



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA**

**Caracterización fenotípica de 250 poblaciones de *Medicago sativa* en  
condiciones de clima Mediterráneo**

**MEMORIA DE TITULO**

**ELOISA AMBAR SMITH ORTÚZAR**

**TALCA, CHILE  
2021**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2021

**APROBACIÓN:**



---

**Profesor Guía: Dr. Alejandro del Pozo Lira**  
**Profesor Titular**  
**Escuela de Agronomía**  
**Facultad de Ciencias Agrarias**



---

**Profesor informante: Dr. Ricardo A. Cabeza**

**Profesor Asistente**  
**Escuela de Agronomía**  
**Facultad de Ciencias Agrarias**

**Fecha de presentación de Memoria de Título: 26 de marzo de 2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer al proyecto FONDECYT N° 1180821 que permitió el financiamiento de esta investigación.

A todos aquellos que fueron parte de este proyecto, principalmente a Viviana Barahona y a su familia, quienes me recibieron en su casa con los brazos abiertos haciendo más amena la recolección de información, a Cata y Felipe, quienes sin esperar nada a cambio viajaron a Cauquenes a apoyarme en la recolección y traspaso eterno de datos, a José Cares y Luis Inostroza, quienes me ayudaron y orientaron en el procesamiento de datos, a Soledad Espinoza y a todos aquellos trabajadores del INIA Cauquenes quienes también tienen responsabilidad en que esta memoria sea publicada.

Gracias a mi profesor guía, Dr. Alejandro del Pozo su trato sencillo y apoyo en la investigación a través de ideas y aclaraciones.

Agradecer a la vida por los grandes amigos que me ha puesto en el camino, por esas amistades que perduran desde la infancia, hasta aquellas que la universidad me entregó, para todas las que de una u otra manera se han cruzado en mi camino y aún perduran con el tiempo, a ustedes cabros y cabras, que me llenan el corazón y me hacen ser una gran persona, gracias por cada momento, mi vida no sería igual sin ustedes.

Dedicada a mi gran Familia, por apoyarme en todo y siempre creer en mí, a mis padres, por su amor incondicional y buena crianza, por inculcarme el amor por la naturaleza, los animales y el campo, por enseñarme a disfrutar y valorar lo sencillo y a esforzarme siempre por conseguir lo que quiero, las palabras para agradecerles a la mujer que han formado son infinitas.

## RESUMEN

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una especie que pertenece a la Familia *Leguminosae* y es la forrajera más cultivada a nivel mundial, debido a la cantidad y calidad de su proteína, su amplia adaptabilidad a condiciones abióticas desfavorables y su gran potencial productivo. La búsqueda de genotipos que se adapten mejor a las condiciones de clima Mediterráneo con baja disponibilidad de agua y que mantengan su alta productividad, es crucial para ser una alternativa en la rotación de cultivos y en el establecimiento de praderas permanentes.

En este estudio se evaluaron fenotípicamente poblaciones “elite” de alfalfa a través de índices de vegetación obtenidos de imágenes digitales RGB, las que fueron utilizadas para medir la producción de materia verde y seca de cada población. El objetivo fue evaluar la relación de índices de vegetación RGB y la producción de materia seca de 250 poblaciones de alfalfa en condiciones de clima mediterráneo e identificar las poblaciones más productivas.

Para ello se plantaron 250 poblaciones, con 4 repeticiones distribuidas mediante un diseño experimental Alfa Látice de 10 bloques con 25 parcelas cada una. El tamaño de cada parcela fue de 0,8 x 1,0 m con 40 plantas distribuidos en hileras separadas a 0,2 m y 0,1 m sobre la hilera. Las fotografías RGB fueron tomadas con una cámara digital montada en un dron DJI Mavic Pro el día 2 de diciembre de 2020 y fueron analizadas con el programa BreedPicks. Las imágenes arrojaron valores para 11 índices espectrales, los cuales fueron: Matiz, Saturación, Luminosidad, Intensidad,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$ , Área verde (GA), Área más verde (GGA) e Índice de estructura de la canopia (CSI). Para la estimación de la materia seca (MS) producida se cortó toda la parcela, se secaron las muestras y se pesó el material vegetal obtenido en cada parcela y sus repeticiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, los indicadores Saturación,  $a^*$  y  $u^*$ , arrojaron una alta correlación con la producción de MS en alfalfa, siendo útiles herramientas en la predicción de rendimientos. Las poblaciones más productivas fueron 108,165,110, 6, 107, 195, 31, 161, 136, 155, 42, 126, 34, 76, 220, 109, 125 y 202, cuyos rendimientos fluctuaron entre los 3210 Kg y los 4169 kg MS ha<sup>-1</sup>.

**Palabras claves:** índices espectrales, alfalfa, clima mediterráneo, imágenes RGB.

## ABSTRACT

Alfalfa (*Medicago sativa* L.), species belonging to Leguminosae's family, is the most cultivated forage legume worldwide, given to the quantity and quality of its protein, its wide adaptability to unfavorable abiotic conditions and its large productive potential. The search for genotypes better adapted to Mediterranean climate with low water availability, exhibiting high productivity, is vital to provide alternatives for crop rotation and permanent grassland.

In this study, alfalfa populations were phenotypically evaluated through vegetation indices obtained from RGB digital images, which were used to estimate the forage production of each population. The objective was to evaluate the relationship of RGB vegetation indices and the dry matter production of 250 elite populations of alfalfa under Mediterranean climate conditions and to identify the most productive populations.

For this, 250 populations were planted in an Alpha Lattice experimental design of 10 blocks with 25 plots each and 4 replicates. The size of each plot was 0.8 x 1.0 m with 40 individuals distributed in rows separated by 0.2 m and 0.1 m above the row. The RGB images were taken with a digital camera mounted on a DJI Mavic Pro drone, on December 2, 2020, and analyzed with the free access program Breed Picks. From digital images 11 vegetation indices were obtained: Hue, Saturation, Luminosity, Intensity,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$ , Green Area (GA), Greenest Area (GGA) and Structure Index of the canopy (CSI). For the calculation of the dry matter (DM) production, the entire plot was cut, the samples were dried and the plant material obtained in each plot and its repetitions were weighed.

According to the results obtained in this work, the vegetation indices Saturation,  $a^*$  and  $u^*$  presented a high correlation with DM production, which facilitates the prediction of forage yield. The most productive populations were 108, 165, 110, 6, 107, 195, 31, 161, 136, 155, 42, 126, 34, 76, 220, 109, 125 and 202, with forage yield between 3,210 and 4,169 kg DM ha<sup>-1</sup>.

**Key words:** spectral indices, alfalfa, Mediterranean climate, high yields.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>1. Introducción</b> .....	11
1.1. Hipótesis .....	13
1.2. Objetivo general .....	13
1.3. Objetivos específicos .....	13
<b>2. Revisión Bibliográfica</b> .....	14
2.1. Importancia de la alfalfa .....	14
2.2. Cambio climático y sequías .....	15
2.3 Efectos del estrés abiótico en alfalfa .....	16
2.4. Uso del fenotipado en mejoramiento vegetal .....	17
2.4.1 Índices de vegetación para la determinación del crecimiento y biomasa acumulada .....	18
<b>3. Materiales y métodos</b> .....	21
3.1 Ubicación del ensayo .....	21
3.2 Material vegetal .....	22
3.3 Diseño experimental .....	22
3.4 Evaluación de índices de vegetación y materia seca .....	23
3.5 Análisis estadístico .....	24
<b>4. Resultados</b> .....	25
<b>5. Discusión</b> .....	30
<b>6. Conclusión</b> .....	34
<b>7. Referencias Bibliográficas</b> .....	35
<b>8. Anexo</b> .....	43



## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diseño de campo. Establecimiento de 250 poblaciones de alfalfa y sus dimensiones.....	21
<b>Figura 2.</b> (a) Orto mosaico aéreo RGB con las 1000 parcelas correspondientes al ensayo. (b) Parcela con sus detalles específicos de largo y ancho .....	23
<b>Figura 3.</b> Diseño de campo Centro experimental Cauquenes. Establecimiento de 250 poblaciones de alfalfa y sus dimensiones.....	24
<b>Figura 4.</b> Histograma de rendimiento para Materia seca (A) y Materia verde (B) en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 y 19 de diciembre del 2020.....	26
<b>Figura 5.</b> Relación entre materia seca y Matiz (A), Intensidad (B), Saturación (C), Luminosidad (D), a* (E) y b*(F) en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el diez de diciembre del 2020.....	29
<b>Figura 6.</b> Relación entre materia seca y u* (G), v* (H), GA (I), GGA (J) y CSI (K) en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el diez de diciembre del 2020.....	30

## ÍNDICE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Registro de temperaturas (°C) máximas, mínimas y precipitaciones ocurridas en la estación INIA Cauquenes durante la temporada primavera-verano año 2020 y 2021 .....	22
<b>Cuadro 2.</b> Coeficiente de correlación de Pearson (R) y coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) entre índices vegetación RGB y producción de materia seca en 250 genotipos de alfalfa en Cauquenes.....	27
<b>Cuadro 3.</b> Diseño de campo Centro experimental Cauquenes. Establecimiento de 250 poblaciones de alfalfa y sus dimensiones.....	28
<b>Cuadro 1A.</b> Selección de los 18 genotipos de <i>Medicago sativa</i> más productivos del ensayo y las medias de producción de materia seca expresada en kg/ha y IV correspondientes a las cuatro repeticiones correspondientes a estos.....	43
<b>Cuadro 1B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional Matiz (Hue) en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	44
<b>Cuadro 2B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional Intensidad en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020 .....	44

<b>Cuadro 3B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional saturación en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	44
<b>Cuadro 4B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional Luminosidad en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020 .....	45
<b>Cuadro 5B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional a* en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	45
<b>Cuadro 6B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional b* en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	45
<b>Cuadro 7B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional Matiz u* en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	46
<b>Cuadro 8B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional v* en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	46
<b>Cuadro 9B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional GA en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020 .....	46
<b>Cuadro 10B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional GGA en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	47
<b>Cuadro 11B.</b> Tabla de Andeva índice vegetacional CSI en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	47
<b>Cuadro 12B.</b> Tabla de Andeva para producción de materia seca (kg/ha) en 250 genotipos de <i>Medicago sativa</i> evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.....	47

## 1. INTRODUCCIÓN

La alfalfa (*Medicago sativa*. Leguminoseae) es la planta forrajera más ampliamente cultivada en el mundo. El centro primario de diversidad de la alfalfa estuvo en el Medio Oriente, en las regiones del noreste de Irán, norte de Turquía y en la del Cáucaso (Quirós y Bauchan, 1982). Fué introducida en América durante la conquista española (entre 1519 y 1521) siendo México, Perú y Chile los primeros países en donde se cultivó.

En Chile se estima que existen alrededor de unas 75.000 ha de alfalfa, con una producción anual aproximada de 1.350.000 toneladas (Valenzuela, 2017). Su cultivo va desde los valles transversales del desierto nortino, hasta Magallanes en el sur. Entre las regiones centro-norte y centro-sur del país existen 60.000 ha, concentrándose el 70% de la superficie entre la Región de Valparaíso y la del Biobío (Ovalle, 2018). Esta especie se caracteriza por poseer un alto contenido proteico. Su amplia adaptabilidad a diversas condiciones edafoclimáticas y su alto potencial productivo, hacen que la alfalfa, llamada la “reina” de las forrajeras, sea de gran importancia en la industria lechera y la producción bovina, gracias a su excelente calidad nutricional y gran palatabilidad (Luro, 1981; Romero, 1992).

Esta forrajera posee una amplia gama de eco-tipos y variedades, lo que permite disponer de material genético adaptable a distintas zonas con diferentes características de suelo, pluviometría y temperatura. Por esto, la alfalfa es considerada una de las especies vegetales de más amplia adaptación en la agricultura global (Luo et al., 2020).

Según su grado de tolerancia al frío, las variedades se clasifican en una escala de latencia que va desde el 1 (mayor dormancia) al 9 (menor dormancia) (Squella, 2011). Además, gracias a su desarrollado sistema radicular, la alfalfa puede sobrevivir largos periodos en condiciones de escasas hídrica (Cunningham et al., 2001; Luo et al., 2020).

Esta especie es altamente sensible a la acidez y a la presencia de aluminio (Al) en el suelo. El PH bajo 5,8 provoca serios problemas de crecimiento y desarrollo de la planta, disminuyendo la disponibilidad de nutrientes y afectando la producción de forraje (del Pozo, 1983).

Los rizobios, bacterias que viven en simbiosis con las leguminosas, les permiten fijar parte de sus necesidades de  $N_2$  desde la atmósfera; Estos son muy sensibles a la acidez del suelo, por lo que se necesita un pH cercano a 6,5 para nodular eficientemente. Lo anterior es de gran importancia en suelos de pH ácido, como los suelos Trumaos (derivados de cenizas volcánicas) (Guiñazú et al., 2013) con alto contenido de Aluminio (Al).

El déficit hídrico del secano interior, especialmente en la zona de clima Mediterráneo del centro-sur de Chile, es la gran limitante para el desarrollo agrícola. Los efectos de este en los cultivos son diversos; en trigo (*Triticum aestivum*), varios procesos y rasgos fisiológicos se han relacionado con el rendimiento de granos (e.g., Araus et al., 2002), también aquellos relacionados con la acumulación de carbohidratos hidrosolubles en tallos previos a la antesis y su posterior uso durante el llenado de granos (Ehdaie et al., 2006; Foulkes, 2007; del Pozo et al., 2016). Además, existe una disminución de la actividad fotosintética por reducción de la conductancia estomática, aumento de la senescencia y reducción del área foliar (Aramendiz et al., 2012; del Pozo et al., 2020), que reduce el crecimiento y producción de las plantas y en casos más extremos de sequía, la muerte del individuo (Morales et al. 2013; del Pozo et al., 2016).

Por este motivo, en zonas donde el riego y las precipitaciones son escasas, es crucial el uso de variedades que se adapten a condiciones del secano Mediterráneo, así, se podría mantener praderas verdes y productivas durante la temporada estival. Aunque la alfalfa es capaz de hacer un uso más eficiente del agua a medida que esta escasea, la búsqueda de variedades adaptadas a climas secos es conveniente para la persistencia de la especie (del Pozo et al., 2017; Luo et al., 2020). Según estudios realizados por del Pozo, et al. (2017) durante los años 2012 y 2015, donde nueve cultivares de alfalfa fueron establecidos en cuatro sitios de secano Mediterráneo de Chile central, con 4-5 meses de periodo seco, del total de plantas establecidas, > 69% de estas persistieron, concluyendo que la alfalfa puede extender su temporada de crecimiento hasta principios de verano y en el otoño, cuando se encuentra en condiciones de secano Mediterráneo, demostrando un eficiente uso de agua por parte de los cultivares utilizados.

En este estudio se evaluaron poblaciones de plantas “elite” de alfalfa con la tecnología digital RGB, para medir la calidad, cantidad y desarrollo vegetacional del material vegetal estudiado.

### **1.1 Hipótesis**

Los índices de vegetación derivados de imágenes RGB permiten seleccionar los genotipos mejor adaptados a condiciones de clima Mediterráneo en la zona central de Chile.

### **1.2 Objetivo general**

Evaluar la relación de once índices de vegetación y la producción de materia seca de 250 poblaciones elite de alfalfa en condiciones de clima Mediterráneo e identificar las poblaciones más productivas.

### **1.3 Objetivos específicos**

- Evaluar índices de vegetación derivadas de imágenes digitales RGB de las 250 poblaciones elite de alfalfa en condiciones de clima Mediterráneo.
- Evaluar la producción de materia seca de las 250 poblaciones elite de alfalfa en condiciones de clima Mediterráneo.

## 2. REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1. Importancia de la alfalfa

La Alfalfa en Chile se cultiva desde el extremo norte de Tarapacá hasta el extremo austral de Magallanes, aunque la mayor superficie se encuentra en la zona central (Correa, 1978).

De acuerdo al Censo Agropecuario realizado el año 1997, la superficie sembrada de alfalfa en el país fue de 80.897 has., de las cuales 6.377 has. están en condiciones de secano (INE, 1998). Para el 2007 la superficie ya había disminuido a 60.615 has. y se estima que hoy la superficie habría aumentado nuevamente a 75.000 ha., sin embargo, no se cuenta con cifras oficiales (INE, 1998; ODEPA, 2007; Valenzuela, 2017). La investigación sobre la Alfalfa en Chile se inicia en la década del 60, pero fue muy específica, refiriéndose solo a pruebas de variedades y en menor medida, a técnicas de establecimiento (Soto, et al. 1990). Su uso es preferentemente para la producción de heno, pero también se la utiliza en pastoreo directo asociada a gramíneas (principalmente Pasto Ovillo (*Dactylis glomerata*) y Festuca (*Festuca arundinacea*) para evitar el meteorismo ruminal. Así, la Alfalfa se convierte en uno de los principales componentes de la alimentación ganadera de la zona central de Chile, gracias a su capacidad de desarrollarse fuera de la temporada de crecimiento de las praderas y cultivos forrajeros convencionales (Espinoza y Barahona, 2017).

Entre sus principales ventajas, destaca su elevado rendimiento, la tolerancia a la sequía (Parga, 1994), la buena adaptación a condiciones edafoclimáticas variadas (Erice et al. 2006) y lo más destacado, la calidad de su forraje por sus elevados niveles de proteínas (18,2%), minerales y vitaminas de calidad. Sin embargo, debido a su bajo contenido de almidón (44,9%) (Mc Donald et al., 1969) su conservación como ensilaje no es muy favorable. Su valor energético también es alto y está relacionado con el contenido de N del forraje. Su mayor valor nutricional se encuentra en sus hojas, siendo estas de mayor calidad nutritiva que los tallos, por lo que, a medida que la planta madura, la relación hoja-tallo cambia y este factor contribuye al descenso del valor nutritivo en las leguminosas (González et al., 1973).

Es un cultivo flexible que permite ser utilizado como heno, ensilaje, soiling o pastoreo (Soto et al., 1990).

Una de las características más sobresalientes de la alfalfa es su capacidad de adaptación a las diferentes zonas agroclimáticas. Esta cualidad de adaptarse a diferentes climas se debe a los años de mejoramiento e investigación en donde se han encontrado variedades muy bien adaptadas a los diferentes regímenes hídricos y de temperatura. Por ejemplo, la alfalfa de flores amarillas (*Medicago falcata*) soporta temperaturas de -26,6°C en Alaska, y la alfalfa común (*Medicago sativa*) puede prosperar en ambientes con temperaturas de 54,4 °C (Soto et al., 1990). Esta tolerancia al calor está dada por la selección natural y estaría relacionada con caracteres de resistencia a la sequía (Soto et al. 1990).

Al igual que todas las leguminosas, la Alfalfa realiza una asociación simbiótica con bacterias fijadoras de N<sub>2</sub>. Para conseguir esta asociación, es necesario inocular la semilla previo a la siembra, con la cepa de rizobio específica. Si no se inocula, se obtendrán plantas débiles, pálidas, con baja producción y altamente susceptible a enfermedades (Soto et al. 1990). La alfalfa establece simbiosis específicamente con cepas de *Ensifer (Sinorhizobium) mellotti*, bacteria responsable de la nodulación y fijación de N<sub>2</sub> (Pini et al., 2012). La nodulación es un proceso conducido por señales bioquímicas tanto desde las plantas a través de compuestos aromáticos flavonoides, así como de los compuestos bacterianos denominados Nod Factors (Jones et al., 2007). Las bacterias producen enzimas las cuales les permiten penetrar al interior de los pelos radicales de la leguminosa e inducir la formación de nódulos, lugar donde se lleva a cabo la reducción del N<sub>2</sub> atmosférico a amonio (Soto et al. 1990). Las elevadas tasas de fijación de N<sub>2</sub> de la alfalfa (120-800 kg/ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>) (Urzúa, 2005) la hace muy importante para los sistemas productivos, ya que al ser incorporada en un sistema de rotación de cultivos semi-intensivo, contribuye a la sostenibilidad de estos.

## **2.2. Cambio climático y sequias**

El cambio climático se basa en alteraciones ambientales, produciendo grandes estragos al planeta, especialmente en la agricultura, reduciendo la producción, el desarrollo y el rendimiento de los cultivos, sobre todo en zonas áridas y semiáridas

Mediterráneas donde el suministro de agua a través del riego es cada vez más escaso (Qaderi, 2012; del Pozo et al. 2019).

El calentamiento global producirá cambios en los patrones de lluvia, disminuyendo el agua disponible en suelos de muchas partes del mundo (Solomon et al., 2007). Los periodos de sequía serán cada vez más frecuentes con consecuencias catastróficas para la agricultura y el medio ambiente (e.g., Mishra and Singth, 2010). La falta de lluvia tiene como consecuencia la desertificación acelerada de vastas zonas del planeta, siendo aquellas de clima mediterráneo las más afectadas, debido a la limitación hídrica y la irregularidad (impredecibilidad) de las precipitaciones (Valladares et al., 2015).

### **2.3. Efectos de los estreses abióticos en alfalfa**

El estrés por sequía y el aumento de la temperatura asociados al cambio climático, imponen severas restricciones a los cultivos. Temperaturas por sobre el óptimo del cultivo (15 a 20° Celsius, Romero, 2016) disminuye la actividad fotosintética, aumenta la transpiración y la conductancia estomática de la planta, traduciéndose en una disminución de la biomasa foliar (Qaderi y Reid, 2009).

Periodos prolongados de estrés hídrico pueden modificar el área específica de las hojas y su anatomía (Erice et al., 2006), aumentar la expansión radical y disminuir el área foliar (Moreno, 2009). La exposición ante algún factor de estrés aumenta los niveles de ácido abscísico (ABA) (precursor de etileno y malato acumulado en las vacuolas de las hojas) trayendo consigo señales químicas que indican el cierre de estomas de manera inmediata (Schachtman y Goodger, 2008).

En las leguminosas que crecen en situación de estrés hídrico, la nodulación se ve afectada por la acumulación de etileno en las raíces. Estudios realizados por Oldroyd et al. (2001) indican que este compuesto es responsable de la inhibición de la elongación del hilo de infección e inhibición de los factores de nodulación (Nod Factors), entre otros (Oldroyd et al., 2001).

Existe evidencia que el nivel de N total de la planta es responsable de la actividad de los nódulos y la tasa de fijación de N<sub>2</sub> (Schubert, 1995), como también, que el N<sub>2</sub> fijado regula el crecimiento de la parte aérea y la producción de materia seca. Se fijan alrededor de 20 a 22 kg de N ha<sup>-1</sup> por cada tonelada de materia seca



acumulada (Herridge et al. 2008; Unkovich et al. 2010; Espinoza et al. 2012; Anglade et al. 2015). Siendo este un proceso de alto requerimiento energético, se necesita una gran cantidad de asimilados para su procesamiento (Schulze, 2004), las leguminosas tienden a controlar finamente la fijación de N<sub>2</sub>, con el fin de evitar el agotamiento de los depósitos de carbono de la planta, especialmente, cuando estas se encuentran sometidas a condiciones de estrés (Sulieman and Tran, 2013; Arrese-Igor et al. 2011).

La alfalfa, especie muy sensible a la salinidad, es propensa a presentar síntomas como palidez en algunos tejidos, disminución del área foliar, achaparrado y arrojado de sus hojas (Soriano, 2003). El incremento de los niveles de sodio en el medio induce a desequilibrios entre la parte radicular y la parte aérea de la planta, teniendo como consecuencia limitaciones en la absorción de agua (Soriano, 2003). Otro factor muy limitante para la alfalfa es la acidez del suelo, aunque durante la germinación puede resistir hasta pH 4. Una elevada concentración de iones H<sup>+</sup> en el suelo perjudica la nodulación de la raíz, puesto que la bacteria específica *R. melioli*, quien es responsable de la fijación simbiótica del N<sub>2</sub>, es muy sensible a la acidez (Soto, 2000), por tanto, su reproducción se ve limitada por pH inferior a 5 (Soriano, 2003). Esto sucede, por ejemplo, en suelos derivados de cenizas volcánicas debido a la condición ácida del suelo (Guiñazú et al, 2013), mientras que en suelos con pH cercanos a 6,5 o superiores, la nodulación ocurre de manera efectiva.

#### **2.4. Uso del fenotipado en mejoramiento vegetal**

Según investigaciones, el rendimiento potencial del trigo (*Triticum aestivum* L.) ha ido aumentando linealmente desde los años sesenta, tanto en zonas de alta disponibilidad hídrica (Zhou et al., 2007; Fischer y Edmeades, 2010; Matus et al., 2012; del Pozo et al., 2014), como en ambientes bajo condiciones de secano (Sánchez-García et al., 2013). Aun así, una mayor producción de granos y mayores rendimientos en trigos bajo condiciones limitantes sigue siendo un gran desafío para hacer frente a la futura demanda mundial de alimentos (Fischer, 2007).

La selección de cultivares de trigo y cereales que se adaptan a estrés ambiental se ha logrado principalmente a través del fenotipado de rasgos fisiológicos. Por ejemplo, se han usado como parámetros de selección el contenido de clorofila en la

hoja, la acumulación de carbohidratos solubles en los tallos durante la antesis, y la discriminación isotópica del carbono ( $\Delta^{13}\text{C}$ ) en granos, entre otros. Estos parámetros han sido usados como complemento a los rasgos agronómicos, permitiendo identificar aquellas características que aceleran la reproducción y aumentan el rendimiento del trigo bajo condiciones de limitación hídrica (Araus et al., 2002; Fischer, 2007; Foulkes et al., 2007; Cattivelli et al., 2008; Fleury et al., 2010; del Pozo, et al., 2016).

En alfalfa, los trabajos de fenotipado en condiciones de campo mediante caracteres fisiológicos son más escasos (del Pozo et al., 2017). La selección de genotipos de alto potencial de rendimiento y persistencia después de largos periodos de sequía es un objetivo importante para los programas de mejoramiento de alfalfa. El uso de herramientas de fenotipado no destructivo, como es la espectroradiometría y el desarrollo de índices de reflectancia espectral (SRI) para estimar rasgos del cultivo, son recursos que pueden ayudar a la selección de genotipos más tolerantes al déficit hídrico basados en mediciones a nivel de campo (Garriga et al., 2020).

#### **2.4.1 Índices de vegetación para la determinación del crecimiento y biomasa acumulada**

Los índices de vegetación (IV) resultan de una combinación de bandas espectrales producto de varios valores espectrales que, sumados, divididos o multiplicados de una forma diseñada, son capaces de producir valores que entregan información sobre la cantidad o el vigor de vegetación dentro de un píxel. Estos valores permiten estimar el estado de la planta en base a la medición de la radiación que éstas emiten o reflejan (Díaz, 2015).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, acrónimo del inglés *normalized difference vegetation index*) es un indicador de teledetección ampliamente utilizado en mediciones realizadas en tierra, el cual separa la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974). El NDVI se utiliza para el monitoreo del crecimiento de cultivos, predicción de producción de éstos, medición de biomasa (Costa, Nunes and Ampatzidis, 2020), verdor de la vegetación y para estimar el tamaño del dosel fotosintético (Pietragalla et al, 2013). El sensor

NDVI es capaz de proporcionar, a través de una medición rápida, datos que pueden utilizarse para estimar y predecir el rendimiento, acumulación de biomasa, tasa de crecimiento, cobertura del suelo y vigor temprano, estimación de patrones de senescencia, y detección de estreses bióticos y abióticos (Pietragalla et al., 2013).

Este índice se calcula a partir de mediciones de la reflectancia de la luz en las regiones rojo e infrarrojo cercano (NIR) del espectro. El infrarrojo cercano (luz reflejada por la vegetación) y la luz roja (la que absorbe la vegetación) son buenos indicadores del estado del dosel, puesto que un dosel verde y sano absorberá la mayor parte de la luz roja y reflejará la mayor parte de la luz NIR, debido a que la clorofila absorbe principalmente la luz azul y roja y el mesófilo de la hoja refleja la luz NIR (Pietragalla et al., 2013).

$$\text{NDVI} = (\text{RNIR} - \text{RRed}) / (\text{RNIR} + \text{RRed})$$

Los valores de NDVI del dosel de un cultivo fluctúan en un rango de 0 a 1 (donde 0 representa ninguna área verde, y 1 representa el verdor máximo) (Pietragalla et al., 2013), por lo que este índice es un buen indicador de estrés hídrico, puesto que cuando el agua está limitando el crecimiento vegetativo, el valor del NDVI es relativamente más bajo (Weier and Herring, 2000).

También es posible obtener índices de vegetación a partir de imágenes digitales RGB (red, green, blue). La combinación de imágenes de color infrarrojo (CIR) y rojo, verde y azul (visibles o RGB) permite la estimación de la biomasa verde presente en el dosel. Los índices RGB pueden ser obtenidos directamente desde fotografías digitales de cámaras convencionales y pueden ser procesadas mediante la comparación entre valores de reflectancia de banda ancha de luz roja, verde y azul o mediante el uso de espacios de color alternativos, o con el conjunto de códigos Breedpix (Casadeuset et al., 2007).

Dentro de los índices que entregan las imágenes RGB está el denominado “espacio de color” LAB, el cual se refiere al espacio de color tridimensional en la imagen, siendo  $L^*$  la luminosidad ( $L^*=0$  representa negro y  $L^*=100$  representa blanco),  $a^*$  va de rojo a verde ( $a^*<0$  indican verdor y  $a^*>0$  indican color rojo) y  $b^*$  es la gradiente del azul ( $b^*<0$  indican color azul y  $b^*>0$  indican color amarillo). El espacio de color HSI (Tono, Saturación, Intensidad), donde el componente tono o

matiz (H) describe el croma de color que atraviesa el espectro visible en forma de ángulo entre 0° y 360°, mientras que las siglas GA (Green Area, Área verde) y GGA (Greenest Area; Área más verde) analizan el número de píxeles verdes de una imagen, siendo el GGA aquel que excluye las tonalidades verde-amarillentas, pudiendo describir con mayor precisión la cantidad de biomasa verde activa y la senescencia de la hoja (Vergara-Díaz et al., 2015). En la Figura 1 se muestra la fotografía aérea RGB perteneciente al ensayo.



**Figura 1.** Fotografía aérea de las 1000 parcelas correspondientes al ensayo, imagen RGB tomadas el día 2 de diciembre de 2020 en Cauquenes, Chile.

### 3.MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Ubicación del ensayo

El ensayo se realizó en el Centro Experimental Cauquenes (35°57'S, 72°17'O) del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), localizado en Cauquenes, Región del Maule, Chile, durante el año 2020 y 2021. El área de estudio presenta un clima mediterráneo seco con una precipitación anual promedio de 660,8 milímetros y con suelo de la Serie Cauquenes, el que posee derivados de rocas graníticas con texturas franco arcillo arenosa a franco arenosa. Las condiciones de temperatura y precipitación durante el ensayo se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Registro de temperaturas (°C) máximas, mínimas y precipitaciones ocurridas en la estación INIA Cauquenes durante la temporada primavera-verano año 2020 y 2021.

Mes	T max. (°C)	T min. (°C)	Precipitaciones (mm)
Agosto 2020	11.1	4.1	26.6
Septiembre 2020	12.1	4.6	18.3
Octubre 2020	13	5	0
Noviembre 2020	19.1	9.3	0
Diciembre 2020	21	9.9	0
Enero 2021	21.5	11.5	19.2
Febrero 2021	21	11.9	0.6
Marzo 2021	20.6	10.7	0.2

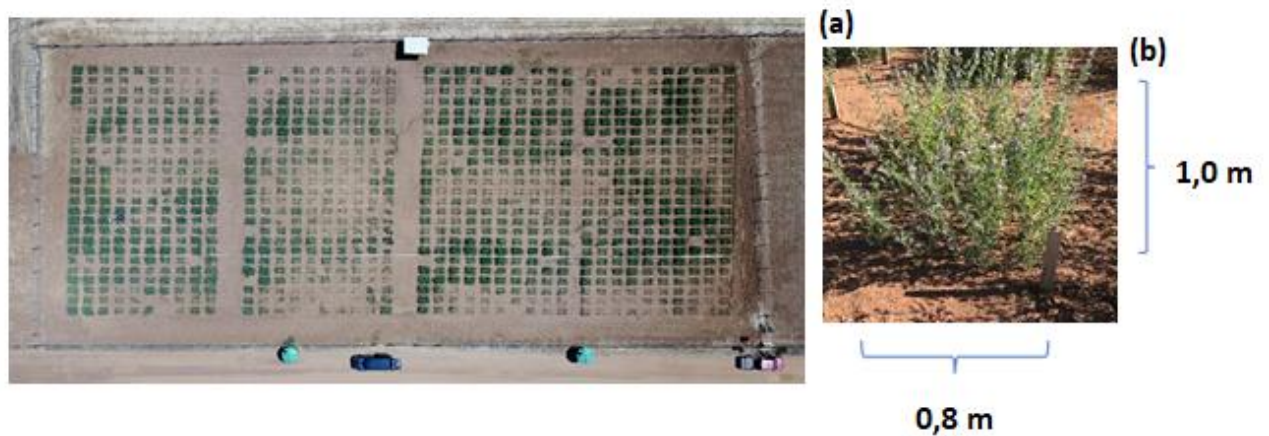
#### 3.2. Material vegetal

Los genotipos se obtuvieron de una selección de 25 poblaciones de un panel de 70 poblaciones que fueron establecidas en Cauquenes. Se eligieron diez plantas de cada una de las poblaciones seleccionadas (250 genotipos), las cuales fueron multiplicadas vegetativamente en un invernadero obteniendo tres clones de cada genotipo. Un total de 750 plantas se dejaron florecer y polinizar a través de abejorros que se dispusieron en el invernadero. De esta manera las distintas plantas se cruzaron libremente. Posteriormente se colectaron semillas de las tres plantas clonales de cada genotipo.

Las semillas de cada genotipo se pusieron a germinar en bandejas almacigueras y luego de alcanzar lastres hojas trifoliadas se llevaron a campo donde fueron trasplantadas 40 plantas por parcela. Se dispuso de cuatro hileras con diez plantas cada una, separadas a una distancia de 10 centímetros sobre hilera y 20 centímetros entre hilera. El tamaño de cada parcela fue de 80 x 100 centímetros y contenía 40 individuos. Previo al trasplante se aplicó una fertilización base de súper fosfato triple ( $200 \text{ kg ha}^{-1}$ ), sulfato de potasio ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$ ), boronatrocalcita ( $20 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y fertiyeso ( $150 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Además, las parcelas recibieron riegos por aspersión a razón de 20 mm cada 10 días.

### 3.3. Diseño experimental

Se utilizó un diseño alfa látice con 10 bloques de 25 genotipos, cada uno con 4 repeticiones. Por consiguiente, cada repetición constó de 250 genotipos (Figs. 2 y 3).



**Figura 2.** (a) Orto mosaico aéreo RGB con las 1000 parcelas correspondientes al ensayo. (b) Parcela con sus detalles específicos de largo y ancho.

25 m										2m	25 m										
Bl. 1	Bl. 2	Bl. 3	Bl. 4	Bl. 5	Bl. 6	Bl. 7	Bl. 8	Bl. 9	Bl. 10		Bl. 1	Bl. 2	Bl. 3	Bl. 4	Bl. 5	Bl. 6	Bl. 7	Bl. 8	Bl. 9	Bl. 10	
1	219	87	168	197	186	50	211	35	170	237		190	5	247	223	165	233	17	188	222	159
2	239	75	48	207	250	54	45	103	243	43		193	250	14	61	171	181	201	39	151	156
3	214	223	65	189	238	109	206	139	59	23		184	119	138	77	93	145	87	29	104	90
4	208	225	74	222	148	40	18	191	181	183		144	175	167	7	95	11	242	194	26	35
5	128	104	36	212	25	1	224	7	60	71		182	66	60	83	176	168	19	72	46	177
6	4	5	30	42	164	234	62	15	226	79		62	80	204	59	213	196	133	120	82	27
7	185	228	233	173	32	92	199	120	91	229		137	57	74	92	49	118	48	227	164	192
8	146	55	98	63	46	194	157	8	82	160		143	246	65	97	219	55	147	22	128	51
9	150	175	24	176	232	58	151	231	138	78		200	50	1	58	69	172	56	105	89	179
10	218	192	248	44	124	188	136	53	115	9		109	218	199	155	234	108	205	240	21	157
11	81	156	31	182	163	56	149	126	29	68		116	236	170	13	101	140	228	139	114	63
12	38	132	119	37	235	117	69	201	66	47		214	248	112	152	158	30	229	127	98	99
13	72	204	28	244	13	89	95	85	203	51		130	102	6	243	91	76	208	79	67	44
14	73	16	57	129	122	67	245	220	93	14		141	43	124	110	18	42	230	142	32	189
15	179	145	86	20	241	195	171	202	96	137		126	100	88	195	73	47	78	106	178	71
16	76	49	113	210	184	131	41	134	100	61		45	148	249	115	10	185	220	226	187	3
17	10	230	6	209	34	118	84	17	193	112		245	75	20	4	84	70	136	41	183	37
18	198	221	155	97	180	242	213	83	200	140		166	191	34	54	9	23	125	33	173	15
19	39	162	88	110	154	70	187	215	227	102		202	215	231	36	122	235	81	64	131	239
20	33	80	141	240	3	158	174	147	247	116		210	209	103	225	132	149	53	16	96	162
21	217	135	106	19	52	111	172	64	26	90		161	197	238	107	123	85	146	174	221	169
22	107	108	166	11	22	99	165	114	153	27		2	206	180	135	160	212	153	186	94	28
23	2	152	133	143	167	236	161	159	205	216		224	68	8	216	198	12	237	52	203	232
24	125	21	101	142	196	249	127	169	130	190		163	24	38	211	121	25	244	86	134	111
25	94	105	144	177	123	12	246	178	77	121		31	40	154	113	129	217	150	207	241	117
				Rep 1												Rep 2					

**Figura 3.** Diseño de campo Centro experimental Cauquenes. Establecimiento de 250 poblaciones de alfalfa y sus dimensiones.

### 3.4. Evaluación de índices de vegetación y materia seca

La caracterización fenotípica se llevó a cabo mediante la evaluación de IV derivados de imágenes RGB (Fig. 2) y medición de materia seca producida en cada parcela.

Para efectos de esta tesis, la materia seca evaluada correspondió solo al primer corte la cual fue obtenida con una máquina segadora de barra autopropulsada el día diez de diciembre de 2020. Las muestras de forraje verde se secaron en horno con ventilación forzada de aire a 65°C hasta alcanzar peso constante para determinar el contenido de MS. El proceso consistió en cortar, secar y pesar el material vegetal obtenido de las 250 parcelas de cada repetición, obteniendo finalmente un total de 1000 muestras. Como criterio de corte, se utilizó como testigo a “Génesis”, madre de los híbridos establecidos en este ensayo quien es el eco-tipo más sobresaliente en el predio. También se contó el número de plantas en cada una de las parcelas para estimar el porcentaje de supervivencia.

Las imágenes RGB (red, green, blue) fueron tomadas con una cámara multispectral MAPIR con filtro OCN montada en un dron DJI Mavic Pro el día dos de diciembre de 2020 y analizadas con el programa de acceso libre BreedPicks. El programa de acceso libre BreedPicks 0.2 de código abierto fue utilizado para

determinar los diferentes índices de vegetación basados en las propiedades de color que posee cada píxel de la fotografía digital (Casadeuset al., 2007).

En este estudio se analizaron los siguientes 11 índices: matiz, saturación, luminosidad, intensidad,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $v^*$ ,  $u^*$ , CSI, área verde (green área (GA)), área más verde (greenest área (GGA)). Los últimos dos índices analizan la cantidad de píxeles verdes en la imagen difiriendo en que GGA excluye tonos verdes amarillentos y, por lo tanto, describe con mayor exactitud la cantidad de material fotosintéticamente activo y la senescencia foliar. El CSI, el cual es una relación entre el GA y GGA, es determinado con la siguiente fórmula  $CSI = 100 * (GA - GGA) / GA$ .

### **3.5 Análisis estadístico**

Los datos fueron analizados en Microsoft® y se determinó la significancia de las variables mediante un análisis ANOVA en modelos lineales mixtos (Diseño Alfa Láctice) utilizando el programa estadístico R versión 3.6.1.

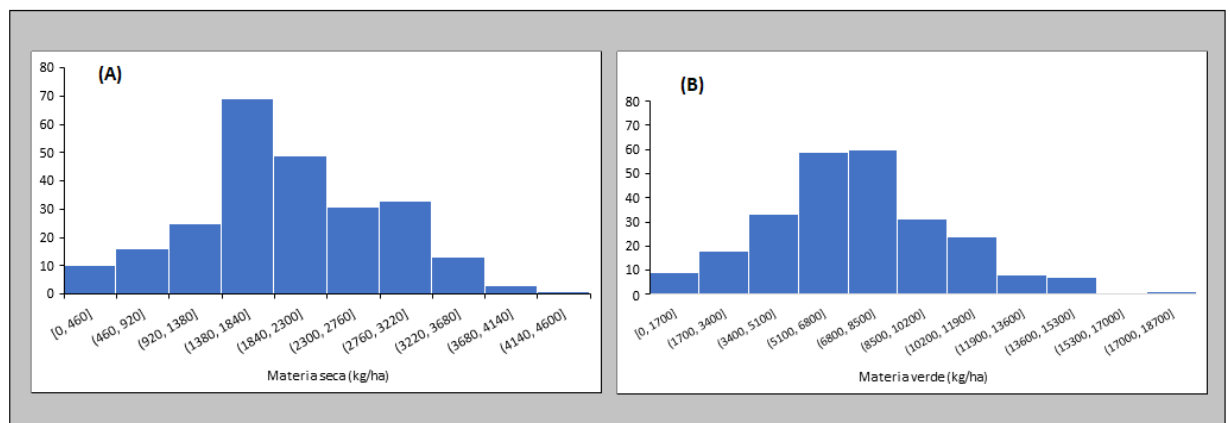
Se utilizó un método de regresión lineal simple para evaluar la relación existente entre las variables en estudio, siendo la variable dependiente: Materia seca (kg MS  $ha^{-1}$ ); y la variable independiente: Índice de vegetación (Matiz, Saturación, Luminosidad, Intensidad,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$ , Área verde, Área más verde y CSI).

En cuanto al coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), se utilizaron las medias de los 250 genotipos, los valores medios de los IV y materia seca para finalmente determinar cómo se correlacionan las variables y mediante el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) explicar cuánto de la variabilidad de la materia seca producida puede ser explicado por los índices vegetacionales.



#### 4. RESULTADOS

En la Figura 4 se muestra el histograma correspondiente a la producción de materia seca (MS) (Fig. 4A) y materia verde (MV) (Fig. 4B) de los 250 genotipos estudiados. Los datos de producción de materia seca (Fig. 4A) son asimétricos hacia la derecha y se concentraron mayormente (47% de los genotipos) entre los 1380 y los 2300 kg ha<sup>-1</sup>. Para efectos de este estudio, se consideró de alto rendimiento aquellos genotipos que sobrepasaron los 3210 kg ha<sup>-1</sup> de MS, por lo que solo un 7,2% del total de genotipos podría ser considerado altamente productivos. El ANDEVA mostró diferencias altamente significativas entre los genotipos (Cuadro 2). Con respecto al rendimiento de MV (Fig.4B) de los 250 genotipos, se observó una distribución más normal, con 47,6% de los genotipos con producciones entre 5100 y 8500 kg ha<sup>-1</sup>.



**Figura 4.** Histograma de rendimiento para Materia seca (A) y Materia verde (B) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 y 19 de diciembre del 2020.

De los 11 índices de vegetación obtenidos, tres de ellos (Saturación, b\* y v\*) no mostraron diferencias entre genotipos (Cuadro 2)

**Cuadro 2.** Valor de F y probabilidad como resultados del análisis de varianza realizado para la MS e índices de vegetación RGB de 250 genotipos de alfalfa, evaluados en Cauquenes el 2 de diciembre de 2020.

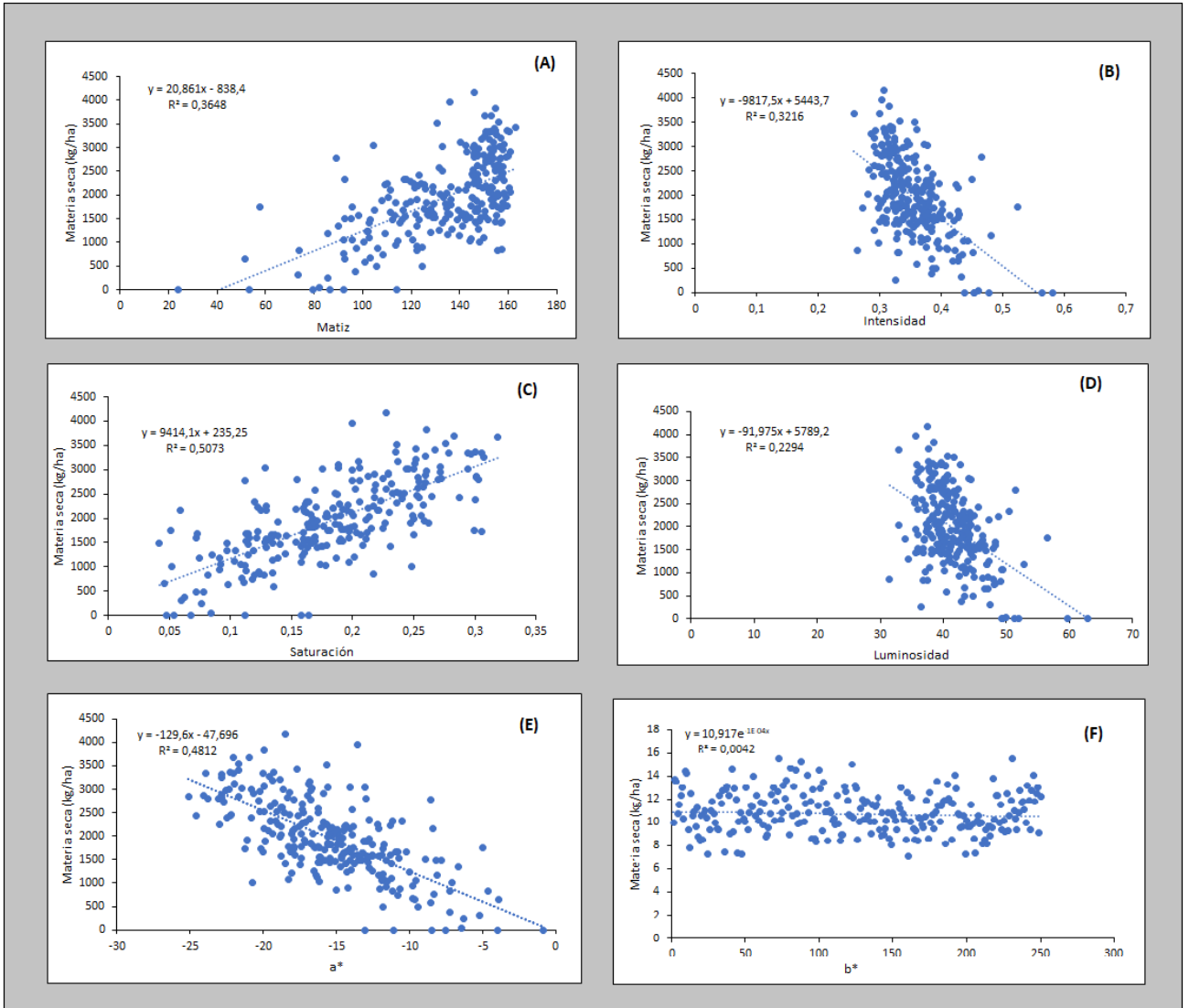
Rasgos	Valor F	p-valor	Significancia
Materia seca (kg/ha)	1.5466	7.095 <sup>-0,6</sup>	***
Matiz	1.4469	0.0001244	***
Intensidad	1.3591	0.001214	**
Luminosidad	1.332	0.002328	**
Saturación	1.1083	0.1559	n.s
a*	1.5425	8.021 <sup>-0,6</sup>	***
b*	1.1021	0.1691	n.s
u*	1.6163	8.257 <sup>-0,7</sup>	***
v*	0.9959	0.5092	n.s
GA	1.5785	2.695 <sup>-0,6</sup>	***
GGA	1.4898	3.75 <sup>-0,5</sup>	***
CSI	2.0792	7.661 <sup>-14</sup>	***

Significancia estadística: \*\* =  $p \leq 0,01$ , \*\*\* =  $p \leq 0,001$ , n.s = no significativo.

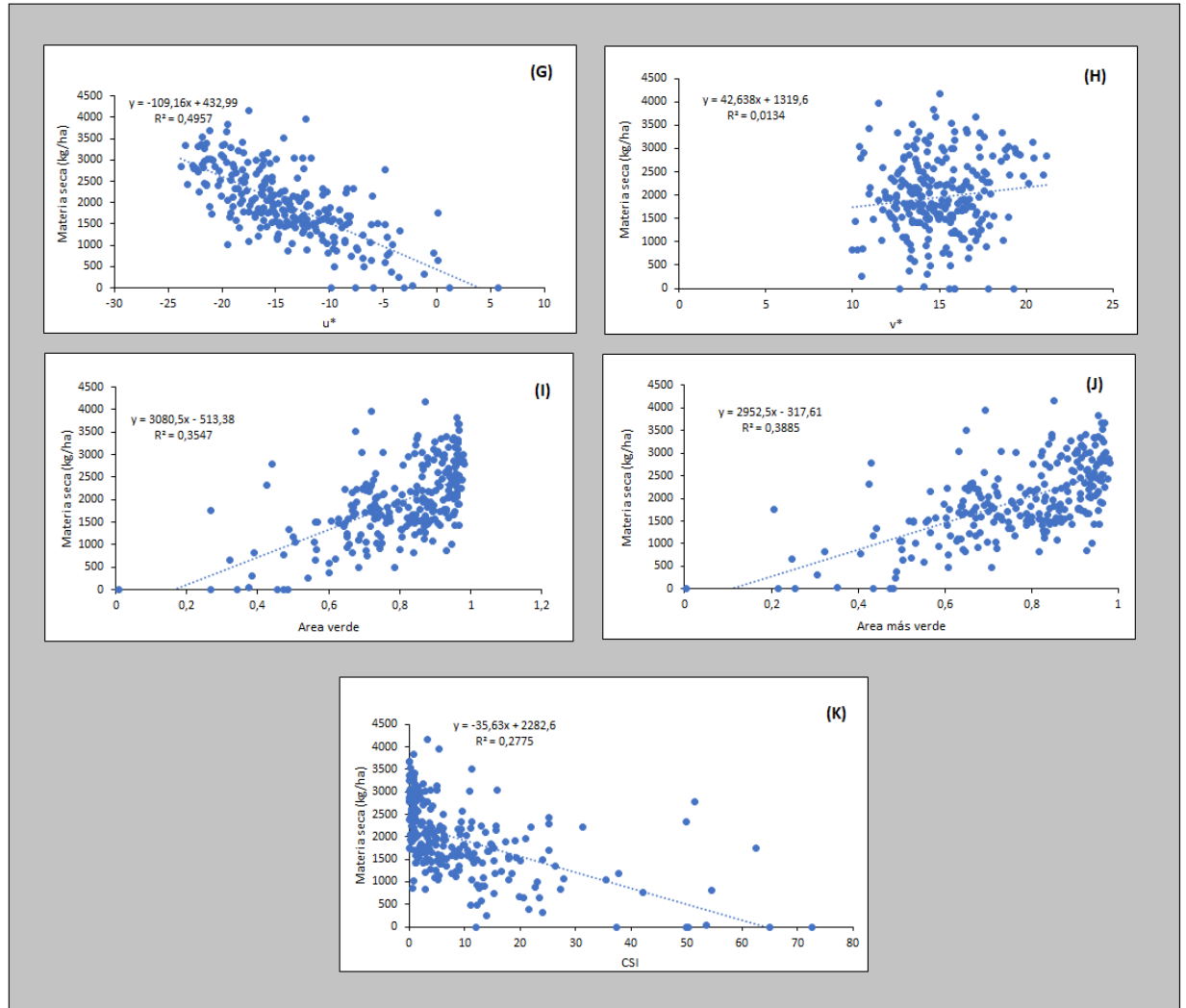
En el Cuadro 3 se muestran las correlaciones de Pearson ( $r$ ) obtenidas entre cada par de variables y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de éstas. El rango del valor  $R$  fluctúa entre -1 y +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables, mientras que el valor de  $R^2$  oscila entre 0 y 1 y explica la variabilidad de la MS ante cambios en los índices de vegetación. El análisis de correlación entre la MS producida y los índices de vegetación derivados del análisis de las imágenes RGB muestran asociaciones positivas con Matiz, Saturación, GA y GGA, pero negativas con Intensidad, Luminosidad, a\*, v\*, u\* y CSI (Cuadro 3; Figs. 5, 6 y 7). El índice Saturación es aquel que muestra la más alta asociación (71%), seguido del GA con una asociación del 62% y el Matiz con un 60%. Los índices de vegetación b\* ( $r = -0,0026$ ;  $p > 0,96$ ) y v\* ( $r = 0,115$ ;  $p > 0,069$ ) no mostraron correlaciones con la MS (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y coeficiente de determinación ( $r^2$ ) entre índices vegetación RGB y producción de materia seca en 250 genotipos de alfalfa en Cauquenes.

Índice de vegetación RGB	Materia seca		p-valor
	Coeficiente de Pearson ( $r$ )	Coeficiente de determinación ( $r^2$ )	
<b>Matiz</b>	0,60	0,3648	<0,00001
<b>Intensidad</b>	-0,567	0,3216	<0,00001
<b>Luminosidad</b>	-0,478	0,2294	<0,00001
<b>Saturación</b>	0,712	0,5073	<0,00001
<b>a*</b>	-0,693	0,4812	<0,00001
<b>b*</b>	-0,0026	0,000	0,9673
<b>u*</b>	-0,704	0,4957	<0,00001
<b>v*</b>	0,115	0,0314	0,0694
<b>GA</b>	0,595	0,3547	<0,00001
<b>GGA</b>	0,62	0,3885	<0,00001
<b>CSI</b>	-0,52	0,2775	<0,00001



**Figura 5.** Relación entre materia seca y Matiz (A), Intensidad (B), Saturación (C), Luminosidad (D), a\* (E) y b\*(F) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el diez de diciembre del 2020.



**Figura 6.** Relación entre materia seca y  $u^*$  (G),  $v^*$  (H), GA (I), GGA (J) y CSI (K) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el diez de diciembre del 2020.

## 5. DISCUSIÓN

La biomasa es una de las principales variables biofísicas de interés al momento de estudiar la vegetal y puede ser definida en términos de peso de materia fresca o peso de materia seca (MS).

La fijación de CO<sub>2</sub> se refiere a la capacidad de las plantas de absorber el carbono atmosférico sintetizándolo a través de la fotosíntesis para luego ser transformado en tejido verde. En zonas agrícolas (naturales o artificiales) la estimación de la fotosíntesis es un importante indicador que puede reflejar desde el estado de crecimiento del cultivo, anticipar el estado de las cosechas y realizar predicciones de rendimiento (Clevers et al., 2007).

El índice más utilizado para medir la productividad de las especies prateras lo constituye el rendimiento o producción de MS, la cual alcanza su máximo valor al segundo o tercer año de crecimiento (Soto, 2000). Estudios realizados por Berti y Samarappuli (2018), quienes buscaban determinar en alfalfa la densidad de plantas/m<sup>2</sup> y tallos/m<sup>2</sup> que maximizaran la producción de forraje y el valor nutritivo de éste, concluyeron que, luego de utilizar densidades de plantación de 72, 52, 37 y 36 plantas/m<sup>2</sup> para el primer, segundo y tercer año de producción, entregó que, durante el primer año de establecimiento, la densidad de plantas y tallos dieron como resultado rendimientos similares. Para temas de esta tesis, se utilizaron parcelas de densidades constantes equivalentes a 50 plantas/m<sup>2</sup> y tal como lo proponen Berti y Samarappuli (2018), este valor está dentro de los rangos de densidad que maximiza la producción de forraje.

De los 250 genotipos en estudio, solo el 7,2% produjo sobre 3210 kg MS ha<sup>-1</sup>, siendo los genotipos 108,165,110, 6, 107, 195, 31, 161, 136, 155, 42, 126, 34, 76, 220, 109, 125, 202 aquellos que pertenecen a este 7,2% de mayor producción con 4169, 3962, 3832, 3682, 3674, 3537, 3512, 3421, 3403, 3364, 3355, 3341, 3339, 3333, 3326, 3280, 3255 y 3210 kg MS ha<sup>-1</sup> respectivamente.

Para poder medir la actividad fotosintética de la vegetación, varios autores (Myneni y Los, 1995; Myneni et al., 1995; Liu et al, 2013.; Marino y Alvino, 2014) proponen que la utilización de los índices de vegetación calculados a partir de las bandas de color rojo e infrarrojo cercano (NIR) serían un buen método para obtener

esta estimación, además, éstos se correlacionan positivamente con la biomasa aérea presente en el predio de estudio (Schino et al., 2003; Ren et al., 2011)

De acuerdo con Bonham, (2013) el mejor método y, probablemente, el más comúnmente usado para medir la biomasa herbácea es el corte y cosecha de la biomasa total. Si bien los métodos de campo son muy útiles, éstos son destructivos, subjetivos, consumen mucho tiempo y solo son aplicables a escala local (Xu et al., 2008). Es por este motivo, índices como el NDVI y los obtenidos bajo el procesamiento de imágenes RGB, actúan como un indicador ampliamente utilizado como descriptor de las variaciones de la vegetación a pesar de los efectos atmosféricos y las variaciones que estos efectos pueden producir (Kaufman, 1984).

El comportamiento típico de una vegetación vigorosa muestra una baja reflectividad en las bandas del rojo visible y contrariamente una alta reflectividad en el infrarrojo cercano. Esto se produce debido a que las características espectrales se relacionan con la acción de pigmentos fotosintéticos presentes en la hoja, siendo la clorofila un compuesto que absorbe la radiación espectral alrededor de 645 nm, onda correspondiente a la banda roja (Rouse et al., 1974).

El NDVI es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de las bandas infrarrojo cercano (750 - 2600 nm) y rojo (630 - 700 nm). Tres bandas del espectro, la verde (520 - 530 nm), la azul (400 - 500 nm) y la roja (630 - 700 nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas (Rouse et al., 1974), mientras que la banda del infrarrojo cercano es reflejada casi en su totalidad. La mayor absorción del rojo y azul, sumada la fuerte reflexión del infrarrojo cercano, hacen de este índice un gran diferenciador entre las superficies con y sin vegetación. Los valores NDVI fluctúan entre -1 y +1 siendo solo aquellos valores positivos los que corresponden a vegetación y así mismo, valores más cercanos a 1 indican un alto contenido de superficie verde (Chuvieco, 2006).

Varios estudios han demostrado la existencia de una buena correlación del NDVI con la producción primaria de la parte aérea de la vegetación (Alcaraz-Segura et al., 2008), por lo que sería un buen método para evaluar la vegetación. En efecto, los índices de vegetación tienen una fuerte correlación con el crecimiento verde de la vegetación y su uso hace más fácil identificación de ésta (Alcaraz-Segura et al., 2008; Asmala, 2012). Como describe Chuvieco, 2006, la radiación de zonas que no

tiene cubierta vegetal, sean estas zonas rocosas o suelo desnudo, resulta en valores negativos, por lo tanto, el índice NDVI permitirá identificar las parcelas de alfalfa que tengan una mayor cobertura vegetal, debido a la mayor actividad fotosintética del cultivo.

El uso de índices derivados de imágenes RGB es parte de las nuevas tecnologías de detección que han despertado un gran interés en los últimos años. Éstas imágenes son un novedoso método que logra evaluar el estado fisiológico de las plantas y su fenotipado (Kefauver et al., 2015), evaluar efectos abióticos como el estrés hídrico (Vergara-Díaz y Zaman-Allah, 2016), hasta predecir rendimiento de grano y evaluar daños producidos por hongos en granos de trigo (Maloney et al., 2014).

Al momento de tomar la fotografía, la información que esta entrega está contenida dentro del color rojo, verde y azul y cada uno de los píxeles correspondientes a la imagen son traducidos en un valor digital perteneciente al espacio de color IHS (Intensity-Hue-Saturation; Intensidad-Matiz-Saturación) (Sancho-Adamson et al., 2019). La intensidad, representa la información lumínica de la imagen, el tono o matiz representa el color en sí y describe como es que el color atraviesa el espectro visible en forma de ángulo entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  y saturación define la pureza del color.

Además de las propiedades IHS, hay otros índices que entregan información numérica contenida en los píxeles, existe el espacio de color CIELAB (L,  $a^*$  y  $b^*$ ) y CIELUV (L,  $u^*$  y  $v^*$ ), el GA, que calcula la cantidad de píxeles verdes definiendo el verdor como  $60^\circ < \text{Tono} < 180^\circ$  y está altamente correlacionada con la biomasa (Olesen et al., 2002) o el índice de área más verde (GGA) que define el área aún más verde  $80^\circ < \text{Matiz} < 180^\circ$  (Sancho-Adamson et al., 2019) excluyendo tonalidades cercanas al amarillo.

Para los índices CIELAB y CIELUV, el L representa la luminosidad y fluctúa entre los valores 100 (blanco) y 0 (negro) mientras que  $a^*$  y  $b^*$  se mueven desde (-)  $a^*$  color verde a (+)  $a^*$  colores rojizos, (-)  $b^*$  tonalidades azules y (+)  $b^*$  tonalidades amarillas dentro de los valores -100 a 100, mientras que los índices  $u^*$  y  $v^*$ , se mueven en un plano de color igual que  $a^*$  y  $b^*$ , pero dentro de otro espacio de color. (Trusell et al., 2005)



Las imágenes digitales del estudio, al haber sido tomadas temprano en la temporada, no presentan material clorótico o senescente, es por este motivo que los índices  $b^*$  y  $v^*$ , quienes responden ante tonalidades azules y amarillas, muestrean correlaciones nulas ante la producción de MS, por otro lado, si las imágenes hubiesen sido tomadas mas tarde en la temporada, los índices  $b^*$  y  $v^*$  podrían ser indicadores y predecir qué población o material senesce antes.

## 6. CONCLUSION

El principal objetivo de esta investigación fue evaluar la relación entre índices de vegetación provenientes del análisis de imágenes RGB y la producción de MS de 250 poblaciones de alfalfa en condiciones de clima mediterráneo.

Los índices de vegetación derivados de imágenes RGB, específicamente Saturación,  $a^*$  y  $u^*$  poseen valores de correlación altos ( $R= 0,5; 0,48; 0,49$ ) con la producción de MS, por lo que el uso de índices vegetacionales provenientes de imágenes RGB y su utilización como herramienta de fenotipado vegetal en alfalfa sería un instrumento de gran utilidad para estimar la producción de MS.

Para efectos de esta tesis, se consideraron de alto rendimiento genotipos que tuvieran una producción de biomasa por sobre los  $3210 \text{ kg MSha}^{-1}$ . Dentro de los 250 poblaciones en estudio, solo el 7,2% superó el rendimiento esperado, siendo los genotipos 108,165,110, 6, 107, 195, 31, 161, 136, 155, 42, 126, 34, 76, 220, 109, 125, 202 quienes presentaron una producción de MS que fluctuó entre los 3210 y los  $4169 \text{ kg ha}^{-1}$  los cuales podrían ser estudiados a futuro como genotipos de alta producción en condiciones de clima Mediterráneo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

**ALCARAZ-SEGURA, D., BALDI, G., DURANTE, P., GARBULSKY, M.F. (2008).** Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17(3):108-117.

**ANGLADE J., BILLEN G., and GARNIER J. 2015.** Relationships for estimating N<sub>2</sub> fixation in legumes: Incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere*. pp: 6:1–24.

**ARAMENDIZ H., CARDONA, O., JARMA, A. (2012).** Effect of climate change on the physiology of crop plants: a review. En *Physiology of plants and climatic change*. p: 68-69

**ARAUS, J. L., SLAFER, G. A., REYNOLDS, M. P., AND ROYO, C. (2002).** Plant breeding in C3 cereals: what should we look for? *Ann. Bot.* 89, 925–940.

**ARRESE-IGOR C., GONZÁLEZ E., MARINO D., LADRERA R., LARRAINZAR E., GIL QUINTANA E. 2011.** Physiological responses of legume nodules to drought. *Plant Stress*. pp: 5:24–31.

**ASMALA, A., (2012).** Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied Mathematical Sciences*, 6(129-132), 6425-6436.

**BERTI, M. AND SAMARAPPULI, D. (2018).** How does sowing rate affect plant and stem density, forage yield, and nutritive value in glyphosate-tolerant alfalfa? *Agronomy*.

**BONHAM, C.D. 2013.** Measurements for Terrestrial Vegetation, Chapter 8: Biomass. Second Edition. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, John Wiley & Sons. 239p.

**CASADESÚS, J.; KAYA, Y.; BORT, J.; NACHIT, M.M.; ARAUS, J.L.; AMOR, S.; FERRAZZANO, G.; MAALOUF, F.; MACCAFERRI, M.; MARTOS, V.; ET AL.** Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Ann. Appl. Biol.* 2007, 150, 227–236

**CATTIVELLI, L.; RIZZA, F.; BADECK, F.; W., MAZZUCOTELLI, E., MASTRANGELO, A. M., FRANCIA, E., et al. (2008).** Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field Crop. Res.* 105, 1–2. 583–589.

**CHUVIECO, E. (2006).** *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona, España, Editorial Ariel.

**CLEVERS, J., VAN DER HEIJDEN, G., VERZAKOV, S., ET AL., 2007.** Estimating grassland biomass using SVM band shaving of hyperspectral data. *Photogramm*

Eng Remote Sens, 73, 1141.**CORREA, G. (1978)**. Alfalfa en la Décima Región. Estación Experimental Remehue (INIA). Boletín Técnico N° 152. Osorno. Chile. 28 p.

**COSTA, L., NUNES, L., AMPATZIDIS, Y. (2020)** A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms, Volumen 172. Agricultural and Biological Engineering Department, Southwest Florida Research and Education Center, University of Florida, USA.

**CUNNINGHAM, S. M.; GANA, J. A.; VOLENEC, J. J.; TEUBER, L. R. (2001)**. Winter Hardiness, Root Physiology, and Gene Expression in Successive Fall Dormancy Selections from 'Mesilla' and 'CUF 101' Alfalfa. *CropScience*, 41(4), 1091–. doi:10.2135/cropsci2001.4141091x

**DEL POZO IBAÑEZ, M. 1983**. Algunos caracteres morfológicos y fisiológicos. En: Del Pozo I, M. La alfalfa, su cultivo y su aprovechamiento. Tercera Edición. Madrid, Mundi-Prensa. pp: 61-86

**DEL POZO, A., MATUS, I., SERRET, M. D., AND ARAUS, J. L. (2014)**. Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions. The case of Chile. *Env. Exp. Bot.* 103, 180–189. Improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. *J. Agric. Sci.* 151, 105–118.

**DEL POZO, A.; YAÑEZ, A.; MATUS, I.; TAPIA, G.; CASTILO, D.; SANCHEZ-JARDÓN, L. and ARAUS, J. (2016)**. Physiological Traits Associated with Wheat Yield Potential and Performance under Water-Stress in a Mediterranean Environment. *Frot.PlantSci.* 7:987

**DEL POZO, A., OVALLE, C., ESPINOZA, S., BARAHONA, V., GERDING, M., HUMPHRIES, A. 2017**. Water relations, persistence and productivity of nine alfalfa cultivars growing in field conditions in Mediterranean environments of central Chile. *European Journal of Agronomy* 84: 16-22.

**DEL POZO, A., BRUNEL-SALDIAS, N., ENGLER, A., ORTEGA-FARIAS, S., ACEVEDO-OPAZO, C., LOBOS G.A., JARA-ROJAS, R., MOLINA-MONTENEGRO, M.A. 2019**. Climate change impacts and adaptation strategies of agriculture in Mediterranean-Climatic Regions (MCRs) *Sustainability* 11, 2769. doi:10.3390/su11102769

**DEL POZO A., MÉNDEZ-ESPINOSA A.M., ROMERO-BRAVO1 S., GARRIGA M., ESTRADA F., ESCOBAR A., ALCAÍNO M., LOBOS G.A. 2020**. Genotypic variation in leaf and whole-plant water use efficiencies are close related in bread wheat under well-watered and water-limited conditions during grain filling. *Scientific Report* 10:460 | <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57116-0>

**DÍAZ GARCIA-CERVIGÓN, J. 2015**. Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. pp: 43

**EHDAIE, B.; ALLOUSH, G. A.; MADORE, M. A. and WAINES, J. G. (2006).** Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat: I. post anthesis changes in internode dry matter. *Crop Sci.* 46, 735–746.

**ERICE, G., IRIGOYEN, J., PÉREZ, P., CARRASCO, R., SÁNCHEZ, M. (2006).** Effect of elevated CO<sub>2</sub>, temperature and drought on dry matter partitioning and photosynthesis before and after cutting of nodulated alfalfa. *PlantScience*, pp.1059–1067.

**ESPINOZA, S. Y BARAHONA, V. (2017).** Alfalfas en condiciones de secano mediterráneo. Ficha técnica no.3. Rahuen, Chile, 2017.

**ESPINOZA S., OVALLE C., ZAGAL E., MATUS I., TAY J., PEOPLES M.B., DEL POZO A. 2012.** Contribution of legumes to wheat productivity in Mediterranean environments of central Chile. *Field Crops Res.* pp: 133:150–159.

**FISCHER, R. A. (2007).** Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *J. Agric. Sci.* 145, 99–113.

**FISCHER, R. A. and EDMEADES, G. O. (2010).** Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50, S85–S98.

**FLEURY, D., JEFFERIES, S., KUCHEL, H., and LANGRIDGE, P. (2010).** Genetic and genomic tools to improve drought tolerance in wheat. *J. Exp. Bot.* 61, 3211–3222

**FOULKES, M. J.; SNAPE, J. W.; SHEARMAN, V. J.; REYNOLDS, M. P.; GAJU, O. and SYLVERSTAR-BRADLEY, R. (2007).** Genetic progress in yield potential in wheat: recent advances and prospects. *J. Agric. Sci.* 145, 17–29

**GARRIGA, M., OVALLE C., ESPINOZA, S., LOBOS, GA., Y DEL POZO, A. 2020.** "El uso de datos de reflectancia Vis-NIR y modelos de regresión para estimar rasgos fisiológicos y de productividad en alfalfa (*Medicago sativa*)," cultivos y pastos *Ciencia* 71 (1), 90-100.

**GONZALEZ, C., VALDES, F., ASTUDILLO, W., MADRID, M. (1973).** Estudio del estado nutritivo en cultivos de alfalfa (*Medicago sativa* L). *Cultivares Moapa y Liquen. Agricultura Técnica (Chile)* 23 (4):165-173.

**HERRIDGE D.F., PEOPLES M.B., BODDEY R.M. 2008** Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *PlantSoil.* Pp: 311:1–18. doi: 10.1007/s11104-008-9668-3.

**INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). 1998.** IV Censo nacional agropecuario, año 1997. Santiago de Chile.

**JONES, K., KOBAYASHI, H., DAVIES, B., TAGA, M., WALKER, G. (2007).** How rhizobial symbionts invade plants: the *Sinorhizobium-Medicago* model. *Nature review*, 5, pp. 619-633.

**KAUFMAN, Y. J. (1984).** Atmospheric effects on remote sensing of surface reflectance. *SPIE Remote Sensing* 475: 20-33.

**KEFAUVER, S.C.; EL-HADDAD, G.; VERGARA-DIAZ, O.; ARAUS, J.L (2015)** RGB Picture vegetation indexes for high-throughput phenotyping platforms (HTPPs). *Remote. Sens. Agr. Ecosyst. Hydrol.* XVIII. 9637, 96370J

**LIU, L.Y., ZHAO, J.J., GUAN, L.L., (2013).** Tracking photosynthetic injury of Paraquat-treated crop using chlorophyll fluorescence from hyperspectral data. *European Journal of Remote Sensing*, 46, 459-473

**LUO, Y.-Z.; LI, G.; YAN, G.; LIU, H. and TURNER, N.C. (2020).** Morphological Features and Biomass Partitioning of Lucerne Plants (*Medicago sativa* L.) Subjected to Water Stress. *Agronomy* 2020, 10, 322.

**LURO, P. (1981).** Modulo semillero "alfalfa" para áreas bajo riego. Argentina.

Recuperado de

[https://books.google.cl/books?id=P8YqAAAAYAAJ&pg=PP5&lpg=PP5&dq=luro+1981+alfalfa&source=bl&ots=xk1ldsAS7g&sig=ACfU3U1t2taxJr\\_DznhF5k1EFytY3E-Bog&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi76Yiw8JfwAhXCq5UCHfx1DeMQ6AEwD3oECA8QAw#v=onepage&q=luro%201981%20alfalfa&f=false](https://books.google.cl/books?id=P8YqAAAAYAAJ&pg=PP5&lpg=PP5&dq=luro+1981+alfalfa&source=bl&ots=xk1ldsAS7g&sig=ACfU3U1t2taxJr_DznhF5k1EFytY3E-Bog&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi76Yiw8JfwAhXCq5UCHfx1DeMQ6AEwD3oECA8QAw#v=onepage&q=luro%201981%20alfalfa&f=false)

**MALONEY, P.V.; PETERSEN, S.R.A.; NAVARRO, D.; MARSHALL, A.L.; MCKENDRY, J.M.; COSTA, J.P.M. (2014).** Digital image analysis method for estimation of fusarium-damaged kernels in wheat. *Crop Sci.*, 54, 2077–2083.

**MARINO, S., ALVINO, A., (2014).** Proximal sensing and vegetation indices for site-specific evaluation on an irrigated crop tomato. *European Journal of Remote Sensing*, 47, 271- 283

**MATUS, I., MELLADO, M., PINARES, M., MADARIAGA, R., AND DEL POZO, A. (2012).** Genetic progress in winter wheat cultivars released in Chile from 1920 and 2000. *Chil. J. Agr. Res.* 72, 303–308

**Mc DONALD, P., EDWARDS, R. and GREENHALGH J. (1969).** *Animal Nutrition.* (Ed.) Cliver and Body. Edinburg, Germany. 407 p.

**MISHRA, A. K. AND SING, V. P. (2010).** A review of growth concepts, *J. Hydrol.*, 391, 202-216.

**MORALES, C.G.; PINO, M.T. and DEL POZO, A. (2013).** Phonological and physiological responses to drought stress and subsequent rehydration cycles in two raspberry cultivars. *Scientia Horticulturae* 162:234–241.

**MORENO F., L. P. (2009).** Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191.

**MYNENI, R.B., LOS, S.O., 1995.** Potential gross primary productivity of terrestrial vegetation from 1982-1990. *Geophysical Research Letters*, 22, 2617-2620.

**MYNENI, R.B., MAGGION, S., LAQUINTA, J., PRIVETTE, J.L., GOBRON, N., PINTY, B., KIMES, D.S., VERSTRAETE, M.M., WILLIAMS, D.L., 1995.** Optical remote sensing of vegetation: modeling, caveats, and algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 51, 169-188.

**OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS (Odepa) 2007.** VII Censo agropecuario y Forestal año 2007.

**OLDROYD, G.; ENGSTROM, E.; LONG, S. (2001).** Ethylene Inhibits the Nod Factor signal transduction pathway of *Medicago truncatula*. *The Plant cell*, vol. 13, p. 1835-1949.

**OLESEN, J.E.; PETERSEN, B.M.; BERNTSEN, J.; HANSEN, S.; JAMIESON, P.D.; THOMSEN, A.G. (2002)** Comparison of methods for simulating effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat. *F. Crop. Res.* 2002, 74, 131–149

**PARGA, J. 1994.** Consideraciones Técnicas para el establecimiento y manejo de la alfalfa. En: Torres y Bortolameolli. (Ed.) Seminario utilización de alfalfa en la Décima Región. INIA Remehue. Osorno, Chile. pp: 3-23

**PIETRAGALLA, J., PASK, AJD., MULLAN, DM., CHÁVEZ-DULANTO PN. Y REYNOLDS, MP. (EDS.) (2013)** Fitomejoramiento Fisiológico II: Una Guía de Campo para la Caracterización Fenotípica de Trigo. México, D.F. CIMMYT

**PINI, F., FRASCELLA, A., SANTOPOLO, L., BAZZICALUPO, M., BIONDI, E., SCOTTI, C. (2012).** Exploring the plant-associated bacterial communities in *Medicago sativa* L. *BMC Microbiol* 12:78

**QADERI, M. and REID, D.; S.N. SINGTH (Ed.), (2009).** Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide and Temperature. *Climate Change and Crops*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Pp 1-8.

**QADERI, M.; KUREPIN, L.; and REID, D. (2012).** Effects of temperature and watering regime on growth, gas exchange and abscisic acid content of canola (*Brassica napus*) seedling. *Environmental and Experimental Botany*, 75, pp.107-113

**QUIROS, C.F. AND BAUCHAN, G. (1982).** The genus *Medicago* and the Origin of the *Medicago sativa* Complex.

**REN, H.R., ZHOU, G.S., ZHANG, X.S., 2011.** Estimation of green aboveground biomass of desert steppe in Inner Mongolia based on red edge reflectance curve area method. *Biosystems Engineering*, 109, 385-395.

**ROMERO, O. (1992).** Cultivares de Alfalfa para las Regiones Bio-Bio, Araucanía y Los Lagos. En: Romero, O. (Ed.) Seminario de alfalfa y su utilización en la zona Sur. Estación Experimental Catrillanca (INIA). Temuco, Chile, pp:33-65.

**ROMERO, L. (2016)** ¿Conviene sembrar alfalfa en primavera? INTA Rafaela

**ROUSE, J.W., R.H. HAAS, J.A. SCHELL, AND D.W. DEERING, (1974).** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317.

**SÁNCHEZ-GARCÍA M., C. ROYO, N. APARICIO, J. A. MARTÍN-SÁNCHEZ AND F. ÁLVARO (2013)** Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. *Journal of Agricultural Science* 151:105-118

**SANCHO-ADAMSON, MARC; TRILLAS, MARIA I.; BORT, JORDI; FERNANDEZ-GALLEGO, JOSE A.; ROMANYÀ, JOAN. 2019.** "Use of RGB Vegetation Indexes in Assessing Early Effects of *Verticillium* Wilt of Olive in Asymptomatic Plants in High and Low Fertility Scenarios" *Remote Sens.* 11, no. 6: 607. <https://doi.org/10.3390/rs11060607>

**SCHACHTMAN, D., GOODGER, J. (2008).** Chemical root to shoot signaling under drought. *Trends in Plant Science*, 13(6), pp. 1360-1385.

**SCHINO, G., BORFECCHIA, F., DECECCO, L., DIBARI, C., IANNETTA, M., MARITINI, S., PEDROTTI F., (2003).** Satellite estimates of grass biomass in a mountainous range in central Italy. *Agroforestry Systems*, 59, 157-162.

**SCHUBERT S. (1995).** Nitrogen assimilation by legumes-processes and ecological limitations. *Fertil. Res*; pp: 42:99–107. doi: 10.1007/BF00750503

**SCHULZE J. (2004).** How are nitrogen fixation rates regulated in legumes? *J. Plant Nutr. Soil Sci.* pp: 167:125–137. doi: 10.1002/jpln.200320358.

**SQUELLA, N. F. 2011.** Praderas de siembra para el territorio mediterráneo de la VI Región. Capítulo 6. Técnicas de conservación de suelos, agua y vegetación en territorios degradados. Curso de acreditación para operadores SIRSD 2011. Serie Actas INIA N° 22 70 p.

**SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR, MILLER, H.L. (EDS.),** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Trabajo sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge y Nueva York (2007), p. 19 -91.

**SORIANO, S. (2003).** Importancia del cultivo de Alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Estado de Baja California Sur. Monografía, Tesis Ingeniero Agrónomo en Producción, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. p: 44.z



- SOTO O, (ED.) (1990).** Producción y utilización de alfalfa zona centro sur y sur [en línea]. Chillan: Serie Quilamapu. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/38128> (Consultado: 24 abril 2021).
- SOTO, P. 2000.** Alfalfa en la zona centro sur de Chile. Colección de libros INIA N°4 Instituto de Investigación Agropecuaria. Chillán, Chile. 266 pp.
- SULIEMAN S., TRAN L.-S.P. 2013.** Asparagine: An amide of distinction in the regulation of symbiotic nitrogen fixation of legumes. *Crit. Rev. Biotechnol.* pp: 33:309–327. Trussell, H.J.; Saber, E.; Vrhel, M. Color image processing. IEEE.
- TRUSELL, H.J., SABER, E, VRHEL, M. (2005):** Color Image Processing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 22(1):14-22.
- UNKOVICH M.J., BALDOCK J., PEOPLES M.B.2010.** Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N<sub>2</sub> fixation by crop and pasture legumes. *PlantSoil*. Pp0; 329:75–89.
- URZÚA, H. 2005.** Beneficios de la Fijación Simbiótica de Nitrógeno en Chile. Departamento de Ciencias Vegetales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. Página 4.
- VALENZUELA, M. 2017.** Estudio de factibilidad técnica y económica de un modelo exportador de heno de alfalfa compactado para los pequeños productores del valle central. Informe III. pp:18-19.
- VALLADARES, F., VILAGROSA, A., PEÑUELAS, J., OGAYA, R., CAMARERO, J., CORCUERA, L., SISÓ, S. y GIL-PELEGRÍN, E.** Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante.* Capítulo 6, p: 163- 190.
- VERGARA-DIAZ, O; KEFAUVER, S; ELAZAB, A; NIETO- TALADRIZ, M y ARAUS, L. 2015.** Grain yield losses in yellow-rusted durum wheat estimated using digital and conventional parameters under field conditions. *The Crop Journal*, Volume 3, Issue 3, Pages 200-210, ISSN 2214-5141, <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.03.003>.
- VERGARA-DÍAZ, O.; ZAMAN-ALLAH, M.A.; MASUKA, B.; HORNERO, A.; ZARCO-TEJADA, P.; PRASANNA, B.M.; CAIRNS, J.E.; ARAUS, J.L (2016).** A novel remote sensing approach for prediction of maize yield under different conditions of nitrogen fertilization. *Front. Plant Sci.* 7, 1–13. [CrossRef] [PubMed].
- WEIER, J. and HERRING, D. (2000).** Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Measuring vegetation (DNVI & EVI).
- XU, B.; YANG, X.C.; TAO, W.G. (2008).** MODIS-based remote sensing monitoring of grass production in China. *International Journal of Remote Sensing* 29:5313–27.
- ZHOU, Y., HE, Z. H., CHEN, X. M., WANG, D. S., YAN, J., XIA, X. C., et al. (2007).** “Genetic improvement of wheat yield potential in North China,” in *Wheat Production*

in Stressed Environments, eds H. T. Buck, J. E. Nisi, and N. Salomón (New York, NY: Springer-Verlag),

## 8. ANEX

Genotipo	Media de Hue	Media de Intensity	Media de Saturation	Media de Lightness	Media de a*	Media de b*	Media de u*	Media de v*	Media de GA	Media de GGA	Media de CSI	Media de kg/ha MS
108	145,911675	0,3060364	0,22701089	37,4140135	-18,4507828	10,8802697	-17,516023	15,0458035	0,87268729	0,85023412	3,29152231	4169,375
165	135,753944	0,3033224	0,1993174	35,634841	-13,5512932	8,48002623	-12,2179188	11,5044254	0,71879392	0,69317002	5,25232654	3961,5625
110	154,763503	0,31511884	0,26032872	38,5389958	-19,9214205	10,2914813	-19,4967123	14,6504575	0,9607136	0,95295687	0,79817916	3831,625
6	150,507023	0,29980932	0,28295622	37,7224605	-22,0657938	12,312612	-21,153108	17,105449	0,96241772	0,96188545	0,05719055	3681,875
107	153,222895	0,25797015	0,31887978	32,9038903	-20,9791415	11,0321208	-19,5350593	14,8146115	0,96830684	0,96830684	0	3674,0625
195	155,997175	0,33158843	0,27567088	40,7035043	-21,6920045	10,6599548	-21,8276845	15,6902113	0,96546546	0,96325013	0,22549609	3536,875
31	130,624415	0,35678755	0,23585995	41,6820973	-15,6583502	9,46291558	-14,2720918	13,4238633	0,67560282	0,65043395	11,1980239	3511,5625
161	163,142048	0,31638939	0,25186639	37,661265	-17,7132855	7,45171863	-18,0867923	10,9219535	0,851855	0,84566288	0,7133504	3420,9375
136	154,539003	0,31987864	0,26743813	39,605141	-21,6504913	11,5778335	-21,387855	16,5672158	0,93250839	0,92403036	0,95808198	3402,5
155	154,798768	0,305864	0,30016851	38,2753773	-22,2862768	11,1648659	-21,9290288	15,8697066	0,95299604	0,95277268	0,02298146	3364,0625
42	159,53823	0,3592514	0,23485416	42,7513298	-19,3008448	9,1898185	-19,7923428	13,8294233	0,91774428	0,91218894	0,59378048	3355
126	160,561253	0,29180774	0,30523068	35,8595533	-20,0397603	8,5282262	-19,9123803	12,6116918	0,84861235	0,8465898	0,20796003	3340,625
34	153,2525	0,31959923	0,27840409	39,6906265	-22,0395618	11,5990742	-21,7379328	16,6429785	0,95090693	0,94349776	0,82738586	3338,75
76	150,93117	0,31838479	0,29431786	40,3113218	-23,9112068	13,22228684	-23,4452228	18,6316343	0,94928012	0,94650669	0,28860308	3332,8125
220	152,3298	0,30758975	0,29690421	38,7620293	-22,8071063	12,2972958	-22,1707173	17,3141081	0,96394622	0,9612976	0,27840185	3326,25
109	155,277523	0,30881694	0,25935351	37,6872065	-19,5869013	10,1187412	-19,1306898	14,4587025	0,89781146	0,89047213	0,75489828	3280
125	150,446443	0,28495325	0,30704534	36,4823075	-22,8470865	12,9028911	-21,6404195	17,5798685	0,96504033	0,96504033	0	3255
202	157,080953	0,31212129	0,25134446	37,8388528	-18,8527783	9,60014003	-18,486645	13,676124	0,84451075	0,83846014	0,68578554	3210

**Cuadro. 1A** Selección de los 18 genotipos de *Medicago sativa* más productivos del ensayo y las medias de producción de materia seca expresada en kg/ha y IV correspondientes a las cuatro repeticiones correspondientes a estos.

**Cuadro 1B.** Tabla de Andeva índice vegetacional Matiz (Hue) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	932406	3744,6	1,4469	0,0001244 ***
Error	713	1845216			
Total	1000	2777622			

Coefficiente de Variación: 47,5 %

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 2B.** Tabla de Andeva índice vegetacional Intensidad en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	1,2163	0,0048846	1,3591	0,001214 **
Error	713	2,5625	0,0035939		
Total	1000	3,7788			

Coefficiente de Variación: 12,8%

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 3B.** Tabla de Andeva índice vegetacional Saturación en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	0,090747	0,00036445	1,1083	0,1559
Error	713	0,234467	0,00032885		
Total	1000	0,325214			

Coefficiente de Variación: 58,7 %.

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 4B.** Tabla de Andeva índice vegetacional Luminosidad en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	11699	46,986	1,332	0,002328**
Error	713	25151	35,275		
Total	1000	36850			

Coeficiente de Variación: 11,7%

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 5B.** Tabla de Andeva índice vegetacional a\* en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	1406,3	5,6477	1,5425	8,021e-06***
Error	713	2610,5	3,6613		
Total	1000	4016,8			

Coeficiente de Variación: -36,7 %

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 6B.** Tabla de Andeva índice vegetacional b\* en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	374,80	1,5052	1,1021	0,1691 n,s
Error	713	973,77	1,3657		
Total	1000	1348,57			

Coeficiente de Variación: 14,2%

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 7B.** Tabla de Andeva índice vegetacional u\* en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	3152	12,6586	1,6163	8,257e-07***
Error	713	5584	7,8316		
Total	1000	8736			

Coefficiente de Variación: -104,6 %

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 8B.** Tabla de Andeva índice vegetacional v\* en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	591,32	2,3748	0,9959	0,5092 n,s
Error	713	1700,27	2,3847		
Total	1000	6791,59			

Coefficiente de Variación: 14,1 %

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 9B.** Tabla de Andeva índice vegetacional área verde (GA) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	13,311	0,053456	1,5785	2,695e-06***
Error	713	24,147	0,033866		
Total	1000	37,458			

Coefficiente de Variación: 38,3%

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 10B.** Tabla de Andeva índice vegetacional Área más verde (GGA) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	12,854	0,051622	1,4898	3,75e-05***
Error	713	24,705	0,034650		
Total	1000	36,559			

Coeficiente de variación: 43,8%

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 11B.** Tabla de Andeva índice vegetacional Componente de senescencia (CSI) en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	111055	446,00	2,0792	7,661e-14***
Error	713	150154	214,51		
Total	1000	261209			

Coeficiente de Variación: 78%

Nivel de significancia: 0,05

**Cuadro 12B.** Tabla de Andeva Materia seca expresada en kg/ha en 250 genotipos de *Medicago sativa* evaluadas en Cauquenes el 10 de diciembre del 2020.

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados Medios	Valor F	Probabilidad
Tratamientos	249	592724733	2380421	1.4622	8.535e-05***
Error	713	1139572000	1627960		
Total	1000				

Coeficiente de Variación: 63,3

Nivel de significancia: 0,05