

Efectos de Fertilización y Riego Sobre Parámetros Morfológicos y Fisiológicos en *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden Bajo un Sistema Dendroenergético para la Vereda Buraga

Municipio de Macaravita

Ingrit Lorena Bautista Anaya, Paola Andrea Triana Mora

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Forestal

Director

Rubén Carvajal Caballero

Ingeniero Agrónomo

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia- IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Málaga

2019

DEDICATORIA

A nuestros padres y hermanos por ser el motivo que nos llevara a cumplir esta meta, sin su amor, apoyo y confianza no hubiese sido posible.

Con inmensa gratitud y amor

Ingrit y Paola

*“Así que ni el que planta
ni el que riega es algo,
sino Dios,
que da el crecimiento”*

1 corintios 3:7.

Agradecimientos

- A Dios por darnos vida, sabiduría y fuerzas en esta etapa formación profesional.
- A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos una formación profesional integral, ética y de alta calidad.
- Al ingeniero Rubén Carvajal Caballero por su esfuerzo y compromiso en la dirección de nuestro trabajo de investigación.
- A la ingeniera Sandra Luengas Aponte y la Tecnóloga Liliana Triana Mora por el apoyo económico en nuestro proceso de formación profesional.
- A Yudy, Juan Pablo, Steven, Ricardo, Juliana, Jhon Fredy y Jeeferson por su apoyo en el proceso de investigación.
- A nuestras familias, amigos, compañeros de la universidad y demás personas quienes estuvieron atentos a brindarnos su apoyo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	16
1 Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 Planteamiento del Problema	18
2.1 Definición del Problema	18
2.2 Justificación	19
3 Marco Referencial.....	20
3.1 Marco Teórico	20
3.1.1 <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden.	20
3.1.2 Plantaciones Dendroenergéticas.....	21
3.1.3 Nutrición Forestal.....	23
3.1.4 Fisiología.	24
3.2 Marco Jurídico, Normativo e Institucional	26
4 Metodología	28
4.1 Área de Estudio	28
4.2 Material Vegetal.....	29
4.3 Diseño Experimental	30
4.4 Suelo	32
4.5 Clima	32
4.6 Medición de Variables Morfológicas y Fisiológicas.....	32
5 Resultados.....	34

5.1 Suelo	34
5.2 Clima	36
5.3 Evaluación de Fertilización y Riego Sobre Parámetros Morfológicos y Fisiológicos	38
5.3.1 Variable Altura (A).....	39
5.3.2 Variable Diámetro (D).....	42
5.3.3 Variable Área Foliar (AF).....	46
5.3.4 Variable Biomasa Verde (BV).....	49
5.3.5 Variable Biomasa Seca (BS).....	52
5.3.6 Variable Eficiencia Fotosintética (EF).	56
5.3.7 Variable Conductancia Estomática (CE).	58
5.4 Contenido de Nutrientes Foliares.	60
5.4.1 Eficiencia Fisiológica (EF).	60
5.4.2 Eficiencia Agronómica (EA).	62
6 Discusión de Resultados.....	62
6.1 Radiación Fotosintéticamente Activa y Fotosíntesis.....	62
6.2 Comparación de Altura y Diámetro.	64
6.3 Relación Biomasa Seca y Área Foliar.	64
6.4 Eficiencia Fotosintética.	66
6.5 Conductancia Estomática.....	67
6.6 Contenido de Nutrientes Foliares.	68
7 Conclusiones.....	71
8 Recomendaciones.....	72
Referencias Bibliográficas.....	73
Apéndices	78

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Modelo factorial 2x2.	31
Tabla 2. Morfología de raíces por tratamiento.	55
Tabla 3. Índices de crecimiento.	56
Tabla 4. Contenido de nutrientes foliares.	60
Tabla 5. Calculo de la eficiencia en el uso de nutrientes.	60
Tabla 6. Comparación de biomasa seca y área foliar entre <i>Eucalyptus globulus</i> y <i>E. grandis</i>	65
Tabla 7. Comparación de las concentraciones de nutrientes foliares.	68

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de ubicación.	29
Figura 2. Disposición del diseño experimental en campo.	31
Figura 3. Perfil del suelo.	35
Figura 4. Análisis químico del suelo.	36
Figura 5. Mapa de isoyetas para el municipio de Macaravita.	37
Figura 6. Mapa de precipitación promedio para el año 2018.	37
Figura 7. Radiación fotosintéticamente activa.	38
Figura 8. Histograma comparación de medias segunda toma de datos Altura.	39
Figura 9. Histograma comparación de medias tercera toma de datos Altura.	40
Figura 10. Histograma comparación de medias cuarta toma de datos Altura.	40
Figura 11. Histograma comparación de medias quinta toma de datos Altura.	41
Figura 12. Comportamiento promedio de altura por tratamiento para toma de datos.	42
Figura 13. Histograma comparación de medias tercera toma de datos Diámetro.	43
Figura 14. Histograma comparación de medias cuarta toma de datos Diámetro.	43
Figura 15. Histograma comparación de medias quinta toma de datos Diámetro.	44
Figura 16. Comportamiento promedio de diámetro por tratamiento para toma de datos.	45
Figura 17. Volumen de un árbol por tratamiento.	46
Figura 18. Histograma comparación de medias primera toma de datos área foliar.	47
Figura 19. Histograma comparación de medias cuarta toma de datos área foliar.	47
Figura 20. Comportamiento promedio de área foliar por tratamiento para toma de datos.	48
Figura 21. Histograma comparación de medias segundo modelo destructivo biomasa verde.	49
Figura 22. Histograma comparación de medias tercer modelo destructivo biomasa verde.	50
Figura 23. Histograma comparación de medias cuarto modelo destructivo biomasa verde.	51
Figura 24. Comportamiento promedio de biomasa verde por tratamiento para toma de datos.	51
Figura 25. Histograma comparación de medias primer modelo destructivo biomasa seca.	52
Figura 26. Histograma comparación de medias segundo modelo destructivo biomasa seca.	53
Figura 27. Histograma comparación de medias tercer modelo destructivo biomasa seca.	53

Figura 28. Histograma comparación de medias cuarto modelo destructivo biomasa seca.	54
Figura 29. Comportamiento promedio de biomasa seca por tratamiento para toma de datos.....	55
Figura 30. Histograma comparación de medias primera toma de datos eficiencia fotosintética. .	57
Figura 31. Comportamiento promedio de eficiencia fotosintética por tratamiento para toma de datos.	58
Figura 32. Comportamiento promedio de conductancia estomática por tratamiento para toma de datos.	59
Figura 33.Eficiencia en el uso de los nutrientes.	61
Figura 34. Eficiencia agronómica.	62
Figura 35. Respuesta de la asimilación CO ₂ frente a la radiación fotosintéticamente activa en <i>Eucalyptus grandis</i>	63
Figura 36. Radiación fotosintéticamente activa en la zona de estudio.	64
Figura 37. Acumulación de biomasa seca en g a los 126 días de establecida la plantación de <i>Eucalyptus globulus</i>	65
Figura 38. Área foliar promedio por planta de <i>Eucalyptus globulus</i> para diferentes dosis de fertilizante a los 126 días de establecida la plantación.....	66
Figura 39.Eficiencia fotosintética de <i>Eucalyptus grandis</i> para dos ambientes.....	67
Figura 40.Conductancia estomática media durante el día y parte de la noche en <i>Eucalyptus grandis</i> W Hill ex Maidem.....	67
Figura 41. Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de los nutrientes.	69
Figura 42. Formas de fosforo en el suelo.	71

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Tratamiento pregerminativo en <i>Eucalyptus grandis</i> y bandeja multicelda con sustrato de turba para la germinación.....	78
Apéndice B. Germinación y plantas en vivero de <i>Eucalyptus grandis</i>	78
Apéndice C. Siembra del material vegetal y fertilización con elementos menores.....	79
Apéndice D. Medición de variables morfológicas.....	79
Apéndice E. Toma de la radiación fotosintéticamente activa a las 6:30 am.	80
Apéndice F. Toma de conductancia estomática.....	80
Apéndice G. Muestre destructivo primera 22 de abril de 2018.	81
Apéndice H. Secado de tejido vegetal 22 de abril de 2018.	81
Apéndice I. Muestreo destructivo árbol total 6 de diciembre de 2018.	82
Apéndice J. Plantación de <i>Eucalyptus grandis</i> a un año de establecimiento.	82

RESUMEN

TITULO: EFECTOS DE FERTILIZACIÓN Y RIEGO SOBRE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS Y FISIOLÓGICOS DE *Eucalyptus grandis* W. HILL EX MAIDEN BAJO UN SISTEMA DENDROENERGÉTICO PARA LA VEREDA BURAGA MUNICIPIO DE MACARAVITA¹

AUTOR: INGRIT LORENA BAUTISTA ANAYA
PAOLA ANDREA TRIANA MORA².

PALABRAS CLAVES: FERTILIZACIÓN, RIEGO, PARÁMETROS MORFOLÓGICOS, PARÁMETROS FISIOLÓGICOS, *Eucalyptus*.

DESCRIPCIÓN:

La reducción de la cobertura del bosque seco al 8% en el país es causada principalmente por actividades antrópicas de extracción de biomasa forestal (madera y leña) y la expansión de la frontera agrícola, la leña satisface el 80% de las necesidades energéticas rurales del país. En el presente estudio se evaluó el efecto de la fertilización y el riego sobre variables morfológicas y fisiológicas de una plantación dendroenergética de *Eucalyptus grandis* durante el primer año de establecida. Se tomaron datos entre marzo y diciembre de 2017 para las variables: altura, diámetro, biomasa verde, biomasa seca, área foliar, conductancia estomática, eficiencia fotosintética y extracción de nutrientes foliares. Adicionalmente se realizó una caracterización edafoclimática del lugar.

Los resultados muestran que el riego y la fertilización no afectaron los procesos de eficiencia fotosintética y conductancia estomática, la fertilización mostro valores significativos entre tratamientos para las variables diámetro, altura y área foliar, mientras que la producción de biomasa verde y seca fue dependiente de la combinación del riego y la fertilización arrojando diferencias significativas entre tratamientos. El contenido de nutrientes foliares sigue tendencias semejantes entre tratamientos, con concentraciones óptimas para el N, P, K y B, deficientes en S, Fe, Mn, Zn y Cu, abundantes en Ca y Mg. La eficiencia en la fijación de elementos es mayor para el Ca y Mg en comparación de P y K.

¹ Trabajo de grado

² Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal.
Director: CARVAJAL CABALLERO, Ruben. Ing, Agrónomo.

ABSTRACT

TITLE: EFFECTS OF FERTILIZATION AND IRRIGATION ON PARAMETERS MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL OF *Eucalyptus grandis* W. HILL EX MAIDEN UNDER A DENDROENERGY SYSTEM TO THE BURAGA LANE TOWN MUNICIPALITY OF MACARAVITA³

AUTHOR: INGRIT LORENA BAUTISTA ANAYA
PAOLA ANDREA TRIANA MORA⁴.

KEYWORDS: FERTILIZATION, IRRIGATION, MORPHOLOGICAL PARAMETER, PHYSIOLOGICAL PARAMETERS, *Eucalyptus*.

DESCRIPTION:

The reduction of the range dry forest to the 8% in the country is caused mainly by antropic activities of extraction of forest biomass (wood and firewood) and the expansion of the agricultural frontier, the firewood satisfies 80% of the rural energy needs of the country. In this study, the fertilization effect and irrigation on morphological and physiological variables of a dendroenergy plantation of *Eucalyptus grandis* was evaluated during the first year of establishment. Information were taken among march y december 2017 for the variables: height, diameter, green biomass, dry biomass, foliar area, stomatal conductance, photosynthetic efficiency and extraction of foliar nutrients. Additionally, an edaphoclimatic characterization of the place was made.

The results show that irrigation and fertilization did not affect the process of photosynthetic efficiency and stomatal conductance, fertilization showed significant values among treatments for diameter, height and leaf area variables, while the production of green and dry biomass was dependent on the combination of irrigation and fertilization showing significant differences among treatments. The contents of foliar nutrients follows similar tendencies among treatments, with optimal concentrations to N, P, K and B, deficient in S, Fe, Mn, Zn and Cu, abundant in Ca and Mg. The efficiency in the fixation of elements Ca and Mg is bigger than P and K.

³ Bachelor Thesis

⁴ Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia. Programa de Ingeniería Forestal.
Director: CARVAJAL CABALLERO, Ruben. Ing, Agrónomo.

Introducción

El aprovechamiento y la deforestación de los bosques bajo fines maderables y energéticos han conducido a fortalecer, mejorar y proteger la conservación de los bosques nativos, mediante la ampliación del sector forestal; incentivando la implementación de plantaciones forestales comerciales con especies maderables de alta adaptabilidad y rápido crecimiento. Los géneros más plantados gracias a sus características de crecimiento y desarrollo corresponden al género *Eucalyptus* y *Pinus* (Ribadeneira y Paulina, 2015).

Eucalyptus es el género más plantado en el mundo, ocupando el 90% de la superficie forestal comercial, siendo su principal exponente *Eucalyptus grandis* (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, 2008). En Colombia hay aproximadamente 470.000 ha de plantaciones comerciales (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2018) de las cuales la gran mayoría se encuentran establecidas en suelos muy lixiviados, de baja fertilidad y con periodos de sequía prolongados durante el año, disminuyendo la capacidad en su proceso nutricional (Rojas, 2015); 15,984 ha corresponden a *Eucalyptus grandis*, ubicadas en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Risaralda y Valle (Mejía, Burbano, García, y Baena, 2014).

Esta especie presenta mecanismos fisiológicos de defensa ante condiciones adversas de estrés hídrico y sequía, con capacidad de osmorregulación o ajuste osmótico para conservar la turgencia de las hojas, sistema radicular profundo, y disposición de las hojas de manera vertical evitando la radiación solar directa; con un alto grado de adaptabilidad a suelos de baja fertilidad, capaz de prosperar bajo condiciones nutricionales limitantes (Mejía *et al.*, 2014).

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar efectos de fertilización y riego sobre parámetros morfológicos y fisiológicos en una parcela dendroenergética de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden durante el primer año de desarrollo en la vereda Buraga municipio de Macaravita.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar condiciones edafoclimáticas para la finca Las Delicias municipio de Macaravita.

Evaluar parámetros de crecimiento y desarrollo del *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden bajo diferentes condiciones de riego y fertilización.

Determinar la eficiencia del aprovechamiento de nutrientes en el *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

2 Planteamiento del Problema

2.1 Definición del Problema

Los bosques secos tropicales en el país presentan un alto grado de fragmentación reflejada en la disminución de su cobertura (Valencia, Trujillo, y Vargas, 2012), a tal punto que actualmente solo permanece un 8% del área total en el país (Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt, 2016). La causa de la fragmentación es la intervención antrópica a través de la expansión de la frontera agrícola y la extracción de madera y leña (Gutierrez, 2014), actividades que buscan la satisfacción de las necesidades básicas de las familias campesinas, pero que al ser ejecutadas mediante técnicas insostenibles no garantizan la regeneración de los bosques secos, generando el deterioro de procesos ecológicos como el ciclaje de nutrientes y regulación del ciclo hídrico, la pérdida de diversidad genética, aumento de procesos erosivos, degradación de los suelos y modificación del paisaje (Pizano y García, 2014). Igualmente, con la degradación de estos ecosistemas se está contribuyendo a la emisión de gases efecto invernadero.

la leña ocupa el 80% del total nacional de consumo energético para el sector rural (Valderrama y Linares, 2008), según la Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (2008) para el año 2009 se consumieron 10.547.000 m³ de madera destinada a calefacción y cocción. Actualmente la dependencia energética de madera obtenida del bosque natural se mantiene y se estima que para el 2030 en el mundo 2700 millones de personas dependan de la leña como principal fuente de energía (Aristizábal, 2010).

Para el sector rural la falta de alternativas energéticas de fácil acceso como gas propano, gas natural, petróleo, carbón mineral, energía eléctrica, energía solar, entre otras conllevan a la dependencia de los combustibles leñosos, agotando el recurso forestal y poniendo en peligro la

seguridad energética. Un ejemplo de lo anterior se encuentra en la vereda Buraga municipio de Macaravita, Santander donde la cocción de alimentos se realiza en un 95% con leña y el restante con gas (Alcaldía municipal Macaravita, 2002).

2.2 Justificación

La disminución de la cobertura boscosa en zonas áridas pone a disposición una gran extensión de suelo para el desarrollo de diversas actividades productivas, según Pizano y García (2014) el 29% del territorio original del bosque seco tropical en Colombia tienen aptitud forestal y el 9% aptitud agroforestal, presentándose la oportunidad de evaluar la implementación de proyectos forestales dendroenergéticos bajo un enfoque sistemático como alternativa de producción segura y sustentable de biomasa combustible (Pinilla y Valenzuela, 2012), actividad coherente con el uso potencial del suelo y las actuales necesidades energéticas del país.

Entre los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) citados en el protocolo de Kyoto se propone la dendroenergía como alternativa que contribuye al crecimiento económico del sector rural, la seguridad energética del país y los esfuerzos de mitigación del cambio climático (Silveira, 2005), sin embargo estas plantaciones forestales de cortos turnos de rotación y altas tasas de crecimiento deben garantizar niveles de producción sostenibles, lo que implica una alta demanda de nutrientes del suelo y de agua (Goya, Frangi, Dalla Tea, Marcó, y Larocca, 1997). Se requiere desarrollar trabajos de investigación encaminados a evaluar los factores limitantes de las zonas potenciales de producción forestal para evitar pérdidas económicas con la implementación de proyectos que no cumplan con los parámetros de producción esperada o que bajo un manejo silvicultural inadecuado lleguen a causar problemas ambientales por sobreutilización del suelo y ruptura de equilibrio en los ciclos biogeoquímicos.

Eucalyptus hace parte de los géneros con mayor explotación forestal en el país, actividad desarrollada en suelos de baja fertilidad y altos índices de deficiencia hídrica (Rojas, 2015) limitantes que llevan a la modificación de algunas características morfológicas y fisiológicas en respuesta a condiciones de estrés (Fernández, Tapias, y Alesso, 2010). El objetivo del trabajo de investigación desarrollado en una plantación forestal dendroenergética de *Eucalyptus grandis* es evaluar la influencia de los factores limitantes riego y disposición de elementos en el suelo en la producción de biomasa, variable directamente relacionada con las características morfofisiológicas de la planta.

Los resultados del estudio se ofrecen como base científica para futuros proyectos forestales en regiones bajo condiciones edafoclimáticas similares y en especial para la vereda Buraga municipio de Macaravita, ubicada en una unidad climática templada árida caracterizada por épocas marcadas de sequías, desarrollo de actividades agrícolas y demanda de recursos forestales para satisfacción de necesidades básicas de los hogares (Alcaldía municipal Macaravita, 2002), donde actualmente no se reportan estudios que sirvan como base para el desarrollo de proyectos productivos que persigan rentabilidad y sostenibilidad ambiental.

3 Marco Referencial

3.1 Marco Teórico

3.1.1 *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Especie forestal originaria de Australia cuyo sinónimo es *Eucalyptus saligna* var. *pallidivalvis* Baker, familia Myrtacea; que se encuentra naturalmente en Queensland y Nuevo Gales del sur, entre 0 a 900 msnm, precipitación promedio anual entre 1.000 y 1800 mm, con una temperatura máxima de 35°C y mínima de 5°C (Ospina et

al., 2006). Introducida en Asia, África, centro y sur América, gracias a su adaptabilidad, crecimiento y rentabilidad; representando a nivel mundial el 90% del componente forestal (Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, 2011).

En Colombia se desarrolla satisfactoriamente entre los 1000 y 2000 msnm, con un área aproximada a 16.000 ha (Ospina et al., 2006) destinadas principalmente a la industria papelera, de construcción, postes y energía. Una de las especies del género *Eucalyptus* menos exigente que se adapta a diferentes tipos de suelo, capaz de hacer un uso más eficiente de nutrientes en suelos de baja fertilidad y soportar sequias prolongadas hasta de tres meses (Zapata, 2013). Madera suave y durable, con densidad promedio entre 0.4 y 0.59 g/cm³ que puede ser influenciada por la densidad, sitio y condiciones de plantación, cuyo poder calorífico es de 18.199 Kj/kg.

3.1.2 Plantaciones Dendroenergéticas. Son plantaciones forestales de corta rotación y altas densidades de siembra basadas en la producción de biomasa leñosa para fines energéticos (Drigo, 2005), en las cuales se plantean como eje principal la selección de especies forestales con alta capacidad de rebrote (Dudley, 2000).

Según Rodríguez (2016) las especies también deben ser pioneras o heliófilas, de rápido crecimiento, resistentes a las sequias, heladas, caducifolias, con permanencia del periodo vegetativo, tasa de mortalidad baja, gran variedad de suelos, baja susceptibilidad a plagas y enfermedades, adaptación a rodales densos, alta capacidad de fijación, buena capacidad de arraigamiento, alta densidad básica de la madera y poder calorífico significativo. las especies que más satisfacen y mejor se adaptan a las exigencias de las plantaciones dendroenergéticas son las pertenecientes al género *Eucalyptus* y *Pinus*.

La dendroenergía es obtenida a partir de biomasa leñosa. Es una forma eficiente de aprovechamiento de la energía solar, ya que a diferencia del petróleo y el carbón no debe pasar por el proceso de fosilización para ser aprovechada (Earl, 1975); es la energía más coherente con los métodos de producción sostenible contribuyendo a la reducción de gases efecto invernadero, conservación y recuperación de los recursos naturales, generando impactos positivos en el componente ambiental, social y económico (Patiño y Smith, 2008), al aprovechar los terrenos baldíos o marginales de manera eficiente, conforme al uso, vocación y aptitud del suelo, sin restar área a los suelos destinados para la agricultura (Elauria, Castro, y Racelis, 2003).

La biomasa es energía química almacenada de origen biológico, es decir un tipo de bioenergía renovable, formada a partir de la fotosíntesis mediante la fijación de la energía solar (Peña, 2016), compuesta principalmente por material vegetal forestal y agrícola, incluyendo productos, subproductos y residuos de estos, que puede ser liberada de forma directa mediante el proceso de combustión al romper los enlaces de los compuestos orgánicos (Patiño y Smith, 2008). Esta energía química es fuente de biocombustibles sólidos, líquidos y hasta gaseosos, ventajas que ofrecen alternativas de desarrollo económico favoreciendo la sociedad y el ambiente (Fernandez, 2003).

Según Patiño y Smith (2008) el potencial de las plantaciones de corta rotación y altas densidades que tienen como fin la producción de biomasa para fines energéticos depende de factores como: la productividad de las tierras disponibles para el cultivo, la precipitación y el agua disponible para la planta, la especie plantada y su genética, la densidad de la plantación, la fertilización y las practicas silviculturales.

3.1.3 Nutrición Forestal. las plantaciones forestales manejadas a altas densidades buscan producir biomasa en menor tiempo y espacio, para lograr este objetivo el sistema de producción extrae mayor cantidad de nutrientes en comparación a plantaciones tradicionales ya que la biomasa obtenida se constituye en alta proporción por ramas y corteza (Esquivel et al., 2016) . Según Mejía, Riaño, Urrego, Ibarra, y Zapata (2017) el rendimiento y la productividad de los cultivos dependen de las características fisiológicas de las plantas, la disponibilidad de agua y nutrientes, la temperatura, la intensidad de la luz y la interacción genotipo-ambiente.

De acuerdo con la concentración en el tejido de la planta los elementos esenciales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes. Nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre en concentración mayor al 0,1% con base en la masa seca integran el grupo de macronutrientes; hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mb), silicio (Si) y níquel (Ni) en concentraciones menores de 100 µg/g agrupan los micronutrientes (Navarro y Navarro, 2003).

El C se obtiene del aire; el H se obtiene del agua y se encarga del balance osmótico; el O se obtiene del agua y del aire, elemento importante en la respiración; N es aprovechado por la planta como NO_3^- y NH_4^+ , forma parte de la clorofila y ayuda a la asimilación de P y K; el P es aprovechado por la planta como $\text{H}_2\text{PO}_4^{4-}$ y HPO_4^{2-} , hace parte del nucleótido ATP; el K participa en los procesos de fotosíntesis, síntesis de proteínas y osmorregulación, es absorbido como K^+ ; el Ca es aprovechado por la planta como Ca^{2+} , forma parte de las paredes celulares y se involucra en procesos de permeabilidad de membranas; el Mg constituye el núcleo de la molécula de clorofila y es absorbido como Mg^{2+} ; el S forma parte de la estructura de aminoácidos, cisteínas y metioninas, es aprovechado por la planta como SO_4^{2-} ; el B es importante para el desarrollo de la pared celular y la división celular, es adsorbido como H_3BO_3 y H_2BO_3^- ; el Cl es aprovechado por la planta como Cl^- y es esencial para afrontar problemas de estrés hídrico; el Cu forma parte del proceso de síntesis de clorofila y es

absorbido como Cu^{2+} ; el Fe es un catalizador importante para los procesos de oxido-reducción y transferencia de electrones, es aprovechado por la planta como Fe^{2+} y Fe^{3+} ; el Mn es importante para la producción de oxígeno en el proceso de fotosíntesis y se absorbe por la planta como Mn^{2+} ; el Zn está implicado en procesos de síntesis de proteínas y es aprovechado por la planta como Zn^{2+} (Melgarejo, 2010).

Las plantas absorben los nutrientes que se encuentran disueltos en solución con el suelo y al presentarse situaciones de déficit de humedad las raíces no pueden aprovechar los nutrientes del sustrato, afectando el potencial productivo de las plantaciones (Muñoz, 2009).

3.1.4 Fisiología. La fisiología vegetal se basa en el estudio de los procesos y funciones de las plantas vivas, y de su interacción con los factores ambientales (Universidad Nacional de Entre Ríos, 2001) al ser dependientes uno del otro por lo que cualquier variación significativa en los factores del medio ambiente puede generar como respuesta en los organismos vegetales una disminución, alteración o modificación en su fisiología (Liñan, 2016) muchas veces reflejados y diagnosticados en su crecimiento y desarrollo. Dentro de los principales factores ambientales que pueden generar algún cambio en el metabolismo de las plantas como respuesta a su aumento o disminución, tenemos el agua, la temperatura y la radiación solar (Vellini *et al.*, 2008).

Entre los factores ambientales a nivel de suelo está la textura, estructura, profundidad, composición química, pH, capacidad de retención de humedad, conductividad hidráulica; y entre los factores a nivel atmosférico el viento, energía radiante, humedad relativa y precipitación (Liñan, 2016) . Mientras que dentro de las respuestas fisiológicas encontramos el potencial genético de cada especie analizando principalmente raíces hojas, estomas y capacidad de osmorregulación (Muñoz, 2009) .

Según Vellini *et al.* (2008) en las plantaciones forestales uno de los factores externos que puede llegar a favorecer la fisiología de las plantas ante variaciones climáticas adversas, es la densidad de plantación, siempre y cuando su planteamiento sea acorde al desarrollo forestal de la especie, dependiendo en gran medida de sus características genotípicas, así como de su edad.

Eucalyptus grandis es una especie forestal cultivada a nivel mundial en plantaciones forestales de baja a alta densidad, en plantaciones cuyo propósito generalmente es producción de madera, celulosa y energía; según Mejía *et al.* (2014) esta especie posee mecanismos fisiológicos de defensa ante el estrés hídrico, que van desde el arreglo prácticamente vertical de sus hojas, sistema radicular profundo, alta sensibilidad estomática, hasta la capacidad de ajuste osmótico para conservar el turgor de sus hojas; haciendo de ella una especie con alta capacidad de resistencia a la sequía y a condiciones medioambientales adversas.

La conductancia estomática es una variable funcional que indica la habilidad con la cual se mueven los gases de un lado a otro a través de los estomas (Pérez y Sandoval, 2017), ya que estos desde sus espacios intercelulares hasta la periferia de la hoja se encargan de controlar la difusión de vapor de agua y por ende la difusión del CO₂. La conductancia estomática es la medida de la apertura de estomas a la difusión.

Un ejemplo de la funcionalidad de los organismos vegetales y los factores ambientales es la dependencia de la eficiencia fotosintética y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el proceso de la fotosíntesis.

Eficiencia fotosintética: eficiencia cuántica del fotosistema PSII, es decir la eficiencia con la cual son procesados los electrones en la fotosíntesis por acción de la cantidad de luz absorbida (Sanclemente y Peña, 2008), y la podemos cuantificar mediante la eficiencia fotoquímica potencial (Fv/Fm), siendo (Fv) la fluorescencia variable y (Fm) la fluorescencia máxima. En algunas

especies forestales la relación F_v/F_m se presenta entre valores de 0.75 a 0.85, donde valores menores indican daños por fotoinhibición además de ser un parámetro de evaluador del rendimiento cuántico del fotosistema II (Ibarra, 2016).

Radiación fotosintéticamente activa (PAR): radiación aprovechable del espectro visible para realizar el proceso de la fotosíntesis, corresponde casi al 50% de la radiación global, ubicada dentro de los 400 y 700 nanómetros (Bautista, Sánchez, y Salazar, 2015). La interceptación de PAR se traduce o se refleja en la cantidad de materia seca (MS) acumulada, además esta tiene una relación proporcional con el índice de área foliar (IAF), pues a medida que aumenta el IAF es más efectiva la interceptación de PAR, hasta llegar a un punto máximo, es decir, a pesar de que siga aumentando el área foliar ya no aportara ganancias a su rendimiento (Castaño, Chica, Obando, y Riaño, 2015).

3.2 Marco Jurídico, Normativo e Institucional

Ley 1715 de 2014 por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Su objetivo es la promoción de energías no convencionales que impulsen el desarrollo económico y la seguridad energética del país, además de buscar la disminución de GEI. El capítulo IV del desarrollo y promoción de las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable) considera la planeación de la producción y el uso eficiente de productos, subproductos y residuos en zonas de silvicultura, sectores con actividad agrícola y cultivos forestales energéticos. La repoblación forestal energética se promueve como fuente que maximiza el recurso energético bajo producción sostenible.

Por medio de esta ley se crea el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE) cuyo fin es la financiación de proyectos que buscan la producción de energía por medio de fuentes no convencionales (Colombia Leyes y Decretos, 2014)

Ley 140 de 2011 por medio de la cual se regula el establecimiento y aprovechamiento de cultivos forestales y sistemas agroforestales con fines comerciales o industriales, y se dictan otras disposiciones (Colombia Leyes y Decretos, 2011).

Ley 697 de 2001 mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. En su artículo No. 1 declara el uso eficiente de la energía como asunto de interés público y promociona las energías no convencionales como alternativas de abastecimiento sostenibles con el ambiente y los recursos naturales (Colombia Leyes y Decretos, 2001).

Ley 629 de 2000 por medio de la cual se aprueba el “protocolo de Kyoto de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático”, hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997. En su artículo 2 promueve el desarrollo sostenible y la reduciendo de GEI mediante la formulación de políticas que impulsen las diferentes formas de energía renovable (Colombia Leyes y Decretos, 2000).

ley 99 de 1993, por medio de la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector publico encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones (Colombia Leyes y Decretos, 1993).

Ley 9 de 1979, por la cual se dictan medidas sanitarias. Dispone de las medidas preventivas para la seguridad y salud en el trabajo y normas generales para la protección del medio ambiente (Colombia Leyes y Decretos, 1979).

Decreto 1843 de 1991, por el cual se reglamenta parcialmente los títulos III, V, VI, VII Y XI de la ley 09 de 1979, sobre uso y manejo de plaguicidas. El consejo nacional de plaguicidas tiene

la función de elaborar programas para vigilar y controlar el uso y manejo de plaguicidas anualmente (Colombia Leyes y Decretos, 1991).

Decreto 1791 de 1996 por medio del cual se establece el régimen de aprovechamiento forestal. Enumera las clases de aprovechamiento forestal dispuestas en la norma además de especificar los procedimientos y requisitos para los mismos (Colombia Leyes y Decretos, 1996).

Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente (Colombia Leyes y Decretos, 1974).

Documento CONPES No. 2834. Política de bosques. Las plantaciones dendroenergéticas son una de las alternativas propuestas para reducir el problema de deforestación ocasionado por la extracción de leña con fin energético, esta estrategia de conservación, uso y recuperación del bosque natural es adelantada por el Ministerio de Minas y Energía, IDEAM, Corporaciones y municipios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1996).

Constitución política de Colombia. Artículo 8, es deber de todos los ciudadanos velar por el cuidado y conservación de los recursos naturales. Artículo 79, derecho a un ambiente sano, es deber del estado la protección del ambiente y la promoción de la educación ciudadana para tal fin. Artículo 80, es deber del estado la planificación del manejo y aprovechamiento de los recursos naturales (Colombia Leyes y Decretos, 1991).

4 Metodología

4.1 Área de Estudio

Se desarrollo la investigación en la finca las Delicias, vereda Bugara, municipio de Macaravita Santander, limitando por el sur con el rio Nevado y el municipio de San Mateo, Boyacá; el área comprende 0.18 ha situadas a 1500 msnm en la zona de vida bs-PM (Ver Figura 1)

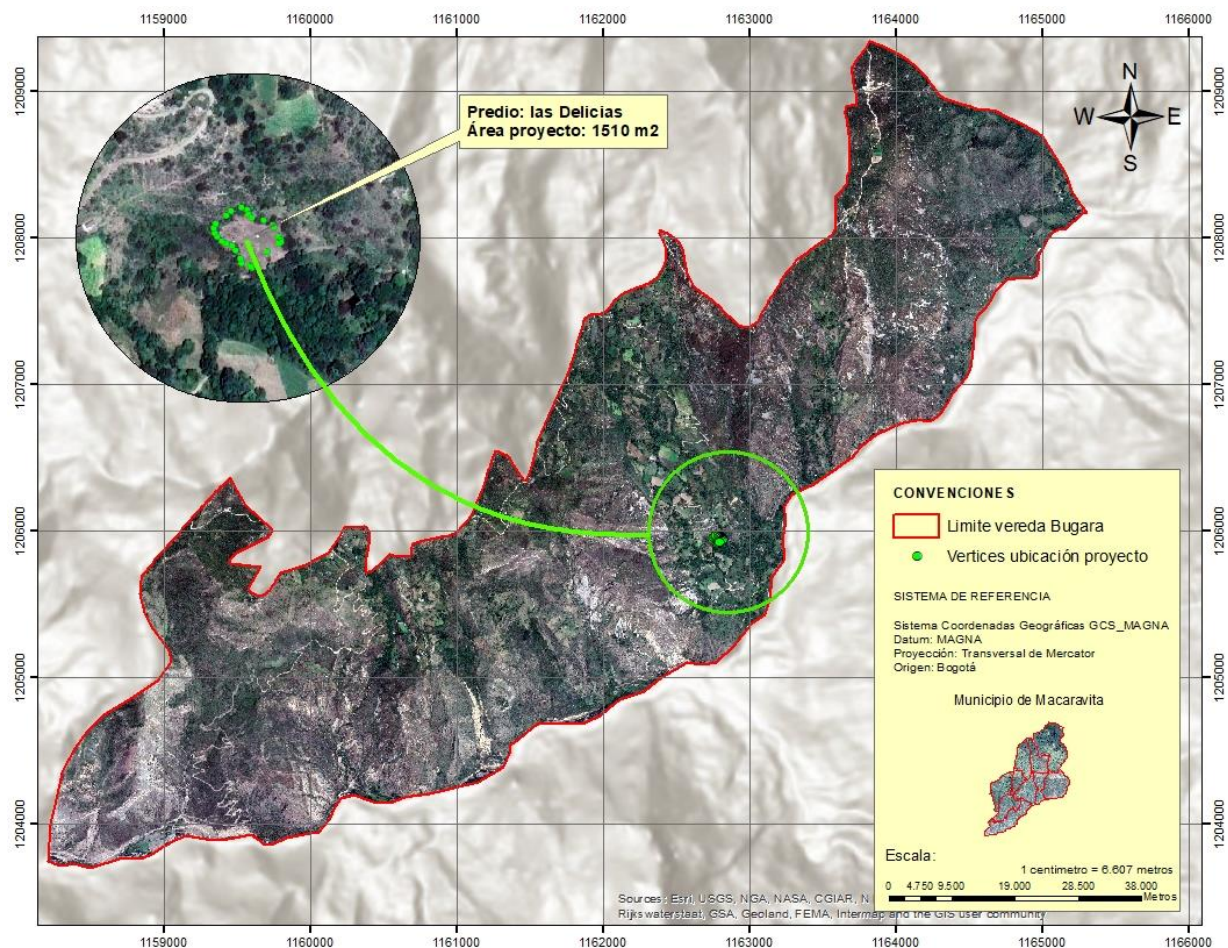


Figura 1. Mapa de ubicación.

4.2 Material Vegetal

Para evaluar los efectos de fertilización y riego se implementó una parcela dendroenergética de *Eucalyptus grandis*, siguiendo las etapas de vivero, plantación y manejo.

La semilla para producir el material es procedente de Caqueza, Cundinamarca y fue adquirida en la tienda forestal El Semillero. La germinación se desarrolló en bandejas multiceldas con

sustrato de turba y 38 días después se realiza el paso de plántula a bolsa. El llenado de bolsas se realizó con bolsa tipo cafetera y sustrato de cascarilla de arroz (cisco) y tierra negra a una relación 1:3, las plántulas se dejaron en eras de crecimiento por tres meses y quince días. El dos de diciembre de 2017 se establece la parcela dendroenergética con un total de 640 plantulas sembradas a 1,18 x 2 m bajo el sistema curvas de nivel, para una densidad de 4237 plantas/ha.

Durante la fase de vivero y primeros tres meses de establecida la plantación se realizó control de hormiga arriera con Sulfuramida y Clorpirifos en caminos y colonias, de plantas arvenses de forma manual en el octavo mes de establecida la plantación.

Se realizó una primera fertilización durante la etapa de vivero utilizando Humita 15, difosfato de amonio y elementos menores con 2 g sulfato de zinc, 2 g sulfato de cobre, 2 g sulfato de hierro, 2 g klib boro, 2 g sulfato de manganeso y 2 g boro. Una vez en campo se procedió con el programa de suministro de fertilizante para los tratamientos y sus réplicas, dispuestos de la siguiente manera: 50 g de NPK al 18%, 15 g de sulfato de magnesio, 10 g de Calcinit, 2 g de sulfato de hierro, 2 g de sulfato de manganeso, 2 g de sulfato de cobre, 2 g de sulfato de zinc y 2 g de sulfato de boro; para cada planta, por tres aplicaciones correspondientes al 15 de marzo, 11 de junio y 23 de septiembre de 2018 para un total de 255 g de fertilizantes por planta. . El riego se suministró mediante un sistema tipo goteo a una intensidad de dos horas al día cada tres días en la época seca, con suspensión en época de lluvias.

4.3 Diseño Experimental

La investigación se realizó organizando la parcela dendroenergética de forma sistemática bajo un modelo factorial 2x2 con cuatro replicas. Las variables de estudio fueron riego (R) y fertilización (F), cada una con dos niveles uno con presencia de la variable (C) y otro con ausencia de la variable

(S) (Ver Tabla 1), cada tratamiento tenía un total de 150 plantas de *Eucalyptus grandis*, 30 por replica (Ver Figura 2)

Tabla 1.
Modelo factorial 2x2.

Factor	Niveles	Tratamiento
Riego	con riego (CR)	CR-CF
	sin riego (SR)	SR-SF
Fertilización	con fertilización (CF)	CF-SR
	sin fertilización (SF)	SF-CR

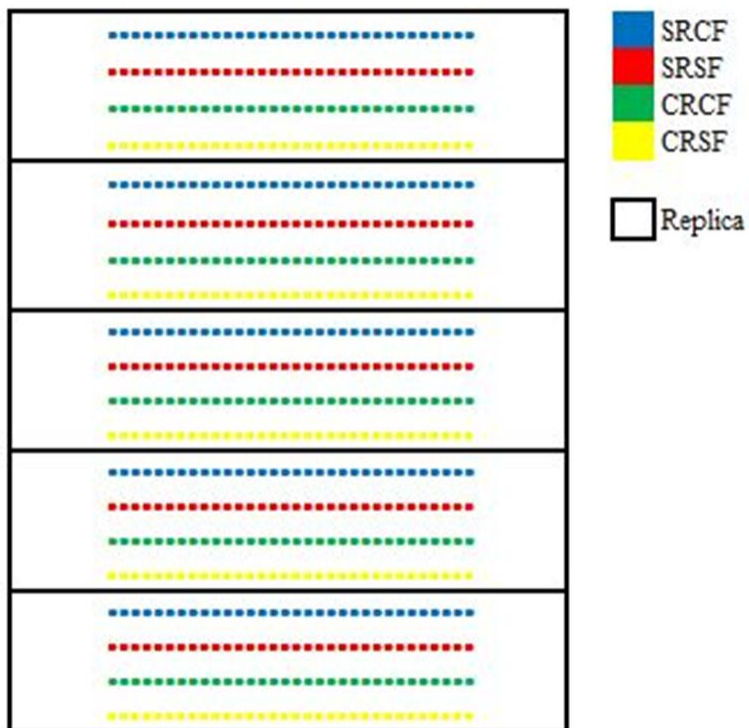


Figura 2. Disposición del diseño experimental en campo.

Para determinar la significancia de las variables y los tratamientos se realizó la prueba de ANOVA y comparación de medias LSD de Fisher con ayuda del software InfoStat 2018.

4.4 Suelo

Se realizó una identificación de perfil del suelo en el área donde se estableció la plantación tomando muestras para determinar el color de los perfiles según la notación Munsell, el análisis químico se realizó por medio de laboratorios AGROSAVIA.

4.5 Clima

Para la parcela dendroenergética se caracterizó la temperatura consultando los datos de la estación meteorológica IDEAM N°24035260 ubicada en el municipio de Capitanejo. La precipitación se estimó con base a las isoyetas elaboradas para la provincia de García Rovira por Carvajal (2017), complementariamente se tomaron medidas de la radiación fotosintéticamente activa con el ceptómetro durante el día para diferentes fechas.

4.6 Medición de Variables Morfológicas y Fisiológicas

Se seleccionaron 55 plantas por tratamiento (11 por replica) con características de crecimiento y desarrollo similares para evaluar parámetros morfológicos y fisiológicos en la plantación durante su primer año de establecimiento por medio de cuatro tomas de datos correspondientes a las fechas: 22 de mayo, 22 de julio, 2 de septiembre y 6 de diciembre del 2018. Para cada toma de datos se midieron las variables:

- Altura (A), tomada para 20 plantas por tratamiento (cinco por replica) desde la base del tallo hasta la yema apical usando un flexómetro.
- Diámetro (D), tomado para 20 plantas por tratamiento (cinco por replica) a 10 cm de la base del tallo usando un pie de rey.

- Cálculo del volumen usando la fórmula de Newton: $V = \frac{(D1+4Dm+D2)}{6} * L$. Donde D= diámetro y Dm= diámetro sección media.
- Se realizaron muestreos destructivos de 2 plantas en cada tratamiento (8 por toma de datos) seleccionados al azar dentro de las unidades experimentales de monitoreo, midiendo en campo su peso fresco y posteriormente en laboratorio se dividió en ramas, tallos y hojas; realizando registro fotográfico de las hojas de cada muestra para procesarlas con el software ImageJ hallando el área foliar de cada individuo. Finalmente, para determinar la biomasa acumulada de todos los componentes vegetales se hizo la obtención de peso seco constante mediante cámara de secado a 65°C. Adicionalmente en la toma de datos del 6 de diciembre también se realizó muestreo de raíces, extrayendo la totalidad del sistema radicular de una planta por tratamiento.
- Se calcularon índices de crecimiento basados en los promedios de biomasa y área foliar arrojados por cada tratamiento.

Tasa de crecimiento relativo (TCR): $TCR = \frac{(\ln W2 - \ln W1)}{(T1 - T2)}$

Tasa absoluta de crecimiento (TAC): $TAC = \frac{W2 - W1}{T2 - T1}$

Tasa de crecimiento de la plantación (TCP): $TCP = \frac{1}{AS} \times \frac{(W2 - W1)}{(T2 - T1)}$

Índice de área foliar (IAF): $IAF = \frac{(AF2 + AF1)/2}{1/AS}$

Tasa de asimilación neta (TAN): $TAN = \frac{\frac{(w2 - w1)}{(T2 - T1)}}{\frac{(\ln AF2 - \ln AF1)}{(AF2 - AF1)}}$

Donde W= biomasa seca, T= tiempo, AF= área foliar, AS= área del suelo.

- Conductancia estomática (CE) y eficiencia fotosintética (EF) se tomaron en cinco árboles testigos por tratamiento (uno por replica) usando el porómetro de hoja y fluorómetro de clorofila respectivamente.

- Eficiencia nutricional, se realizó por medio de los laboratorios AGROSAVIA un análisis de tejido vegetal completo para determinar el porcentaje de contenido nutricional en cada uno de los tratamientos, recolectándose hojas de diferentes árboles en las cinco replicas 10 meses después de establecida la plantación; posteriormente con base a la biomasa seca se calculó la cantidad fijada de N, P , K, Ca y Mg en gramos por planta y su porcentaje de eficiencia en relación a la cantidad de fertilizante aplicado.

La eficiencia agronómica se calculó empleando la siguiente formula:

$$\text{Eficiencia agronómica } EA = \frac{BST - BSt}{Na}$$

Dónde:

BST= gramos de biomasa seca producidos en el tratamiento con fertilización.

BSt= gramos de biomasa seca producidos en el testigo.

Na= gramos del nutriente aplicado en la fertilización.

5 Resultados

5.1 Suelo

El suelo donde se estableció la plantación es de textura franco arcillo-arenosa; profundidad efectiva de 47 cm; pendiente del 38% y perfil integrado por 3 horizontes (Ver Figura 3), horizonte A con 38 cm y color 10YR 4/2 (marrón grisáceo oscuro), horizonte B con 59 cm y color 10YR 5/2 (marrón grisáceo), horizonte C con 35 cm y color 10YR 6/4 (marrón amarillento claro). La caracterización química se muestra en la Figura 4.

De acuerdo con la saturacion de bases el suelo es tipo calcareo por la concentracion en un 93% del Ca, generando problemas en las relaciones ionicas. La relacion Ca/Mg ideal es de 2-4, el valor 14,6 indica deficiencia de Mg; para (Ca+Mg)/K es ideal en 10, el valor 241,4 indica deficiencia de K; para Mg/K se considera optimo.

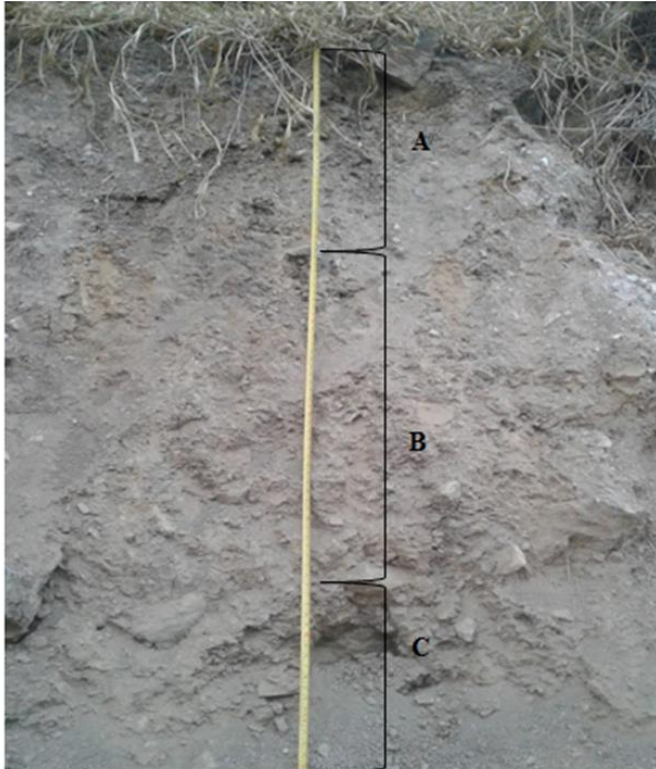


Figura 3. Perfil del suelo.

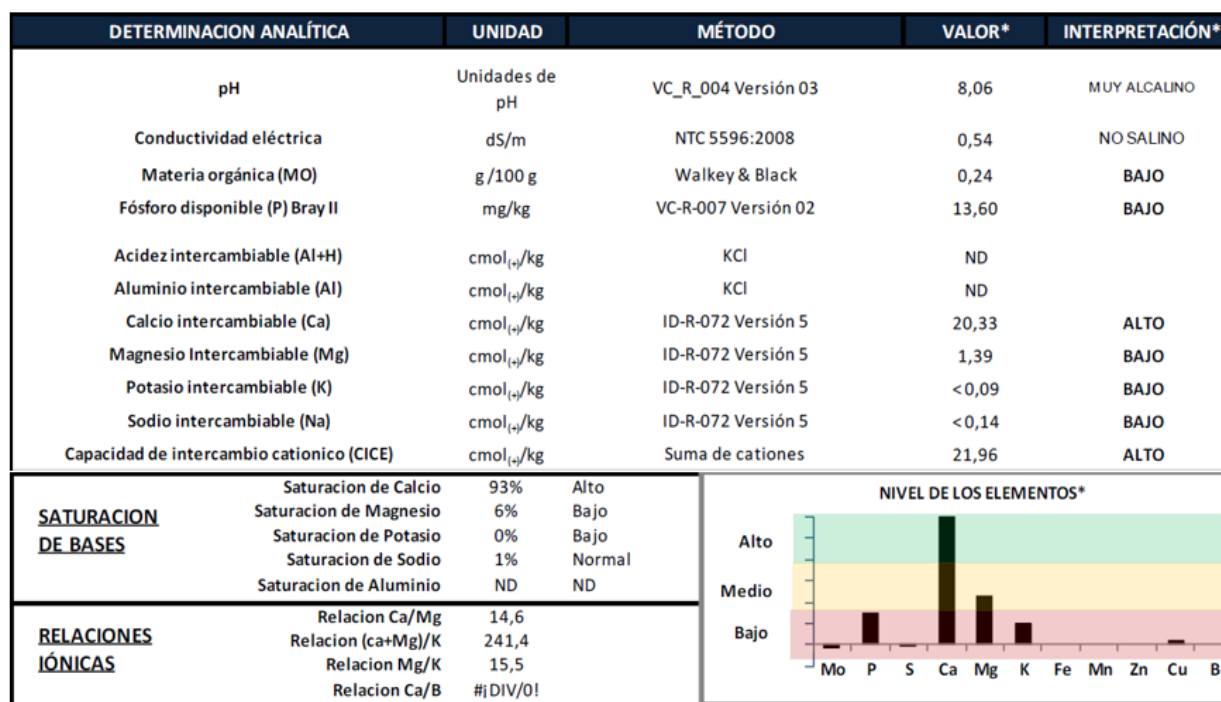


Figura 4. Análisis químico del suelo.

5.2 Clima

La precipitación promedio varía entre los 800 y 900 mm/año (Ver Figura 5) y la temperatura en promedio es de 21,8° C. Para el año 2018 en el municipio de Capitanejo se registra una precipitación anual de 892,1 mm, siendo febrero el mes más seco con cero (0) mm y junio el más lluvioso con 170mm (Ver Figura 6), valores coherentes con los resultados obtenidos por medio de las isoyetas.

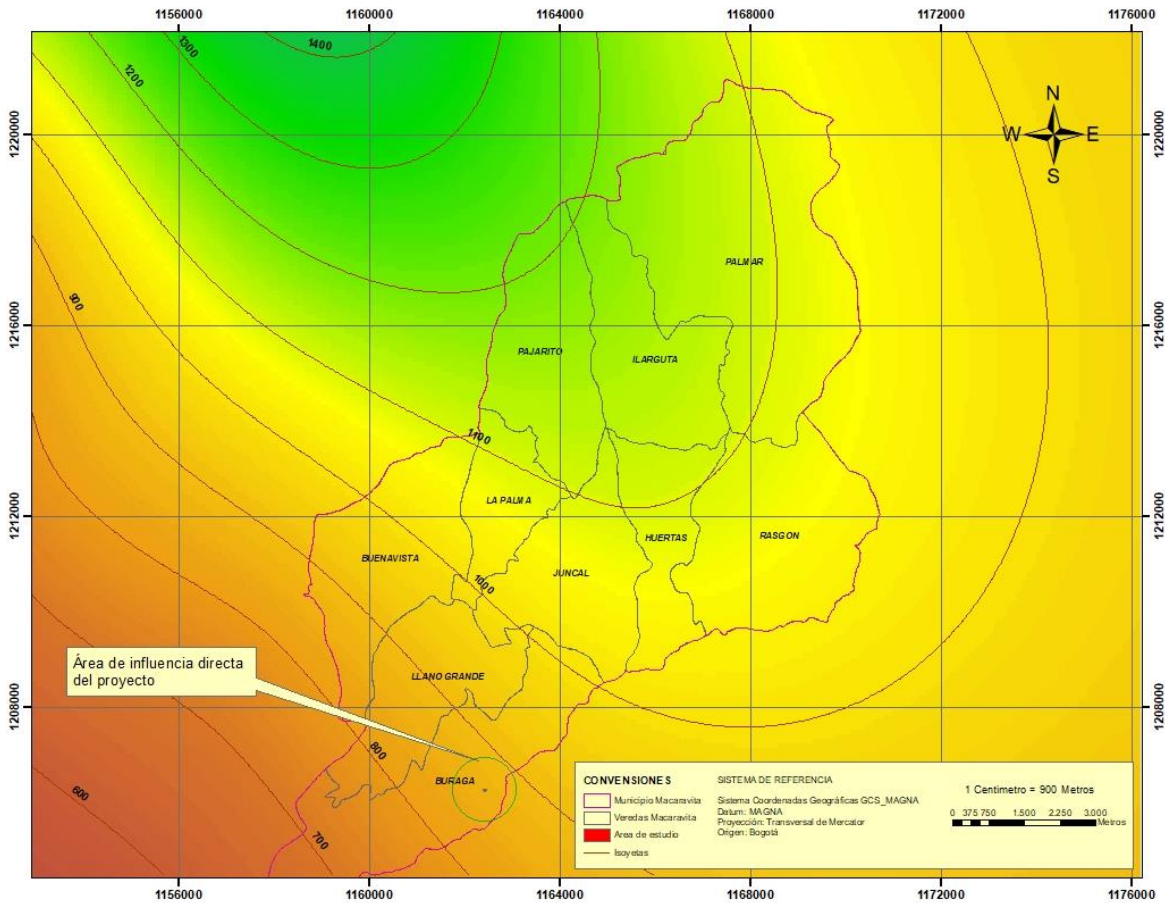


Figura 5. Mapa de isoyetas para el municipio de Macaravita. Tomado y adaptado de Carvajal (2017).

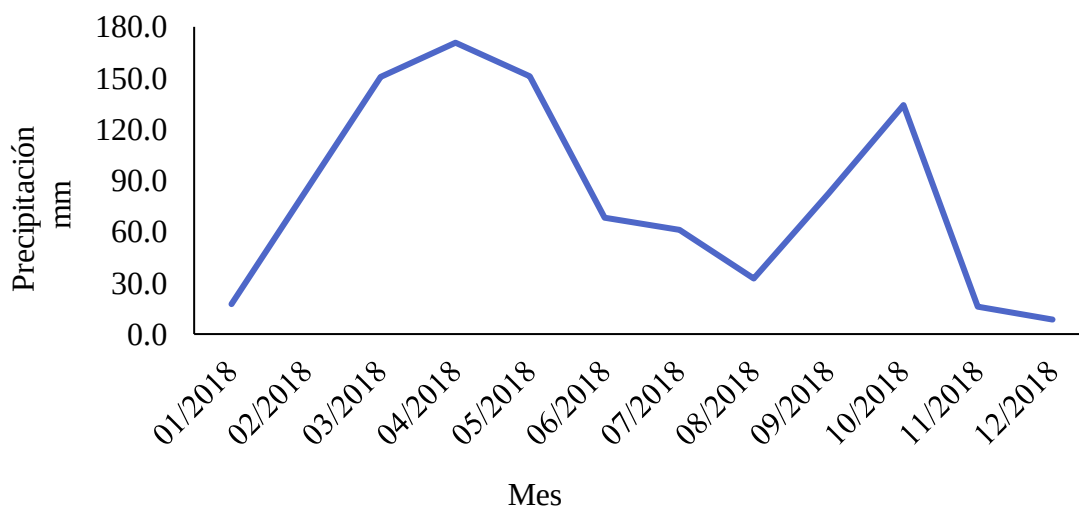


Figura 6. Mapa de precipitación promedio para el año 2018.

Se tomaron seis medidas de PAR entre los meses de febrero y septiembre desde las 6:00 am hasta las 4:00 pm con intervalos de 30 minutos, los valores registrados se observan en la Figura 7.

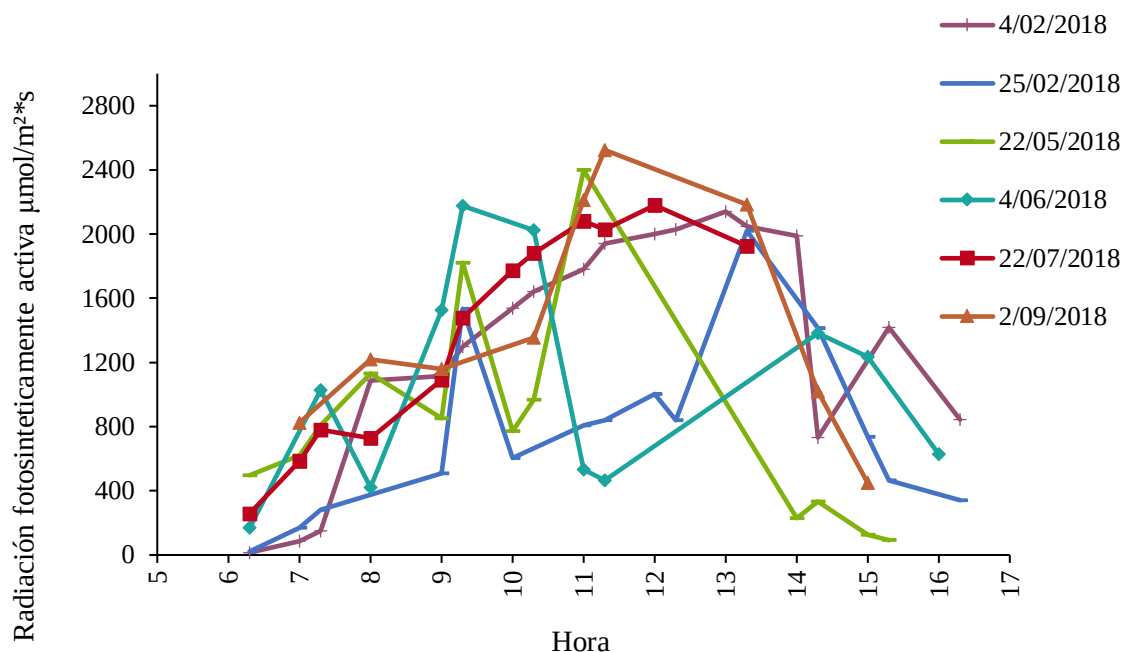


Figura 7. Radiación fotosintéticamente activa.

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante días soleados presenta una tendencia creciente que puede llegar hasta los 2400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, con valores de 1000-1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ para las ocho de la mañana llegando a los 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ hacia las 10:00 am, y entre 10:30 am a 12:30 pm alcanzando valores alrededor de los 2400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$; la PAR máxima registrada fue de 2524 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ en el mes de septiembre.

5.3 Evaluación de Fertilización y Riego Sobre Parámetros Morfológicos y Fisiológicos

5.3.1 Variable Altura (A). Especificación del comportamiento de la variable altura para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para las dos variables y su combinación ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula, es decir que no se presentó diferencia significativa en los tratamientos.

Junio 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable fertilización y la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable riego con un p-valor de 0,01, rechazando la hipótesis nula, la prueba LSD Fisher arrojó diferencias significativas en la comparación de medias para los tratamientos SRCF y SRSF respecto a CRSF el cual presento los valores más bajos. (Ver Figura 8).

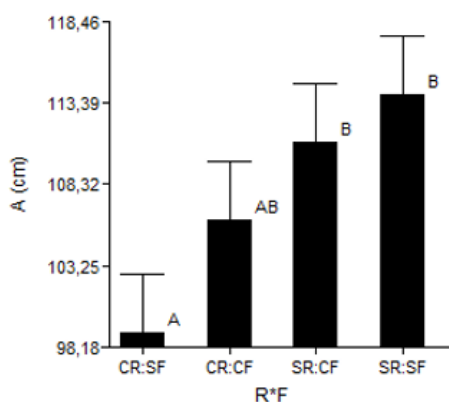


Figura 8. Histograma comparación de medias segunda toma de datos Altura.

Julio 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable fertilización y riego con un p-valor de 0,003 y 0,03 respectivamente, rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para el tratamiento CRSF respecto a los demás, que presentan valores más altos (Ver Figura 9).

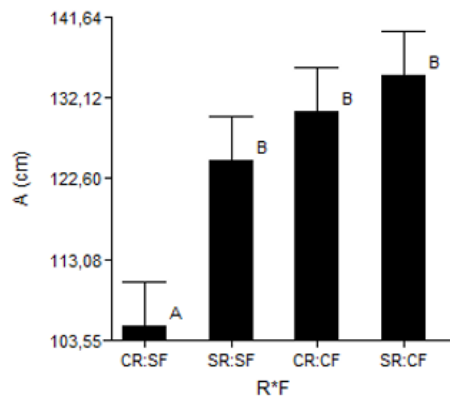


Figura 9. Histograma comparación de medias tercera toma de datos Altura.

Septiembre 2 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable fertilización, y riego con un p-valor de 0,009 y 0,03 respectivamente, rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para los tratamientos SRSF, CRCF Y SRCF, pero si diferencias significativas respecto al tratamiento CRSF (Ver Figura 10).

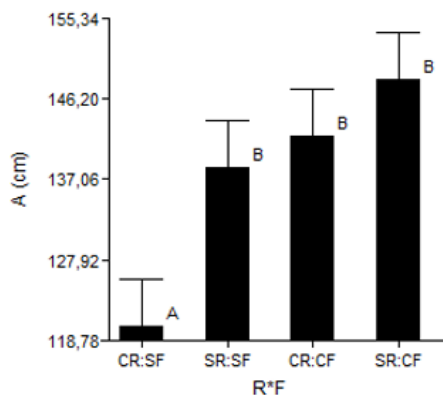


Figura 10. Histograma comparación de medias cuarta toma de datos Altura.

Diciembre 6 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego y la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable fertilización con un p-valor de 0,004, rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias de los tratamientos CRCF y SRCF respecto al tratamiento CRSF, mientras que el tratamiento SRSF estadísticamente no presenta diferencias significativas con ninguno de los tratamientos (Ver Figura 11).

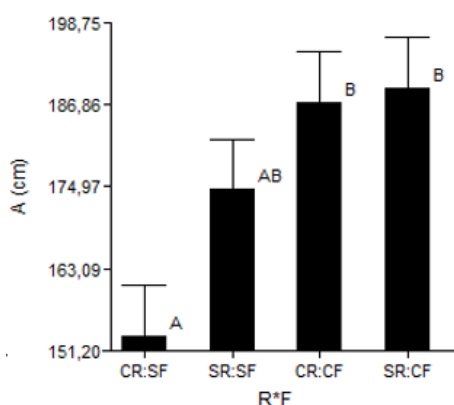


Figura 11. Histograma comparación de medias quinta toma de datos Altura.

Valores promedio de altura para los tratamientos durante las cinco tomas de datos se muestran en la Figura 12.

La altura promedio mayor está representada por el tratamiento SRCF con 1,89 m seguida de 1,87 m tratamiento CRCF, acorde a los resultados del análisis de varianza donde la fertilización fue la variable que presentó más significancia a lo largo de la investigación. Durante los primeros meses la altura no presentó diferencias significativas entre tratamientos, pero a partir del mes 6 y 7 el tratamiento CRSF empezó a quedar rezagado en comparación al crecimiento de los demás tratamientos, presentando una altura promedio de 1,55 m.

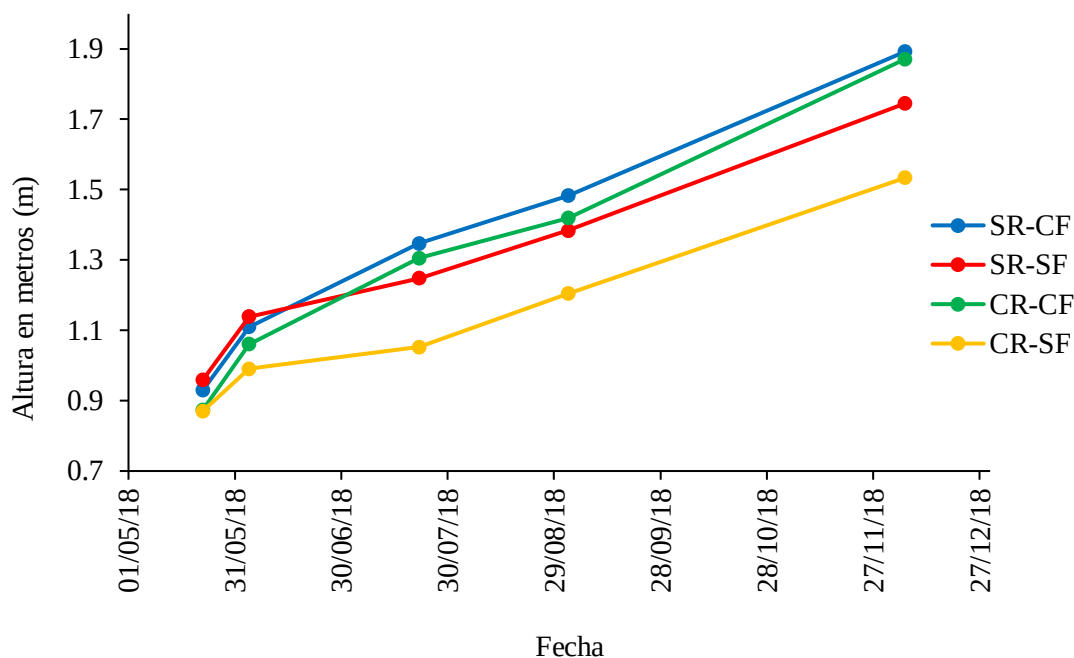


Figura 12. Comportamiento promedio de altura por tratamiento para toma de datos.

5.3.2 Variable Diámetro (D). Especificación del comportamiento de la variable diámetro para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Junio 4 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Julio 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula. Se cometió un error estadístico tipo I para realizar la prueba LSD de Fisher encontrando significancia en la comparación de medias, lo que sugiere haber cometido un error

estadístico tipo II al aceptar la hipótesis nula aun cuando esta es falsa; por lo cual nuevamente se debe poner a consideración la hipótesis nula, donde finalmente se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa (Ver Figura 13).

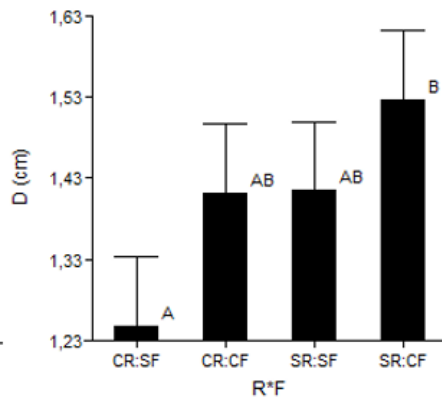


Figura 13. Histograma comparación de medias tercera toma de datos Diámetro.

Septiembre 2 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego y la combinación de las dos variables estudiadas ($R*F$) y $<0,05$ para la variable fertilización, con un p-valor de 0,02 rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para los tratamientos CRSF Y SRCF (Ver Figura 14).

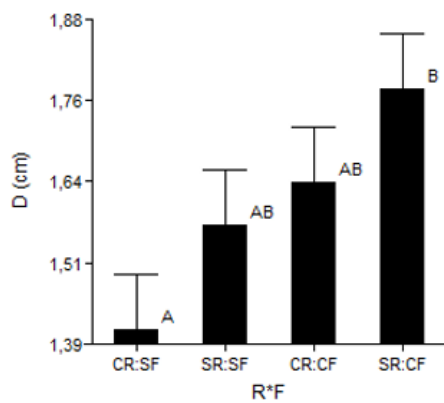


Figura 14. Histograma comparación de medias cuarta toma de datos Diámetro.

Diciembre 6 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego y la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable fertilización, con un p-valor de 0,003 rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para los tratamientos CRSF y SRCF (Ver Figura 15).

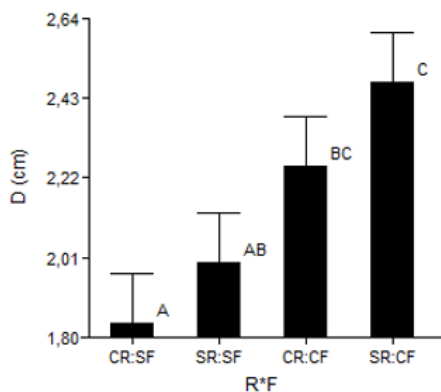


Figura 15. Histograma comparación de medias quinta toma de datos Diámetro.

Valores promedio de diámetro para los tratamientos durante las cinco tomas de datos se muestran en la Figura 16.

Al inicio de la plantación si bien los diámetros eran diferentes, estos presentaron un crecimiento proporcional entre sí hasta el mes 5, posteriormente empezaron a aumentar mostrando diferencias que solo llegaron a ser significativas a partir del mes 8, presentando los mayores valores tratamientos con aplicación de fertilizantes arrojando un diámetro de 2,47 cm para el tratamiento SRCF y de 2,24 cm para CRCF.

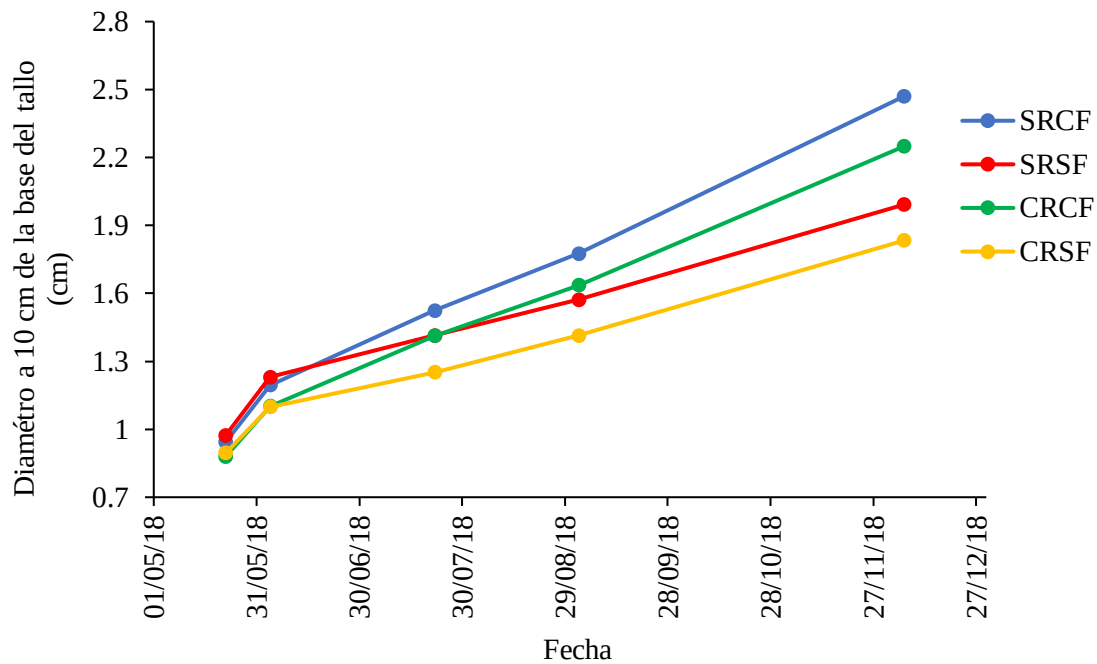


Figura 16. Comportamiento promedio de diámetro por tratamiento para toma de datos.

Volumen. El volumen promedio por árbol para cada tratamiento al año de establecida la plantación se muestra en la Figura 17. Es decir que bajo la densidad de siembra de la plantación se obtendrían 0,1079 m³ de madera para el tratamiento CRCF, 0,0753 m³ con SRSF, 0,0742 m³ con SRCF y 0,058 m³ para CRSF.

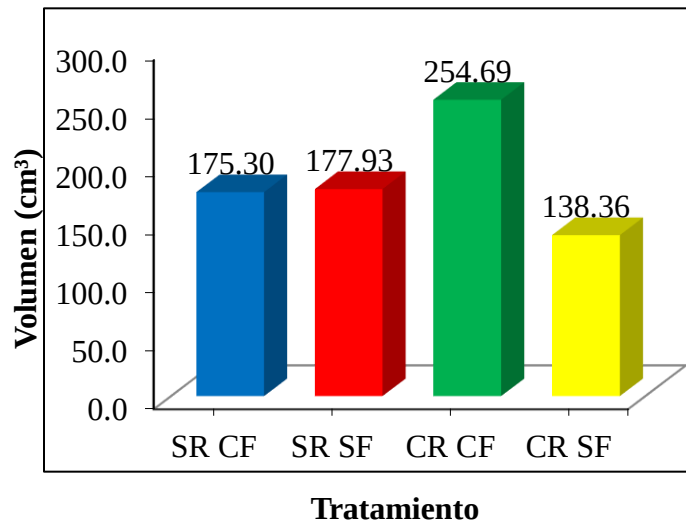


Figura 17. Volumen de un árbol por tratamiento.

5.3.3 Variable Área Foliar (AF). Especificación del comportamiento de la variable área foliar para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable riego, rechazando la hipótesis nula. Se realizó la prueba LSD de Fisher encontrando significancia en la comparación de medias para los tratamientos CRSF respecto a SRCF y SRSF (Ver Figura 18).

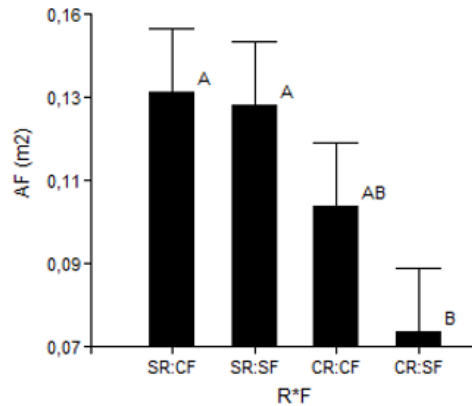


Figura 18. Histograma comparación de medias primera toma de datos área foliar.

Julio 22 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $<0,05$ para las dos variables y su combinación ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Septiembre 2 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Diciembre 6 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable riego, rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para la variable riego y para los tratamientos SR:CF y CR:CF (Ver Figura 19).

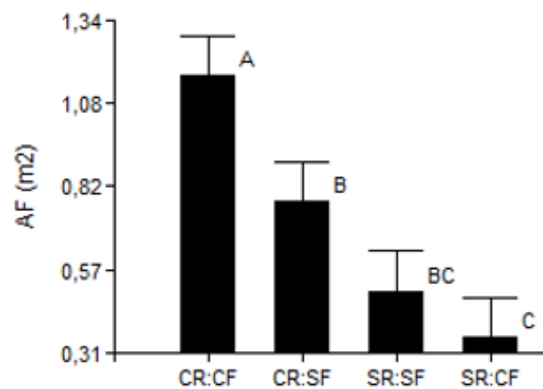


Figura 19. Histograma comparación de medias cuarta toma de datos área foliar.

Valores promedio de área foliar para los tratamientos durante las cuatro tomas de datos se muestran en la Figura 20.

El área foliar durante el tiempo en evaluación solo presento diferencias significativas en la comparación de medias para el año de establecida la plantación, siendo el tratamiento CRCF el más representativo con 1,17 m², seguido de CRSF con 0,78 m², SRSF con 0,58 m² y SRCF con 0,36 m² significativamente más bajo, es decir, que el riego fue el factor limitante para el desarrollo foliar reflejando una diferencia promedio de 0,54 m² de AF entre los tratamientos CR y SR.

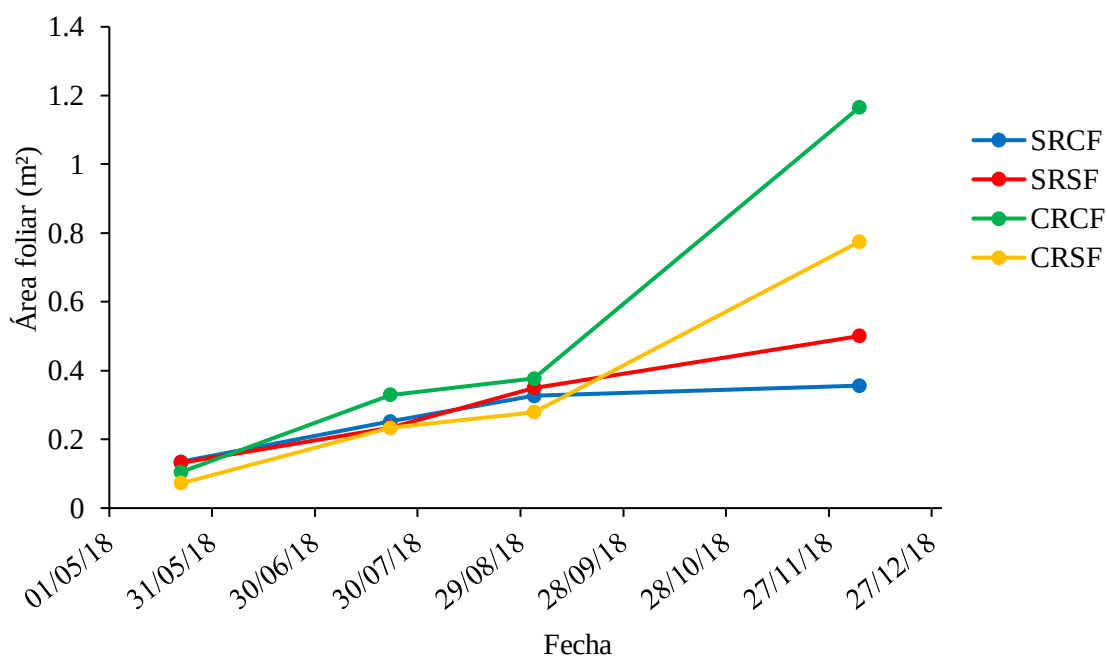


Figura 20. Comportamiento promedio de área foliar por tratamiento para toma de datos.

Inicialmente en mayo la variable riego tuvo incidencia en el follaje de la plantación, pero no fue significativa para la comparación de medias de los cuatro tratamientos; en julio y septiembre las variables se comportaron de forma semejante no arrojando significancia por tratamiento.

El tratamiento CRCF alcanza para el mes cinco de establecida la plantación un área foliar de 0,105 m² presentando un incremento de 1,166 m² al cumplir el año; los incrementos en el mismo periodo para los tratamientos CRSF, SRCF y SRSF son 0,775, 0,356 y 0,501 m² respectivamente. La Figura 20 nos permite ver que las ganancias de área foliar aumentaron significativamente a partir del 2 de septiembre.

5.3.4 Variable Biomasa Verde (BV). Especificación del comportamiento de la variable biomasa verde para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue >0,05 para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas (R*F), aceptando la hipótesis nula.

Julio 22 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue >0,05 para las variables riego y fertilización y <0,05 para la combinación de las dos variables (R*F) con un p-valor de 0,02 rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para los tratamientos SRCF y CRCF (Ver Figura 21).

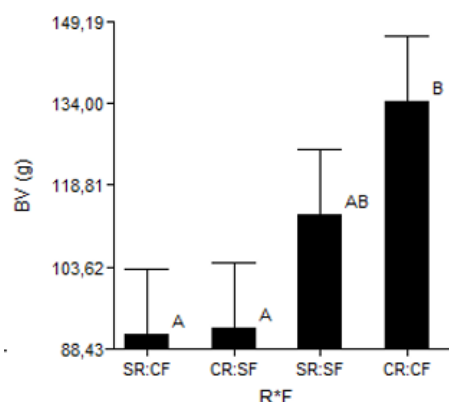


Figura 21. Histograma comparación de medias segundo modelo destructivo biomasa verde.

Septiembre 2 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego y la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable fertilización, con un p-valor de 0,04 rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en las medias para la variable fertilización y para los tratamientos SRSF y CRCF (Ver Figura 22).

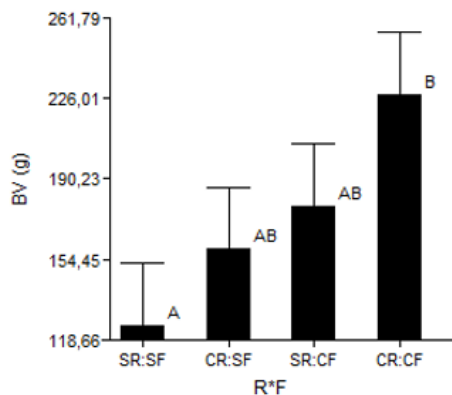


Figura 22. Histograma comparación de medias tercer modelo destructivo biomasa verde.

Diciembre 6 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $<0,05$ para las 2 variables y su combinación ($R \times F$) con p-valor de 0,001riego, 0,02 fertilizante y 0,03 ($R \times F$) rechazando la hipótesis nula. En este caso la prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas para el tratamiento CRCF el cual integra los valores positivos de cada variable (Ver Figura 23).

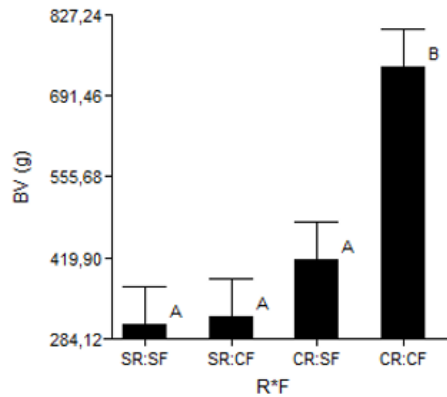


Figura 23. Histograma comparación de medias cuarto modelo destructivo biomasa verde.

Valores promedio de biomasa verde para los tratamientos durante las cuatro tomas de datos se muestran en la Figura 24.

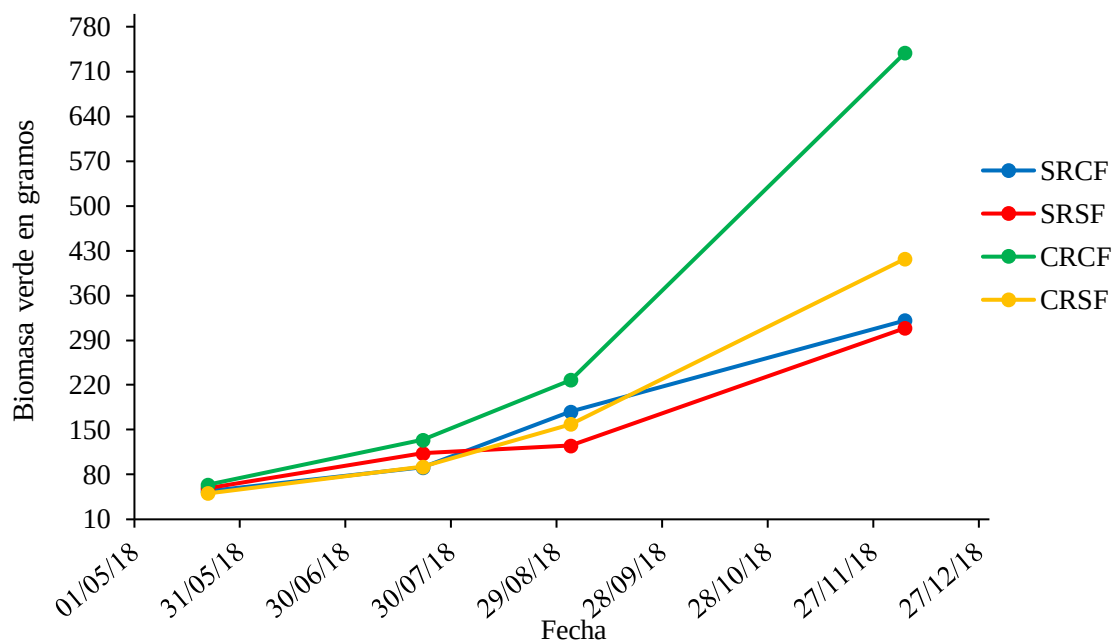


Figura 24. Comportamiento promedio de biomasa verde por tratamiento para toma de datos.

Los tratamientos CRSF, SRCF Y SRSF no presentaron diferencias significativas en la producción de biomasa mientras que, el tratamiento CRCF a partir del mes 9 presento un incremento de 511,80 g superior al doble de la biomasa producida hasta dicho mes, arrojando un

total de 738,97 g, con una diferencia de 321,82 g, 418,19 g y 430,16 g respecto a los demás tratamientos.

5.3.5 Variable Biomasa Seca (BS). Especificación del comportamiento de la variable biomasa seca para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para las dos variables y $<0,05$ para su combinación (R*F), rechazando la hipótesis nula. Se realizó la prueba LSD de Fisher encontrando diferencia significativa en la comparación de medias para los tratamientos CRCF Y SRCF (Ver Figura 25).

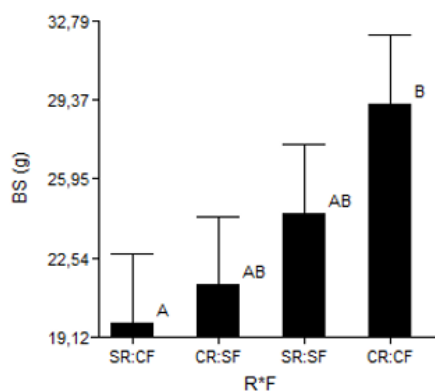


Figura 25. Histograma comparación de medias primer modelo destructivo biomasa seca.

Julio 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $<0,05$ para las 2 variables y su combinación (R*F) con p-valores de 0,03 riego, 0,03 fertilización y 0,003 (R*F), rechazando la hipótesis nula. En este caso la prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas en el tratamiento CRCF respecto a las medias de los otros tres tratamientos (Ver Figura 26).

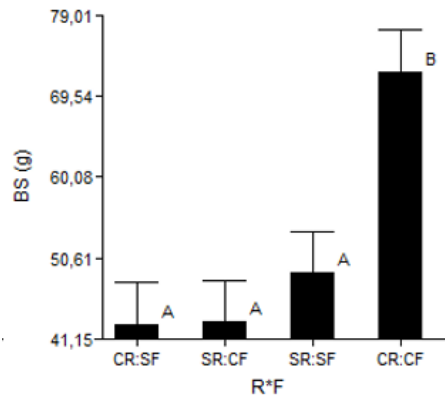


Figura 26. Histograma comparación de medias segundo modelo destructivo biomasa seca.

Septiembre 2 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego y la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$) y $<0,05$ para la variable fertilización, con un p-valor de 0,04 rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas entre las medias de dos tratamientos, SRSF Y CRCF (Ver Figura 27).

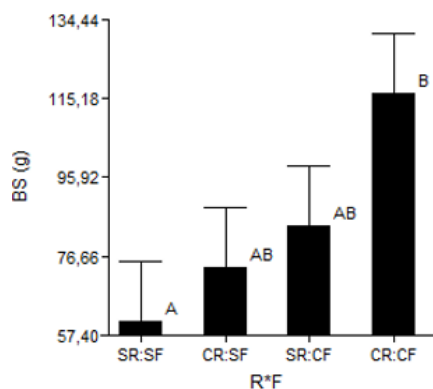


Figura 27. Histograma comparación de medias tercer modelo destructivo biomasa seca.

Diciembre 6 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $<0,05$ para las 2 variables y su combinación ($R \times F$) con p-valores de 0,003 riego, 0,01 fertilización y 0,03 ($R \times F$), rechazando la hipótesis nula. En este caso la prueba LSD de Fisher arrojó diferencias significativas

en las dos variables y en el tratamiento CRCF respecto a las medias de los otros tres tratamientos (Ver Figura 28).

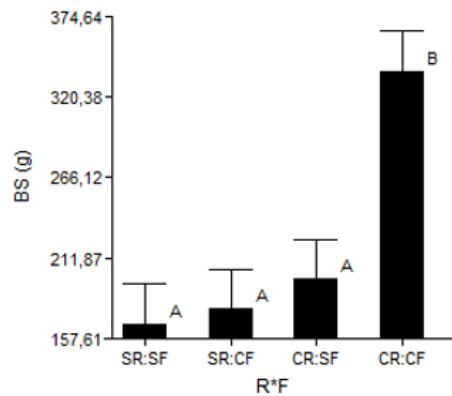


Figura 28. Histograma comparación de medias cuarto modelo destructivo biomasa seca.

Valores promedio de biomasa seca para los tratamientos durante las cuatro tomas de datos se muestran en la Figura 29. La biomasa seca presenta un comportamiento directamente proporcional al de la biomasa verde ya que el contenido de humedad promedio para los tratamientos se encuentra entre el 51% y 53%.

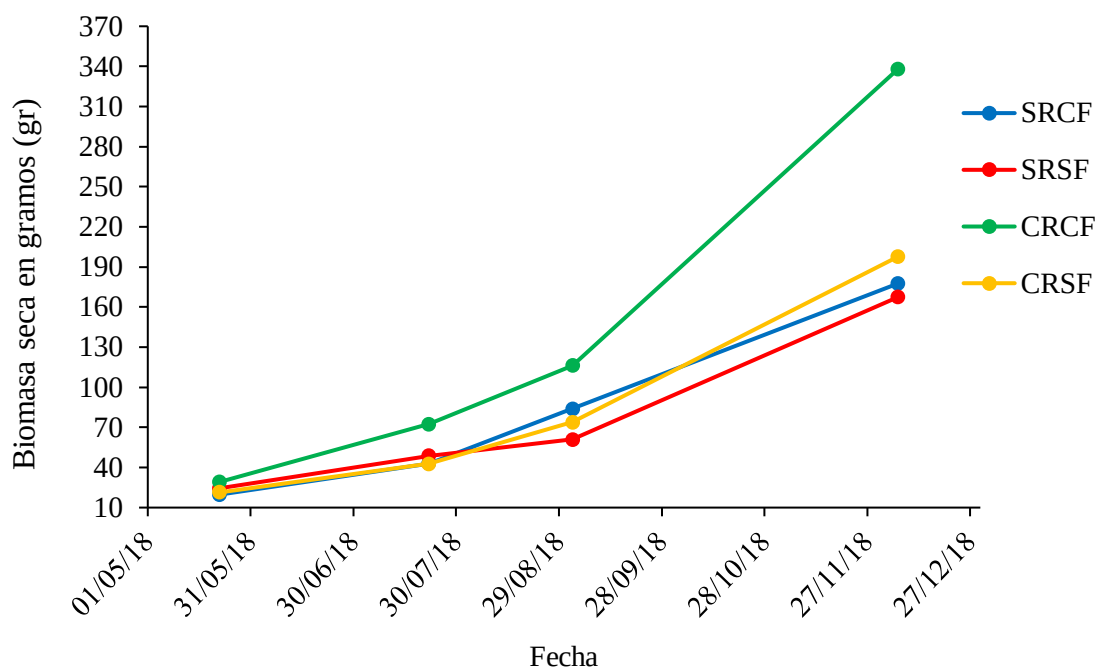


Figura 29. Comportamiento promedio de biomasa seca por tratamiento para toma de datos.

Muestreo de raíces. Peso y longitud de raíz por tratamiento se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Morfología de raíces por tratamiento.

T	PV	PS	Principal (cm)	Secundaria (cm)	Dirección	Secundaria (cm)	Dirección
SRCF	243	95,46	121	148	SW	65	SE
SRSF	182	70,5	138	239	SE	56	SW
CRCF	305	118,15	119	147	E	143	SE
CRSF	95	41,17	113	110	SW	85	SE

Las raíces de los tratamientos sin riego presentan mayor longitud de raíz principal como respuesta a la necesidad de profundizar su sistema radicular en busca de agua, además de presentar longitudes considerables en las raíces secundarias, capaz de traspasar a otra unidad experimental que, si cuenta con riego como fue el tratamiento SRSF que presento una raíz secundaria superior

a los 2 m de longitud. Los valores más altos para biomasa seca almacenada corresponden a los tratamientos con suministro de fertilizantes.

Índices de Crecimiento. Fueron calculados por tratamiento con variables morfológicas y fisiológicas (Ver Tabla 3).

Tabla 3.

Índices de crecimiento.

Tratamiento	TCR g/(g*mes)	TAC (gr/mes)	TCP (g/m ² *mes)	TAN (g/m ² *mes)	IAF
SRCF	0,349	0,025	0,010	0,003	0,522
SRSF	0,305	0,023	0,009	0,003	0,634
CRCF	0,389	0,049	0,020	0,017	1,793
CRSF	0,353	0,028	0,012	0,008	1,659

5.3.6 Variable Eficiencia Fotosintética (EF). Especificación del comportamiento de la variable eficiencia fotosintética para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue >0,05 para la variable riego y la combinación de las dos variables estudiadas (R*F) y <0,05 para la variable fertilización, rechazando la hipótesis nula. La prueba LSD de Fisher no arrojó diferencias significativas en las medias para ninguno de los cuatro tratamientos (Ver Figura 30)

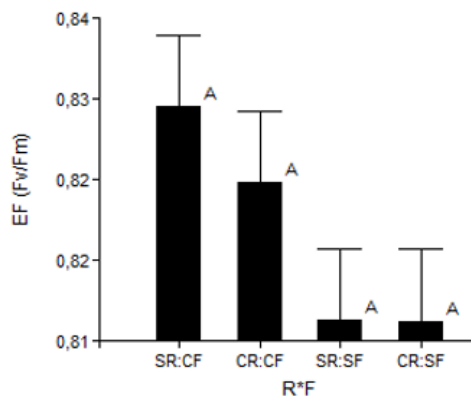


Figura 30. Histograma comparación de medias primera toma de datos eficiencia fotosintética.

Junio 4 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Julio 22 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Septiembre 2 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Valores promedio de eficiencia fotosintética para los cuatro tratamientos durante la toma de datos se muestran en la Figura 31.

Considerando optimo el valor $F_v/F_m=0,8$, los meses de mayo, junio y julio registraron eficiencia fotosintética optima; en septiembre todos los tratamientos presentaron valores inferiores, 0,76 para CR:CF-SR:SF y 0,78 para SR:CF-CR:SF. La plantación no presento diferencia significativa de medias para los tratamientos durante las cuatro tomas de datos.

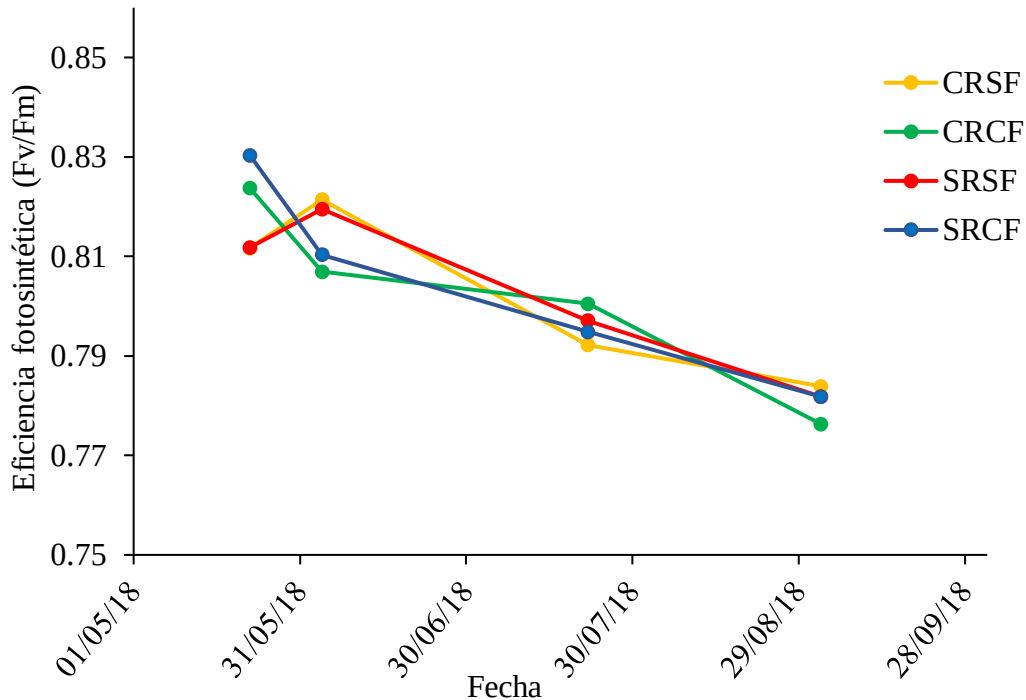


Figura 31. Comportamiento promedio de eficiencia fotosintética por tratamiento para toma de datos.

5.3.7 Variable Conductancia Estomática (CE). Especificación del comportamiento de la variable conductancia estomática para cada fecha y su respectivo análisis de datos.

Mayo 22 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Junio 4 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Julio 22 del 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Septiembre 2 de 2018. En el análisis de varianza el p-valor calculado fue $>0,05$ para la variable riego, fertilización y para la combinación de las dos variables estudiadas ($R \times F$), aceptando la hipótesis nula.

Valores promedio de conductancia estomática para los cuatro tratamientos durante la toma de datos se muestran en la Figura 32.

La conductancia estomática para el primer año de establecida la plantación varía entre 78,73 y 369 mmol/m²s y no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para las cuatro tomas de datos. El 22 de mayo se registraron valores promedios de 82,65 mmol/m²s, presentaron aumentos solo de 7,79 y 17,01 mmol/m²s para los meses de junio y septiembre. Julio registro los valores más altos con 369,54 mmol/m²s para el tratamiento CRSF.

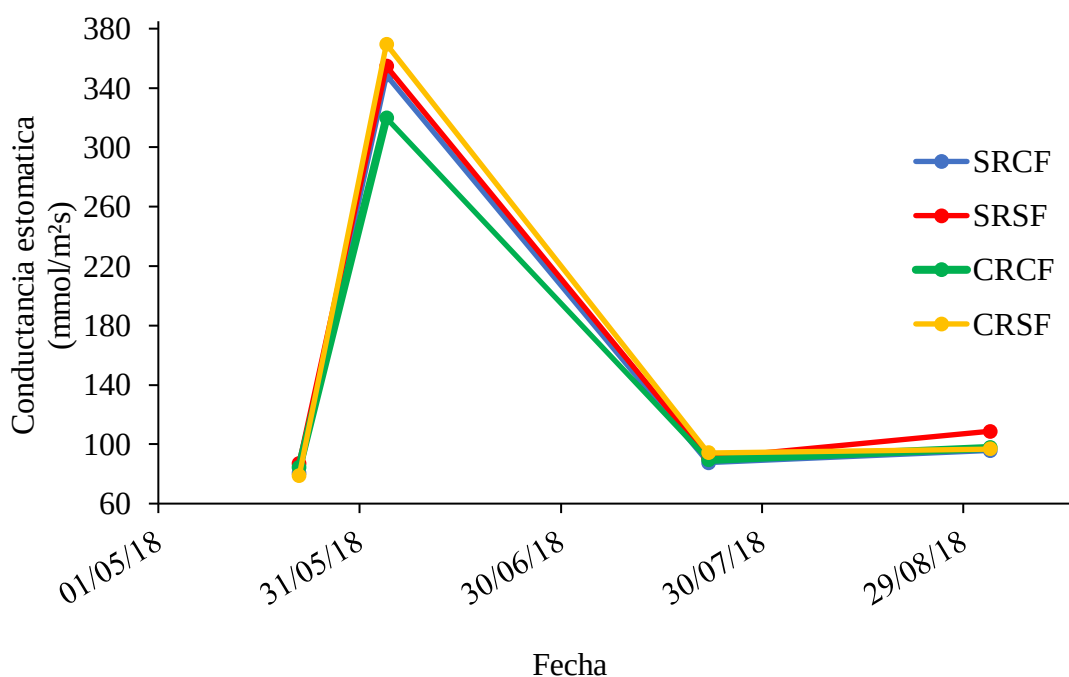


Figura 32. Comportamiento promedio de conductancia estomática por tratamiento para toma de datos.

5.4 Contenido de Nutrientes Foliares.

El contenido de nutrientes calculado por tratamiento se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

Contenido de nutrientes foliares.

Elemento/ Unidad	SR-CF	SR-SF	CR-CF	CR-SF
N (%)	1,45	1,5	1,56	1,39
P (%)	0,09	0,11	0,09	0,09
K (%)	0,5	0,62	0,61	0,51
Ca (%)	1,59	1,7	1,34	2,25
Mg (%)	0,42	0,48	0,39	0,53
S (%)	0,08	0,08	0,09	0,07
Fe (ppm)	21,58	17,94	19,28	19,09
Mn (ppm)	5,12	4,26	4,87	6,09
Zn (ppm)	1,00	0,87	0,84	0,89
Cu (ppm)	0,11	0,20	0,15	0,14
B (ppm)	48,48	52,65	51,72	52,49

5.4.1 Eficiencia Fisiológica (EF). La eficiencia en el uso de elementos mayores para los tratamientos fertilizados se muestra en la Tabla 5 y Figura 33.

Tabla 5.

Calculo de la eficiencia en el uso de nutrientes.

Tratamiento	NE	CAF	FP (g)	FA(g)	E (%)
SRCF	N	1,45	3,960	31,65	12,51
	P	0,09	0,246	27	0,910
	K	0,5	1,365	27	5,057
	Mg	0,42	1,147	7,425	15,447
	Ca	1,59	4,342	7,95	54,616
CRCF	N	1,56	6,615	31,65	20,9
	P	0,09	0,411	27	1,521
	K	0,61	2,281	27	8,449
	Mg	0,39	1,779	7,425	23,963
	Ca	1,34	6,113	7,95	76,899

Nota: NE: nutrientes esenciales, CAF: contenido análisis foliar, FA: fertilizante aplicado, FP: fertilizante fijado por la planta y E: eficiencia.

La biomasa seca para el tratamiento CRCF fue de 456,23 g, de la cual 436,9 g corresponden a la fijación de carbono, hidrogeno y oxígeno (CHO) y 19,33 g a la fijación de macroelementos y microelementos. Obteniendo de esta manera la eficiencia fisiológica para 5 macroelementos de los cuales el Ca presento la eficiencia más alta en el uso de los nutrientes por parte de la planta, y el fosforo la más baja. De mayor a menor el porcentaje de eficiencia fisiológica en el uso de los nutrientes es la siguiente: 73,8 Ca, 23,9 Mg, 20,9 N, 8,4 K y 1,5 P.

En el mismo sentido para el tratamiento SRCF la biomasa seca fue de 273,081 g con 261,5 g de carbono, hidrogeno y oxígeno y 11,58 para macro y microelementos; arrojando porcentajes de eficiencia fisiológica en el uso de los nutrientes de: 54,6 Ca, 15,4 Mg, 12,5 N, 5,05 K y 0,9 P.

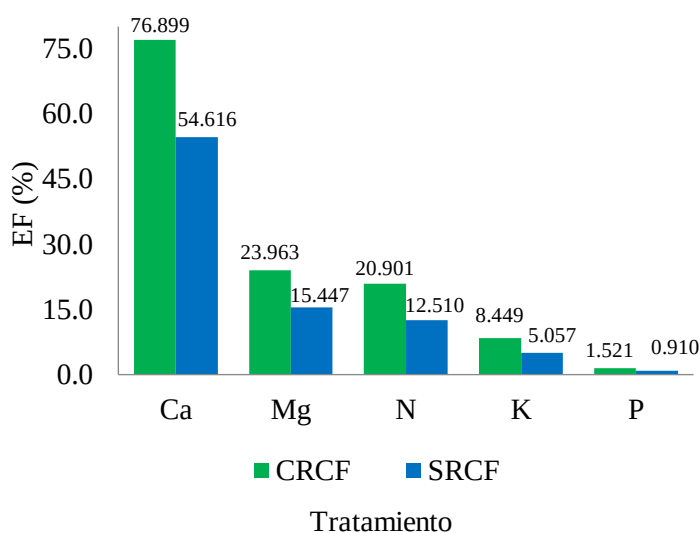


Figura 33. Eficiencia en el uso de los nutrientes.

El porcentaje de eficiencia en el uso del nutriente aplicado es superior para el tratamiento CRCF respecto a SRCF gracias a la solución acuosa que se forma con el agua, agente que ayuda en la movilización de los nutrientes al interior de la planta; pero aun así el aprovechamiento de los

nutrientes es insuficiente, exceptuando el Ca que se encuentra para los dos tratamientos por encima del 50% de eficiencia.

5.4.2 Eficiencia Agronómica (EA). La diferencia de producción de biomasa para los tratamientos CRCF y SRCF por la exclusión de la fertilización con el testigo es de 218,705 g y 35,555 g respectivamente. En los dos casos con una dosis de 7,4 g de Mg, es el nutriente que presenta mayores resultados permitiendo calcular una eficiencia agronómica o producción de 29,45 g y 4,78 g por g de Mg aplicado (Ver Figura 34).

El segundo nutriente con mayor EA es el Ca y el nutriente que presenta la más baja EA es el N con 6,9 g para el tratamiento CRCF y 1,12 g para el tratamiento SRCF.

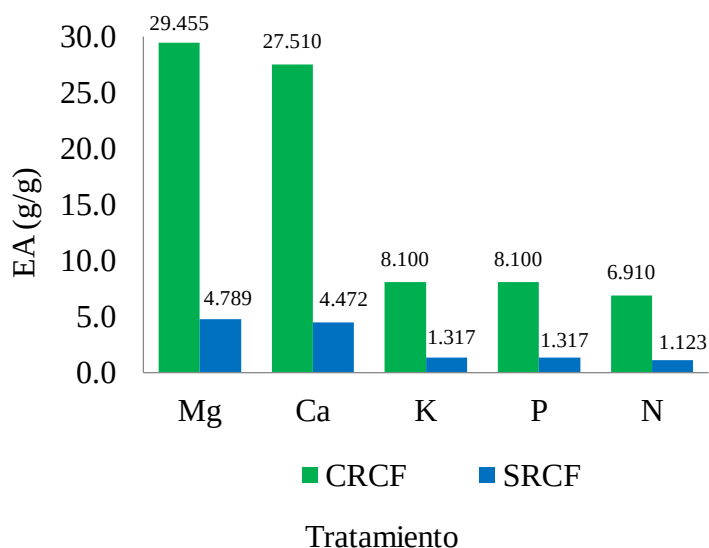


Figura 34. Eficiencia agronómica.

6 Discusión de Resultados

6.1 Radiación Fotosintéticamente Activa y Fotosíntesis.

Chica, Castaño, Riaño, y Obando (2014) explican la respuesta de la fotosíntesis (A) a la radiación fotosintéticamente activa (RFA) como:

“un modelo exponencial asintótico, en el cual la máxima asimilación se alcanza siguiendo un comportamiento logarítmico; a mayor radiación menor es la tasa de incremento de la asimilación hasta llegar al nivel máximo (A_m), a partir de este no se da incremento en A por más que aumente la RFA”.

Estudios del mismo autor reportan para *Eucalyptus grandis* un A_m de $17,3 \mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ con una RFA de $719 \mu\text{mol}(\text{fotones})\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Ver Figura 35).

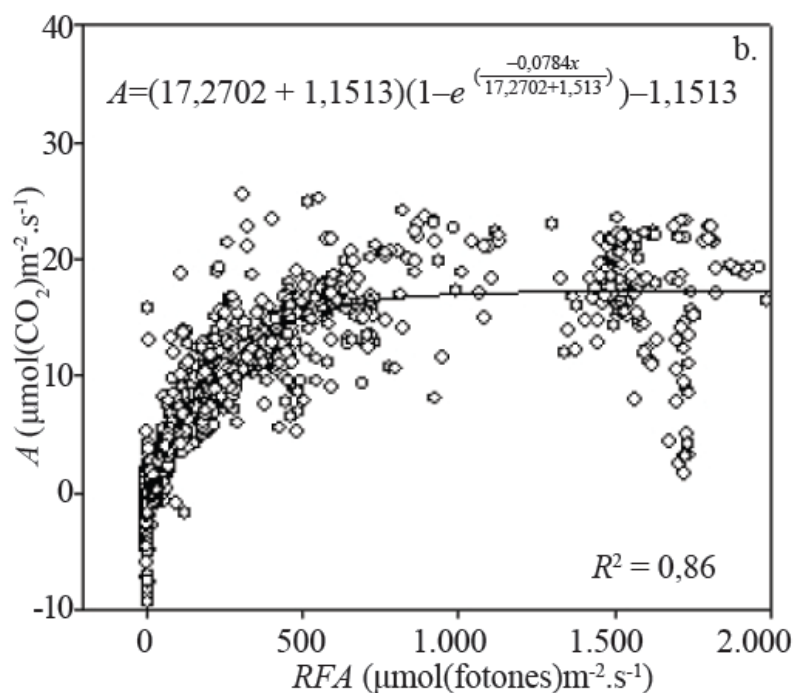


Figura 35. Respuesta de la asimilación CO_2 frente a la radiación fotosintéticamente activa en *Eucalyptus grandis*. Adaptado de Chica et al. (2014) / Intercambio gaseoso en *Eucalyptus pellita* F.Mell y *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden en dos regiones de Colombia. Cenicafé, 65 (2), 55-72.

Según el valor máximo (A_m) registrado, las horas al día donde la fotosíntesis neta es máxima para la zona en estudio de acuerdo a los valores de RFA son de 6 a 9 y de 15 a 17 (Ver Figura 36).

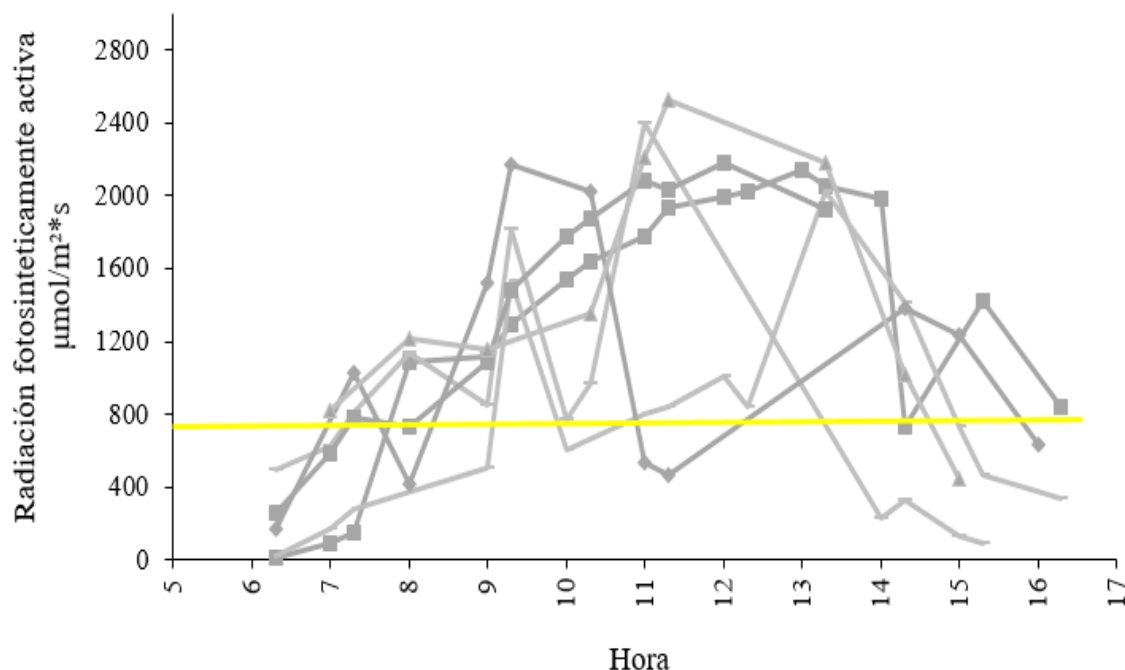


Figura 36. Radiación fotosintéticamente activa en la zona de estudio.

6.2 Comparación de Altura y Diámetro.

Los parámetros productivos de la plantación dendroenergética presentaron diferencias significativas para los tratamientos con fertilización, Salamanca y Ortiz (2018) reportan para la edad de 4 meses diámetros de 0,57 a 0,75 cm y alturas de 58 cm a 76 cm en *Eucalyptus glóbulus* bajo un ensayo de alta densidad y diferentes concentraciones de fertilizante; lo anterior sugiere que *Eucalyptus grandis* a la misma edad se encontraba en condiciones óptimas de crecimiento.

6.3 Relación Biomasa Seca y Área Foliar.

Graciano, Goya, y Caldiz (2004) reportan biomasa seca (Ver Figura 37) y área foliar (Ver Figura 38) para la especie *Eucalyptus globulus* establecida bajo condiciones de suelo arenoso con pH 8,25, precipitación de 808 mm y diferentes tipos de fertilización con superfosfato triple.

Comparando los tratamientos SRSF y SRCF a los cinco meses de establecida la plantación de *Eucalyptus grandis* con los resultados obtenidos para dosis de fertilización 0 g y 20 g del estudio en mención, se encuentran valores semejantes de desarrollo foliar y acumulación de biomasa (Ver Figura 39).

Tabla 6.

Comparación de biomasa seca y área foliar entre *Eucalyptus globulus* y *E. grandis*.

Especie	Comparación	Biomasa seca (g)	Área foliar (m ²)
<i>E. globulus</i>	fertilización 0g	26	0,11
<i>E. grandis</i>	tratamiento SRSF	24,4	0,12
<i>E. globulus</i>	fertilización 20g	20	0,099
<i>E. grandis</i>	tratamiento SRCF	19,74	0,13

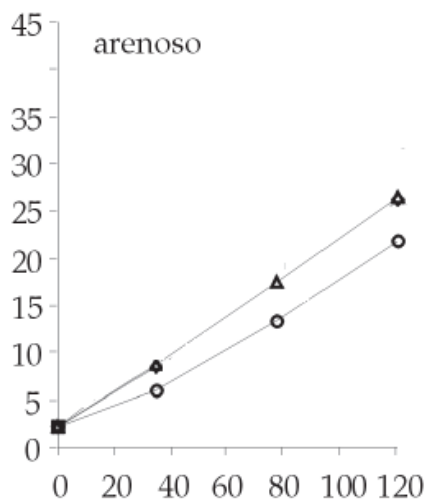


Figura 37. Acumulación de biomasa seca en g a los 126 días de establecida la plantación de *Eucalyptus globulus*. Fertilización de 0 g (rombos) y 24 g (círculos). Adaptado de Graciano *et al.* (2004) / Acumulación y distribución de materia seca en *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantado en macetas con tres tipos de suelo y fertilizado con fósforo. *Ecologia Austral*, 14(1), 53-64.

	Área foliar (cm ²)	Total(g)	Tallo(g)	tallo:total	Hojas(g)	hojas:total	Ramas(g)	ramas:total
Arenoso								
0 g	1163 ± 339	26.2 ± 9.1	12.3 ± 3.6	0.48 ± 0.06	10.8 ± 4.5	0.41 ± 0.08	3.0 ± 3.2	0.11 ± 0.08
6 g	1595 ± 572	32.5 ± 12.1	14.6 ± 5.8	0.45 ± 0.08	13.6 ± 5.8	0.42 ± 0.06	4.2 ± 2.0	0.13 ± 0.06
12 g	1808 ± 566	26.5 ± 7.7	11.5 ± 3.5	0.44 ± 0.07	11.8 ± 3.9	0.44 ± 0.05	3.2 ± 1.6	0.12 ± 0.05
24 g	994 ± 350	21.9 ± 9.3	9.2 ± 4.8	0.42 ± 0.10	9.8 ± 4.6	0.44 ± 0.07	2.9 ± 1.5	0.14 ± 0.07

Figura 38. Área foliar promedio por planta de *Eucalyptus globulus* para diferentes dosis de fertilizante a los 126 días de establecida la plantación. Adaptado de Graciano *et al.* (2004) / Acumulación y distribución de materia seca en *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantado en macetas con tres tipos de suelo y fertilizado con fósforo. Ecología Austral, 14(1), 53-64.

6.4 Eficiencia Fotosintética.

Los valores de eficiencia fotosintética que se muestran en la Figura 39 son el resultado de estudios desarrollados por Lima, Jarvis, y Rhizopoulou (2003) para *Eucalyptus grandis* bajo diferente ambiente de CO₂ y riego. El ambiente control presenta niveles normales de CO₂ y riego ideal para la planta, el ambiente estresado presenta niveles normales de CO₂ y disminución de riego diario para la planta.

Comparando el valor Fv/Fm de los tratamientos aplicados con los resultados de Lima *et al.* (2003) se observa que la eficiencia fotosintética o aprovechamiento de la radiación es mayor incluso en épocas de baja precipitación, manteniendo valores de Fv/Fm que varían entre 0,76 y 0,8, mayores con respecto al máximo reportado (0,7) para condiciones normales de la especie.

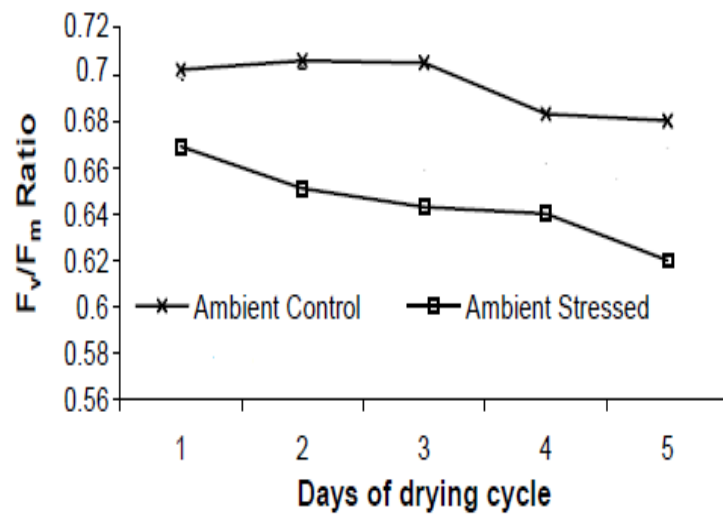


Figura 39. Eficiencia fotosintética de *Eucalyptus grandis* para dos ambientes. Adaptado de Lima *et al.* (2003) / Stomatal responses of *Eucalyptus* species to elevated CO₂ concentration and drought stress. *Scientia Agricola*, 60(2), 231-238.

6.5 Conductancia Estomática.

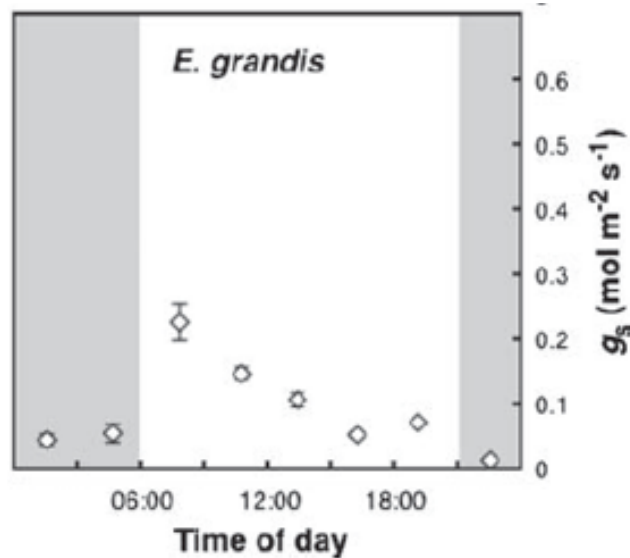


Figura 40. Conductancia estomática media durante el día y parte de la noche en *Eucalyptus grandis* W Hill *ex* Maidem. Adaptado de Lewis, Phillips, Logan, Hricko, y Tissue (2011) / Leaf photosynthesis, respiration and stomatal conductance in six *Eucalyptus* species native to mesic and xeric environments growing in a common garden. *Tree Physiology*, 31(9), 997-1006.

Los resultados de conductancia estomáticos registrados varían entre 80 y 110 mmol/m²s en las horas de la mañana (7 a 10) y de 348 mmol/m²s para horas del mediodía y parte de la tarde (12 a 15), valores similares a los reportados por Lewis *et al.* (2011) para la especie *Eucalyptus grandis* desarrollada en hábitos méxicos y séricos (Ver Figura 40).

6.6 Contenido de Nutrientes Foliare.

Tabla 7.

Comparación de las concentraciones de nutrientes foliares.

Elemento esencial	<i>E. grandis</i> estado adulto	<i>E. globulus</i> Brotes tiernos	<i>E. globulus</i> vivero	<i>E. grandis</i> estado juvenil	SRCF	SRSF	CRCF	CRSF
Rangos:	Ideales			Deficiente	Calculado			
N (%)	1,6-2,9	1,4-2,2	1,7-2,5	<1,5	1,45	1,5	1,56	1,39
P (%)	0,1-0,3	0,2-0,4	0,12-0,25	<0,07	0,09	0,11	0,09	0,09
K (%)	0,6-1,8	0,4-1,5	0,5-1,5	<0,5	0,5	0,62	0,61	0,51
Ca (%)	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,9	<0,1	1,59	1,7	1,34	2,25
Mg (%)	0,1-0,3	0,1-0,3	0,1- 0,3	<0,06	0,42	0,48	0,39	0,53
S (%)	0,15-0,2	0,2-0,3	0,15-0,2	<0,1	<u>0,08</u>	<u>0,08</u>	<u>0,09</u>	<u>0,07</u>
Fe (ppm)	50-156	60-200	50-400	-	<u>21,58</u>	<u>17,94</u>	<u>19,28</u>	<u>19,09</u>
Mn (ppm)	190-700	100-250	100-1250	-	<u>5,12</u>	<u>4,26</u>	<u>4,87</u>	<u>6,09</u>
Zn (ppm)	15-46	30-150	10-150	<7	<u>1,00</u>	<u>0,87</u>	<u>0,84</u>	<u>0,89</u>
Cu (ppm)	4-12	4,0-20	6-100	<2	<u>0,11</u>	<u>0,20</u>	<u>0,15</u>	<u>0,14</u>
B (ppm)	15-100	20-100	10-100	<8	48,48	52,65	51,72	52,49

Nota: Para los contenidos nutricionales de los tratamientos los números en negrilla representan niveles óptimos, subrayados niveles deficientes y en cursiva niveles en abundancia.

Los contenidos de nutrientes foliares por tratamiento evaluado se compararon con los rangos óptimos en estado adulto y deficientes en estado juvenil publicados por De Arruda y Malavolta (2000) para la especie *Eucalyptus grandis* y los rangos óptimos en vivero y brotes tiernos publicados por Toro y Quiroz (2007) para la especie *Eucalyptus globulus*. Se clasifico teniendo

como límites del rango óptimo el valor menor y máximo reportado por los dos autores para cada elemento (Ver Tabla 7).

El N, P y K están en el rango ideal para los cuatro tratamientos sin embargo, el tratamiento CRCF concentro más N con respecto al tratamiento CRSF y similar con el tratamiento SRSF, el P es concentrado en igual proporción para los tratamientos SRCF, CRCF y CRSF y presenta un leve aumento para el tratamiento SRSF; el Ca y Mg está en concentraciones abundantes para los cuatro tratamientos, el Ca está en mayor proporción para el tratamiento CRSF al igual que el Mg; el S presenta niveles de concentración deficiente para los cuatro tratamientos.

Los elementos menores Fe, Mn, Zn y Cu están en concentraciones bajas para todos los tratamientos a diferencias del B ubicado en niveles óptimos. Las bajas concentraciones de estos elementos según Gutiérrez, Rodríguez, Villanueva, García, y Romo (2015) se debe a que en suelos con pH entre 8,0 y 8,5 presentan baja disponibilidad de Fe, Mn, Cu, Zn y B como se muestra en la Figura 41.

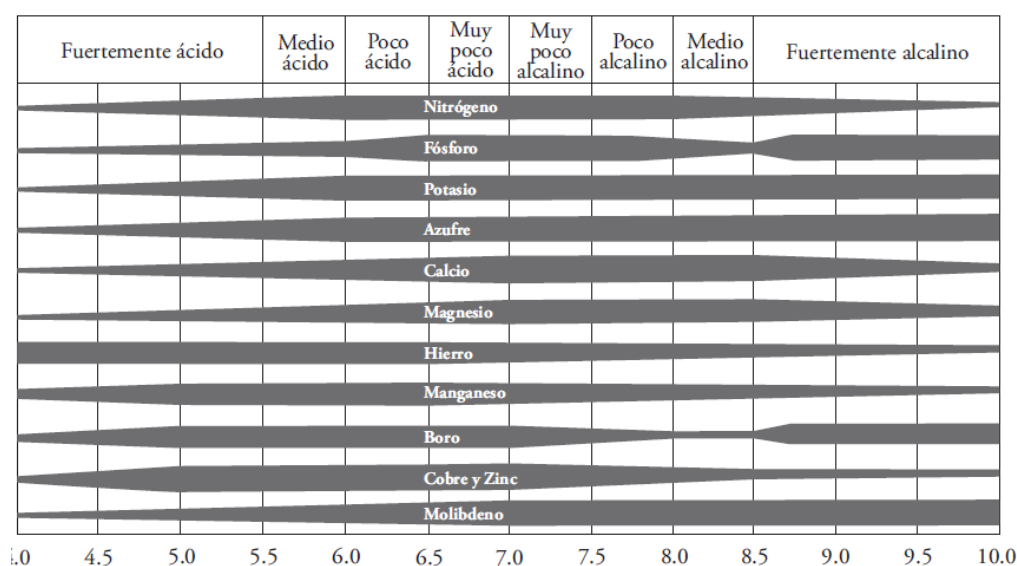


Figura 41. Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de los nutrientes. Adaptado de Gutiérrez *et al.* (2015) / Calidad del agua en la producción de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero. Agrociencia, 49(2), 205-219.

El calcio y el magnesio presentan los mayores valores en el uso eficiente de los nutrientes aplicados, nitrógeno, potasio y fosforo los más bajos, aun cuando en el análisis de tejido foliar el contenido de nitrógeno es superior al de magnesio con 1,45% N, 0,42% Mg para el tratamiento SRCF, y 1,56% N, 0,39% Mg para el tratamiento CRCF; esto se debe principalmente a los altos contenidos de calcio en el suelo y a la relación catiónica Ca/Mg, Los bajos contenidos de fosforo y potasio son influenciados por las altas concentraciones de calcio, generando relaciones antagónicas con el potasio y fijando el fosforo al suelo mediante fosfatos de calcio (Munera y Meza, 2012), disminuyendo considerablemente la cantidad de fosforo asimilable (Ver Figura 42). En cuanto a la eficiencia fisiológica en el tratamiento que presentaron los valores más altos CRCF se considera que el nitrógeno presenta una eficiencia media a baja con un 20,9%, potasio y fosforo eficiencias baja y muy baja con valores de 8,4 k y 1,5 P, en relación al estudio de Da Silva, Poggiani, y Coelho (1983) quienes reportan para *Eucalyptus grandis* una eficiencia fisiológica de 33,36 % de N, 39 % P, 15,25 % K y 12,21 % Ca.

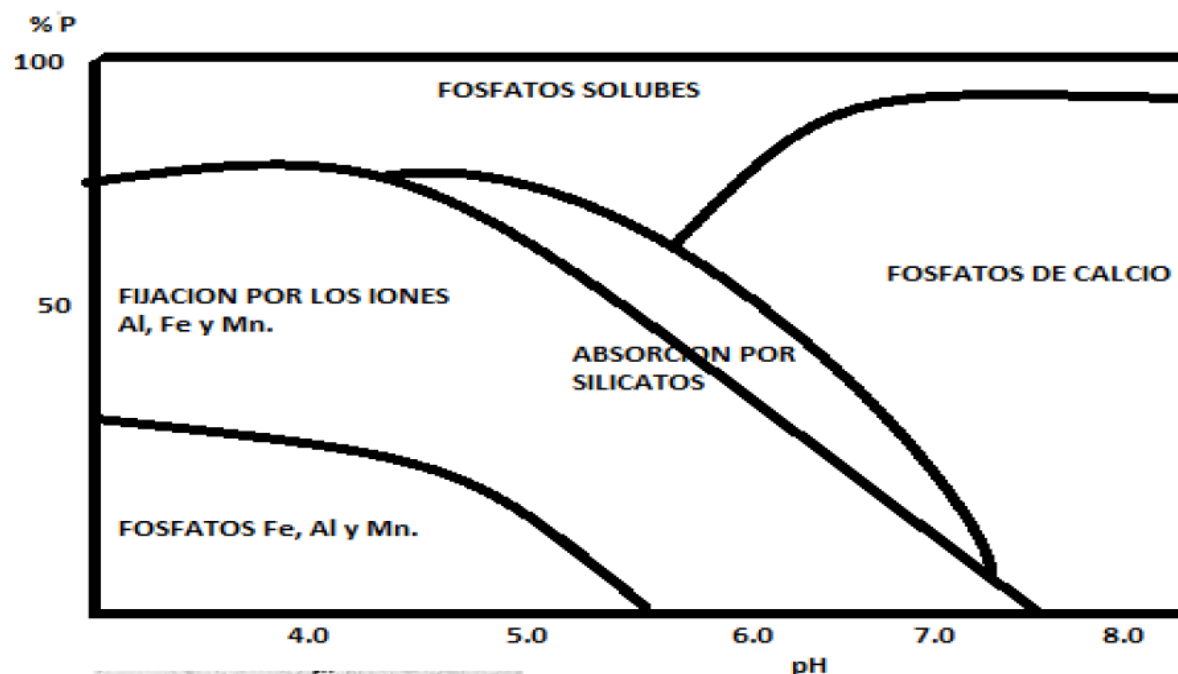


Figura 42. Formas de fósforo en el suelo. Adaptado de Munera y Meza (2012) / El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5248/el%20fosforo%20elemento.pdf>

7 Conclusiones

El incremento de diámetro, altura y área foliar en los individuos de *Eucalyptus grandis* muestra que la especie responde positivamente a los tratamientos con fertilización; pero el incremento de biomasa fue mayor para el tratamiento con fertilización y riego.

La conductancia y la eficiencia fotosintética no presentaron diferencias significativas para ninguno de los tratamientos, resultados atribuibles a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa disponible y a las características ecofisiológicas especiales que posee la especie *Eucalyptus grandis*.

Calcio y magnesio fueron los elementos que presentaron mayores porcentajes de absorción y fijación nutricional en los tratamientos con fertilización, el calcio presento una eficiencia fisiológica seis veces mayor a la ideal para *Eucalyptus grandis*.

Los bajos niveles en el uso eficiente de fosforo y potasio se debe a las altas concentraciones de calcio en el suelo, lo cual provoca antagonismo con potasio y disminución de fosfatos solubles al fijar el fosforo en forma de fosfato de calcio.

8 Recomendaciones

Elaborar análisis químico completo de suelo para obtener la concentración de los elementos menores y así, proponer dosis de fertilización acordes a las necesidades de la planta y las deficiencias del suelo.

Dados los resultados de la eficiencia agronómica y fisiológica de los elementos, es necesario disminuir las dosis de fertilizante y aumentar la frecuencia de aplicación para evitar pérdidas del fertilizante por procesos naturales de lixiviado, erosión y competencia de arvenses.

En estudios futuros hacer toma de datos de conductancia estomática y eficiencia fotosintética a diferentes horas del día para obtener resultados de la variación y el comportamiento de estas variables bajo diferentes periodos de luz solar.

Continuar con la investigación a fin de obtener una base de datos más sólida, ya que las diferencias significativas se empezaron a visualizar a partir del octavo mes de establecida la plantación.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía Municipal Macaravita. (2002). Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Macaravita (EOT). Macaravita, Santander. Colombia : La Alcaldía
- Aristizábal, J. (2010). Estufas mejoradas y bancos de leña: una alternativa de autoabastecimiento energético a nivel de finca para dependientes de los bosques de roble de la cordillera Oriental. *Colombia Forestal*, 13(2), 245-256.
- Bautista, E., Sánchez, Y., y Salazar, J. (2015). Dinámica de la radiación fotosintéticamente activa en arreglos agroforestales con *Hevea brasiliensis* en el norte de la amazonia colombiana. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 18(2), 365-372.
- Carvajal, R. (2017). Caracterización edafoclimática provincia de García Rovira. *SENNOVA*, 1(1), 1-25.
- Castaño, A., Chica, H., Obando, D., y Riaño, N. (2015). Arquitectura del dosel e interceptación de la radiación solar por tres especies forestales nativas en Colombia. *Cenicafé*, 64(1), 19-30.
- Chica, H., Castaño, A., Riaño, N., y Obando, D. (2014). Intercambio gaseoso en *Eucalyptus pellita* F.Mell y *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden en dos regiones de Colombia. *Cenicafé*, 65 (2), 55-72.
- Colombia. Leyes y Decretos, Decreto 1791, Diario Oficial No. 42.894 (04 de octubre de 1996).
- Colombia. Leyes y Decretos, Decreto 1843, Diario Oficial No. 39.991 (26 de agosto de 1991).
- Colombia. Leyes y Decretos, Ley 99, Diario Oficial No. 41.146 (22 de diciembre de 1993).
- Colombia. Leyes y Decretos, Ley 9, Diario Oficial No. 35308 (16 de julio de 1979).
- Colombia. Leyes y Decretos, Ley 697, Diario Oficial No. 44.573 (05 de octubre de 2001).
- Colombia. Leyes y Decretos, Ley 140, Diario Oficial No. 41.406 (24 de junio de 1994).
- Colombia. Leyes y Decretos, Ley 1715, Diario Oficial No. 49.150 (13 de mayo de 2014).
- Colombia. Leyes y Decretos, Ley 629, Diario Oficial No. 44.272 (27 de diciembre de 2000).
- Da Silva, H., Poggiani, F., y Coelho, L. (1983). Eficiencia de utilização de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus*. *Pesquisador florestal*, 6(7), 1-8.
- De Arruda, R., y Malavolta, E. (2000). nutrição e adubação potássica em eucalyptus. *informações agronomicas*, 91(10), 1-12.

- Drigo, R. (2005). East África: Spatial woodfuel production and consumption analysis of selected African countries. Recuperado de <http://www.fao.org/3/j8227e/j8227e00.pdf>
- Dudley, G. (2000). Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals. *Journal of Environmental Quality*, 29(2), 662-683.
- Earl, D. (1975). *Forest energy and economic development*. Oxford, Reino Unido: Clarendon Press.
- Elauria, J., Castro, M., y Racelis, D. (2003). Sustainable biomass production for energy in the Philippines. *Biomass and Bioenergy*, 25(5), 531-540.
- Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuña, E., Cancino, J., Espinosa, M., y Muñoz, F. (2016). Sustentabilidad en el uso de nutrientes de plantaciones dendroenergéticas en dos suelos marginales de la Región de Biobío, Chile. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13(33), 11-19.
- Fernandez, J. (2003). Energías renovables para todos, Biomasa. Recuperado de <http://media1.webgarden.es/files/media1:4befe685c2de5.pdf.upl/E.Biomassa.pdf>
- Fernández, M., Tapias, R., y Alesso, P. (2010). Adaptación a la sequía y necesidades hídricas de *Eucalyptus globulus* Labill. *CIDEU*, 8(9), 31-41.
- Goya, J., Frangi, J., Dalla Tea, F., Marcó, M., y Larocca, F. (1997). Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos Jornadas Forestales de Entre Ríos, 12(3), 1-19.
- Graciano, C., Goya, J., y Caldiz, D. (2004). Acumulación y distribución de materia seca *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantado en macetas con tres tipos de suelo y fertilizado con fósforo. *Ecologia Austral*, 14(1), 53-64.
- Gutierrez, A. (2014). Aportes a la rehabilitación ecosistémica de áreas riparias con énfasis en calidad de suelos y producción dendroenergética por medio de arreglos agroforestales en zonas ganaderas del piedemonte llanero (tesis de maestría). Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas U.D.C.A, Villavicencio, Meta.
- Gutiérrez, J., Rodríguez, T., Villanueva, A., García, S., y Romo, J. (2015). Calidad del agua en la producción de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero. *Agrociencia*, 49(2), 205-219.
- Ibarra, D. (2016). Efecto Fisiológico del fósforo en Genotipos de *Eucalyptus grandis*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Valle del cauca.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2016). BIODIVERSIDAD 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia. Recuperado de <http://www.humboldt.org.co/es/test/item/898-bio2015>.

- Lewis, J., Phillips, N., Logan, B., Hricko, C., y Tissue, D. (2011). Leaf photosynthesis, respiration and stomatal conductance in six *Eucalyptus* species native to mesic and xeric environments growing in a common garden. *Tree Physiology*, 31(9), 997-1006.
- Lima, W., Jarvis, P., y Rhizopoulou, S. (2003). Stomatal responses of *Eucalyptus* species to elevated CO₂ concentration and drought stress. *Scientia Agricola*, 60(2), 231-238.
- Liñan, J. (2016). Fisiología Vegetal. Centro Universitario UAEM Zumpango Licenciatura de Ingeniero Agrónomo en Producción. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/80531592.pdf>
- Mejía, M., Burbano, R., García, M., y Baena, D. (2014). Respuesta fotosintética de *Eucalyptus grandis* W. Hill a la disponibilidad de agua en el suelo ya la intensidad de luz. *Acta Agronómica*, 63(4), 311-317.
- Mejía, M., Riaño, N., Urrego, J., Ibarra, D., y Zapata, C. (2017). Effect of soil water availability on gas exchange in young trees of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Acta Agronómica*, 66(4), 549-557.
- Melgarejo, L. (2010). Experimentos en Fisiología Vegetal. Recuperado de http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/laboratorios/fisiologiavegetal/documentos/Libro_experimentos_en_fisiologia_y_bioquimica_vegetal__Reparado_.pdf
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2018). Cadena de forestal, Indicadores e instrumentos. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Forestal/Documentos/002%20-%20Cifras%20Sectoriales/002%20%20Cifras%20Sectoriales%20%202018%20Enero%20Forestal.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1996). Política de Bosques. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Políticas/555_politica_de_bosques.pdf
- Munera, G., y Meza, D. (2012). El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5248/el%20fosforo%20elemento.pdf>
- Muñoz. (2009). Importancia del agua en la nutrición de los cultivos. *Carta Trimestral*, 31(3), 1-4.
- Navarro, S. y Navarro, G. (2003). Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Recuperado de http://www.academia.edu/11618245/Qu%C3%ADmica_Agr%C3%ADcola_Segunda_Edici%C3%B3n
- Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2008). Bosques y energía: cuestiones clave. Recuperado de <http://www.fao.org/3/i0139s/i0139s00.pdf>

- Ospina, C., Hernandez, R., Rodas, C., Urrego, J., Riaño, N., Aristizabal, F., Godoy, J. y Osorio, O. (2006). Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana. El Eucalipto, *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Manizales, Colombia: Cenicafe.
- Patiño, J., y Smith, R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Energética*, (39), 19-34.
- Peña, S. (2016). La Biomasa, Importancia, Características y Formas de Preparación. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Santiago_Pena2/publication/311171316_La_biomasa_Importancia_tipos_y_caracteristicas_y_formas_de_preparacion/links/583ecc5d08ae8e63e617d4dc.pdf
- Peréz, K., y Sandoval, E. (2017). Comportamiento fisiológico de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) sometidas a estrés por salinidad. *Conexión agropecuaria JDC*, 4(2), 13-24.
- Pinilla, J., y Valenzuela, C. (2012). Algunos antecedentes en la búsqueda de opciones económicas para el abastecimiento de biomasa. *Ciencia e investigación forestal*, 18(2), 69-90.
- Pizano, C. y García, H. (2014). El bosque seco tropical en Colombia. Recuperado de <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9333>.
- Ribadeneira, C. y Paulina, M. (2015). Reforestación con fines comerciales: Situación del sector forestal industrial ecuatoriano e impacto de las políticas públicas, período 2000-2013 (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito DM, Ecuador.
- Rodriguez, J. (2016). Modelación de biomasa en plantaciones de *Eucalyptus* sp. y *Pinus radiata* para fines energéticos, en suelos arenales, sedimentos marinos y trunco en la región del Biobío y la Araucanía, Chile (tesis doctoral). Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Rojas, J. (2015). Fertilidad de suelos en plantaciones forestales del trópico colombiano (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Salamanca, L. y Ortiz, T. Extracción de nutrientes y parámetros productivos de *Eucalyptus globulus* bajo diferentes niveles de fertilización en la zona de vida bosque muy húmedo montano Bmh-M (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Málaga, Santander.
- Sanclemente, M., y Peña, E. (2008). Crecimiento y eficiencia fotosintética de *Ludwigia decurrens* Walter (Onagraceae) bajo diferentes concentraciones de nitrógeno. *Acta Biológica Colombiana*, 13(1), 175-186.
- Silveira, S. (2005). Promoting bioenergy through the clean development mechanism. *Biomass and*
- Toro, J. y Quiroz, I. (2007). Fertilización de *Eucalyptus globulus* producidos en contenedores. Hualpén, Chile: INNOVA CHILE-CORFO.

- Universidad Nacional de Entre Ríos. (2001). Manual de Prácticas de Fisiología Vegetal. Recuperado de http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/fisiologiaveg/m_didactico/manual_practicas/Crecimiento_AED.pdf
- Valderrama, E., y Linares, E. (2008). Uso y manejo de leña por la comunidad campesina de San José de Suaita (Suaita, Santander, Colombia). *Colombia Forestal*, 11(1), 19-34.
- Valencia, J., Trujillo, L., y Vargas, O. (2012). Dinámica de la vegetación en un enclave semiárido del río Chicamocha, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2), 40-65.
- Vellini, A., Paula, N., Alves, p., Pavani, L., Bonine, C., Scarpinati, E., y Paula, R. (2008). Respostas fisiológicas de diferentes clones de eucalipto sob diferentes regimes de irrigação. *Revista Árvore*, 32(4), 651-663.
- Zapata, C. (2013). Influencia edafoclimática en el desarrollo de plantaciones juveniles de *Eucalyptus grandis* en en el suroccidente colombiano (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.

Apéndices

Apéndice A.

Tratamiento pregerminativo en *Eucalyptus grandis* y bandeja multicelda con sustrato de turba para la germinación.



Apéndice B.

Germinación y plantas en vivero de *Eucalyptus grandis*.



Apéndice C.

Siembra del material vegetal y fertilización con elementos menores.



Apéndice D.

Medición de variables morfológicas.



Apéndice E.

Toma de la radiación fotosintéticamente activa a las 6:30 am.



Apéndice F.

Toma de conductancia estomática.



Apéndice G.

Muestra destructiva primera 22 de abril de 2018.



Apéndice H.

Secado de tejido vegetal 22 de abril de 2018.



Apéndice I.

Muestreo destructivo árbol total 6 de diciembre de 2018.



Apéndice J.

Plantación de *Eucalyptus grandis* a un año de establecimiento.

