de mucha utilidad para generar un primer acercamiento al problema y profundizar sobre el conocimiento del UAV.

Si bien puede ser una técnica más barata que otras, la misma requiere de mucho trabajo ya que implica la distribución y colocación de estacas dentro del área a evaluar y su correspondiente mantenimiento. A su vez, el número de estacas a ser colocadas depende de la heterogeneidad de la cobertura vegetal presente, dificultando la implementación de esta técnica para superficies extensas y ambientes complejos en cuanto a diversidad de especies.

La metodología de estacas es muy dependiente del sistema de GPS, ya que para poder obtener una correcta captura de la estaca se requiere de alta precisión en la información que se le entrega al UAV, que le sirve de insumo para determinar el momento preciso para capturar la imagen. De esta experiencia surgió la necesidad de identificar cada una de las repeticiones de los puntos de escala para las experiencias posteriores.

La metodología de Mapping 3d permitió generar estimaciones más exactas de la altura de las pasturas en comparación a la técnica de estacas. Los mejores resultados se obtuvieron con cámara a color (RGB). Esta técnica es menos dependiente del sistema de GPS para la captura de las imágenes ya que el error que se pueda producir en la ubicación y momento de captura de las mismas, se puede apaciguar con un alto % de solapamiento entre las imágenes ( $\geq 70$ ). Sin embargo, se requiere de mucha precisión del sistema GPS para la georreferenciación de los puntos de apoyo, los cuales son los que determinan la altura del terreno, así como también en la georreferenciación de determinados puntos de interés dentro del área estudiada.

En términos generales para el Mapping 3d se requiere de un mayor número de fotos y un consumo de batería levemente mayor en comparación con la metodología de Estacas, pero permite cubrir más extensión y brinda una visión unificada. Además, es una tecnología que requiere de alta capacidad de almacenamiento ya que genera un alto volumen de información.

No existió efecto de estación, tratamiento ni altura de vuelo en la estimación de la altura de la pastura por parte de los modelos. En cuanto a las distintas versiones generadas de los modelos tampoco se observó diferencias entre los mismos a nivel general.

Se identificó al umbral como la variable de mayor importancia a la hora de generar los modelos digitales. A su vez, el viento afectó una correcta obtención de los modelos cuando el umbral establecido era bajo, debido a que cuanto menor es el umbral menor es el error permitido en la ubicación de captura de la imagen.

A nivel general se concluye que, a más altura de vuelo, se obtienen menor cantidad de fotos, con menor consumo de batería, pero en consecuencia se perderá resolución en las fotos y en los modelos obtenidos.

La metodología de Mapping 3d en general logró diferenciar espacios (zonas) con diferentes alturas de forraje con distinto comportamiento. Incluyendo todas las variables los modelos digitales demuestran ser exactos ya que sobrestiman en 0,52 cm el valor de regla, pero con un desvío del 13 % mostrando baja precisión. Sin embargo, cuando se modifica el umbral se observa dos comportamientos contrastantes. Por un lado, con umbral de 0,9 los modelos tienden a subestimar el valor de regla en 3,82 cm y un desvío de 6,4 %, mostrando una mejora en la precisión con respecto al promedio general. Por otro lado, cuando se aumenta el valor del umbral se disminuye la precisión y la exactitud ya que se obtiene una sobrestimación de 7,0 cm y un desvío de 17,4 %.

A partir de los UAV de bajo costo se pueden producir buenos resultados en cuanto a estimaciones de altura a través de los modelos digitales (Cunliffe et al., 2016). A su vez para la aplicación de la técnica de Mapping no se requiere de técnicas laboriosas, no es destructiva ni invasiva por lo que configura como una técnica prometedora.

Por otro lado, a partir de la experiencia generada en este trabajo se cree pertinente realizar una serie de comentarios acerca de las posibles mejoras que puedan hacerse en futuros trabajos relacionados a esta temática.

En primer lugar, en cuanto a la superficie a evaluar, la misma debería ser a nivel de micro parcela para poder generar un ambiente más controlado donde se puedan identificar claramente qué factores puedan estar incidiendo en los resultados.

La metodología de Mapping 3d se puede mejorar si se mejora la calidad del modelo de suelo. Para esto se presentan dos formas de lograrlo, realizar el modelo Mapping 3d sin vegetación viva o con otro instrumento más adecuado para ello como el láser LIDAR, el cual es utilizado en otros trabajos (Cunliffe et al., 2016).

Es importante considerar la precisión al momento de la georreferenciación a través de los instrumentos a utilizar (cámara, GPS y UAV) tanto para la generación como evaluación de los modelos digitales.

En futuros trabajos se debería considerar incluir en la evaluación del Mapping 3d la medición de densidad o volumen de las pasturas a través de algún índice de vegetación como puede ser el NDVI (Dandois y Ellis, 2010). Así como también, medir o controlar otras fuentes de error que aparecen mencionadas en la bibliografía como son (%H del aire, contenido de agua de la planta, presencia de material vegetal muerto, etc.) para evaluar su impacto.

Se cree que esta tecnología tiene un gran potencial como herramienta para la investigación. Los mapas que se obtienen como resultado del Mapping se podrían vincular con otros sensores que monitorean la actividad bovina como el presentado por Olivera et al. (2010) y de esta forma evaluar el comportamiento animal.

De acuerdo al alto volumen de información que genera el Mapping 3d se visualiza como alternativa, la posibilidad de realizar el estudio en ciertas zonas dentro de un área siguiendo la metodología de otras herramientas como el plato de levante y el c-dax.

Fue pertinente realizar comentarios con respecto a la adquisición de las fotos y la generación de los modelos digitales.

Con respecto al tiempo de adquisición y al espacio (almacenamiento de información) que requieren las misiones del UAV, se observó que están influenciadas por la altura de vuelo al mantener las demás configuraciones de vuelo fijas como el solapamiento. La altura de vuelo afecta principalmente la cantidad de fotos que se obtendrán por cada misión realizada y por ende el número de fotos a procesar para la generación de los modelos. El tiempo para adquirir las fotos con el UAV ronda los 8 minutos para los vuelos a 20 metros de altura mientras que para el vuelo a 30 metros llevo entre 3-4 minutos. Otro factor que modificó, pero en menor cuantía fue el umbral, al aumentar el umbral el tiempo total de adquisición bajo levemente.

La memoria ocupada por las fotos fue sustancialmente diferente según la altura de vuelo, en términos promedio para los vuelos de junio y octubre a 20 metros se usaron el equivalente a 1.91 GB/ha, 2.5 veces más que para los vuelos a 30 metros que requirieron

0,74 GB/ha. Considerando todos los vuelos realizados y procesados (enero, abril, junio y octubre) sin separar por altura de vuelo el promedio fue 1,16 GB/ha.

El espacio requerido para el procesamiento en QGIS tuvo el mismo comportamiento, los vuelos a 20 metros requirieron más espacio en el disco duro que los vuelos a 30 metros, pero la diferencia es un tanto menor, aproximadamente 1,6 veces más (5,26 vs 3,1 GB/ha). El promedio para todos los vuelos fue 3,91 GB/ha.

El tiempo requerido para procesar las imágenes, obtener los modelos digitales y el orto mosaico en el AgiSoft Photoscan, es el factor que muestra menos diferencia entre las distintas alturas de vuelo, teniendo como promedio unas 3 horas por parcela (0,2 ha). Algo que es de destacar, los vuelos de abril fueron sobre 2 bloques, que corresponden a 6 parcelas (1,2 ha). Sin embargo, los tiempos de procesamiento no fueron 6 veces más altos, si no que fueron aún mayores. Esto evidencia una limitante con respecto al procesamiento de grandes áreas ya que insumiría mucho tiempo la generación de los modelos.

Si pretende realizar un seguimiento entre distintas fechas, se debe guardar por lo menos el orto mosaico y el modelo de altura de pasto, y como respaldo ante posibles pérdidas los modelos de altura o las fotos para re generarlos.

## VI. RESUMEN

Los recursos forrajeros para los sistemas productivos en el Uruguay representan la mayor fuente de alimento para el ganado. Los métodos tradicionales de medición del forraje no han sido adoptados por las dificultades que presentan. Los vehículos aéreos no tripulados ofrecen una opción alternativa para la obtención de información geoespacial precisa de forma accesible. En base a que la altura de la pastura presenta una relación positiva y lineal con la disponibilidad de materia seca. En esta tesis se propone una primera aproximación a la estimación de altura de las pasturas a partir de un UAV, integrando dos áreas de conocimiento, ingeniería en computación y agronomía. El objetivo principal fue determinar el potencial de los modelos digitales de vegetación obtenidos a partir de imágenes capturadas por un UAV, como medio para estimar la altura de las pasturas con precisión. Las evaluaciones se llevaron a cabo en La Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la Republica, Uruguay. El trabajo consto de tres etapas, las cuales describen el proceso por el cual se atravesó, las mismas se denominaron, calibración, ajuste metodológico y experimento central. La calibración permitió comprender el funcionamiento del dron, como también detectar y corregir errores de todo tipo en el sistema, a través del simulador o vuelos reales a menor escala. El ajuste metodológico, consistió en avaluar dos metodologías propuestas para estimar la altura de la pastura, denominadas Estacas y Mapping 3d; así como también evaluar la performance del UAV, permitiendo realizar una primera aproximación a la generación de los modelos digitales, el procesamiento y análisis de datos. El Mapping 3d a partir de cámara RGB R2 de 0,56, resulto ser la metodología con la cual se obtuvieron mejores resultados, por eso se decidió profundizar en dicha técnica en la etapa denominada experimento central. Dicho experimento se realizó sobre una pradera de festuca de segundo año. Los vuelos se realizaron a 20 y 30 metros de altura, sobre dos tratamientos de altura remanente, en dos estaciones (otoño y primavera). No encontrando efecto en la combinación de dichas variables. El Mapping 3d se evaluó en diferentes escalas espaciales; a) a nivel de parcela no se observan buenos resultados, b) a nivel de punto de muestreo en junio se obtuvieron R2 con la regla de 0,18 a 0,55, mientras que para octubre fueron de 0,05 a 0,52, y c) a nivel de punto de escala permitió observar el comportamiento de los modelos en diferentes alturas evidenciando que los modelos digitales captan dicha variabilidad sobre todo en los puntos extremos. A nivel general el mapping 3d sobreestimo la altura de forraje en 0,5 cm con un desvío de 13 % al considerar todas las variables involucrados. El error de posicionamiento de captura de imagen (umbral), es la variable explicativa de mayor importancia para obtención de buenos resultados. Al exigir menor umbral ( $<1$ ), es la velocidad del viento la variable que más afecta, subestimando la altura de regla en 3,8 cm. Al permitir mayor error en el posicionamiento (umbrales  $\geq 1$ ) surgen otras variables, (radiación, versión de los modelos y tratamientos), y se sobrestima la altura en 7,0cm.

Palabra clave: Altura de forraje; UAV; Modelo digital; Mapping 3d; Pastura.

## VII. SUMMARY

Forage resources for productive systems in Uruguay represent the largest source of food for livestock. Traditional methods of forage measurement have not been adopted because of the difficulties they present. UAVs offer an alternative option for obtaining accurate geospatial information in an accessible way. On the basis that the height of the pasture presents a positive and linear relationship with the availability of dry matter. In this thesis a first approximation to the height estimation of the pastures from a UAV is proposed, integrating two areas of knowledge, computer engineering and agronomy. The main objective was to determine the potential of digital vegetation models obtained from images captured by a UAV, as a means to accurately estimate the height of pastures. The evaluations were carried out at the Mario A. Cassinoni Experimental Station (EEMAC) belonging to the Faculty of Agronomy of the University of the Republic, Uruguay. The work consisted of three stages, which describe the process by which it was crossed, they were named, calibration, methodological adjustment and central experiment. The calibration allowed to understand the operation of the drone, as well as to detect and correct errors of all kinds in the system, through the simulator or real flights on a smaller scale. The methodological adjustment consisted in evaluating two proposed methodologies to estimate the height of the pasture, called Stakes and Mapping 3d; as well as evaluating the performance of the UAV, allowing a first approximation to the generation of digital models, the processing and analysis of data. The 3d Mapping from a RGB R2 camera of 0.56, turned out to be the methodology with which the best results were obtained, so it was decided to deepen this technique in the stage called the central experiment. This experiment was carried out on a fescue meadow of the second year. The flights were made at 20 and 30 meters high, on two treatments of remaining height, in two seasons (autumn and spring). Not finding an effect in the combination of said variables. The 3d mapping was evaluated in different spatial scales; a) at the plot level no good results are observed, b) at the sampling point level in June R2 was obtained with the rule of 0.18 to 0.55, while for October they were from 0.05 to 0.52, and c) at the scale point level, it was possible to observe the behaviour of the models at different heights, showing that the digital models capture this variability, especially in the extreme points. In general, 3d mapping overestimated forage height by 0.5 cm with a deviation of 13% when considering all the variables involved. The image capture positioning error (threshold) is the most important explanatory variable for obtaining good results. By requiring a lower threshold ( $<1$ ), wind speed is the variable that most affects, underestimating the height of the rule in 3.8 cm. By allowing greater positioning error (thresholds  $\geq 1$ ) other variables arise, 0 (radiation, model version and treatments), and the height is overestimated by 7.0 cm.

Keyword: Height of forage; UAV; Digital model; Mapping 3d; Pasture.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Acosta, G.; Ayala, A.; Acosta, A. 2006. Comportamiento en pastoreo de ganado lechero sobre una pastura gramínea de *Dactylis glomerata*, pastoreada en distintas edades de rebrote. *Revista Argentina de Producción Animal*. 26 (1):23–30.
2. Adler, P.; Raff, D.; Lauenroth, W. 2001. The effect of grazing on spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia*. 128: 465-479.
3. Aguerre, M.; Cajarville, C.; La Manna, A.; Cavestany, D.; Mendoza, A.; Mattiauda, D.; Carriquiry, M.; Repetto, J.; Meikle, A.; Chilbroste, P. s.f. Estrategias de alimentación de vacas lecheras en pastoreo: ¿Qué hemos aprendido de los sistemas comerciales y qué hemos generado desde la investigación en Uruguay? s.n.t. 55 p.
4. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echeverría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. (en línea). Montevideo, MGAP. Esc 1:1.000.000. Consultado feb. 2016. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/1619\\_carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_del\\_uruguay\\_1.1.000.000\\_imprimir\\_a0\\_0.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf).
5. Angelone, A.; Toledo, J.; Burns, J. 1980. Herbage measurement in situ by electronics. 1. Multiple-probe type capacitance meter; a brief review. *Grass and Forage Science*. 35:25-33.
6. Anthony, D.; Elbaum, S.; Lorenz, A.; Detweiler, C. 2014. On crop height estimation with UAVs. (en línea). Lincoln, Nebraska, University of Nebraska. Department of Computer Science and Engineering. 8 p. Consultado jul. 2016. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/287906358\\_On\\_crop\\_height\\_estimation\\_with\\_UAVs](https://www.researchgate.net/publication/287906358_On_crop_height_estimation_with_UAVs)
7. Arias, J.; Dougherty, C.; Bradley, N.; Cornelius, P.; Lauriault, L. 1990. Structure of tall lescue swards and intake of grazing cattle. *Agronomy Journal*. 82: 545-548.
8. Assuero, S.; Escuder, C.; Norbis, H. 1989. Comparación de dos metodologías para estimar la disponibilidad de forraje en parcelas pastoreadas. *Revista Argentina de Producción Animal*. 9 (2): 115-119.



9. Bailey, D.; Gross J.; Laca, E.; Rittenhouse, L.; Coughenour, M.; Swift, D.; Sims, P. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management*. 49: 386-400.
10. Bending, J.; Bolten, A.; Bennerts, S.; Broscheit, J.; Eichfuss, S.; Bareth, G. 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imagig. *Remote Sensing*. 6: 1-18.
11. Bisio, A.; Larripa, M.; Galli, J.; Cangiano, C. 2001. Comparación de metodologías para estimar fitomasa aérea en pasturas cultivadas. *Revista Argentina de Producción Animal*. 21 (1): 101-103.
12. Brummer, J., Nichols, J.; Engel, R.; Eskridge, K. 1994. Efficiency of different quadrat sizes and shapes for sampling standing crop. *Journal of Range Management*. 47: 84-89.
13. Burgueño, J. 1997. Evaluación de un medidor de materia seca de forraje por capacitancia. III. Calibración. (en línea). Montevideo, PROVA. pp. 1-3. Consultado ago. 2017. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/268348394\\_PF\\_08\\_EVALUACION\\_DE\\_UN\\_MEDIDOR\\_DE\\_MATERIA\\_SECA\\_DE\\_FORRAJE\\_PO\\_R\\_CAPACITANCIA\\_I\\_III\\_CALIBRACION](https://www.researchgate.net/publication/268348394_PF_08_EVALUACION_DE_UN_MEDIDOR_DE_MATERIA_SECA_DE_FORRAJE_PO_R_CAPACITANCIA_I_III_CALIBRACION)
14. Cangiano, C. 1996a. Consumo en pastoreo. Factores que afectan la facilidad de cosecha. *In*: Cangiano, C. A. ed. *Producción animal en pastoreo*. Balcarce, INTA. pp. 41-60.
15. \_\_\_\_\_. 1996b. Métodos de medición de la fitomasa aérea. *In*: Cangiano, C. A. ed. *Producción animal en pastoreo*. Balcarce, INTA. pp. 117-127.
16. \_\_\_\_\_.; Pece, M. 1997. Como evaluar la pastura. *In*: Cangiano, C. A. ed. *Producción animal en pastoreo*. Balcarce, INTA. pp. 237-258.
17. \_\_\_\_\_.; Brizuela, M. 2011. Cómo evaluar la pastura. *In*: Cangiano, C. A. ed. *Producción animal en pastoreo*. Balcarce, INTA. pp. 237-258.
18. Carvalho, P.; Ribeiro, H.; Poli, C.; De Moraes, A.; Delagarde, R. 2001. Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo. *In*: *Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia (38º., 2001, Piracicaba, Brasil)*. Anais. Piracicaba, Brasil, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz. pp. 853-871.

19. Cayley, J.; Bird, P. 1996. Techniques for measuring pastures; general principles. Pastoral and Veterinary Institute Hamilton. Technical Report series no. 191. 60 p.
20. Chilibroste, P. 1998. Fuentes comunes de error en la alimentación del ganado lechero en pastoreo: II. Balance de nutrientes. In: Jornadas Uruguayas de Buiatría (26as.), Congreso Latinoamericano de Buiatría (1998, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Centro Médico Veterinario Paysandú. pp. 8-12.
21. \_\_\_\_\_. 2009. Incorporación de las TIC's en el proceso de gestión, monitoreo y control de sistemas pastoriles. Montevideo, UdelaR.FA/UdelaR.Fcien/LART/CONAPROLE. 29 p.
22. \_\_\_\_\_.; Soca, P.; Mattiauda, D. 2011. Balance entre oferta y demanda de nutrientes en sistemas pastoriles de producción de leche: potencial de intervención al inicio de la lactancia. In: Jornadas Uruguayas de Buiatría. (39as.), Congreso Latinoamericano de Buiatría (15°. 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay, Centro Médico Veterinario Paysandú. pp. 91-97.
23. \_\_\_\_\_. 2015. ¿Carga o productividad individual? ¿Pasto o concentrado?: mitos y realidades en la intensificación de los sistemas de producción de leche en Uruguay. In: Jornadas Uruguayas de Buiatría (39as.), Congreso Latinoamericano de Buiatría (43as., 2015, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú, Uruguay. Centro Médico Veterinario de Paysandú. pp. 158-162.
24. Chuvieco, E. 2010. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Barcelona, Ariel. 73 p.
25. Cibils, A.; Brizuela, M. 2009. Tecnologías disponibles para el desarrollo de pastoreo de precisión en sistemas extensivos de pastizal. In: Congreso de la Asociación Argentina para el Manejo de los Pastizales Naturales (5o., 2009, Corrientes). Trabajos presentados. Corrientes, Argentina, s.e. pp. 81-89.
26. Cid, M.; Brizuela, M. 1998. Heterogeneity in tall fescue pastures created and sustained by cattle grazing. *Journal of Range Management*. 51 (6): 644-649.
27. Cunliffe, A.; Brazier, R.; Anderson, K. 2016. Ultra-fine grain landscape-scale quantification of dryland vegetation structure with drone-acquired

- structure from motion photogrammetry. *Journal of Remote Sensing of Environment*. 183: 129-143.
28. Dandois, J.; Ellis, E. 2010. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. *Remote Sensing*. 2: 1157-1176.
29. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environments*. 136: 259-276.
30. Demanet, R.; Canseco, C. 2006. Comparación de métodos indirectos de estimación de la disponibilidad de forraje en praderas permanentes del sur de Chile. In: Reunión Anual de la Sociedad Chilena de Producción Animal (31<sup>a</sup>, 2006, Temuco, Chile). Actas. Temuco, Chile, Universidad de La Frontera. Instituto de Agroindustria. pp. 23-50.
31. Do Carmo, M.; Soca, P.; Carriquiry, M.; Scarlatto, S.; Astessiano, A.; Genro, C.; Claramunt, M.; Espesandín, A. 2013. Oferta de forraje de campo natural y resultado productivo de los sistemas de cría vacuna del Uruguay: producción, uso y conversión del forraje aportado por campo natural. In: Seminario de Actualización Técnica: cría Vacuna (2013, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 97-114 (Serie Técnica no. 208).
32. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; Cardozo, G.; Balzarini, M. 2015. Ajuste de carga animal en base a oferta forrajera. (en línea). MGAP. DGDR. Cartilla técnica. s.p. Consultado feb. 2016. Disponible en [http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20Tacuarembó/Dia%20de%20campo%20manejo%20de%20carga%20en%20Basalto%20oct%202015/protocolo%20estimacion%20forraje%20y%20ajuste%20de%20carga%20Laura\\_Maxi.pdf](http://www.inia.uy/Documentos/Privados/INIA%20Tacuarembó/Dia%20de%20campo%20manejo%20de%20carga%20en%20Basalto%20oct%202015/protocolo%20estimacion%20forraje%20y%20ajuste%20de%20carga%20Laura_Maxi.pdf)
33. Fernández, H. 2005. Estimación de la disponibilidad de pasto. (en línea). s.l., Sitio Argentino de Producción Animal. 4 p. Consultado mar. 2016. Disponible en <http://www.produccion-animal.com.ar/>
34. Forbes, T.; Hodgson, J. 1985. The reaction of grazing sheep and cattle to the presence of dung from the same, or the opposite species. *Grass and Forage Science*. 40: 177–182.
35. \_\_\_\_\_. 1988. Researching the plant-animal interface. The investigation of ingestive behaviour in grazing animals. *Journal of Animal Science*. 66: 2369-2379.

36. Galli, J.; Cangiano, C.; Pece, M.; Rozsypalek, S.; Dichio, L. 1996. Efecto del peso vivo y de la altura de la pastura sobre las dimensiones del bocado en bovinos en pastoreo. I. Profundidad del Bocado. *Revista Argentina de Producción Animal*. 6 (1): 213-214.
37. García, J. 1995. Estructura del tapiz de praderas. Montevideo, INIA. 10 p. (Serie Técnica no. 66).
38. Geosoluciones, CL. s.f. Orto rectificación y mosaicos. (en línea). Santiago de Chile. s.p. Consultado nov. 2017. Disponible en <http://www.geosoluciones.cl/ortorectificacion-y-mosaicos/>
39. Gibb, M.; Ridout, M. 1988. Application of double normal frequency distributions fitted to measurements of sward height. *Grass and Forage Science*. 43: 131–136.
40. Gordon, I.; Benvenuti, M. 2006. Food in 3D: how ruminant livestock interact with sown sward architecture at the bite scale. *In*: Bels, V. ed. Feeding in domestic vertebrates: from structure to behaviour. Saint Genés-Champanelle, INRA. pp. 263-277.
41. Gregorini, P.; Gunter, S.; Bowman, M.; Caldwell, J.; Masino, C.; Coblenz, W.; Beck, P. 2011. Effect of herbage depletion on short-term foraging dynamics and diet quality of steers grazing wheat pastures. *Journal of Animal Science*. 89: 1824-3830.
42. 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.
43. Hirata, M. 2002. Herbage availability and utilization in small-scale patches in a Bahia grass (*Paspalum notatum*) pasture under cattle grazing. *Tropical Grasslands*. 36: 13-23.
44. Hobbs, N. 1996. Modification of ecosystems by ungulates. *Journal of Wildlife Management*. 60: 695-713.
45. Hodgson, J. 1985. The significance of sward characteristics in the management of temperate sown pastures. *In*: International Grassland Congress (15<sup>th</sup>., 1985, Kyoto, Japan). Proceedings. Kyoto, Japan. Science Council of Japan/Japanese Society of Grassland Science. pp. 63-67.

46. \_\_\_\_\_. 1990. *Grazing management: science into practice*. London, UK, Longman 203 p.
47. \_\_\_\_\_.; Illius, A. 1998. *The Ecology and Management of Grazed Ecosystems*. Wallingford, UK, CAB International. 466 p.
48. Holechek, J.; Pieper, R.; Herbel, C. 2004. *Range Management Principles and Practices*. 5<sup>th</sup>. ed. New Jersey, Prentice Hall. 600 p.
49. INALE (Instituto Nacional de la Leche, UY). 2014. Uruguay lechero. (en línea). Montevideo. 46 p. Consultado nov. 2017. Disponible en <http://inale.org/innovaportal/v/3204/4/innova.front/uruguay-lechero.html>
50. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2016. Programa nacional de lechería 2017-2020. Montevideo. 4 p.
51. Kemerer, A. 2011. Procedimientos para la delimitación de zonas de manejo mediante imágenes satelitales. Buenos Aires, INTA. pp. 1-2.
52. King, W.; Rennie, M.; Dalley, D.; Dynes, R.; Upsdell, M. 2010. Pasture mass estimation by the C-DAX pasture meter: regional calibrations for New Zealand. *In: Australasian Dairy Science Symposium (4<sup>th</sup>., 2010, ciudad, Australia)*. Proceedings. Christchurch, Australia, Lincoln University. pp. 233-238.
53. Laca, E.; Demment, M.; Winckel, J.; Kie, J. 1989. Comparison of weight estimate and rising-plate meter methods to measure herbage mass of a mountain meadow. *Journal of Range Management*. 42 (1): 71-75.
54. \_\_\_\_\_.; Ungar, M.; Seligman, N.; Demment, M. 1992. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. *Grass and Forage Science*. 47: 91-102.
55. \_\_\_\_\_.; Ortega, I. 1995. Integrating Foraging Mechanisms Across Spatial and Temporal Scales. *In: International Rangeland Congress (5<sup>th</sup>., 1995, Salt Lake City, Utah, USA)*. Proceedings. Salt Lake City, USA, Society for Range Management. pp. 204-215.
56. \_\_\_\_\_.; Lemaire, G. 2000. Measurement sward structure. *In: t Mannetje, L.; Jones, R. eds. Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*. Wallingford, CABI. pp. 103-121.

57. \_\_\_\_\_. 2008. Ganadería de precisión. *In*: Reunión Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur: Grupo Campos (17<sup>a.</sup>, 2008, Minas). Innovando para mantener su sustentabilidad y competitividad. Minas, INIA/SUL/ UdelaR. FA. pp. 75-77.
58. \_\_\_\_\_. 2009. New approaches and tools for grazing management. *Rangeland Ecology Management*. 62: 407-417.
59. LART (Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, AR). 2017. Sistema de seguimiento forrajero. (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado abr. 2017. Disponible en <http://larfile.agro.uba.ar/lab-sw/sw/gui/Inicial.page?reset-window-manager=true>
60. Lezama, F. s.f. La heterogeneidad espacial del campo natural en Uruguay. (en línea). *In*: Curso Producción Animal Sostenible en Pastoreo sobre Campo Natural. (2013, Minas, UY). Mesa de ganadería sobre campo natural. Montevideo, INIA. pp. 26-32. Consultado abr. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/libro\\_campo\\_natural\\_final\\_en\\_baja\\_0.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/libro_campo_natural_final_en_baja_0.pdf)
61. López, J.; González, A. s.f. Measuring grass yield by non’destructive methods: a review. (en línea). Coruña, España, Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (CIAM). 21 p. Consultado jul. 2016. Disponible en <http://ciam.gal/uploads/publicacions/294archivo.pdf>
62. McGilloway, D.; Cushnahan, A.; Laidlaw, A.; Mayne, C.; Kilpatrick, D. 1999. The Relationship Between Level of Sward Height Reduction in a Rotationally Grazed Sward and Short: term Intake Rates of Dairy Cows. *Grass and Forage Science*. 54: 116–126.
63. Mannetje, L. ‘t 2000. Measuring biomass of grassland vegetation. *In*: ‘t Mannetje, L; Jones, R. eds. Field and laboratory methods for grassland and animal production research. Wallingford, CABI. pp. 151-178.
64. Matches, A. 1992. Plant-response to grazing: a review. *Journal of Production Agriculture*. 5: 1-7.
65. Mendoza, P.; Lascano, P. 1986. Mediciones en la pastura en ensayos de pastoreo. *In*: Reunión de Trabajo sobre Evaluación de Pasturas con Animales: alternativas Metodológicas (1<sup>a.</sup>, 1984, Lima, Perú). Memorias. Calí, CIAT. pp. 143-165.

66. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2016. Anuario estadístico agropecuario 2016. (en línea). Montevideo. 198 p. Consultado jul. 2017. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/exportaciones\\_e\\_importaciones\\_pesqueras\\_por\\_ano\\_-\\_anuario\\_diea\\_2016.pdf](http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/exportaciones_e_importaciones_pesqueras_por_ano_-_anuario_diea_2016.pdf)
67. Millapán, L. 2006. Estimación de biomasa área en pasturas templadas de sistemas lecheros pastoriles. Tesis Especialista en Producción Lechera en Sistemas Argentinos. Buenos Aires, Argentina. FAUBA. 63 p.
68. Moliterno, E. 1997. Estimación visual de la disponibilidad de forraje en pasturas: (II). La altura de la pastura como estimador de su producción instantánea. Cangüé. no. 10: 27-32.
69. Mónaco, N.; Rosa M.; Santa, V.; Aufrán, V.; Heguiabehere, A. 2015. Utilización de estimadores para determinación de biomasa a campo. European Scientific Journal. 11 (33): 296-310.
70. Montossi, F.; Pravia, M.; Dighiero, A.; Porcile, V.; Gutiérrez, D.; De Barbieri, I. 2013a. Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. (en línea). Revista INIA. no. 34: 25-29. Consultado ago. 2017. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7057/1/revista-INIA-34-p.25-29.pdf>
71. \_\_\_\_\_. 2013b. Invernada de precisión; estimación de la disponibilidad de pasturas y forrajes en predios de GIPROCAR II: Ajuste del "Rising Plate Meter" para las condiciones de Uruguay. Montevideo, INIA. 168 p. (Serie Técnica no. 211).
72. Mursan, A.; Hughes, T.; Nicol, A.; Sugiura, T. 1989. The Influence of Sward Height on the Mechanics of Grazing Steers and Bulls. Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production. 49: 233–236.
73. Naroaka Enterprises, AU. s.f. Automatic pasture reader. (en línea). Victoria. s.p. Consultado oct. 2017. Disponible en <http://www.pasturereader.com.au>
74. Olivera, V.; Reyes, S., San Román, C. 2010. MOSOBO: monitoreo del sonido bovino. Tesis Ingeniero en Sistemas. Montevideo. Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. 95 p.

75. O'Regain, P.; Schwartz, J. 1995. Dietary selection and foraging strategies of animals on rangeland. Coping with spatial and temporal variability. *In*: International Symposium on the Nutrition of Herbivores (4<sup>th</sup>., 1995, Paris, France). Proceedings. Paris, France, INRA. pp 419-424.
76. Paruelo, J.; Lauenroth, W.; Roset, P. 2000. Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *Journal of Range Management*. 53 (2): 190-193.
77. \_\_\_\_\_.; Di Bella, C.; Milcovic, M. 2013. Percepción remota y sistemas de información geográfica: sus aplicaciones en agronomía y ciencias ambientales. Buenos Aires, Argentina, Hemisferio Sur. 402 p.
78. Pereira, M., s.f. Seguimiento forrajero vía satélite: una nueva herramienta para la toma de decisiones. (en línea). *Revista del Plan Agropecuario*. no. 144: 48-49. Consultado ago. 2016. Disponible en [https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R144/R\\_144\\_48.pdf](https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R144/R_144_48.pdf)
79. Peyraud, J.; Delaby, L. 2001. Ideal Concentrate Feeds for Grazing Dairy Cows Responses to Supplementation in Interaction with Grazing Management and Grass Quality. *In*: Garnsworthy, P.; Wiseman, J. eds. *Recent Advances in Animal Nutrition*. Nottingham, Nottingham University Press. pp. 203-221.
80. Pías, A. 2017. Introducción de tecnologías en sistemas de producción lechera para aumentar la productividad y eficiencia. Tesis de Ing. en Información. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Ingeniería. 87 p.
81. Reinoso, V.; Soto Silva, C. 2006. Cálculo y manejo en pastoreo controlado. III) Pastoreo por horas. Determinación de la disponibilidad y crecimiento de la pastura. *Revista Veterinaria*. 41 (161-162): 25-30.
82. Rowbottom, M. 2015. Potential of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and remote sensing to accurately estimate pasture biomass in intensively grazed dairy pastures. Thesis Bachelor of Science. Perth, Australia. University of Western Australia. 49 p.
83. Sanderson, M.; Rotz, C.; Fultz, S.; Rayburn, E. 2001. Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agronomy Journal*. 93: 1281-1286.



84. Sciaretta, F. 2012. Estimaciones forrajeras, claves para un rendimiento óptimo. (en línea). Buenos Aires, Sitio Argentino de Producción Animal. 3 p. Consultado jun. 2016. Disponible en <http://www.produccion-animal.com.ar/>
85. Serrano, J.; Peça, J.; Da Silva, M.; Shahidian, S. 2011. Calibration of a capacitance probe for measurement and mapping of dry matter yield in Mediterranean pastures. *Precision Agriculture*. 12:860-875.
86. Spada, M. del C.; Cangiano, C. 1991. El uso del disco en la estimación de la fitomasa aérea: una comparación con otros métodos. *Revista Argentina de Producción Animal*. 11 (1): 19-27.
87. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 1992. Evaluación de un capacitómetro para estimar la fitomasa aérea. *Revista Argentina de Producción Animal*. 12 (1): 33-38.
88. Stakellum, G.; Dillon, P. 1989. The effect of herbage mass on the herbage intake and grazing behaviour of dairy cows. *In*: International Grassland Congress (16<sup>th</sup>., 1989, Nice, France). Proceedings. Nice, France, INRA. pp. 1157-1158.
89. Stobbs, T. 1973. The effect of plant structure on the intake of tropical pastures. I: Variation in the bite size of grazing cattle. *Australian Journal of Agriculture Research*. 24: 809-919.
90. St-Onge, B.; Achaichia, N. 2001. Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data. (en línea). *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 34: 131-137. Consultado ago. 2017. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.150.6229&rep=rep1&type=pdf>
91. Stuth, J. 1991. Foraging behavior. *In*: Heitschmidt, R.; Stuth, J. eds. *Grazing management: an ecological perspective*. Oregon, Timber. pp. 85-108.
92. 3D Robotics. s.f. About 3DR. (en línea). s.n.t. 1 p. Consultado jul. 2016. Disponible en <https://3dr.com/about>
93. Tsutsumi, M.; Itano, S.; Shiyomi, M. 2007. Number of Samples Required for Estimating Herbaceous Biomass. (en línea). *Rangeland & Ecology Management*. 60: 447-452. Consultado jul. 2017. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S155074240750059X>

94. Tucker, C. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8: 127-150.
95. \_\_\_\_\_. 1980. A critical review of remote sensing and other methods for non-destructive estimation of standing crop biomass. *Grass and Forage Science*. 35: 177-182.
96. UGR (Universidad de Granada, ES). 2008. Técnicas auxiliares de laboratorio. I Errores. (en línea). Granada. s.p. Consultado dic. 2017. Disponible en <http://www.ugr.es/~andyk/Docencia/TEB/Errores.pdf>
97. Wade, M. 1991. Factors affecting the availability of vegetative *Lolium perenne* to grazing dairy cows with special reference to sward characteristics, stocking rate and grazing method. These Docteur. Rennes, France. Universite de Rennes. 57 p.
98. Zahawi, R.; Dandois, J.; Holl, K.; Nadwodny, D.; Reid, J.; Ellis, E. 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. (en línea). *Biological Conservation*. 186: 287–295. Consultado feb. 2018. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.031>
99. Zhang, C.; Kovacs, J. 2012. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. (en línea). *Precision Agriculture*. 13 (6): 693-712. Consultado jul. 2017. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Chunhua\\_Zhang3/publication/257640210\\_The\\_application\\_of\\_small\\_unmanned\\_aerial\\_systems\\_for\\_precision\\_agriculture\\_A\\_review/links/546e02ba0cf2bc99c2150c7d/The-application-of-small-unmanned-aerial-systems-for-precision-agriculture-A-review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Chunhua_Zhang3/publication/257640210_The_application_of_small_unmanned_aerial_systems_for_precision_agriculture_A_review/links/546e02ba0cf2bc99c2150c7d/The-application-of-small-unmanned-aerial-systems-for-precision-agriculture-A-review.pdf)

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1. Condiciones climáticas

En el cuadro se resume la información de las condiciones climáticas predominantes durante los vuelos realizados.

Los vuelos se intentaron realizar al mediodía para lograr la mayor luminosidad, pero no fue posible en todos los casos principalmente por las condiciones de viento predominantes.

En términos generales en octubre existió mayor velocidad de viento promedio y máxima en los días que se realizaron los vuelos en comparación a junio.

Condiciones climáticas predominantes cuando se realizaron los vuelos con UAV.

Vuelos		Viento promedio		Viento máx.		Radiación solar (w/m <sup>2</sup> )
Fecha	Hora	Velocidad (m/s)	Dirección	Velocidad (m/s)	Dirección	
<b>13/06/17</b>	15:19-15:28	4.8	SSW	11.3	S	355
<b>14/06/17</b>	11:26-11:34	4.8	ENE	14.5	ENE	409
<b>02/10/17</b>	13:37-13:45	14.5	WNW	32.2	WNW	864
<b>03/10/17</b>	11:16-11:23	8.0	NW	24.1	NW	705
	17:50-17:53	1.6	SSW	11.3	W	177
<b>05/10/17</b>	11:24-11:31	0.0	NNE	9.7	NNE	300

Viento máx.= Viento máximo; SSW= sur-suroeste; ENE= este-noreste; WNW= oeste-noroeste; NW= noroeste; NNE= nor-noreste; S= sur; W= oeste.

Anexo 2. Altura de forraje en cm para plato, regla y dron según fecha.

	Tratamiento	Plato	Regla	Mapping 3D
Sábado 1-abr.	T6	-	15,48	2,75
	T9	-	15,74	2,87
	T12	-	17,50	3,20
	T9	-	15,78	4,61
	T12	-	17,92	3,60
	T6	-	16,50	1,97
Martes 4-abr.	T6	14,94	16,27	3,66
	T9	15,05	18,63	3,57
	T12	14,16	18,89	3,95
	T9	14,33	17,53	7,48
	T12	14,25	17,02	4,50
	T6	13,91	16,56	3,44
Jueves 6-abr.	T6	12,64	10,97	1,47
	T9	13,01	12,35	1,31
	T12	12,48	10,73	2,67
	T9	14,64	13,18	3,05
	T12	13,66	10,27	1,64
	T6	14,94	11,40	1,32
Viernes 7-abr.	T6	12,62	9,64	4,74
	T9	13,80	10,28	3,03
	T12	0,00	0,00	1,94
	T9	13,73	10,51	5,60
	T12	-	-	2,64
	T6	13,33	10,29	1,79

Anexo 3. Promedio de altura (cm) estimada con la técnica de Mapping 3d y resultados estadísticos para el tratamiento de junio a nivel de parcela según versión.

	junio											
Tratamiento	T6						T12					
Altura de vuelo (m)	A20			A 30			A20			A 30		
Versión	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Altura de regla (cm)	7,5						13,8					
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Media (cm)	6,55	6,42	5,70	4,73	4,12	5,25	3,34	3,19	3,64	2,19	1,81	2,26
Desv. estándar	9,19	7,77	5,93	5,02	4,90	5,13	4,26	3,89	4,68	2,52	2,34	2,32
Coef. correlación	0,51	0,50	0,74	0,45	0,41	0,69	0,26	0,14	0,60	0,43	0,20	0,38
R <sup>2</sup>	0,26	0,25	0,55	0,20	0,17	0,48	0,07	0,02	0,36	0,18	0,04	0,14
R <sup>2</sup> ajustado	0,24	0,23	0,54	0,18	0,15	0,47	0,05	0,00	0,34	0,16	0,02	0,12
P-valor	0,000	0,000	< 0,0001	0,002	0,005	< 0,0001	0,081	0,363	< 0,0001	0,004	0,192	0,011
DSM y DTM (cm/pixel)	1,24	1,24	1,24	1,95	1,93	1,93	1,31	1,31	1,32	2,05	2,04	2,05
Ortho mosaico (cm/pixel)	0,62	0,62	0,62	0,98	0,96	0,96	0,65	0,65	0,66	1,03	1,02	1,03

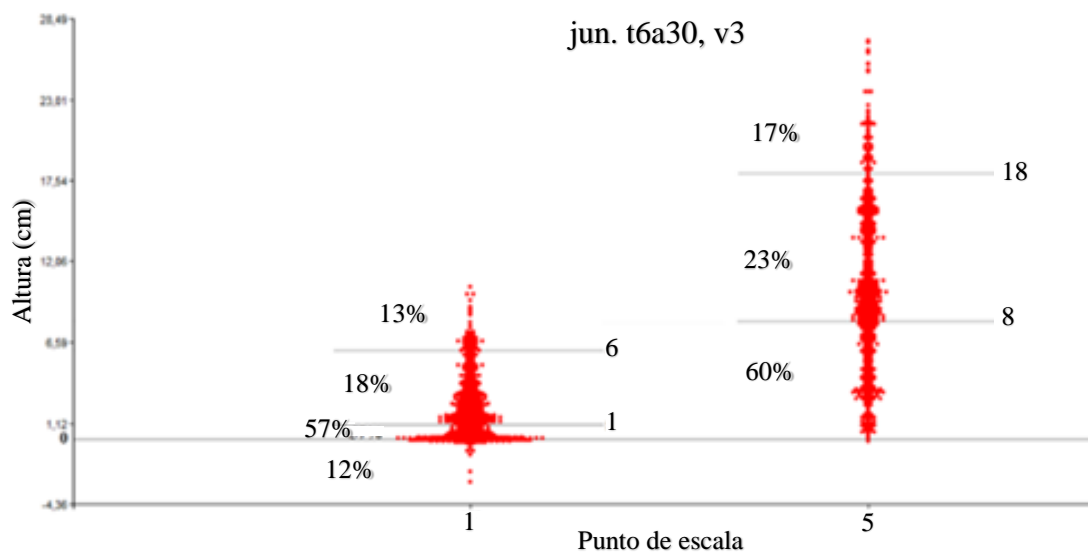
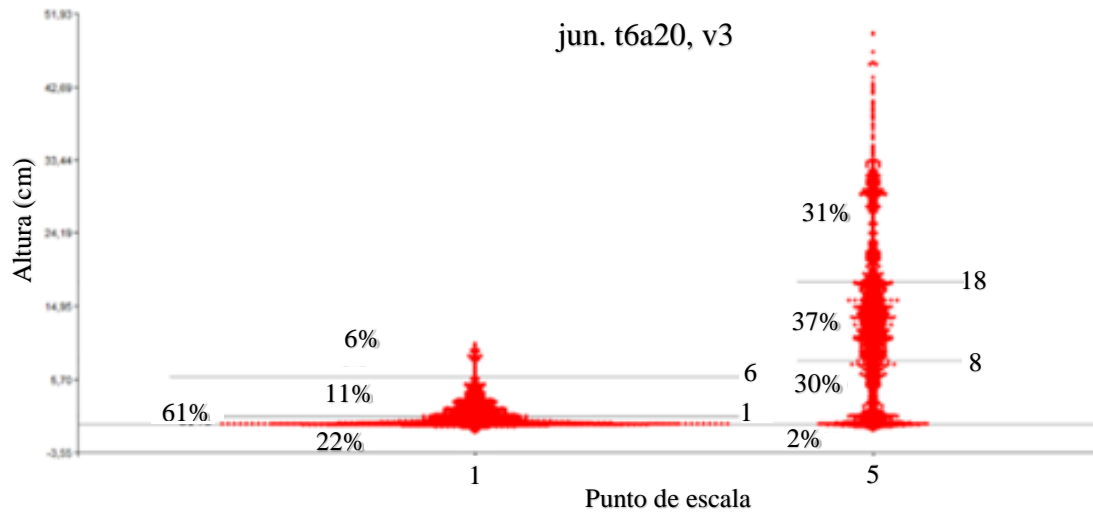
Desv. estándar= desvío estándar; coef. correlación= coeficiente de correlación de Pearson.

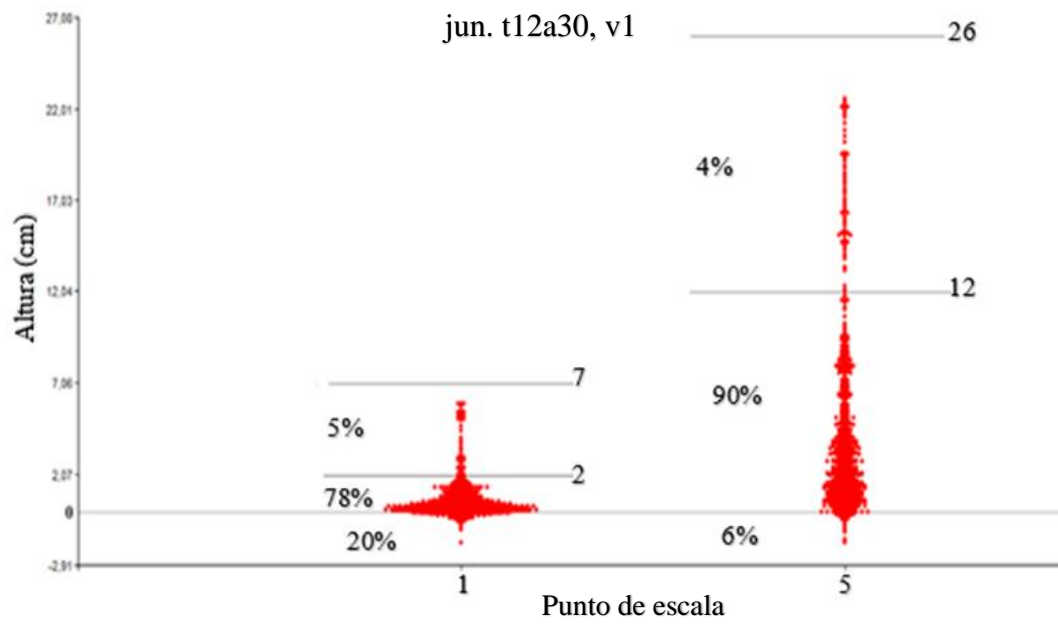
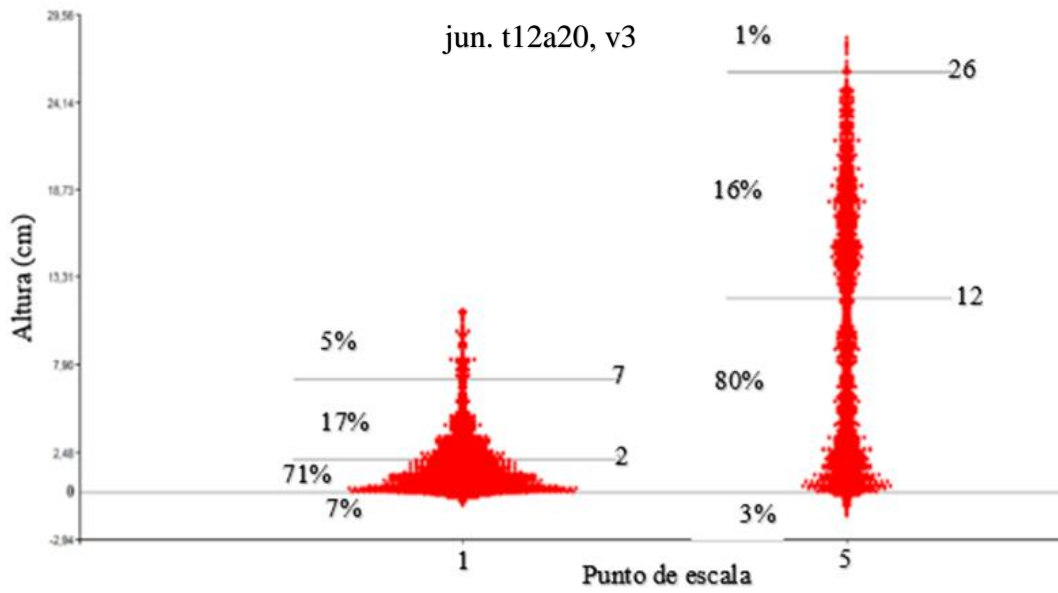
Anexo 4. Promedio de altura (cm) estimada con la técnica de Mapping 3d y resultados estadísticos para el tratamiento de octubre a nivel de parcela según versión.

	octubre												
Tratamiento	T6											T12	
Altura de vuelo (m)	A20					A30						A20	A 30
Fecha de vuelo	2-oct.		03-oct.			02-oct.			03-oct.			05-oct.	
Versión	V1	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V1
Altura de regla (cm)	7											14,3	
n	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Media	15,47	17,83	7,23	6,92	7,22	10,46	9,32	23,59	5,62	5,81	5,79	19,79	34,83
Desv. estándar	18,66	23,34	8,45	7,84	9,27	10,45	9,28	25,50	5,14	5,77	9,70	11,28	28,97
Coef. correlación	0,44	0,47	0,72	0,69	0,70	0,65	0,57	0,41	0,59	0,63	0,22	0,72	0,23
R <sup>2</sup>	0,20	0,22	0,52	0,48	0,49	0,43	0,33	0,17	0,35	0,39	0,05	0,52	0,05
R <sup>2</sup> ajustado	0,18	0,21	0,51	0,47	0,48	0,41	0,31	0,15	0,33	0,38	0,03	0,51	0,03
P-valor	0,00	0,00	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,01	< 0,0001	< 0,0001	0,14	0,005	< 0,0001
DSM y DTM	1,26	1,26	1,29	1,29	1,30	1,96	1,96	1,94	2,05	2,05	2,06	1,28	2,04
Ortho mosaico	0,63	0,63	0,65	0,65	0,65	0,98	0,98	0,97	1,03	1,03	1,03	0,64	1,02

Desv. estándar= desvío estándar; coef. correlación= coeficiente de correlación de Pearson.

Anexo 5. Gráficos de dispersión de puntos y porcentajes de puntos que están en los siguientes rangos (<0, entre 0-mín., mín.-máx. y >máx.) para junio según tratamiento y altura de vuelo.





Anexo 6. Gráficos de dispersión de puntos y porcentajes de puntos que están en los siguientes rangos (<0, entre 0-min, min-máx. y >máx.) para octubre según tratamiento y altura de vuelo.

