

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFECTO DE LA REFERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO EN EL  
CRECIMIENTO INICIAL DE UN CLON DE *E. grandis***

**por**

**Alfonso GONZÁLEZ CARUGO  
Alejandro FROS PICÚN**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2015**

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. Rafael Escudero

-----  
Ing. Agr. (M.Sc) Luis Gallo

-----  
Ing. Agr. (M.Sc) Carmelo Centurión

Fecha: 20 de noviembre de 2015

Autores:

-----  
Alfonso Daniel González Carugo

-----  
Alejandro Fros Picún

## AGRADECIMIENTOS

A los tutores de este trabajo, el Ing. Agr. Rafael Escudero y al Ing. Agr. (M.Sc) Luis Gallo, por su disponibilidad y apoyo.

A la empresa UPM- Forestal Oriental, por la oportunidad de trabajar en este ensayo y brindar toda la información disponible sobre el mismo. En particular al Ing. Agr. (M.Sc) Carmelo Centurión y al Ing. Agr. Daniel Romero.

Al compañero Ing. Agr. Mauricio Quiroga por su buena disposición y apoyo en el análisis de los datos.

A Lic. Sully Toledo por su disposición dedicación y profesionalismo.

Alfonso: A toda mi familia, en especial a mis padres Daniel y Jacqueline, por la educación que me brindaron, los valores que me transmitieron y por el gran esfuerzo para hacer posible la realización de mis estudios. A mis hermanas Magdalena y Noelia, y a mi novia y compañera Dayana por el apoyo incondicional en todo momento. A mi compañero Alejandro por la buena disposición y hacer posible el trabajo en equipo.

Alejandro: A toda mi familia en especial a mis padres Franklin y Graziella por su amor, esfuerzo y sostén incondicional para hacer posible mi desarrollo personal y profesional. A mis abuelos, hermanos y amigos por el aliento y apoyo a lo largo de toda la carrera. A mi compañero Alfonso, por la disponibilidad y esfuerzo para la realización de este trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 <u>Objetivo general</u> .....	2
1.1.2 <u>Objetivos específicos</u> .....	2
<b>2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u></b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 NUTRIENTES</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 <u>Macro nutrientes y micronutrientes</u> .....	<b>3</b>
2.1.1.1 Macronutrientes .....	3
2.1.1.2 Micronutrientes.....	4
<b>2.2 NITRÓGENO</b> .....	<b>4</b>
2.2.1 <u>Factores que afectan el contenido total de N en el suelo</u> .....	<b>5</b>
2.2.1.1 Clima y vegetación .....	5
2.2.1.2 Topografía.....	6
2.2.1.3 Tipo de suelo .....	6
2.2.1.4 Material madre .....	6
2.2.1.5 Manejo .....	7
2.2.2 <u>Balace de nitrógeno</u> .....	<b>7</b>
2.2.2.1 Mecanismos de ganancia .....	7
2.2.2.2 Mecanismos de pérdida de nitrógeno .....	10
2.2.3 <u>Absorción y asimilación dentro de la planta</u> .....	<b>13</b>
<b>2.3 RESPUESTA DE LAS PLANTAS AL AGREGADO DE NUTRIENTES</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4 DINÁMICA DE NUTRIENTES EN ECOSISTEMAS FORESTALES</b> .....	<b>15</b>
<b>2.5 FERTILIZACIÓN</b> .....	<b>16</b>
2.5.1 <u>Fertilización nitrogenada en <i>Eucalyptus</i></u> .....	<b>18</b>
2.5.1.1 Eficiencia de la fertilización nitrogenada según tipo de suelo.....	18
2.5.1.2. Fertilización nitrogenada al momento de la plantación .....	19
2.5.1.3. Refertilización con nitrógeno .....	21
2.5.1.4 Efectos de la fertilización nitrogenada.....	22
2.5.1.5 Mantenimiento de los efectos de la fertilización	

en <i>Eucalyptus</i> .....	23
2.5.2 <u>Fertilizantes aplicados</u> .....	24
2.5.2.1 Urea .....	24
2.5.2.2 Sulfammo .....	27
2.6 ESPECIE .....	30
2.7 CLONES .....	32
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	33
3.1 SITIO EXPERIMENTAL .....	33
3.1.1 <u>Suelos según CONEAT</u> .....	33
3.1.2 <u>Clima</u> .....	34
3.2 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....	34
3.2.1 <u>Diseño experimental</u> .....	34
3.2.2 <u>Metodología</u> .....	36
3.2.2.1 <u>Tratamientos</u> .....	37
3.2.2.2 <u>Cronología del experimento</u> .....	38
3.2.2.3 <u>Formas de aplicación de los fertilizantes</u> .....	38
3.2.3 <u>Cuantificación de las variables</u> .....	39
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	42
4.1 BLOQUES .....	42
4.2 RESULTADOS.....	42
4.2.1 <u>Resultados de volumen de madera</u> .....	42
4.2.1.1 <u>Verificación de supuestos</u> .....	42
4.2.1.2 <u>Datos obtenidos para volumen de madera</u> .....	43
4.2.2 <u>Resultados para área de copa</u> .....	46
4.2.2.1 <u>Verificación de supuestos</u> .....	46
4.2.2.2 <u>Datos obtenidos para área de copa</u> .....	47
4.2.2.3 <u>Análisis factorial para área de copa</u> .....	50
4.2.3 <u>Resultados para las mediciones adicionales</u> .....	51
4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	51
4.3.1 <u>Consideraciones generales</u> .....	51
4.3.2 <u>Relación entre ambas variables</u> .....	52
4.3.3 <u>Fertilización en plantación</u> .....	53
4.3.4 <u>Refertilización</u> .....	54
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	55
6. <u>RESUMEN</u> .....	56
7. <u>SUMMARY</u> .....	57
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	58

9. ANEXOS ..... 63

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resumen de los 5 tratamientos .....	38
2. Cronología del experimento .....	38
3. Resultados de volumen para cada tratamiento .....	43
4. Resultado de la prueba Tukey con un $\alpha$ de 0.05 .....	45
5. Resumen de los contrastes realizados .....	46
6. Resumen de los datos para área de copa .....	47
7. Media y límites inferior y superior del intervalo de confianza.....	49
8. Resumen de resultados de los contrastes para área de copa .....	50
Figura No.	
1. Respuesta en crecimiento vegetal al agregado creciente de nitrógeno.....	15
2. Foto de urea en su forma comercial.....	24
3. Foto del sulfammo en su forma comercial .....	27
4. Gráfica de pérdidas por volatilización en los 20 primeros días después de la aplicación, a partir de urea y sulfammo.....	29
5. Variación en el pH con la aplicación de urea y sulfammo fertilizante .....	29

6. Distribución natural de <i>Eucalyptus grandis</i> en Australia.....	31
7. Representación del diseño experimental .....	36
8. Forma de aplicación de los fertilizantes en la plantación.....	39
9. Forma de aplicación de fertilizante en la refertilización.....	39
10. Datos de volumen por tratamiento y para cada bloque.....	43
11. Rendimiento en volumen en promedio para cada tratamiento .....	44
12. Representación de los valores promedio para área de copa para cada tratamiento y cada bloque.....	47
13. Gráfica de medias de área de copa para cada tratamiento.....	48
14. Gráfica de intervalos de confianza (95%) para las medias de cada tratamiento.....	49
15. Comparación de las medias para cada tratamiento para volumen de madera y para área de copa.....	52

## 1. INTRODUCCIÓN

La historia de la forestación en Uruguay podría dividirse en dos etapas: la primera abarcaría desde los orígenes hasta el año 1987, período durante el cual la silvicultura no habría de superar las 31.000 hectáreas. La segunda tendría como propulsora la promulgación de la nueva Ley de Desarrollo Forestal No. 15.939, en diciembre de 1987, la cual catapultaría la superficie destinada a este rubro, así como el desarrollo de industrias forestales y por ende, de la economía forestal (FAO, 2004).

Según información del MGAP, más específicamente de la DIRENARE, había al 2004 unas 660.000 ha forestadas. El incremento de la superficie de bosques comerciales fue muy pausado entre 1951 (95 000 has) y 1990 (186 000 has) y se aceleró fuertemente a partir de la década de los 90 hasta llegar actualmente a más de 750 000 has. Alrededor del 80 % de las plantaciones se localizaban en 2004 sobre suelos de prioridad foresta, lo que indica que lo que perseguía la normativa legal fue eficaz; en ello pesó sin duda el beneficio fiscal y económico que dio la ley (Perdomo y Crucci, 2010).

Actualmente el área afectada alcanzó el millón y medio de hectáreas (incluye caminería y zonas buffer) (MGAP. DGF 2012b, Uruguay XXI 2013).

El país no posee una extensa trayectoria en este tipo de utilización de la tierra. Tampoco se han observado suficientemente (intensidad y duración) fenómenos e impactos positivos o negativos, provocados por el uso forestal (Perdomo y Crucci, 2010).

Las actividades forestales se sustentan en plantaciones comerciales de especies de rápido crecimiento de *Eucalyptus* y *Pinus*, con predominancia del primer género a razón del 70% de la superficie (Bennadji, 2007), siendo las especies más utilizadas *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus maidenii*, *Eucalyptus dunnii*, *Pinus elliotti* y *P. taeda*. Las mayores concentraciones de plantaciones forestales se encuentran en los departamentos de Rivera, Tacuarembó, Paysandú, Río Negro y Lavaljeja (SPF, 2011).

La aplicación de fertilizantes al momento de la plantación en *Eucalyptus sp.* es una práctica habitual en muchos países, mediante la cual puede incrementarse significativamente el crecimiento inicial (Gaitán et al., 2004).

La fertilización tiene como objetivos: lograr mayor desarrollo y homogeneidad inicial de las plantas para que estas cubran más rápidamente el suelo y mejorar la capacidad del sitio, lo que se traduce en un aumento de la producción de madera al final de la rotación y/o en un acortamiento del ciclo (Gaitán et al., 2004).

Dentro de los fertilizantes aplicados se encuentran los nitrogenados, que contienen distintas cantidades de nitrógeno según de cual se trate, este es el elemento más común en el planeta, es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales. Es además el nutriente que en general más influye en el rendimiento y calidad del producto a obtener en la actividad agropecuaria (Perdomo y Barbazán, 1999).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la refertilización nitrogenada en el crecimiento inicial del árbol, en un clon de *Eucalyptus grandis* en el departamento de Tacuarembó.

### 1.1.2. Objetivos específicos

1- Evaluar la respuesta en volumen de madera con aplicación de urea a los 4 meses de edad del árbol.

2- Evaluar la respuesta en área de copa con la aplicación de urea a los 4 meses de edad del árbol.

3- Evaluar dos dosis distintas de fertilizante aplicadas al momento de plantación medido como volumen de madera y área de copa.

4- Comparar rendimientos en volumen de madera y área de copa en tratamientos refertilizados con urea y otros con sulfammo.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. NUTRIENTES

Los nutrientes son aquellos elementos que la planta necesita para cumplir un ciclo de vida o simplemente favorecen algún aspecto del crecimiento y desarrollo de la misma.

Los nutrientes más estudiados son nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio por ser los que más limitan la producción primaria neta y otras funciones del ecosistema.

#### 2.1.1. Macronutrientes y micronutrientes

Los nutrientes se pueden separar en macronutrientes y micronutrientes según las cantidades en que son requeridos por las plantas.

##### 2.1.1.1. Macronutrientes

Hay dos grupos de macronutrientes; los denominados nutrientes vegetales primarios, que son el nitrógeno, fósforo y potasio. Denominados de esta forma porque las plantas los consumen en cantidades relativamente grandes y, muy a menudo, están deficientes en el suelo. A su vez hay otro grupo llamado nutrientes vegetales secundarios. Estos también son consumidos en cantidades abundantes por las plantas, pero por lo general no son deficientes en los suelos. Calcio, magnesio y azufre corresponden a este grupo (Garategui, 2002).

### 2.1.1.2. Micronutrientes

Son elementos esenciales para el crecimiento vegetal aunque se requieren en muy pequeñas cantidades, por lo que también se les llama elementos traza. Se trata de hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, molibdeno y cloro (Garategui, 2002).

Es necesario resaltar que la mayoría de los micronutrientes definidos anteriormente pueden desarrollar niveles altos de toxicidad a concentraciones elevadas, por lo que el suministro y la presencia de los mismos deben considerarse con especial cuidado (Tisdale y Nelson, Bonilla, Havlin et al., citados por Cantera e Ilhenfeld, 2014).

## 2.2. NITRÓGENO

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales. Es además el nutriente que en general más influye en el rendimiento y calidad del producto a obtener en la actividad agropecuaria (Perdomo y Barbazán, 1999).

En la naturaleza existen dos fuentes principales de reserva de N para las plantas. La mayor es la atmósfera, en la cual el 78% del aire es N. La otra reserva importante de N es la materia orgánica del suelo (MOS). Del total del N que hay en el suelo, aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos (Perdomo y Barbazán, 1999).

A pesar de que el N es uno de los elementos más comunes del planeta, es también el nutriente que más frecuentemente limita la producción de los cultivos. Esto se debe a que la molécula de  $N_2$  ( $N\equiv N$ ) es inerte, con una gran estabilidad conferida por su triple enlace (Perdomo y Barbazán, 1999)

A diferencia del P y K, la dinámica del N en el suelo no está regulada por un equilibrio químico, sino principalmente por procesos biológicos, derivados de la actividad microbiana del suelo que afectan sobre todo a las formas minerales y a las formas orgánicas de reserva (Perdomo y Barbazán, 1999).

## 2.2.1. Factores que afectan el contenido total de N del suelo

### 2.2.1.1. Clima y vegetación

El clima, actuando a través de la temperatura y la humedad, junto con el tipo de vegetación, determinan la cantidad de N de suelos que nunca han sido laboreados. Dicha temperatura afecta de modo diferencial la actividad de los microorganismos y de las plantas (Perdomo y Barbazán, 1999).

En climas donde la temperatura es baja, la actividad de los microorganismos es escasa y, por lo tanto, la velocidad de descomposición de los restos y de la materia orgánica también es muy baja. Además, la temperatura mínima para el crecimiento de las plantas es menor que para el crecimiento de los microorganismos. Por lo tanto, con temperaturas bajas se resiente más la actividad microbiana que la actividad fotosintética de las plantas (Perdomo y Barbazán, 1999).

Al aumentar la temperatura, como sucede al acercarse a la región tropical, la actividad microbiana aumenta más rápidamente que la actividad fotosintética de las plantas. Como resultado, estos suelos acumulan poca materia orgánica (Perdomo y Barbazán, 1999).

Por otra parte, al aumentar la humedad de los suelos, aumenta la velocidad crecimiento vegetal, y con esto la tasa de producción de materia seca. Por esto, cuando se compara el contenido de N del suelo de las distintas regiones, se observa que el aumento de los niveles hídricos del suelo se corresponde con un aumento del contenido de N total del suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

#### 2.2.1.2. Topografía

Según el grado de la pendiente, se desarrollan suelos con distintos contenidos de materia orgánica. En general, los suelos desarrollados sobre superficies planas y bajas presentan mayores contenidos de materia orgánica que aquellos desarrollados sobre pendientes pronunciadas (Perdomo y Barbazán, 1999).

#### 2.2.1.3. Tipo de suelo

Los distintos tipos de suelos presentan, en su condición natural, diferentes contenidos de N total. Las cantidades de N total presentes en los distintos suelos pueden estimarse a partir del contenido de MOS. Por ejemplo, en los primeros 20-cm de un Vertisol con 8% de MOS, de un Brunosol con 5% de MOS, y de un Luvisol con 2% de MOS, existirían respectivamente 11.0, 7.0 y 2.8 ton.ha<sup>-1</sup> de N total. Estos cálculos son aproximados; en los mismos se asume un valor de densidad aparente de 1.2, un contenido de C del humus de 58%, y una relación C/N del humus de 10/1.

Los distintos suelos no difieren solo en el contenido de nitrógeno, sino también en la distribución en profundidad (Perdomo y Barbazán, 1999).

#### 2.2.1.4. Material madre

El efecto principal de este factor es a través de la influencia de la textura; al aumentar el contenido de arcilla del material madre también aumenta el contenido de C orgánico de los suelos, el cual está relacionado estrechamente con el contenido de N del mismo. Este efecto se debe a que la fijación de sustancias húmicas en complejos órgano-minerales ayuda a preservar la MOS (Perdomo y Barbazán, 1999).

#### 2.2.1.5. Manejo

El contenido de MOS puede cambiar drásticamente debido al manejo, como por ejemplo, cuando se pasa de una situación de campo natural a una situación de laboreo. Cuando se laborea un suelo, aumenta la superficie específica del mismo que se expone al ataque microbiano, y aumentan también la aireación y la tasa de mineralización de la MOS. Además, con el laboreo aumenta también el riesgo de erosión, ya que ocurre una pérdida preferencial de las fracciones más finas de los primeros centímetros del suelo. Estas fracciones son generalmente las más ricas en MO. Con la cosecha del producto agropecuario también aumenta la extracción del N del suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

#### 2.2.2. Balance de nitrógeno

Según Perdomo y Barbazán (1999), el contenido de nitrógeno del suelo, es el resultado de las pérdidas y ganancias que ocurran al mismo.

##### 2.2.2.1. Mecanismos de ganancia

###### Aporte con las lluvias

Los aportes de N por las lluvias son de escasa relevancia en la producción que se realiza en nuestro país. Toman importancia únicamente en regiones desérticas.

###### Fijación no simbiótica

La fijación no simbiótica de N en el suelo puede ser realizada por microorganismos tales como bacterias de vida libre; no existen grandes estudios sobre el caso en nuestro clima, siendo un mecanismo de relevancia en otros climas (Perdomo y Barbazán, 1999).

### Fijación simbiótica

El N proveniente de la fijación simbiótica entre especies de leguminosas y bacterias fijadoras de N es particularmente importante en la producción agropecuaria de nuestro país, donde se realizan rotaciones de cultivos con praderas mezclas de leguminosas y gramíneas, las cuales generalmente permanecen en producción por tres o cuatro años (Perdomo y Barbazán, 1999).

### Fertilizantes inorgánicos y abonos orgánicos

Estos fertilizantes pueden originarse en procesos de síntesis química (sintetizados por el hombre) o provenir de fuentes orgánicas (por ejemplo, estiércol). Actualmente, los fertilizantes de origen químico constituyen una fuente importante de N en muchos sistemas agrícolas.

### Mineralización de nitrógeno

El término mineralización se usa normalmente para describir la transformación de N orgánico en N inorgánico, ya sea este en forma de  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NO}_3^-$  (Black, Pilbeam et al., citados por Perdomo y Barbazán, 1999). El término amonificación se usa generalmente para describir específicamente el pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$  (Ladd y Jackson, citados por Perdomo y Barbazán, 1999). Otros autores, en cambio, emplean el término mineralización para referirse sólo al pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$ . Esto se debe en parte a que el  $\text{NH}_4^+$  es la forma de N inmovilizada preferentemente por los microorganismos, a la conexión íntima que existe entre los procesos de mineralización e inmovilización de N y a que el proceso de mineralización hasta  $\text{NH}_4^+$  es realizado por los microorganismos heterótrofos del suelo, los cuales utilizan sustancias orgánicas carbonadas como fuente de energía (Perdomo y Barbazán, 1999).

El pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$  involucra dos reacciones, aminización y amonificación, llevadas a cabo por una gran variedad de microorganismos no especializados, incluyendo bacterias aeróbicas y anaeróbicas, hongos y actinomicetes. Es, además un proceso lento, comparado con el resto de las transformaciones que sufre el N hasta llegar a  $\text{NO}_3^-$  (Perdomo y Barbazán, 1999).

El  $\text{NH}_4^+$  producido en la mineralización tiene varios caminos a seguir: a) puede ser utilizado por microorganismos heterotróficos para descomponer más residuos orgánicos carbonados –proceso denominado “inmovilización”; b) puede ser absorbido directamente por las plantas superiores; c) puede ser convertido a  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  por nitrificación; d) puede ser fijado por minerales arcillosos; e) puede ser liberado lentamente hacia la atmósfera como  $\text{N}_2$ .

Es de hacer notar que los procesos de mineralización e inmovilización actúan al mismo tiempo, determinando lo que se denomina ciclo de mineralización e inmovilización (CMI), o mineralization-immobilization turnover (MIT) en inglés (Jansson y Persson, citados por Perdomo y Barbazán, 1999).

Cada uno de estos procesos (mineralización e inmovilización) ocurre a una cierta tasa bruta, y la diferencia entre ellos resultará en un efecto neto. Cuando la cantidad de N mineral en el suelo aumenta, ocurre mineralización neta. En cambio, cuando se retira N mineral ya existente en el suelo, ocurre inmovilización neta. Este efecto neto es muy importante, pues determina la cantidad de N mineral disponible para las plantas no fijadoras de N en casos en que no se fertilice con este nutriente. Debido a que la actividad básica de los organismos heterótrofos es la disipación de energía, la mineralización neta es la reacción normal y dominante. Sin embargo, el efecto neto será siempre menor que la mineralización bruta (Jansson y Persson, citados por Perdomo y Barbazán, 1999).

Como ya se mencionó otro de los caminos que puede seguir el  $\text{NH}_4^+$  es la nitrificación, esta se define como el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ , el cual es realizado por un grupo reducido de microorganismos autótrofos especializados (principalmente Nitrobacterias), que obtienen su energía (E) de este proceso oxidativo. Dicho proceso ocurre en dos etapas: primero se produce el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ , en donde intervienen bacterias del género Nitrosomonas.



Luego este  $\text{NO}_2^-$  es convertido a  $\text{NO}_3^-$  por bacterias del género Nitrobacter.



La reacción II es más rápida que la reacción I, y ambas reacciones son mucho más rápidas que la reacción de pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$ , por lo que el  $\text{NO}_3^-$  es la forma de N mineral que normalmente se acumula en los suelos.

Como se observa en la reacción, en el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  (ecuación I y II) se libera  $\text{H}^+$ , por lo que en determinadas condiciones la nitrificación puede acidificar los suelos (Perdomo y Barbazán, 1999)

#### 2.2.2.2. Mecanismos de pérdidas de nitrógeno

Desde el punto de vista agrícola y del medio ambiente, lo deseable sería que el  $\text{NO}_3^-$  de cualquier origen (suelo, material orgánico agregado o fertilizante), fuera finalmente absorbido por las plantas. Sin embargo, esta forma de N mineral puede también perderse del sistema suelo-planta. Los dos procesos de pérdida más importantes, el lavado y la desnitrificación, ocurren en condiciones de exceso de agua en los suelos. En nuestro país estas condiciones son más probables en el período otoño-invierno, especialmente cuando el suelo está en barbecho, ya que no existe un cultivo que pueda remover el  $\text{NO}_3^-$  del suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Debido a su carga negativa, el  $\text{NO}_3^-$  no es retenido por la fracción coloidal del suelo. Por lo tanto, el agua que se mueve a través del mismo puede llevar consigo el  $\text{NO}_3^-$  hacia los horizontes inferiores, proceso que se conoce como lixiviación o lavado.

A igualdad de otras condiciones, el tipo de suelo afecta la magnitud de las pérdidas por lixiviación, siendo ésta mayor en suelos livianos. También es importante el grado de diferenciación textural de los suelos. La presencia de un horizonte Bt saturado reduce la velocidad de pasaje de agua a través del perfil a casi cero, lo que obviamente reduce la posibilidad de lavado de  $\text{NO}_3^-$ . Los factores que afectan la lixiviación son: humedad del suelo, presencia de rastrojo en superficie, cultivo en crecimiento activo y tipo de laboreo (Perdomo y Barbazán, 1999).

La desnitrificación es un proceso de reducción biológica realizado en el suelo por un gran número de microorganismos anaerobios facultativos. En condiciones de anaerobiosis estos microorganismos utilizan el  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{NO}_2^-$  en lugar de  $\text{O}_2$  como aceptores de electrones ( $e^-$ ), produciendo dos formas gaseosas de N,  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso) y  $\text{N}_2$  (N molecular) (Perdomo y Barbazán, 1999).

Este proceso requiere un aporte de energía externa, expresada en la ecuación por el suministro de electrones (e<sup>-</sup>). Esto significa que para que este proceso ocurra debe existir en el suelo materia orgánica de fácil descomposición. Por esto, la tasa de desnitrificación tiende a ser máxima en los horizontes superiores, donde se concentra la mayor parte de la MOS (Perdomo y Barbazán, 1999).

Al igual que ocurre con otros procesos biológicos, la tasa a la cual se produce este proceso aumenta con la temperatura. Las temperaturas mínimas citadas oscilan entre 2.7 y 10 °C, la máxima sería de alrededor de 75 °C y la óptima cercana a los 65 °C (Firestone, 1982).

En los distintos climas, sin embargo, estos microorganismos tienen distintos óptimos, lo que demuestra que estos microorganismos son capaces de adaptarse y crecer en un amplio rango de temperaturas de suelo. Al respecto, se ha observado que en regiones templadas los microorganismos desnitrificadores pueden crecer a temperaturas menores que los de regiones cálidas (Firestone, 1982)

En nuestro país algunos estudios preliminares sugieren que las temperaturas de invierno no limitarían totalmente la desnitrificación. En ensayos de laboratorio, Perdomo y Dodera, citados por Perdomo y Barbazán (1999), midieron la tasa de desaparición de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en muestras incubadas a distintas temperaturas. Para las muestras incubadas in situ en el suelo por dos días (temperaturas de suelo promedio de 11.5 ° C), la tasa de desaparición de nitrato fue el 70% de la tasa máxima (28 ° C). Luego de dos días de incubación a 11.5 ° C había desaparecido un 36% del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> agregado, mientras que a los 7 días las pérdidas fueron totales (Perdomo y Barbazán, 1999).

La anaerobiosis que produce la desnitrificación se produce normalmente como consecuencia de anegamiento de los suelos. Esto es más frecuente en suelos poco permeables con horizontes Bt muy pesados. Si bien el lavado y la desnitrificación pueden ocurrir simultáneamente, la desnitrificación sería más importante en condiciones de agua estancada, cuando no existiría movimiento rápido hacia horizontes inferiores (Perdomo y Barbazán, 1999).

En nuestro país todavía no se tiene información suficiente acerca de la importancia relativa del lavado o la desnitrificación como mecanismos de pérdida. Hasta que esto suceda, parece razonable asumir que ambos procesos son parcialmente responsables por las pérdidas de N que ocurren en condiciones de exceso hídrico. Esta falta de información se debe en parte a que la metodología para medir el proceso de

desnitrificación en el campo es muy complicada, por lo cual las pérdidas de N por este mecanismo generalmente se estiman por diferencia (Perdomo y Barbazán, 1999).

La volatilización, es otro proceso de pérdida de nitrógeno en la atmósfera. Estas pérdidas pueden ocurrir siempre que existan grandes concentraciones de  $\text{NH}_3$  cerca de la superficie del suelo. Esto generalmente ocurre luego de una aplicación de fertilizantes amoniacales o materia orgánica fácilmente descomponible, en la superficie de suelos neutros o alcalinos; también, cuando se concentra un fertilizante alcalino amoniacal en un volumen limitado de suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Hauck, citado por Perdomo y Barbazán (1999) concluyó que las pérdidas como  $\text{NH}_3$  son significantes en suelos con pH menor a 7.0. Hauck, citado por Perdomo y Barbazán (1999) confirma lo anunciado por Gardner y afirma que las pérdidas de nitrógeno aplicado en suelos de pH 8 pueden llegar a ser mayores al 50 % de lo aplicado. La urea aplicada en superficie es particularmente objeto de grandes pérdidas por volatilización; esto se debe al efecto que causa la urea hidrolizada en el suelo, en el pH local, próximo a las partículas de fertilizante.

Dicha volatilización se ve aumentada por un aumento del pH del suelo. Sin embargo, en algunas condiciones la magnitud de las pérdidas puede hacerse independiente del pH del suelo. En el caso de la urea, por ejemplo, el pH alcalino que se crea alrededor de las partículas que se están disolviendo es más importante que el pH de suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Un aumento de la temperatura también tiende a incrementar las pérdidas hasta aproximadamente  $45^\circ\text{C}$ , debido a que aumenta la constante de equilibrio de la ecuación II y la velocidad de difusión de  $\text{NH}_3$  (sol) hacia  $\text{NH}_3$  (gas) (Perdomo y Barbazán, 1999).

Además se ha observado que las pérdidas de urea son mayores en suelos arenosos que en suelos arcillosos; esta diferencia se explica por la diferencia de CIC entre ambos tipos de suelo. A mayor CIC mayor va a ser la proporción del  $\text{NH}_4^+$  del suelo que va a estar en forma intercambiable, es decir retenido por la fase sólida del suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Relacionado con el ítem anterior, el modo de aplicación del fertilizante afecta las pérdidas en forma muy importante. Cuando el fertilizante se aplica a la siembra normalmente queda cubierto por el suelo y no hay pérdidas por volatilización de  $\text{NH}_3$ . En cambio, la aplicación de fertilizantes amoniacales directamente sobre el cultivo sin cobertura de suelo disminuye la probabilidad de que el  $\text{NH}_4^+$  sea retenido por la fase

sólida del suelo y aumenta la probabilidad de pérdidas. Las aplicaciones de fertilizante nitrogenado en cobertura son comunes en la refertilización de cultivos como trigo o cebada (al macollaje), o maíz (al estado de 6 hojas). La aplicación de N en cobertura a cultivos en siembra directa incrementa aún más la probabilidad de pérdidas, porque el rastrojo presente sobre la superficie disminuye todavía más la fracción del fertilizante nitrogenado que entra en contacto con el suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Los estudios realizados sobre el efecto de la humedad en las pérdidas por volatilización muchas veces han producido resultados contradictorios, quizás debido a que los demás factores en estudio no estaban a niveles constantes. Nelson (1982), luego de revisar muchos trabajos en el tema concluye que:

- Esencialmente no existen pérdidas de  $\text{NH}_3$  cuando se aplican fertilizantes sólidos a suelos con baja humedad. Esto se debe a que los fertilizantes requieren cierta humedad para disolverse.
- Las mayores cantidades de pérdida de  $\text{NH}_3$  por volatilización se obtienen normalmente en suelos con contenidos altos de humedad que se están secando.
- Contenidos iniciales altos de humedad en el suelo tienden a reducir las pérdidas de  $\text{NH}_3$  cuando los suelos no se están secando.

### 2.2.3. Absorción y asimilación dentro de la planta

La planta puede absorber el nitrógeno como  $\text{NO}_3^-$  y como  $\text{NH}_4^+$ , normalmente la mayoría de los cultivos absorben la mayor parte como  $\text{NO}_3^-$ , aunque depende en gran medida de la especie. En algunos casos las plantas absorben este elemento bajo la forma de urea (Perdomo y Barbazán, 1999).

La absorción como  $\text{NO}_3^-$  es un proceso activo, con gasto de energía, requiriendo la presencia de enzimas especiales.

Una vez que el  $\text{NO}_3^-$  ha sido absorbido por la planta, puede ser almacenado como tal por los tejidos radicales, o reducido y sintetizado en aminoácidos, o depositado en el xilema para ser transportado por los tallos. En los tallos y pecíolos puede existir tanto aminoácidos como  $\text{NO}_3^-$ ; éste puede ser almacenado temporariamente

o moverse hacia las hojas para ser almacenado allí o reducirse. La asimilación de este  $\text{NO}_3^-$ , se realiza a través de una serie de etapas, obteniéndose  $\text{NH}_3$ .

La absorción de  $\text{NH}_4^+$ , se cumple a través de un proceso activo y otro pasivo. Este no debe ser reducido, lo que se traduce como un ahorro energético. Esta forma del nitrógeno debe ser incorporado inmediatamente a los esqueletos carbonados. Si no existen carbohidratos disponibles para este proceso, el  $\text{NH}_4^+$  puede acumularse a niveles tóxicos dentro de la raíz. Este no se transporta por el xilema por lo que es transformado o asimilado en las raíces. A diferencia de éste, el  $\text{NO}_3^-$  es acumulado en grandes cantidades sin generar toxicidad (Perdomo y Barbazán, 1999).

### 2.3. RESPUESTA DE LAS PLANTAS AL AGREGADO DE NUTRIENTES

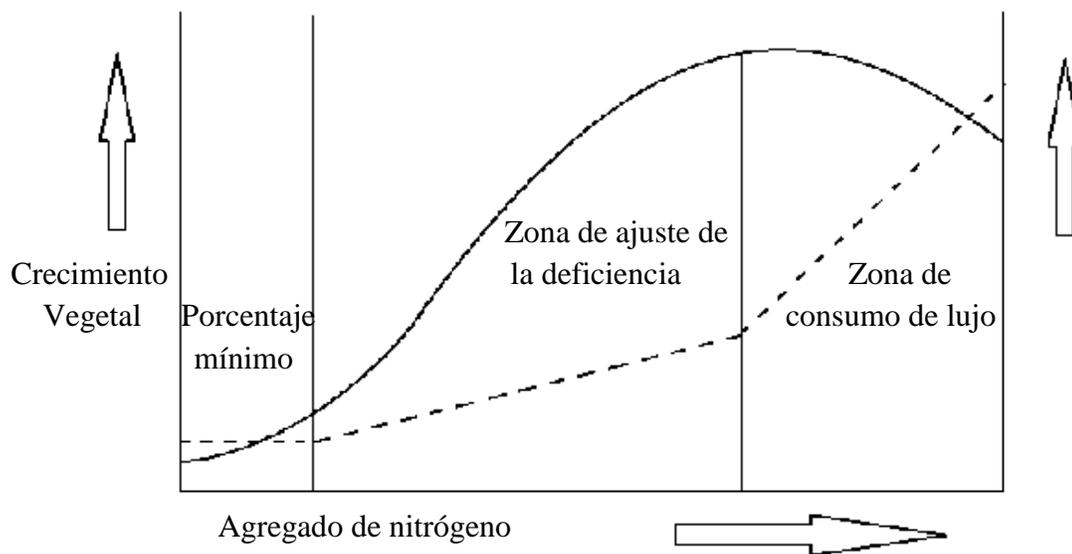
Muchos autores describen la respuesta del crecimiento vegetal al agregado de un nutriente en 3 etapas, la primera que se refiere a la fase de porcentaje mínimo, la segunda a la de ajuste de la deficiencia y una tercera de consumo de lujo, también sucede esto para el caso del nitrógeno (figura 1)

El límite entre la etapa de ajuste de la deficiencia y la fase de consumo de lujo es el porcentaje crítico, este se define a una escala de concentración de nutrientes en la planta, por encima de la cual no habría respuesta significativa a las aplicaciones del elemento. En cambio, cabría esperar que los árboles que en sus tejidos tengan un contenido de nutriente menor al de la concentración crítica, respondieran a la aplicación del elemento (Pritchett, 1991).

También se definió la concentración crítica como la concentración de un nutriente en el punto que se separa la zona de deficiencia de la zona de concentración adecuada, (Macy, citado por Hauck, 1984, figura 1).

Por último existe un efecto tóxico de nutrientes, punto en el cual el crecimiento empieza a disminuir, algunos autores citan que concentraciones altas producen excesos de salinidad y afectan el crecimiento y calidad de las plantas, esto sucede en la línea de porcentaje crítico que aparece en la figura 1.

Figura 1. Respuesta en crecimiento vegetal al agregado creciente de nitrógeno.



Fuente: Hauck (1984).

#### 2.4. DINÁMICA DE NUTRIENTES EN ECOSISTEMAS FORESTALES

En los ecosistemas forestales el ciclo de los nutrientes se puede caracterizar en tres tipos: ciclo geoquímico que hace referencia a la entrada y salida de los elementos minerales en los ecosistemas; ciclo biogeoquímico que establece las relaciones entre suelo, planta y atmósfera y el ciclo bioquímico que involucra la transferencia interna de los elementos dentro de los procesos vegetales (Switzer y Nelson, 1972).

Otros autores señalan que en un suelo forestal existen tres estados nutricionales (Miller, 1981)

- I. Previo al cierre del follaje.
- II. posterior al cierre del follaje.
- III. mantenimiento de la plantación.

El primer estado, estado de interés para el experimento, se refiere a los años previos al cierre del follaje. En esta etapa el crecimiento de los árboles es muy dependiente de los nutrientes del suelo y es cuando pueden esperarse respuestas en crecimiento al agregado de nutrientes. La mayoría de la productividad primaria neta corresponde al crecimiento del follaje, con relativamente altas concentraciones de nutrientes (Cromer et al., Attiwill et al., Grove y Malajczuk, citados por Garategui, 2002). Existe muy poca redistribución de nutrientes y está asociada a la senescencia foliar. La mayor proporción de los nutrientes absorbidos es retenida en el árbol (Attiwill et al., citados por Garategui, 2002). En este estado ocurre cierta translocación de nutrientes desde el follaje viejo al joven, (Leuning et al., citados por Cromer et al., 1993) pero el crecimiento de los árboles seguramente este limitado por el aporte de nutrientes del suelo, debido a que existe una gran demanda y a la escasa exploración del suelo por las raíces.

Cromer et al. (1993) evaluaron el efecto de la fertilización en la acumulación de biomasa de *E. grandis*, durante los tres primeros años de edad. En sus estudios encontraron que la tasa de crecimiento de los árboles en parcelas sin fertilizar, fue inhibida por el bajo aporte de nutrientes del suelo, particularmente durante el período previo al cierre de copa.

## 2.5. FERTILIZACIÓN

Basurco et al. (2000), aseguran que dentro de los tratamientos silvícolas de una plantación es necesario tener en cuenta las características del lugar y los requerimientos de la especie. Una de las prácticas silvícolas que se debe atender en primer lugar es la fertilización, dado que la pretensión sería asegurar las exigencias nutricionales de los árboles y mantener los niveles de fertilidad del suelo. También afirma que muchos autores recomiendan la fertilización localizada en el momento de la plantación en masas de eucaliptos. Sin embargo, las dosis recomendadas suelen ser algo diferentes dependiendo de la zona donde se encuentra localizada la plantación.

La aplicación de fertilizantes al momento de la plantación en *Eucalyptus sp.*, es una práctica habitual en muchos países mediante la cual puede incrementarse significativamente el crecimiento inicial (Gaitán et al., 2004).

La fertilización tiene como objetivos: lograr mayor desarrollo y homogeneidad inicial de las plantas para que estas cubran más rápidamente el suelo y mejorar la capacidad del sitio, lo que se traduce en un aumento de la producción de madera al final de la rotación y/o en un acortamiento del ciclo (Gaitán et al., 2004).

Binkley, citado por Pozo (2005), en estudios realizados en México encontró que la fertilización en muchos casos ha permitido acelerar el crecimiento del rodal, disminuyendo el tiempo que tarda en alcanzar el límite de máximo tamaño, produciéndose además una reducción de las limitaciones del sitio

Si bien en el Uruguay se ha constatado una alta probabilidad de obtener respuestas positivas al agregado de fósforo en la instalación de plantaciones de *Eucalyptus sp.* (Zamalvide y Ferrando, 2010), los resultados no desprenden grandes variaciones en rendimiento para el agregado de potasio (Zamalvide y Ferrando, 2010) o bien para la adición de nitrógeno, a pesar de haberse realizado correcciones exitosas en situaciones de deficiencia para este último caso (Perdomo y Crucci, 2010).

Según Pritchett (1991), el resultado más notable de las adiciones de fertilizante es un aumento en la tasa de crecimiento del árbol, esta mayor producción de madera, implica un aumento en la eficiencia de la fotosíntesis o en el tamaño del aparato fotosintético, o de ambas a la vez.

Según Methol, citado por Gaitán et al. (2004), algunos autores cuestionan las ventajas iniciales obtenidas a través de la aplicación de fertilizantes durante la etapa de implantación, sugiriendo que al momento de la tala se obtendría un volumen de madera similar. Algunos investigadores sugieren que las limitaciones de nutrientes declinan después que el rodal completa el área foliar, debido a que la demanda de nutrientes sería menor, no obstante las evidencias empíricas muestra que sitios con limitaciones en nutrientes en edades tempranas, siguen teniéndolas a edades avanzadas (Fisher y Binkley, citados por Gaitán et al., 2004).

Actualmente, la mayoría de las plantaciones comerciales a nivel mundial son fertilizadas con utilización de prácticamente la misma formulación, N-P-K, independiente de la especie, tipo de suelo y época de plantación. Las fuentes más comunes para el agregado de estos nutrientes han sido normalmente: sulfato de amonio (21%N), superfosfato simple (21% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), superfosfato triple (45% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y cloruro de potasio (60% K<sub>2</sub>O) (Bellote y Ferreira, citados por Cantera e Ilhenfeld, 2014).

Según Liebig (1855), si un nutriente se encuentra ausente o deficiente, estando todos los demás presentes, el suelo será deficiente para todos aquellos cultivos que requieren ese nutriente (no hay sustitución). Esta última se denomina ley del mínimo. Este modelo usado para describir la respuesta vegetal afirma que en un suelo rico en nutrientes minerales el rendimiento no aumenta por agregados de la misma sustancia. (plateau). Blackman (1905), generalizó dicho modelo para otros factores resultando en la siguiente afirmación: cuando un proceso está determinado por un cierto número de factores, la velocidad del mismo va a estar limitada por el proceso más lento (no hay interacción)<sup>1</sup>.

### 2.5.1. Fertilización nitrogenada en *Eucalyptus*

Algunos autores mencionan que la fertilización ha sido realizada por beneficios como son acortamiento de la rotación, aumento de la producción por hectárea, cierre más temprano del follaje, entre otras (Schutz, citado por Hebert et al., 1989).

#### 2.5.1.1. Eficiencia de la fertilización nitrogenada según tipo de suelo

La productividad de las plantaciones de eucaliptos (*Eucalyptus sp.*) depende en buena medida del aporte de nitrógeno (N), sobre todo cuando estas son instaladas sobre sitios pobres y degradado. En estas situaciones, el N frecuentemente limita el crecimiento temprano y la sobrevivencia; siendo necesaria la aplicación de N externo al sistema, especialmente durante el establecimiento de la plantación (Ringrose y Neilsen, citados por Crucci, 2007).

Afirmando la existencia de una relación de la respuesta con el tipo de suelo, Cromer et al. (1993), encontraron que la respuesta al agregado de nitrógeno presenta una respuesta diferencial en diferentes tipos de suelos, observándose una respuesta en suelos relativamente recientes y con bajos contenidos de materia orgánica. Apoyando está

---

<sup>1</sup> Bordoli, J. M. 2010. Respuesta vegetal al suministro de nutrientes. In: Curso de Fertilidad de Suelos (2010, Montevideo). Presentación. Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. (sin publicar).

apreciación Noble et al. (1990) encontraron que la respuesta relativa aumenta en sitios marginales con respecto a otros sitios.

Según Cromer et al. (1993) el nitrógeno es inherentemente deficiente en suelos arenosos y en tierras agrícolas abandonadas, con bajo contenido de materia orgánica, menciona además que en este tipo de suelos es necesario aplicar nitrógeno a las plantas a fin de asegurar su rápido establecimiento y crecimiento. En estudios realizados en Brasil por Bonin et al. (2010) se obtuvieron resultados que acompañan esta afirmación.

#### 2.5.1.2. Fertilización nitrogenada al momento de la plantación

Es característico de este elemento que sus concentraciones en el follaje de árboles y en los componentes vivos de ramas se incrementan rápidamente durante el primer año de crecimiento, a medida que las copas de los árboles se desarrollan en crecimiento relativo. Sin embargo cuando las copas de los árboles comienzan a competir por luz, el crecimiento en altura continua pero el follaje y las ramas de la parte baja de la copa mueren progresivamente, por lo tanto la cantidad total de nitrógeno en el follaje y ramas permanece relativamente estable (Cromer et al., 1993). Esto se puede traducir como una necesidad relativamente alta en los primeros años de la plantación para este nutriente.

Cromer et al., citados por Garategui (2002), en sus estudios sobre el efecto de la fertilización en la acumulación de biomasa de *Eucalyptus globulus* en Australia, aplicaron N y P en tres momentos (en plantación, a los 8 y a los 15 meses de edad). Evaluaron una secuencia de edad de las plantas y encontraron que en esta especie, en las condiciones del ensayo, alcanza los máximos valores de crecimiento con el agregado de 200 Kg de nitrógeno por hectárea agregado en la plantación. Con esa dosis, el crecimiento fue 2.36 veces mayor que el del testigo.

Según Jordán et al. (2009) se aprecia un aumento significativo del área foliar a medida que aumenta la concentración de nitrógeno en el medio de crecimiento, en plantines de *E. globulus*, esto puede deberse a un aumento en la eficiencia de las raíces, lo que hace que el crecimiento en esta parte de árbol no sea tan significativo en contraposición a la parte aérea que sigue creciendo de la misma forma.

Cromer et al. (1993), encontraron que con un poco más de medio año de edad, el índice de área foliar de los árboles fertilizados llegó a ser 20 veces mayor que el de los tratamientos control. Estos tratamientos de fertilización en plantación, indican que la nutrición tiene su máximo impacto en el área foliar de los árboles jóvenes. La aplicación de fertilizante incrementó sustancialmente la tasa de crecimiento de la masa foliar capaz de interceptar la radiación solar.

Estimaciones detalladas del crecimiento de *E. grandis*, mostraron que los tratamientos de fertilización en el momento de plantación, resultaron en un sustancial incremento del área foliar y de todos los componentes de la biomasa aérea, evaluado al tercer año. La masa foliar en los tratamientos fertilizados se desarrolló rápidamente antes del primer año y alcanzó un “plateau” que se mantuvo hasta la edad de 2.4 años (Cromer et al., 1993).

Smerthurst et al., citados por de Jesus (2008), encontraron que las altas dosis de N (500 kg ha<sup>-1</sup> de N en total) eran necesarias para maximizar el crecimiento en muchos lugares, pero no había evidencia para sugerir la aplicación de N por encima de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N en una sola aplicación. Por lo tanto, se requieren varias aplicaciones para maximizar el crecimiento. Otro hecho importante informado por Smerthurst et al. (2004) es que la disponibilidad de N en el suelo aumentó durante un período de uno a dos años después de que se han aplicado dosis totales. La tasa de crecimiento de los árboles aumentó en el mismo período, seguido por la respuesta menos pronunciada por otros años, durante el cual una nueva aplicación de N apoyó la tasa de crecimiento.

Lamb, Bell y Ward, Yost et al., Judd et al., Shedley et al., Grove et al., Bennett et al., citados por Crucci (2007), afirman que las concentraciones de nitrógeno en hoja, en *Eucalyptus* jóvenes, son sensibles a los cambios en la fertilidad del suelo y aumentan con el incremento de los valores de aplicación de nitrógeno. Es por esto que Leuning et al., citados por Crucci (2007), trabajando con *E. grandis* (fertilizados y no fertilizados), encontraron que el nitrógeno total reunido en copas de árboles fertilizados excedió al de los árboles no fertilizados en todos los casos probados, ya que el promedio de las concentraciones de nutrientes y la masa foliar fueron mayores en los árboles fertilizados.

La mayor productividad es claramente dependiente del mantenimiento de un alto índice de área foliar (IAF), para interceptar una alta proporción de radiación solar disponible. Una relación directa entre producción de biomasa y radiación interceptada fue demostrada para varias especies de *Eucalyptus* (Linder, Turnbull et al., citados por Cromer et al., 1993).

### 2.5.1.3. Refertilización con nitrógeno

Las especies de *Eucalyptus* presentan una mayor respuesta al nitrógeno en los dos primeros años después de la plantación según Barros et al. (1990), en cambio Godinho et al. (1996) indican que en la población más vieja (37 meses), presenta una mayor respuesta que en poblaciones más jóvenes.

Ensayos de fertilización con 1400 kg/ha de N y 500 kg/ha de P en *E. grandis* establecidos en el sudeste de Queensland (Australia), de 3 años de edad indicaron un aumento en el crecimiento volumétrico, además de un fuerte cierre de copas. Otra característica a señalar es el aumento del índice de área foliar, comparada con las parcelas sin aplicación (Cromer y Kriedemann, citados por Pozo, 2005).

Gaitán et al. (2004) encontraron que a los 7 meses de edad los árboles presentaron una respuesta significativa a la fertilización que se manifestó a través de una mayor altura total y cobertura de la copa, indicadores del volumen de copa y por lo tanto de la capacidad de foto sintetizar, además determina la cobertura del suelo y la habilidad de las plantas para competir frente a las malezas. La mayor respuesta es en el tratamiento con dosis dividida en el que se obtuvo un 31% de ganancia en la altura y 45% en cobertura, dicha fertilización dividida se trata de una aplicación en plantación y una hecha posteriormente, a los 2.5 meses de dicha plantación.

Bonin et al. (2010), en sus estudios de la respuesta de *Eucalyptus* a la fertilización con nitrógeno en diferentes ensayos situados en varios estados de Brasil encontraron que se produjo una respuesta significativa en los primeros años de crecimiento.

Acompañando esto, Cromer et al. (1993), encontraron que la aplicación de fertilizante resultó en una rápida expansión del área foliar durante los primeros 12 meses de edad y en el mantenimiento de esta ventaja. Como consecuencia, se lograron mayores niveles de producción.

En estudios realizados en nuestro país, la aplicación de N en seis meses después de la plantación de *Eucalyptus* resultó en aumentos en la producción de volumen evaluados a los dos años de edad. Sin embargo, en parcelas que recibieron fertilización 12 meses después de la siembra, los contrastes ortogonales establecidos entre grupos que recibieron N y que no fueron fertilizados no fueron significativas (Perdomo et al., 2007).

Perdomo y Crucci (2010), realizaron un ensayo de fertilización nitrogenada en plantaciones de 2 años de edad de *E. grandis*, midiendo a los 6 meses el volumen de los árboles de cada tratamiento, no encontrando diferencias significativas entre cada una de las dosis aplicadas, así como tampoco entre los promedios de los tratamientos fertilizados y los no fertilizados. A pesar de no ser significativas las respuestas encontradas por estos autores, constataron un aumento de rendimiento como volumen de madera en ensayos realizados en nuestro país.

Según Gama, citado por Pulito (2009), la ausencia de respuesta o la mala respuesta al agregado de nutrientes se puede atribuir a una mayor cantidad de N mineralizado de materia orgánica del suelo.

Estudios realizados por Araújo et al. (2003), en Brasil al sur de Bahía encontraron una respuesta positiva al agregado de nitrógeno que aumento cuando esta fue acompañada por correcciones de los niveles de fósforo y micronutrientes, especialmente Zinc. Esta afirmación coincide con lo expuesto anteriormente como ley del mínimo.

#### 2.5.1.4. Efectos de la fertilización nitrogenada

Como ya se mencionó algunos autores no encontraron ventajas significativas en la aplicación de fertilizantes nitrogenados, en cambio otros encontraron diferencias marcadas en cuanto al crecimiento posterior a la plantación, como área foliar o como volumen de madera, ya sea que se mantengan o no al final de la rotación.

Gaitán et al. (2004) dicen que dicho efecto positivo también contribuye a asegurar el establecimiento de la plantación al acelerar el desarrollo inicial de las plantas y acortar el período de mayor riesgo que es la implantación (período que abarca desde la plantación hasta que las copas de los árboles cubren totalmente el suelo), durante esta fase las plantas de *Eucalyptus grandis* son muy sensibles a la competencia de otras plantas, al daño de plagas, principalmente hormigas y roedores, a la falta de agua en el horizonte superficial del suelo y a las heladas.

#### 2.5.1.5. Mantenimiento en el tiempo de los efectos logrados por la fertilización

Snowdon y Khana, citados por Gaitán et al. (2004) clasificaron las respuestas en crecimiento en dos tipos: Tipo I si sólo se mantienen hasta determinada etapa o permiten llegar más rápidamente a una determinada etapa, pero al final del ciclo forestal dejan de ser significativas o Tipo II cuando el cambio en la productividad del sitio se mantiene hasta el final.

Según Cromer et al. (1993) la aplicación de fertilizante resultó en una rápida expansión del área foliar durante los primeros doce meses de edad y en el mantenimiento de esta ventaja. Como consecuencia, se lograron mayores niveles de producción.

Herbert et al. (1989), observaron un rápido incremento absoluto del DAP a partir del momento de la fertilización y que este efecto culminaba entre seis y ocho años de edad. Cromer et al. (1982) encontraron una tendencia similar que para el crecimiento en diámetro pero en la altura del árbol.

Gaitán et al. (2004) observaron que las mayores tasas de crecimiento se mantienen hasta el quinto año, lo que sugiere que a través de otros mecanismos (retraslocación, aumento del índice del área foliar, y/o en la eficiencia fotosintética), las plantas siguen teniendo ventajas aun cuando estas ya no se detectan en el suelo.

Schönau, Herbert, Schönau y Pennefather, citados por Gaitán et al. (2004) concluyeron que en cuanto a dicha permanencia en el tiempo de las diferencias encontradas a edades tempranas se mantiene la respuesta a la fertilización inicial, determinando una mayor producción al momento de la cosecha.

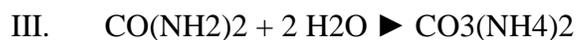
## 2.5.2. Fertilizantes aplicados

### 2.5.2.1 Urea

Figura 2. Foto de urea en su forma comercial.



Según Perdomo y Barbazán (1999) la urea es un fertilizante de origen sintético. Su fórmula es  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  y contiene 46% de N. Al ser incorporada al suelo sufre un proceso de hidrólisis, formando carbonato de amonio ( $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$ ).



Esta reacción es catalizada por la enzima ureasa, una enzima que abunda en el suelo. Esto se debe a que la urea es una molécula orgánica relativamente abundante, constituyendo la forma principal de excreción de N en la orina de los mamíferos. Al igual que lo que ocurre para otras enzimas del suelo, una parte de la actividad de la ureasa se localiza dentro de las fracciones humificadas de la MOS, y se considera que los mismos mecanismos que explican la estabilidad del humus explicarían la estabilidad de la ureasa en el suelo. Parte de la ureasa del suelo proviene de los microorganismos; muchos de ellos poseen esta enzima y son capaces de llevar a cabo esta hidrólisis. Los restos frescos en descomposición también aportan ureasa al suelo, aunque la enzima

proveniente de estas fuentes se degrada rápidamente por la acción microbiana (Perdomo y Barbazán, 1999).

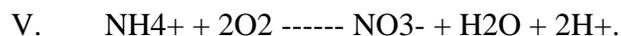
La molécula de  $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$  producida en la ecuación antes presentada es inestable, y se descompone rápidamente en el suelo de acuerdo a la siguiente reacción:



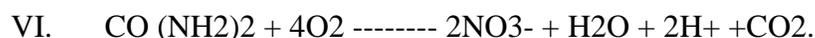
Si existe suficiente humedad en el suelo estas dos reacciones ocurren rápidamente, por lo que generalmente se considera a la urea como un fertilizante amoniacal. Sin embargo, a diferencia de otros fertilizantes nitrogenados, el N de la urea tiene más probabilidades de perderse por volatilización. De acuerdo con la reacción, cualquiera sea el pH del suelo, en la zona de disolución de la urea el pH es siempre alcalino (Perdomo y Barbazán, 1999).

Estas pérdidas pueden existir solamente cuando la urea se aplica en superficie, ya que unos pocos centímetros de suelo sobre el fertilizante son suficientes para retener el  $\text{NH}_3$ . Por lo tanto, la mejor estrategia para reducir las pérdidas de urea es incorporarla al suelo, como se hace normalmente cuando se la aplica en la plantación. En caso de tener que aplicar este fertilizante en la superficie, lo que es común cuando se fertilizan cultivos o pasturas en crecimiento, es conveniente hacerlo en suelos secos. Si el suelo está húmedo, sería preferible aplicarlos en condiciones de baja evapotranspiración, como por ejemplo en días nublados. El mejor momento de aplicar urea en superficie sería antes de una lluvia. En estas condiciones atmosféricas, no sólo la evapotranspiración es baja, sino que además, la lluvia va a incorporar a la urea dentro de los primeros centímetros del suelo. En caso de contar con equipos de riego sería recomendable la aplicación de cierta cantidad de agua para lograr dicho objetivo. Por lo tanto, cuando la urea se aplica en superficie existe la potencialidad de que parte del N se pierda por volatilización. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones estas pérdidas no son muy importantes, y si se siguen ciertas normas básicas de manejo, normalmente la mayoría del N de la urea se transforma rápidamente en  $\text{NH}_4^+$ , el cual es retenido por los coloides del suelo (Perdomo y Barbazán, 1999).

Cabe destacar que los fertilizantes amoniacales generan acidez en el suelo ya que al nitrificarse se libera H<sup>+</sup>. De acuerdo con la reacción:



Por cada molécula de NH<sub>4</sub> que se transforma en NO<sub>3</sub> se producen 2 H<sup>+</sup>. Cuando se agregan al suelo fertilizantes como la urea se genera un residuo ácido, para el cual se distingue, un valor máximo, un valor mínimo y un valor oficial. El valor máximo supone que toda la urea se nitrifica en el suelo. De acuerdo con la reacción:



Por cada mol de urea se producen dos moles de NO<sub>3</sub> y dos moles de H<sup>+</sup> (Bouman et al., Little, citados por Perdomo y Barbazán, 1999). La magnitud del efecto acidificante de los fertilizantes nitrogenados depende de varios factores, entre ellos se encuentra el tipo de suelo. Los suelos de textura más arenosa tienden a acidificarse más rápido que los suelos arcillosos, debido fundamentalmente a que los primeros tienen menor poder buffer (Perdomo y Barbazán, 1999).

### 2.5.2.2. Sulfammo

Figura 3. Foto del Sulfammo en su forma comercial.



El fertilizante aplicado en la refertilización es el Sulfammo 11: (18-0/0-18 + 3%Ca + 1%Mg + 6%S + 0,21%B). Está compuesto por una mezcla física entre K-(50%) y Sulfammo Meta 29 (50%).

Según grupo Roullier, fabricante del fertilizante, representados en Uruguay por Timac Agro, el sulfammo es una gama de Fertilizantes sólidos granulados complejos. Combina una relación de fuentes nitrogenadas adecuada con la especificidad del calcáreo marino generando un microambiente más favorable para la asimilación de nutrientes por los vegetales y una mayor vida microbiana en el suelo. Esto se debe en gran parte a la presencia de una doble membrana compuesta por dos capas: Una exterior que es mineral y está compuesta por una sal de calcio y una capa interior de carácter orgánico que tiene la capacidad de complejarse a través de sus grupos funcionales con los nutrientes de la fracción mineral.

Además dicha fuente señala que existe una liberación lenta de nitrógeno por la adecuada combinación de nitrógeno amoniacal y ureico, lo que evita altas tasas de volatilización, desnitrificación y lixiviación.

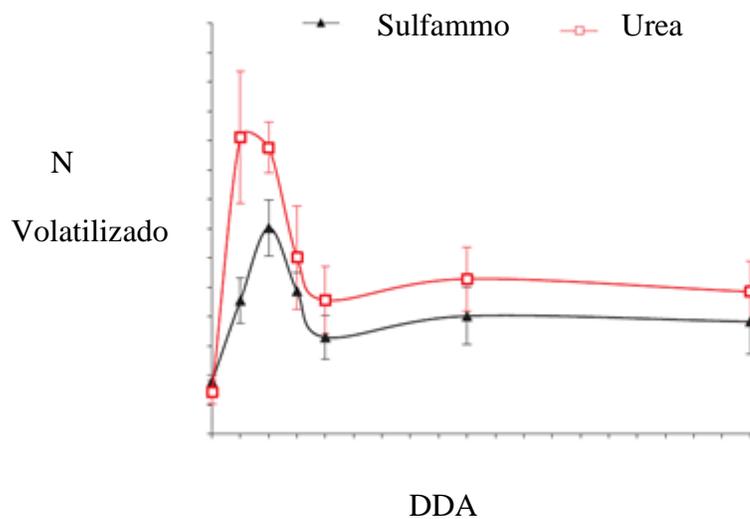
De esta manera logra una forma de entrega progresiva y de mayor aprovechamiento del nitrógeno por la planta, de manera más natural y al reducir las pérdidas de N es más amigable incluso para el medioambiente.

En resumen entre las ventajas citadas se encuentran

- Liberación gradual de nitrógeno.
- Aplicación superficial de N sin pérdidas por volatilización.
- Menores pérdidas de N por lixiviación por lluvias.
- Colabora con la mineralización de la materia orgánica.
- Equilibrio N:S (formación de proteínas) y N-Mg dada su formulación balanceada.
- Posibilidad logística de disminuir el número de refertilizaciones debido a las menores pérdidas.
- No acidifica el suelo.

Existen varios estudios que comparan este fertilizante con la urea como fuente de nitrógeno y las pérdidas que se pueden ocasionar por volatilización. Un caso es el estudio realizado por González (2012) en plantaciones de café en Colombia, el mismo obtuvo como resultado una menor pérdida por volatilización a partir del fertilizante sulfammo tal como se muestra en la figura 4.

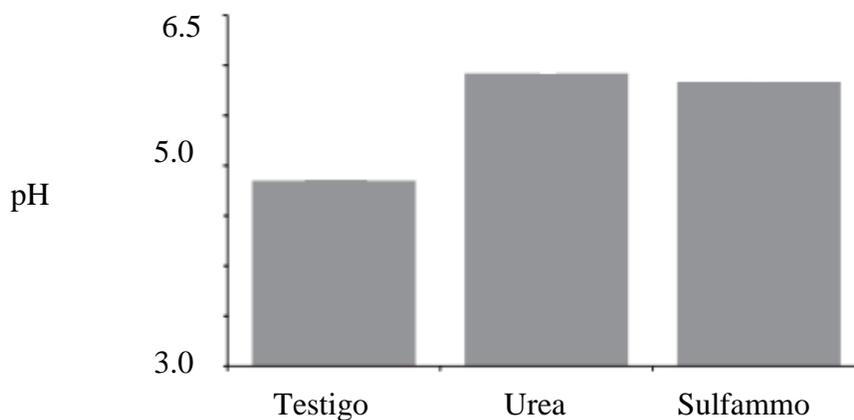
Figura 4. Gráfica de pérdidas por volatilización en los 20 primeros días después de la aplicación, a partir de Urea y Sulfammo.



Fuente: González (2012)

El mismo autor también encontró que dicho fertilizante produjo una menor acidificación del suelo cuando se lo compara con urea como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Variación en el pH con la aplicación de urea y sulfammo fertilizante.



Fuente: González (2012).

## 2.6. ESPECIE

En los últimos años el cultivo de *Eucalyptus* en América Latina ha presentado un incremento considerable debido a las numerosas posibilidades que ofrece este complejo grupo de plantas capaces de proporcionar especies y aún orígenes adaptables a las más variadas condiciones ambientales.

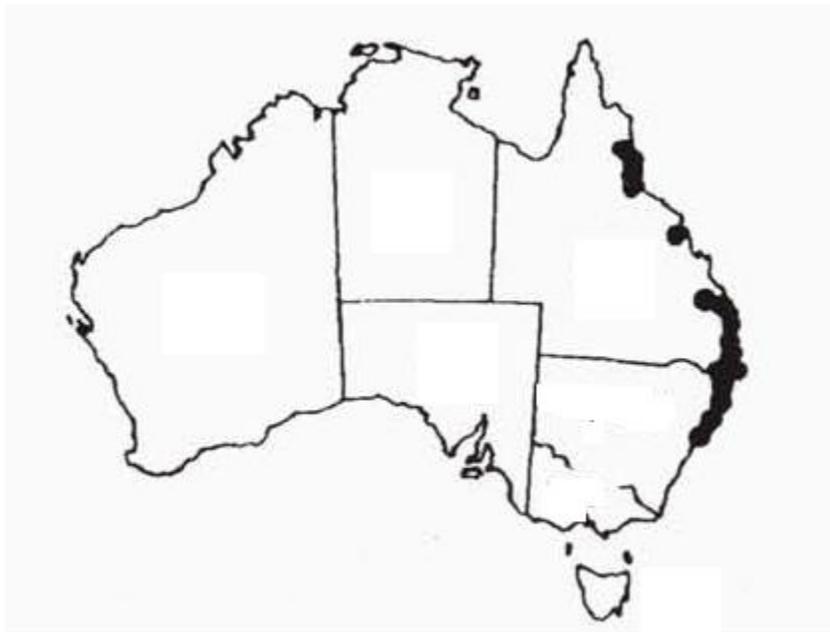
Las razones que justifican el gran desarrollo de las plantaciones de *Eucalyptus* son: su rápido crecimiento que permiten rotaciones más cortas, rectitud del fuste, amplia adaptabilidad a distintos suelos y climas, valiosas propiedades de la madera para la producción de combustible, carbón vegetal, fabricación de pulpa y papel, así como madera aserrada, postes aceites esenciales, miel y taninos, además de brindar sombra y vivienda (FAO, 2007).

El aumento mundial de la demanda de pulpa de fibra corta ha impulsado la masiva expansión de las plantaciones de *Eucalyptus* durante siglo XX (Turnbull, citado por FAO, 2007). Debido a su alto contenido de fibra en relación con otros componentes de la madera y uniformidad de las mismas, en relación con otras especies de angiospermas, ha llevado a la alta demanda de pulpa de *Eucalyptus*. El desarrollo de tecnologías de secado y aserrado de maderas, también ha aumentado el interés por plantaciones de *Eucalyptus*, para madera aserrada, chapa y tableros (Kellison, citado por FAO, 2007). Al año 2000, se encuentran plantaciones en más de 90 países (Doughty, citado por FAO, 2007).

El género *Eucalyptus* cuenta con unos 600 taxones específicos y subespecíficos, originarios de Australia e islas vecinas.

Naturalmente se localiza en el este del continente australiano, en áreas disyuntas de la región norte y centro, costero (sur) y continental (norte), con diferentes registros altitudinales (0-600m entre 25° y 33° S, 500 m a los 21° S y alrededor de 1100 m entre 16° y 19° S); clima templado (sur) hasta tropical (norte), con un promedio de temperaturas máximas de 24-30°C (sur) y 29-32°C (norte), mínimas de 3-8°C(sur) a 10-17°C(norte), con heladas escasas en localizaciones alejadas de la costa; húmedo, con precipitaciones estivales con una media anual de 1000 a 3500mm (Hall, Johnston y Marryat, FAO, Boland et al., citados por Brussa, 1994).

Figura 6. Distribución natural de *Eucalyptus grandis* en Australia



Fuente: Aguerre et al., citados por Crucci (2007).

Actualmente el *E. grandis* es una de las especies más cultivadas en nuestro país en forestaciones comerciales por su conformación y velocidad de crecimiento, las que pueden verse ampliamente disminuidas en suelos poco desarrollados y en aquellos suelos con drenaje imperfecto (Brussa, 1994).

Las plántulas y plantas jóvenes no toleran excesivas heladas (Brussa, 1994). Por esta sensibilidad a las bajas temperaturas, no es apropiado en regiones con frecuente ocurrencias de fuertes heladas (Marcó, 1991).

Es empleado en carpintería, construcciones en general y para la producción de pasta de celulosa.

El *Eucalyptus grandis* presenta ciertos requerimientos de precipitación media anual, temperatura media, et que se cumplen en algunas zonas de nuestro país.

Se puede dividir al país en tres regiones, sur- este, centro-norte y litoral oeste (MGAP. DGF 2012b, Uruguay XXI 2013).

La zona centro-norte que incluye los departamentos de Tacuarembó, Rivera, Cerro Largo, Durazno, Artigas y Treinta y Tres , alcanza un total de 136.976 has forestadas con dicha especie lo que la convierte en la zona que más se planta este *Eucalyptus* (MGAP. DGF 2012b, Uruguay XXI 2013).

## 2.7. CLONES

Un clon se define como un grupo de individuos genéticamente idénticos, que derivan de un solo individuo mediante propagación asexual. Según la teoría de totipotencia celular todas las especies vegetales podrían clonarse si se ofrecen las condiciones adecuadas; esto se debe a que cada célula que compone el individuo tiene la información genética necesaria para originar una nueva planta completa (Trujillo, 2003).

Las plantas reproducidas a través de material vegetativo conservan genotipos exactamente iguales al material original. Así, propágulos obtenidos de árboles seleccionados por características deseadas (tales como rápido crecimiento, buena forma, calidad de madera, etc.) heredan los componentes genéticos destacados sin modificaciones. Por tal motivo, el uso de la propagación vegetativa está aumentando rápidamente y es de vital importancia para el mejoramiento genético forestal así como para uso a escala comercial (Bennadji et al., 2002).

El proceso de propagación vegetativa no incluye meiosis, por lo tanto los ramets (brotes originarios de la planta madre) son genéticamente idénticos a los ortets (planta madre) (Higashi et al., citados por Barrios y Quiroga, 2014).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. SITIO EXPERIMENTAL

El presente estudio fue realizado en el departamento de Tacuarembó, en un rodal que se encuentra en el establecimiento “El capricho”, perteneciente a la empresa Forestal Oriental. El acceso al mismo desde la capital del país se da por las rutas 5, 43, 59 y un acceso final por camino vecinal. Esta zona se conoce como Cerro de Arbolito.

Las coordenadas en las cuales se ubica el cuadro del ensayo (cuadro 7C540t) son 55°49'35,198"W 32°13'14,586"S. La seccional policial a la que pertenece es la novena de dicho departamento, pertenece además a la seccional judicial número 3.

El rodal se encuentra en una ladera alta, de baja pendiente y con una altura de 130 m sobre el nivel del mar.

##### 3.1.1. Suelo según CONEAT

El suelo en el que se realizó el experimento pertenece al grupo CONEAT de suelos 7, estos son zonas de lomas y colinas de sedimentos arenosos de origen Gondwánico, Areniscas de Tacuarembó, con predominio de suelos muy profundos y profundos, de texturas livianas; drenaje bueno a moderadamente bueno, de fertilidad baja.

Más específicamente el grupo al que pertenece es 7.32, este grupo ocupa extensas zonas en los alrededores de la ciudad de Tacuarembó, entre los arroyos Tranqueras y Batoví. El material geológico está constituido por areniscas de Tacuarembó, de color rosado o areniscas retransportadas apoyadas sobre la formación Tacuarembó. El relieve está formado por colinas sedimentarias no rocosas con pendientes entre 6 - 10%. Los suelos dominantes son Luvisoles Ocrícos/Melanícos Abruptícos Típicos (Praderas Arenosas gris amarillentas) muy profundos de color pardo amarillento oscuro, textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad muy baja; y Acrisoles Ocrícos/Abruptícos (Praderas Arenosas) de color pardo amarillento oscuro,

textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad extremadamente baja. La vegetación es de pradera estival, existiendo en algunas zonas pasturas finas que permiten realizar invernadas (MGAP. RENARE, s.f.).

### 3.1.2. Clima

Para la caracterización de la zona en base al clima se tomó en cuenta la estación experimental de INIA en Tacuarembó dada la cercanía de la misma con el sitio experimental, la distancia en línea recta es de 54 km.

Según lo calculado en base a INIA. GRAS, la temperatura media en la zona de estudio se encuentra en 18.3°C, una máxima media de 23.5 °C y una mínima media de 13.1°C.

Las precipitaciones anuales en promedio de la zona en estudio se encuentran entre 1400 y 1500 mm anuales según INIA. GRAS.

Las precipitaciones acumuladas en el período desde la plantación del rodal hasta la realización de las mediciones fueron de 656 mm.

En cuanto a la ocurrencia de heladas el 24 de abril se observó la primera helada agrometeorológica y dicho fenómeno ocurrió 13 veces en el período en cuestión.

## 3.2. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

### 3.2.1. Diseño experimental

El diseño que se planteó para la realización experimento es un diseño en bloques completos al azar.

El diseño en bloques completamente al azar, puede utilizarse cuando las unidades experimentales pueden agruparse; generalmente el número de unidades por grupo es igual al número de tratamientos, estos grupos se denominan bloques o repetición. El agrupamiento presenta el objetivo de lograr que las unidades en un bloque sean tan uniformes como sea posible, de modo que las diferencias observadas se deban

en gran parte a los tratamientos. La variabilidad entre unidades de diferentes bloques será mayor que la variabilidad entre unidades del mismo bloque. La variación entre bloques no afecta claramente a las diferencias entre medias de tratamientos, ya que cada tratamiento aparece el mismo número de veces en cada bloque. En el terreno, un bloque consiste en un grupo compacto de parcelas, durante el transcurso del experimento, todas las unidades deben tratarse tan uniformemente como sea posible en todo aspecto diferente del tratamiento (Steel y Torrie, citados por Barrios y Quiroga, 2014).

Modelo estadístico de un diseño en bloques al azar

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde

- $i = 1, 2, 3, 4, 5$  (tratamientos)
- $j = 1, 2, 3$  (bloques)

Los supuestos del modelo

- Es correcto (en relación al material experimental)
- Es aditivo
- No existe interacción bloque x tratamiento

Los supuestos a los errores experimentales

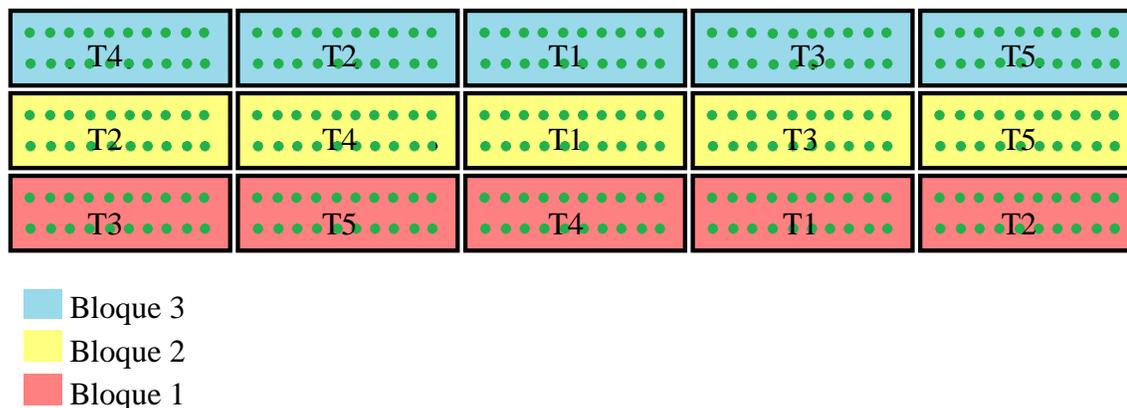
- Son variables aleatorias
- $E(\varepsilon_{ij}) = 0$  para todo  $i, j$
- $\varepsilon_{ij} \sim N$
- $V(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2$  para todo  $i, j$
- Son independientes

Por último decimos que “por definición”  $\alpha_i = \mu_i - \mu$

El ensayo fue realizado en 3 bloques completos al azar, que fueron realizados diferenciando las zonas por pendiente. Este número de bloques da un total de 3 repeticiones para cada tratamiento.

Los tratamientos realizados fueron 5, dando un total de 15 unidades experimentales, cada una de estas unidades experimentales contiene un número de 20 árboles, distribuidos en dos filas de 10 plantas en cada parcela. El total de árboles del experimento fue de 300 árboles.

Figura 7. Representación del diseño experimental



### 3.2.2. Metodología

El experimento consistió en la instalación de un rodal de *Eucalyptus grandis* de origen clonal en una segunda rotación. El marco de plantación fue de 3.0 m x 2.8 m (1190 árboles/ha).

Se realizó un control de hormigas previo a la plantación de con Fipronil, producto denominado Lampo en su forma comercial, a razón de 2 kg/ ha.

La preparación del suelo consistió en la pasada de rastra de tiro excéntrico con discos de 32" y una pasada de acamelladora.

Se realizó además una aplicación de glifosato en la totalidad del área (fila y entrefila), este se ubicó temporalmente después de la preparación del suelo y preplantación, la dosis que se aplicó fue de 5 l/ha. Esta aplicación de herbicida y todas las realizadas durante el ensayo se realizaron con equipo costal.

Con el objetivo de controlar malezas en la fila se realizó una aplicación de preemergente Isoxaflutole a razón de 300 g/ha.

Durante todo el ensayo se mantuvo el sitio experimental libre de malezas, esto llevo alguna otra aplicación de herbicidas como lo fue la aplicación de post emergentes y preemergente en la fila.

La plantación del mismo se realizó con pala plantadora y se realizó una fertilización inicial que varía la dosis según tratamiento.

Al otro día de la plantación se realizó la primera medición para constatar que no existieran diferencias entre los árboles de cada tratamiento.

A los 4 meses de la plantación se realizó una refertilización con Urea a 0 y 300 kg/ha, y sulfammo a razón de 300 kg/ha, este último aplicado en uno de los tratamientos.

Luego de transcurridos 3 meses de la refertilización se realizó la medición DAP, de altura y de diámetro de copa en dos medidas.

A la edad de 20 meses de la plantación se realizó una segunda medición para constatar la permanencia o no de lo encontrado previamente.

#### 3.2.2.1. Tratamientos

Los tratamientos realizados fueron 5, las dosis iniciales en la plantación fueron de 140 y 210 g/árbol de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn, en tres de los tratamientos se aplicó la dosis de 210g y en dos de los mismos se aplicó la dosis de 140g. Estos se realizaron con el fin de observar cual de dichas cantidades de fertilizante da mejores resultados en el crecimiento inicial del árbol y además con el objetivo de ver como interacciona ésta fertilización temprana con la posterior aplicación a los 4 meses de edad del árbol.

La refertilización se realizó de dos formas, en dos de los tratamientos se realizó con 300 kg de Urea por hectárea, el resultado de esta aplicación es el principal objetivo del presente trabajo ya que lo principal que se quiere evaluar es la incidencia del nitrógeno en el crecimiento inicial del árbol. Para intentar determinar cuanta de la incidencia es meramente atribuida al nitrógeno se realizó otro tratamiento de refertilización con sulfammo, dicho fertilizante es más completo ya que posee nitrógeno, potasio y algunos microelementos. En dos de los tratamientos no se realizó refertilización, estos son utilizados como tratamientos testigos.

Cuadro 1. Resumen de los 5 tratamientos.

Tratamientos	Fertilización al plantar	Refertilización (a los 4 meses)
1	140 g/árbol de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn	No aplica
2	210 g/árbol de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn	No aplica
3	140 g/árbol de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn	300 kg/ha de urea
4	210 g/árbol de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn	300 kg/ha de urea
5	210 g/árbol de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn	300 kg/ha de Sulfammo 11 (18-00-18 + 6% S + 3% Ca + 1% Mg + 0,21% B)

### 3.2.2.2. Cronología del experimento

De forma de resumir la cronología del experimento y que sea visualizado de mejor manera se confeccionó el cuadro 3.

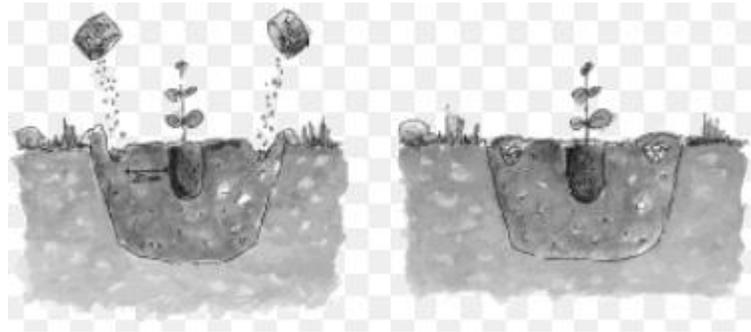
Cuadro 2: Cronología del experimento.

14 de noviembre del 2011	Establecimiento del rodal
14 de noviembre del 2011	Fertilización
15 de noviembre del 2011	Primera medición
12 de marzo del 2012	Refertilización con Urea y Sulfammo
8 de junio del 2012	Segunda medición
11 de julio de 2013	Tercer medición

### 3.2.2.3. Formas de aplicación de los fertilizantes

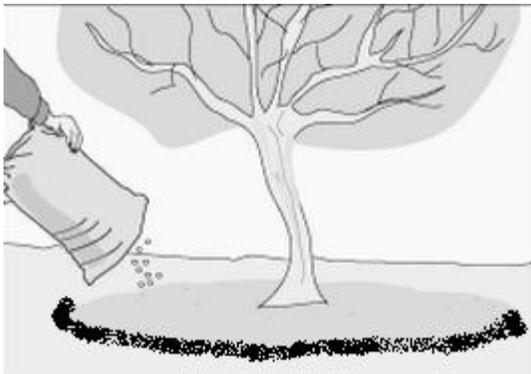
Al plantar los fertilizantes fueron aplicados en dos hoyos a una distancia de 30 cm de la planta en direcciones opuestas de forma paralela al sentido de las filas.

Figura 8. Forma de aplicación de los fertilizantes en la plantación.



La refertilización se desarrolló en la modalidad de media corona, esta consiste en la aplicación de fertilizante de forma superficial con el objetivo de cubrir la mitad del contorno de la circunferencia teórica que resulta de la proyección de las ramas sobre el suelo.

Figura 9. Forma de aplicación de fertilizante en la refertilización.



### 3.2.3. Cuantificación de las variables

El estudio principal se basó en la segunda medición dados los objetivos del estudio.

Las variables estimadas para realizar el estudio de resultados del ensayo fueron el volumen de madera de cada árbol y el área de copa.

Para el caso de volumen de madera se eligió esta variable como forma de comprender dos parámetros medidos directamente en el campo, estos fueron el diámetro del árbol a una altura de 1.3 m (DAP) y la altura total del árbol, y cuantificar dicho volumen que es uno de los indicadores de crecimiento.

Otra variable calculada fue el área de copa, este es un indicador del área foliar de los árboles, que se puede interpretar como un indicador del crecimiento del árbol, esta involucra una variable directa también medida a campo como lo es el diámetro de copa.

Para la medición del diámetro del tronco se utilizó un calibre graduado dando un resultado con un error de apreciación de  $\pm 0.05$  cm, lo que se entiende es una apreciación suficiente para el estudio. Con dicha medición de diámetro se realizó el cálculo de área basal por árbol (AB) de la siguiente forma:

$$AB (m^2) = \pi/4 * DAP^2$$

Dónde

AB: Área basal estimada en metros cuadrados

DAP: Diámetro a la altura del pecho

En el caso de la altura (H) se realizó la medida con una regla numerada, lo que constituye un método directo, dando un error de medición despreciable al igual que en el caso de diámetro.

La estimación de volumen utilizando las dos variables antes dichas se realizó según la siguiente ecuación:

$$\text{VOL}(\text{m}^3) = \text{AB} (\text{m}^2) * \text{H}$$

Dónde

$\text{VOL}(\text{m}^3)$ : Volumen de madera medido en metros cúbicos

$\text{AB} (\text{m}^2)$ : Área basal en metros cuadrados

H: altura del árbol

El factor de forma que se utiliza en el cálculo de volumen de madera aparece implícito en la ecuación, ya que se asume que este tiene un valor de “1”. Dicho valor es asignado dado que el valor de DAP es medido aproximadamente en la mitad del fuste del árbol y se asume que la forma del árbol es de “cono”. En relación a ello, la bibliografía sobre el tema muestra una gran cantidad de trabajos donde se utiliza el cálculo del volumen en *Eucalyptus sp.* considerando la fórmula de un cono, tal como lo indica Harper et al., citados por Pozo (2005).

Para la medición de la cobertura de la copa (CC) en el suelo se realizaron dos medidas por árbol, una con orientación norte- sur y otra con dirección este- oeste del diámetro de copa con una cinta métrica. Partiendo de estas dos medidas se obtiene un único valor de diámetro de copa (DC) realizando el promedio de las dos medidas antes dichas.

Con el diámetro se procede a la realización del cálculo del área de copa (AC) como se indica en la siguiente ecuación.

$$\text{AC} = \pi/4 * \text{DC}^2$$

Dónde

AC: Área de copa en metros cuadrados

DC: Diámetro de copa en metros.

A modo de complemento se realizó el análisis de volumen de madera a los 20 meses de la plantación calculado de la misma forma que en el caso desarrollado.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. BLOQUES

En el caso de los bloques se observó que los mismos estuvieron realizados de forma correcta ya que presentaron diferencias significativas entre sí, esto se evidenció en los análisis de varianza para cada una de las variables en estudio y para las dos mediciones en cuestión.

### 4.2. RESULTADOS

Para presentar los resultados se realizó una verificación de supuestos como parte del análisis estadístico y una presentación de los datos procesados para cada uno de los casos, pero analizando la segunda medición realizada que como ya se dijo es la que nos interesa.

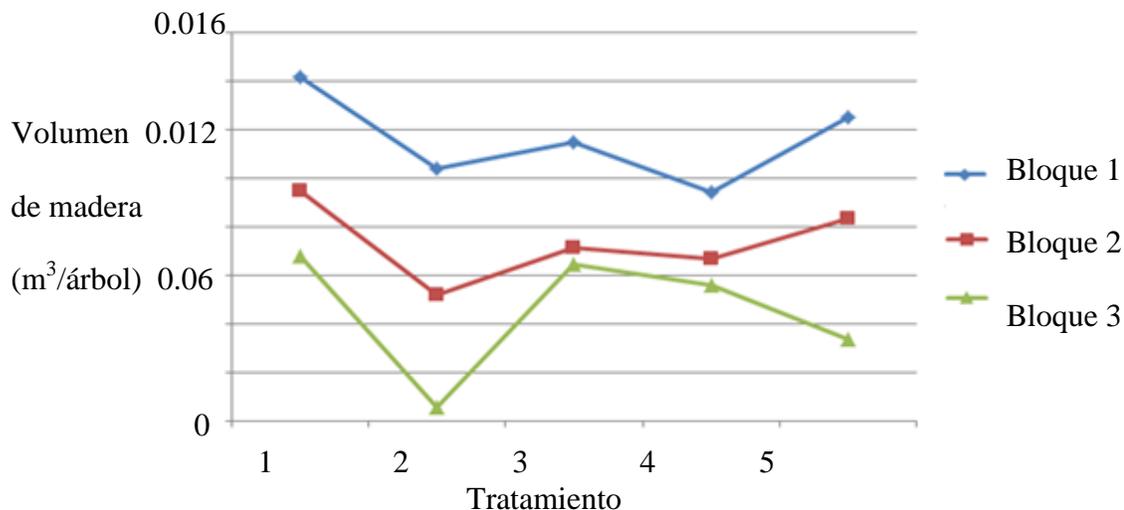
#### 4.2.1. Resultados para volumen de madera

##### 4.2.1.1. Verificación de supuestos

Para comenzar se realizó una prueba para saber si el error tiene una distribución normal, el resultado fue un P- valor mayor a  $\alpha$  por lo que el error tiene este tipo de distribución. Se encontró también que hay homogeneidad de varianza, o sea que no existen diferencias significativas entre las varianzas de los distintos tratamientos.

Por último se verifico que no exista una posible interacción bloque por tratamiento, para esto se realizó la gráfica de la figura 10.

Figura 10. Datos de volumen por tratamiento y para cada bloque.



Se aprecia que no existe cruzamiento entre las tres curvas que representan a cada uno de los tratamientos, por lo que puedo decir que no existe interacción bloque por tratamiento.

#### 4.2.1.2. Datos de volumen de madera obtenidos

Para el caso del volumen de madera se obtuvo un promedio de volumen de 0.00785 m<sup>3</sup> por árbol en la totalidad del experimento.

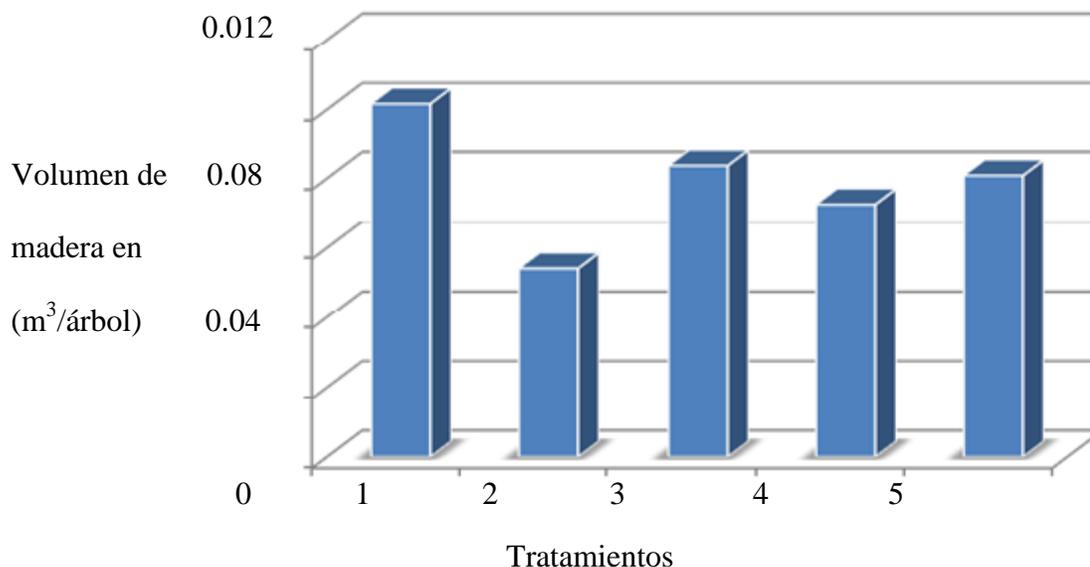
Los resultados de volumen para cada tratamiento se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 3. Resultados de volumen para cada tratamiento.

Tratamiento	Media	min	Max
1	0,01016	0,00679	0,01419
2	0,00541	0,00059	0,01042
3	0,00836	0,00644	0,01148
4	0,00726	0,00560	0,00945
5	0,00808	0,00338	0,01252

De forma de ser apreciados de mejor manera se presentan los datos del anterior cuadro de forma gráfica en la figura 11

Figura 11. Rendimiento en volumen en promedio para cada tratamiento.



En la gráfica de la figura 11 se observa que existiría un rendimiento superior en promedio para el tratamiento número 1 y una clara desventaja en cuanto al rendimiento para el caso del tratamiento número 2; para verificar que las diferencias encontradas son significativas se realizó el análisis estadístico de los datos.

Al realizar un análisis de varianza de los datos obtenidos se pudo observar que existen diferencias significativas en al menos uno de los tratamientos realizados.

Ya que se encontró al menos una diferencia se realiza la prueba de comparación múltiple de Tukey para llegar a elaborar un ranking y observar entre que tratamientos hay diferencias significativas. Los resultados de la prueba se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4. Resultado de la prueba de Tukey con un  $\alpha$  de 0.05.

Tratamiento	Media	
1	0.01016	a
3	0.00836	ab
5	0.00808	ab
4	0.00726	ab
2	0.00541	b

La única observación que se puede sacar de la prueba de Tukey realizada es que los tratamientos 1 y 2 presentan diferencias significativas, siendo superior el tratamiento 1, el resto de los tratamientos no podemos decir que presenten diferencias entre ellos.

Cada uno de los tratamientos en análisis es una combinación de tres factores distintos, dado esta característica se procedió a realizar una serie de contrastes para poder llegar a determinar la conveniencia o no de cada factor para la obtención de un mayor rendimiento medido como volumen de madera.

En primer lugar se contrastaron los tratamientos con aplicación de 300 kg/ha a los 4 meses de la plantación de los árboles, con los que no realizaban dicha aplicación. (Contraste 1). Para este caso no se obtuvieron diferencias significativas por lo que no se puede decir que dicho factor presente diferencias en cuanto al rendimiento.

Otro contraste realizado fue el de la refertilización con urea y con sulfammo (tratamientos 4 y 5) y no se obtuvieron diferencias significativas entre los mismos. (Contraste 3).

Por último (contraste 2) se contrastaron las aplicaciones de 140g y 210 g de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn en la plantación, para este caso si se encontraron diferencias significativas, ya que el valor de P es menor al planteado de antemano para el ensayo, presentando una superioridad el factor de 140 g de dicho producto.

El estimador de la diferencia encontrada es de 0.00585, para calcular la diferencia en volumen se debe dividir dicho valor entre 4, ya que este es el multiplicador para las medias contrastadas opuestamente, el resultado fue de 0.00146 m<sup>3</sup> / árbol a favor de los tratamientos de 140 g/parcela aplicado al momento de la plantación en el experimento.

Cuadro 5. Resumen de los contrastes realizados.

	Estimador	Valor F	P valor
<b>Contraste. 1</b>	-0.000050	9.970072e-04	0.975584
<b>Contraste. 2</b>	0.005850	1.364803e+01	0.006092
<b>Contraste. 3</b>	-0.000827	5.450661e-01	0.481435

#### 4.2.2. Resultados para área de copa

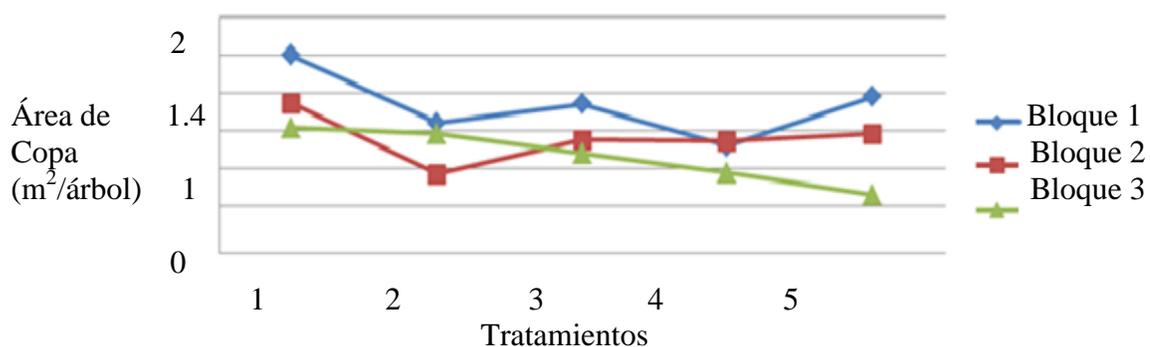
##### 4.2.2.1. Verificación de supuestos

Al igual que para el caso de volumen de copa se realizó la verificación de supuestos.

Se comenzó por ver si el error tiene distribución normal y por probar que exista homogeneidad de varianzas, en ambos casos los datos superaron estas pruebas ratificando lo realizado en el experimento.

Cuando se verificó si existía interacción con los bloques planteados para el experimento, se encontró que existe una pequeña interacción que fue desestimada debido a que las curvas siguen una misma tendencia y ese cambio de ranking se debería a otros factores y no a que exista una verdadera interacción entre los bloques y dicho tratamiento.

Figura 12. Representación de los valores promedio para área de copa para cada tratamiento y cada bloque.



#### 4.2.2.2. Datos obtenidos para área de copa

Para este caso se encontró que la media para el experimento fue de 1.386 m<sup>2</sup>/árbol, obteniéndose un mínimo de 1.06 m<sup>2</sup>/árbol y un máximo de 1.8 m<sup>2</sup>/árbol.

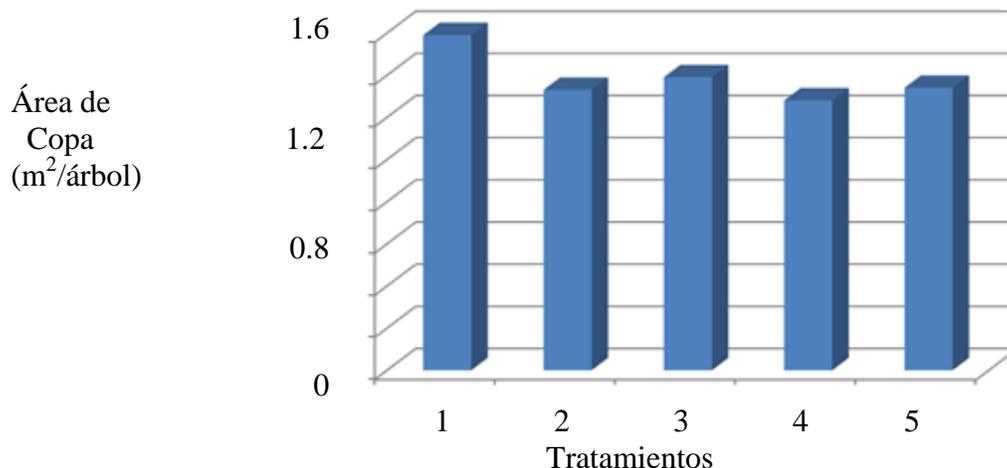
En el cuadro 7 a modo de resumen se aprecian los datos obtenidos, presentándose los promedios, máximos y mínimos para cada uno de los tratamientos.

Cuadro 6. Resumen de datos para volumen de copa.

Tratamiento	Medias	Mínimos	Máximos
1	1.59	1.416	1.800
2	1.33	1.171	1.442
3	1.39	1.279	1.540
4	1.28	1.178	1.345
5	1.34	1.062	1.581

De forma que los datos sean visualizados de mejor manera se confeccionó la figura 13.

Figura 13. Medias de área de copa para cada tratamiento.



En este caso las diferencias no son tan marcadas como para el caso de volumen de madera pero se puede apreciar de forma subjetiva y decir que existiría una superioridad para el tratamiento número 1.

Para la verificación de dicho supuesto se realizó el análisis de varianza (ANAVA), en este caso el valor de P da un resultado mayor al planteado para dicho análisis lo que nos lleva a decir que no existen diferencias entre los tratamientos planteados.

Por lo antes dicho al realizar una prueba de comparación múltiple como es la prueba Tukey no nos da diferencias ni un ranking verdadero para poder decir que tratamiento presenta superioridad con respecto a alguno de los otros.

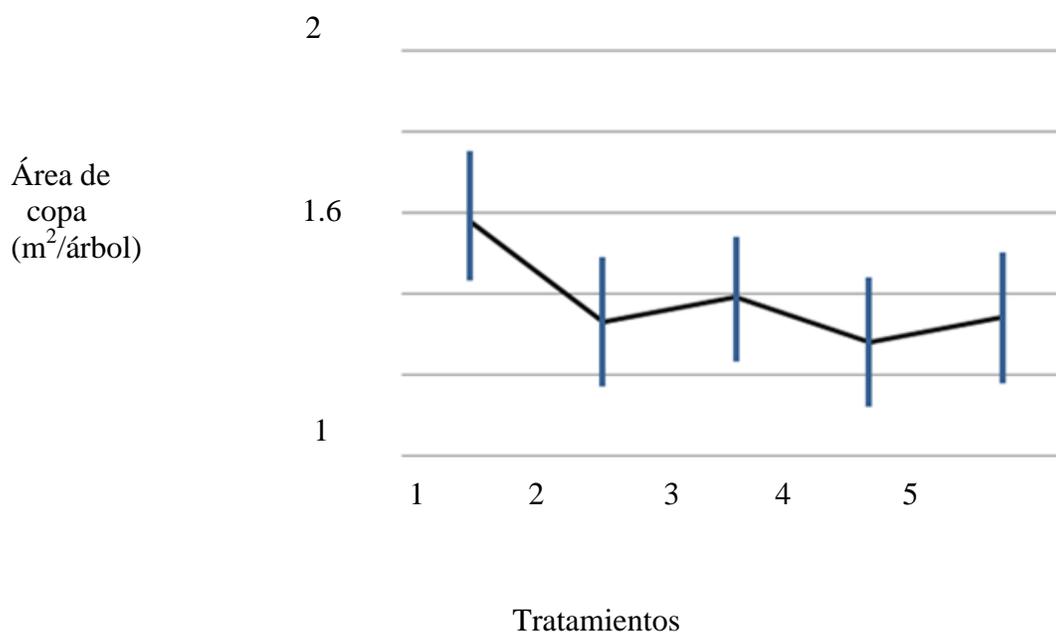
Lo antes dicho se ve evidenciado también si se realizan los intervalos de confianza para cada uno de los tratamientos (cuadro 7).

En la gráfica de la figura 14, se ve claramente que los intervalos se superponen por lo que no se puede afirmar que sean distintos.

Cuadro 7. media y limites inferior y superior del intervalo de confianza.

Tratamiento	Medias	Lim. Inf.	Lim. Sup.
1	1,58	1,43	1,75
2	1,33	1,17	1,49
3	1,39	1,23	1,54
4	1,28	1,12	1,44
5	1,34	1,18	1,50

Figura 14. Gráfica de intervalos de confianza (95%) para las medias de cada tratamiento.



Se puede apreciar en la figura 14 que los intervalos de confianza (líneas en azul) para las medias por cada tratamiento se superponen, lo que da un elemento más para afirmar lo dicho anteriormente en cuanto a que no existen diferencias entre los distintos tratamientos.

Ya que no se encuentran diferencias entre los tratamientos se procedió a realizar los contrastes para poder llegar a inferir acerca de alguno de los factores. Estos contrastes son los mismos que los planteados para el caso de volumen de madera.

Al igual que para el caso de volumen de madera el único contraste que presentó diferencias fue el que compara la aplicación de 140 g y 210 g de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn. Esta diferencia es estimada en 0.18 m<sup>2</sup>/árbol. Lo que equivale a 214 m<sup>2</sup>/ha de aumento de la cobertura del suelo por las hojas de los árboles. Si tomamos un ancho de 1.4 m supone un aumento de 4.5 %.

Cuadro 8. Resumen de resultados de los contrastes para área de copa.

	<b>Estimador</b>	<b>Valor F</b>	<b>P valor</b>
<b>Contraste. 1</b>	0.4967	3.22943	0.11005
<b>Contraste. 2</b>	0.7286	6.95159	0.02987
<b>Contraste. 3</b>	-0.061	0.38971	0.54983

#### 4.2.2.3. Análisis factorial para área de copa

Si se toman únicamente los primeros cuatro tratamientos, encontramos que estos están formados por dos niveles de dos factores distintos. Por esta característica del ensayo se realizó un análisis factorial, formando un factorial de 2 x 2 (dos niveles de dos factores).

Con esto se pretende visualizar una posible interacción entre los dos factores aplicados en los primeros cuatro tratamientos y analizar los datos de forma más correcta ya que en caso de existir, el efecto de uno de los factores se puede ver afectado por el nivel del otro factor

Cuando se realizó el ANAVA del modelo encontramos que la interacción no es significativa. Esto indica que el nivel de uno de los factores no afecta significativamente el efecto de un nivel del otro factor. De esta forma se toma como resultado principal el análisis del experimento como un DBCA y no se toma en cuenta una interacción entre las variables.

#### 4.2.3. Resultados de las mediciones en plantación y a los 20 meses de edad del rodal

Para el caso de la medición en la plantación se evaluó que no existieran diferencias significativas entre las parcelas. Este resultado nos dice que no había diferencias previas a los posibles efectos de los tratamientos.

Para el caso de la medición a los 20 meses de edad, se realizó el cálculo de volumen de madera por árbol promedio por parcela y no se encontraron diferencias entre los tratamientos por separado ni tampoco en la realización de los contrastes, por lo que se puede decir que las diferencias encontradas no perduraron en el tiempo.

### 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.3.1. Consideraciones generales

Según las precipitaciones relevadas en la zona en el período no se puede decir que este haya sido un factor limitante ya que el registro para el período comprendido entre la plantación y la fecha en que se relevaron los datos (aproximadamente 7 meses) es de 537 mm de precipitaciones, cantidad que es suficiente si se la compara con los requerimientos anuales para la especie que se encuentra en los 900 mm anuales en promedio. Además no se registraron precipitaciones en los días posteriores a la refertilización, lo que reduce las posibilidades de pérdidas de nitrógeno por lixiviación.

El enmalezamiento tampoco supuso una competencia por los nutrientes (del suelo y aplicados como fertilizante) ya que el sitio se mantuvo libre de malezas en todo momento mediante la aplicación de herbicidas. La competencia por nutrientes tampoco es posible que se dé a esas edades de los árboles, dado el marco de plantación presente en el ensayo.

La variación genética no fue un factor que pudo generar “ruido” al experimento dado que se trata de clones, esto no supuso un inconveniente para el experimento.

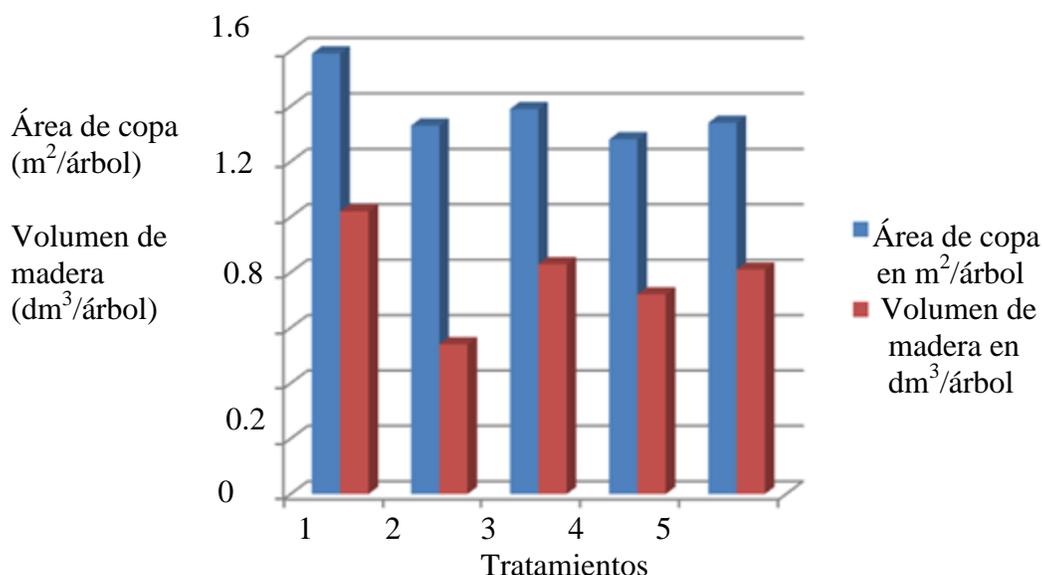
El suelo tampoco presenta una limitante ya que se trata de suelos profundos, bien drenados, de textura arenosa franca, con pendientes moderadas, suelos en los que se encuentran grandes cantidades bajo forestación dados los buenos rendimientos que se obtienen. Otra característica de este grupo de suelos es la baja fertilidad, lugares que según muchos autores supone una mayor respuesta al agregado de fertilizante, lo que llevaría a ver de forma más clara algún efecto de los tratamientos.

#### 4.3.2. Relación entre ambas variables

En la presentación de los resultados del ensayo se encontró que ambas variables medidas se comportaron de forma similar con la aplicación de los 5 tratamientos.

Esto se ve claramente en la figura 15, que representa los promedios para ambas medidas luego de la aplicación de cada uno de los tratamientos.

Figura 15. Comparación de las medias para cada tratamiento para volumen de madera y para área de copa.



Para la realización del gráfico se utilizó el volumen de madera en dm<sup>3</sup>/árbol para que se asemejen las escalas y ver de mejor manera lo dicho anteriormente.

Esto coincide con diversos autores citados anteriormente que indican que un aumento en el área foliar se traduce como un aumento en el volumen de madera, esto se da por un aumento en la masa fotosintetizadora, como también en un aumento en la interceptación de la luz solar.

Una vez comprobado esto se puede realizar un análisis conjunto de las dos variables, ya que ambas representan el crecimiento inicial del árbol de forma muy similar, de igual manera como ya se dijo la variable de mayor interés del trabajo es el área de copa.

#### 4.3.3. Fertilización en la plantación

Cuando se comparó todos los tratamientos por separado se constató una única diferencia para la variable volumen de madera, en el caso de la fertilización en la plantación a diferentes dosis. Se encontró una superioridad en el crecimiento inicial para la dosis de 140 g sobre la de 210 g de dicho factor. Para el caso de área de copa esta diferencia no fue significativa pero de forma subjetiva se puede apreciar la misma tendencia.

Cuando se realizaron los contrastes para inferir sobre la aplicación de los niveles de dicho factor (Contraste 2), se encontró la misma tendencia ya que fue significativa la diferencia para las dos variables.

De estos contrastes se saca la conclusión de que la diferencia encontrada en la aplicación de los dos niveles de dicho factor es muy considerable, ya que se puede cuantificar en un aumento para el volumen de madera de 0.0014 m<sup>3</sup>/árbol. Esta diferencia según algunos autores se traduciría en un mayor volumen de cosecha al final del ciclo aunque otros sostienen lo contrario, argumentando que luego del cierre de copa los árboles terminan presentando volúmenes similares.

De dichos contrastes se desprende además que el área de copa presentó un aumento de 0.18 m<sup>2</sup>/árbol para la dosis de 140 g, lo que significa un aumento de 214 m<sup>2</sup>/ha de cobertura del suelo por parte de los árboles, dato de mucha relevancia dados los objetivos del ensayo.

Este valor implica un aumento en la cobertura del suelo en un 2.14 %, por hectárea total, llevado al área donde se dan los principales problemas de malezas da un porcentaje mayor de aumento en la cobertura (4.5%), este dato puede suponer un ahorro en el control de malezas y en la fertilización ya que la cantidad de fertilizante aplicada es menor.

Dicha diferencia en el área foliar también trae aparejada otras ventajas como lo es la habilidad de competir con las malezas según lo afirmado por Gaitán et al. (2004), esta competencia es de vital importancia en la implantación de un determinado rodal, esta define junto a otros factores el porcentaje de sobrevivencia de los árboles.

Estas afirmaciones contrastan con lo esperado ya que muchos autores señalan que una mayor fertilización ocasiona mejores respuestas iniciales de crecimiento y esto se debería ver plasmado en el volumen de madera y en el área de copa medidos a los 7 meses de edad del rodal.

Según la bibliografía citada este resultado puede deberse a un posible efecto tóxico del fertilizante que aunque fue aplicado a 30 cm de la planta puede haber generado dicho efecto. En esta afirmación se dice que los micronutrientes aplicados en

grandes cantidades pueden generar toxicidad (Tisdale y Nelson, Bonilla, Havlin et al., citados por Cantera e Ilhenfeld, 2014).

#### 4.3.4. Refertilización

Para el caso de la aplicación de urea no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de 0 y 300 kg/ha de dicho factor.

Este último resultado arrojado por el experimento, contrasta también con lo esperado ya que en muchos de los casos de fertilización similares se encontró un aumento en la biomasa aérea y con esto un aumento en el volumen de madera, y en este caso no se aprecia dicha diferencia.

Si aplicamos la ley del mínimo suficiente nos daría una explicación para este caso, ya que para el caso de la urea otro nutriente podría estar limitando el crecimiento, esta teoría se puede refutar con la comparación de las aplicaciones de urea con la refertilización con sulfammo, este último es un fertilizante nitrogenado más completo, este presenta los macro y micronutrientes más comunes en este tipo de producción (a excepción de fósforo), y este tratamiento no presentó diferencias significativas con el tratamiento que se aplica urea.

Según lo citado en la bibliografía el fertilizante sulfammo presenta una estructura más estable que la urea, esto reduce las pérdidas por volatilización por lo que en caso de haberse dado pérdidas significativas de urea por volatilización se tendrían que apreciar diferencias entre estos dos fertilizantes aplicados a los 4 meses post plantación y como ya se dijo no se encontraron. Dado esto último no podemos decir que el hecho de no encontrar diferencias entre los tratamientos con y sin refertilización con nitrógeno en forma de urea, se deba a las pérdidas por volatilización.

## 5. CONCLUSIONES

Las variables en estudio se comportaron de forma muy similar en cuanto a las variaciones relativas que presentaron en los 5 tratamientos, debido a que una mayor área foliar aumenta el área fotosintética y la intercepción de la luz, lo que lleva a un aumento en el volumen de madera.

No se encontraron grandes diferencias entre los cinco tratamientos del ensayo.

En lo que respecta a la dosis de aplicación de fertilizante en la plantación se encontró una clara superioridad de la menor dosis de fertilizante (140 g de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn). Esto se da probablemente al efecto tóxico que pueden causar algunos micro y macronutrientes a grandes agregados de los mismos.

La aplicación de la dosis menor de fertilizante, genera un aumento en la cobertura del suelo por parte del área de copa de 4.5 % del área de surco, lo que supone un ahorro en la aplicación de fertilizante y en un ahorro o aumento en la efectividad de la aplicación de herbicidas en la fila de plantación, y así lograr una mejor implantación del rodal.

No se presenta una diferencia significativa en la aplicación de urea a los 4 meses de edad del árbol en la fecha de medición del ensayo (a los 7 meses de edad del árbol).

La refertilización con el fertilizante sulfammo, no presentó incrementos en el crecimiento inicial del árbol con respecto a los refertilizados con urea y a los que no se les realizó fertilización, a pesar de ser un fertilizante más completo en cuanto a nutrientes que la urea.

No existe una interacción entre los niveles de fertilizante aplicados en la plantación y los niveles de urea aplicados en la refertilización.

Las pocas diferencias encontradas no se mantuvieron en el tiempo, desaparecieron a los 20 meses de edad del rodal.

## 6. RESUMEN

Este trabajo se encuentra dentro del programa de Investigación y Desarrollo de la empresa Forestal Oriental – UPM. El objetivo general es evaluar el efecto de la refertilización nitrogenada en el crecimiento inicial del árbol, en un clon de *Eucalyptus grandis* en el departamento de Tacuarembó. Los objetivos específicos son: I) Evaluar la respuesta en volumen de madera con aplicación de urea a los 4 meses de edad del árbol. II) Evaluar la respuesta en volumen de copa con la aplicación de urea a los 4 meses de edad del árbol. III) Evaluar dos dosis distintas de fertilizante aplicadas al momento de plantación medido como volumen de madera y volumen de copa. IV) Comparar rendimientos en volumen de madera y volumen de copa en tratamientos refertilizados con urea y otros con sulfammo. Como resultado se obtuvo que no existieron grandes diferencias para los tratamientos. Para los fertilizantes aplicados en la plantación se obtuvieron mejores rendimientos con la menor dosis de fertilización (140 g de 14-30-12 + 3% S + 0,15% B + 0,2% Zn) frente a la mayor dosis (210 g del mismo fertilizante). Para el caso de los aplicados en la refertilización (Urea y Sulfammo) no se encontraron diferencias significativas en área de copa y volumen de madera medidos a los 7 meses de edad del árbol.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*; Refertilización; Urea; Sulfammo; Área de copa; Volumen de madera.

## 7. SUMMARY

This work is within the research and development program of the company Forestal Oriental - UPM. The overall objective is to evaluate the effect of nitrogen on the initial growth refertilization tree, a clone of *Eucalyptus grandis* in the department of Tacuarembó. The specific objectives are: i) assessing the response volume of wood with application of urea at 4 months of age of the tree. II) evaluate the response crown volume with the application of urea at 4 months of age of the tree. III) evaluate two different doses of fertilizer applied when measured as planting timber volume and volume of glass. IV) Compare volume yields wood and glass volume in refertilizados with urea and with sulfammo other treatments. As a result it was found that there were no significant differences for treatments. For planting fertilizer applied in better yields they were obtained with the lower dose of fertilization (14-30-12 140 g + 3% S + 0.15% B + 0.2% Zn) against the highest dose (210 g of the same fertilizer). In the case of those applied in the refertilization (Urea and Sulfammo) no significant differences in crown area and timber volume measured at 8 months of age of the tree is found.

Keywords: *Eucalyptus grandis*; Refertilization; Urea; Sulfammo; Crown area; Timber volume.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Araújo, E. F.; Gava, J. L.; Souza, A. J.; Silveira, R. L. V. A. 2003. Crescimento de clones de *Eucalyptus* em resposta à aplicação de nitrogênio em espodossolo no sul da Bahia. (en línea). In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo (29º., 2003, Sao Paulo). Solo; alicerce dos sistemas de produção. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1 disco compacto. Consultado ago. 2015. Disponible en <http://www.rragroflorestal.com.br/documents/29cbcs/N-BA.pdf>
2. Atiwill, P. M. 1980. Nutrient cycling in a *Eucalyptus* oblique (L'Hérit.) forest IV. Nutrient uptake and nutrient return. Austr.J. Bot. 28: 199-222.
3. \_\_\_\_\_; Adams, M. A. 1996. Nutrition of *Eucalyptus*. Collingwood, CSIRO. 440 p.
4. Barrios, G.; Quiroga, M. 2014. Impacto combinado de distintos envases y sustratos usados en vivero, en el establecimiento y crecimiento inicial de un clon de *Eucalyptus grandis*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 114 p.
5. Barros, N. F.; Nrovais, R. F.; Neves, J. C. L. 1990. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto; relação solo-eucalipto. Viçosa, Folha de Viçosa. 369 p.
6. Basurco, F.; Noriega, M.; Romeral, L.; Toval, G. 2000. Ensayos de fertilización localizada en masas clonales de *Eucalyptus globulus* en el momento de la plantación en la provincia de La Coruña. Pontevedra, Centro de Investigación y Tecnología de ENCE. 5 p.
7. Bellote, A.; Ferreira, C. 1995. Nutrientes minerales y crecimiento de árboles abonados de *Eucalyptus grandis* en el Estado de São Paulo. Bosque. 16 (1): 69-75.
8. Bennadji, Z.; Trujillo, M. I.; de Mello, J. C.; Maruyama, T. 2002. Propagación vegetativa de especies del genero *Eucalyptus*. Montevideo, INIA. 37 p. (Serie Aftercare forestal INIA-JICA no. 9)
9. \_\_\_\_\_. 2007. Proyectos de Investigación INIA. Programa Nacional de Investigación en Producción Forestal. Revista INIA. no. 12: 34-36.

10. Binkley, D. 1993. Nutrición forestal; prácticas de manejo. México, Limusa. 340 p.
11. Bonin Goiz, B. R.; Gonçalves, J. L. M.; Moraes, L. F.; Pulito, A. P. 2010. Resposta à fertilização nitrogenada em plantações de eucalipto. (en línea). In: Simposio Internacional de Iniciação Científica (18°. 2010, São Paulo). Exatas e engenharias. São Paulo, s.e. 1 disco compacto. Consultado ago. 2015. Disponible en <https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoVisualizarResumo?numeroInscricaoTrabalho=739&numeroEdicao=18>
12. Brussa, C. 1994. *Eucalyptus*; especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
13. Cantera, B.; Ilhenfeld, S. 2014. Efecto de la fertilización y aplicación de bioestimulantes en el desarrollo inicial de plantaciones de *Eucalyptus globulus* sobre suelos de Lavalleja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 75 p.
14. Cromer, R. N.; Williams, E. R. 1982. Biomass and nutrient accumulation in a planted *Eucalyptus globulus* (labill) fertilizer trial. *Austr.J.Bot.* 30 (3): 265-278.
15. \_\_\_\_\_; Cameron, D. M.; Rance, S. J.; Ryan, P. A.; Brown, M. 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*; biomass accumulation. *For. Ecol. and Management.* 62: 231-243.
16. Crucci, M. 2007. Evaluación de DRIS y nivel crítico en el diagnóstico nutricional de *Eucalyptus grandis*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 60 p.
17. de Jesus, G. L. 2008. Nutrição e produção de eucalipto e frações da matéria orgânica do solo influenciadas por fonte e doses de nitrogênio. Tesis Ing. Agr. (MSc.). Viçosa, Brasil. Universidade Federal de Viçosa. 63 p.
18. FAO. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina; informe nacional Uruguay. (en línea). Roma. 9 p. Consultado ene. 2015. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/007/j2807s/j2807s00.htm#TopOfPage>
19. \_\_\_\_\_. 2007. Marker – assisted selection; current status and future perspectives in crops, livestock, forestry and fish. Roma. 471 p.

20. Firestone, M. K. 1982. Biological denitrification. In: Stevenson, F. J. ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. pp. 289-326 (Monography no. 22).
21. Gaitán, J. J.; Larocca, F.; Dalla Tea, F. 2004. Fertilización de *Eucalyptus grandis*; dinámica de la respuesta durante la rotación comercial. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (19º., 2004, Buenos Aires). Cambio en el uso de la tierra, educación y sustentabilidad. Buenos Aires, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. s.p.
22. Garategui, A. L. 2002. Estudio de la respuesta al nitrógeno en *Eucalyptus dunnii*, para producción de biomasa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 87 p.
23. Godinho, V. de P. C.; Barros, N. F. de; Pereira, P. R. G.; Cantarutti, R. B. 1996. Crescimento e recuperação de N e K por *Eucalyptus camaldulensis*, cultivado em solo arenoso de cerrado, em resposta ao modo de aplicação de adubo nitrogenado e potássico. In: Conferencia de IUFRO sobre Silvicultura e Melhoramiento de Eucalyptos (3º., 1996, Salvador de Bahía). Anais. Salvador de Bahía, EMBRAPA. CNPF. pp. 98-105.
24. González, O. H.; Sadeghian, K. S. 2012. Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. Revista Cenicafé. 63 (1): 132-143.
25. Hauck, R. D. 1984. Nitrogen in crop production. Madison, Wisconsin, ASA/CSSA/SSSA. 804 p.
26. Havlin, J.; Tisdale, S.; Nelson, W.; Beaton, J. 2014. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. New Jersey, USA, Pearson. 516 p.
27. Hebert, M. A.; Schönau, A. P. G. 1989. Fertilizing commercial forest species in southern Africa; research progress and problems (part 1). South Afr. For. Jou. 151: 58-70.
28. Higashi, E.; Vaz de Arruda, R.; Natal, A. 2000. Propagação vegetativa de *Eucalyptus*; princípios básicos e a sua evolução no Brasil. (en línea). Sao Paulo, Brasil, IPEF. 11 p. Consultado 22 jun. 2013. Disponible en <http://ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr192.pdf>
29. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agroclima y Sistemas de Información, UY). s.f. Caracterización agroclimática

- del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 15 feb. 2015. Disponible en [http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara\\_agro/index.html](http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara_agro/index.html)
30. Marcó, M.; Allian, R.; Sánchez, M. 1991. *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus dunni* en la región mesopotámica y su zona de influencia. In: Jornadas Forestales (6as., 1990, Concordia, Entre Ríos). Memorias. Concordia, INTA. 1 disco compacto.
31. MGAP. DGF (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal, UY). 2012a. *Eucalyptus grandis*; superficie forestada bajo proyecto (en línea). Montevideo. s.p. Consultado dic. 2013. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,20,441,O,S,0,MNU;E;134;2;MNU>
32. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2012b. Superficie total de bosques (cartografía 2012). Actualización de la cartografía forestal del Uruguay. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado dic. 2013. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,20,441,O,S,0,MNU;E;134;2;MNU;,"](http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,20,441,O,S,0,MNU;E;134;2;MNU;,)
33. \_\_\_\_\_. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Estadísticas Agropecuarias, UY). 2013. Anuario estadístico agropecuario. (en línea). Montevideo. 270 p. Consultado ene. 2014. Disponible en [http://www.mgap.gub.uy/Dieaanterior/Anuario2013/DIEA\\_Anuario\\_2013.pdf](http://www.mgap.gub.uy/Dieaanterior/Anuario2013/DIEA_Anuario_2013.pdf)
34. \_\_\_\_\_. RENARE (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. División Suelos y Aguas, UY). s.f. Descripción de grupos de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. 62 p. Consultado 15 ago. 2015. Disponible en <http://www.cebra.com.uy/renare/media/Descripci%C3%B3n-de-Grupos-de-Suelos-CONEAT-1.pdf>
35. Miller, H. G. 1981. Forest fertilization; some guiding concepts. *Forestry*. 54 (2): 157-167
36. Noble, A. D.; Herbert, M. A. 1990. Influence of soil matter content on the responsiveness of *Eucalyptus grandis* to nitrogen fertiliser. *South Afr. For. Journal*. 156: 23-27.
37. \_\_\_\_\_.; Barbazán, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 72 p.
38. \_\_\_\_\_.; Durán, J.; Llovet, P. 2007. Soil and plant indices for predicting eucalypt response to nitrogen in Uruguay. *Soil Sci. Soc. Ame. Jou*. 71: 1708-1718.

39. \_\_\_\_\_; Crucci, M. 2010. Respuesta de plantaciones de eucaliptos a la fertilización nitrogenada. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo). 10 años de investigación en producción forestal. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 48-54.
40. Pozo, E. R. 2005. Efecto de la fertilización sobre plantaciones de *Eucalyptus globulus* (Labill.) y *Eucalyptus nitens* (maiden) de siete años de edad en la comuna de Máfil, provincia de Valdivia. Tesis Ing. Agr. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 115 p.
41. Pritchett, W. L. 1991. Suelos forestales; propiedades, conservación y mejoramiento. México, Limusa. 634 p.
42. Pulito, A. P. 2009. Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus*. Tesis Mestre em Recursos Florestais. Piracicaba, Brasil. Universidade de Sao Paulo. 59 p.
43. SPF (Sociedad de Productores Forestales del Uruguay, UY). 2011. Plantaciones. Zonas forestadas en Uruguay. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 16 feb. 2015. Disponible en <http://www.spf.com.uy/forestacion-en-uruguay/plantaciones/>
44. Steel, R.; Torrie, J. 1985. Bioestadística; principios y procedimientos. 2ª ed. Bogotá, Colombia, Presencia. 622 p.
45. Tisdale, S.; Nelson, W. 1970. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Barcelona, Montaner y Somon. 700 p.
46. Trujillo, M. 2003. Clonación y mejoramiento genético avances en *Eucalyptus grandis*. (en línea). In: Programa Nacional Forestal. Avances en investigación y transferencia de tecnología en zona de prioridad forestal 8. Tacuarembó, INIA. pp. 19-22 (Actividades de Difusión no. 321). Consultado 16 feb. 2015. Disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/publicacion-ver.php?id=761>
47. Zamalvide, J. P.; Ferrando, M. 2010. Algunas consideraciones generales en relación al tema “fertilización de Eucaliptos. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo). 10 Años de investigación en producción forestal. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 38-42.

## 9. ANEXOS

Anexo no. 1. Vista aérea del ensayo.





Anexo no. 3. Resultados para área de copa en metros cuadrados.

Tratamiento	Bloque	Área de copa
1t	1b	1,800
2t	1b	1,442
3t	1b	1,540
4t	1b	1,319
5t	1b	1,581
1t	2b	1,545
2t	2b	1,171
3t	2b	1,350
4t	2b	1,345
5t	2b	1,382
1t	3b	1,416
2t	3b	1,382
3t	3b	1,279
4t	3b	1,178
5t	3b	1,062

Anexo no. 4. Resultados para volumen de madera en metros cúbicos.

trat	bloque	Volumen
1	1	0.01419
2	1	0.01042
3	1	0.01148
4	1	0.00945
5	1	0.01252
1	2	0.00949
2	2	0.00522
3	2	0.00716
4	2	0.00672
5	2	0.00835
1	3	0.00679
2	3	0.00059
3	3	0.00644
4	3	0.00560
5	3	0.00338

Anexo no. 5. ANAVA para diseño factorial.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
refert	1	0.04625	0.04625	2.183	0.178
fert	1	0.09955	0.09955	4.700	0.062
refert:fert	1	0.01606	0.01606	0.758	0.409
Residuals	8	0.16946	0.02118		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1