

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

UNA EVALUACIÓN DE ALTERNATIVA DE FERTILIZACIÓN CON FUENTES  
DE LIBERACIÓN CONTROLADA EN EL ESTABLECIMIENTO DE  
PLANTACIONES COMERCIALES DE *EUCALYPTUS GRANDIS*

Por

Eduardo NOBLE MOLINA  
Ignacio Andrés RODRÍGUEZ VELÁZQUEZ

Trabajo final de grado  
presentado como uno de los  
requisitos para obtener el título  
de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2023

## PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

-----  
Ing. Agr. (MSc.) Sergio Andrés Baietto

-----  
Ing. Agr. (MSc.) Maximiliano González

Tribunal:

-----  
Ing. Agr. (MSc.) Sergio Andrés Baietto

-----  
Ing. Agr. (Dr.) Jorge Hernández

-----  
Ing. Agr. (Dr.) Jaime González Talice

Fecha:

30 de enero de 2023

Estudiantes:

-----  
Eduardo Noble Molina

-----  
Ignacio Andrés Rodríguez Velázquez

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios.

“De vivir

De tratar, de lograr

Ser la revancha de todos aquellos

Que la pelearon al lado de cerca o muy lejos y no

Pudieron reír sin llorar”

“Acuérdense de luchar por lo imposible porque lo posible se agotó!

CJS

Eduardo Noble Molina

Agradezco a familia y amigos, quienes apoyaron y fueron clave para lograr culminar este proceso. A mi compañero de tesis Eduardo por el apoyo y dedicación. A tutores y Agroenfoque quienes hicieron posible el desarrollo de la evaluación.

Ignacio Andrés Rodríguez Velázquez

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1 <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2 <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1 REGULACIÓN Y DESARROLLO DEL RUBRO FORESTAL EN URUGUAY	3
2.2 PLANTACIONES COMERCIALES .....	4
2.2.1 <u>Productividad potencial, sitio forestal y manejo</u> .....	5
2.2.2 <u>Descripción de la especie <i>Eucalyptus grandis</i></u> .....	5
2.2.3 <u>Preparación del suelo</u> .....	6
2.2.4 <u>Control de malezas</u> .....	7
2.2.5 <u>Control de hormigas</u> .....	7
2.2.6 <u>Fertilización</u> .....	8
2.3 NUTRICIÓN DE LOS BOSQUES.....	8
2.3.1 <u>Nutrientes</u> .....	9
2.3.2 <u>Ciclo de nutrientes</u> .....	11
2.3.3 <u>Evaluación de nutrientes en el agro-ecosistema suelo-árbol</u> .....	13
2.4 FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA. ....	13
2.4.1 <u>Uso y aplicación de fertilizantes</u> .....	13

2.4.2 <u>Fertilizantes de Liberación Controlada</u> .....	14
2.4.3 <u>Fertilizantes de liberación controlada recubierto de polímeros</u> .....	15
2.4.4 <u>Proceso de liberación de nutrientes</u> .....	16
2.4.5 <u>Factores que afectan el proceso de liberación</u> .....	18
2.4.6 <u>Aplicaciones</u> .....	19
3 <u>MATERIALES Y METODOS</u> .....	20
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO .....	20
3.1.1 <u>Caracterización edafológica</u> .....	23
3.1.2 <u>Preparación del sitio</u> .....	23
3.1.3 <u>Fertilizante</u> .....	24
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	24
3.2.1 <u>Evaluación de la sobrevivencia</u> .....	26
3.2.2 <u>Evaluación de las variables continuas</u> .....	27
4 <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u> .....	29
4.1 SOBREVIVENCIA .....	29
4.2 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO .....	32
4.2.1 <u>Área basal</u> .....	32
4.2.2 <u>Altura</u> .....	33
4.2.3 <u>Volumen</u> .....	34
4.3 EVALUACIÓN DE NUTRIENTES EN HOJA.....	35
4.4 EFECTO DE ALGUNOS PARÁMETROS DE SUELO EN LAS VARIABLES EVALUADAS .....	37
5 <u>CONCLUSIONES</u> .....	43

6 <u>RESUMEN</u> .....	44
7 <u>SUMMARY</u> .....	45
8 <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	46
9 <u>ANEXOS</u> .....	59

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Figura No.

	Página
Figura No. 1: Caracterización agroclimática del periodo 2018-2020 .....	21
Figura No. 2: Localización del área de estudio.....	22
Figura No. 3: Mortalidad según tratamiento y comparación de medias .....	29
Figura No. 4: Mortalidad según periodo de liberación y dosis .....	31
Figura No. 5: Área basal según periodo.....	32
Figura No. 6: Contenido foliar de nutrientes con relación a la cantidad de fertilizante aplicada y el periodo de liberación.....	35
Figura No. 7: Media de sobrevivencia según bloque.....	38
Figura No. 8: Media área basal, altura y volumen según bloque .....	39
Figura No. 9: Media de contenido de nutrientes foliares según bloque.....	40
Figura No. 10: Comparación de los perfiles de suelos de los bloques.....	41

Tabla No.

Tabla No. 1 Dosis de nutrientes por planta que aportan los tratamientos para las cantidades de fertilizantes agregadas .....	25
Tabla No. 2 Tratamientos correspondientes a las unidades experimentales, resultado de la combinación de las cantidades agregadas de fertilizante Basacote Plus®, dosis en g por planta (G) y periodo de liberación en meses (M).....	25
Tabla No. 3 Tabla de p-valor para sobrevivencia .....	29

## 1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay se observan, a partir de la década de los 60, impulsos emitidos desde el Estado para el desarrollo del sector maderero, propiciándolo por intermedio de leyes y reglamentaciones. Las buenas condiciones ambientales locales, sumadas a claras señales políticas, generaron el clima necesario para el desarrollo del sector forestal, posibilitando la instalación de diversos proyectos tanto en la fase agraria como industrial. Entre ellos se destacan la instalación de aserraderos y plantas de producción de pulpa de celulosa.

En la instalación de una plantación forestal comercial en Uruguay, usualmente se realiza una fertilización de tipo “*starter*” al momento de su establecimiento, sin fertilizaciones posteriores. En este sentido, los fertilizantes de liberación controlada (FLC) constituyen una fuente de nutrientes comúnmente utilizada, siendo una alternativa tecnológica a la utilización de fertilizantes tradicionales (solubles). Los FLC poseen tecnologías que les permiten controlar la solubilización, posibilitando la presentación del fertilizante en diferentes periodos de liberación.

En los últimos años ha existido un cambio tecnológico relevante en la fertilización de plantaciones comerciales de *Eucalyptus grandis*, favoreciendo y difundiendo el uso de FLC. La escasa información nacional e internacional disponible sobre sus efectos, y en relación a dosis y periodo de liberación recomendadas, determina la necesidad de profundización en la generación de conocimiento sobre la temática.

Este trabajo busca evaluar las diferentes presentaciones de un fertilizante de liberación controlada que son relacionadas con diferentes periodos de liberación de nutrientes del FLC y la dosis utilizada en el establecimiento de una plantación forestal comercial. En este sentido, se evaluó la respuesta de la plantación a los factores periodo de liberación y dosis del producto, así como el efecto de las interacciones de los factores anteriormente mencionados en el primer año desde la implantación.

## **1.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del trabajo es cuantificar el efecto de la dosis y periodo de liberación de un fertilizante de liberación controlada aplicado en la plantación, así como la interacción entre estos factores, sobre el crecimiento y sobrevivencia de plantas en plantaciones comerciales de *Eucalyptus grandis* de un año de edad.

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

1. Evaluar el efecto de los factores dosis, y período de liberación del fertilizante de liberación controlada y su interacción en el crecimiento de los plantines al año de su instalación. A través del área basal, altura y volumen
2. Evaluar el efecto de los factores dosis, periodo de liberación del fertilizante de liberación controlada y su interacción sobre la sobrevivencia de plantas.
3. Evaluar el efecto dosis, periodo de liberación del fertilizante de liberación controlada y su interacción sobre la concentración foliar de nutrientes.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 REGULACIÓN Y DESARROLLO DEL RUBRO FORESTAL EN URUGUAY**

El rubro forestal en Uruguay ha sido uno de los sectores más dinámicos en la economía nacional, marcado por un constante crecimiento en las últimas décadas. Uruguay es un país tradicionalmente ganadero, por lo que es interesante el proceso de desarrollo del sector maderero. Se puede dividir en tres periodos: primer y segundo impulso e industrialización y consolidación del sector maderero descritos en Anexo I (Figura No. 1). A continuación, se describe brevemente dicho proceso.

Los primeros estímulos se dan en 1950, a partir de misiones de técnicos internacionales, se realizaron estudios para establecer el potencial de incremento de la base forestal nacional (Morales, 2007, Gutiérrez y Panario, 2014). En este sentido, se aconsejó al país realizar acciones orientadas hacia el desarrollo del conocimiento de sus suelos, permitiendo la planificación y la estimulación de todos los sectores agropecuarios (García Préchac, 2015). Los diversos estudios liderados por la CIDE (Comisión de Inversiones y Desarrollo Económico) confluyen en el año 1963, estableciendo el Programa de Desarrollo Forestal con objetivos que se materializan en: *i*) la creación en 1964 de la Dirección Forestal en el ámbito del Ministerio de Ganadería (Ley N° 13320) y *ii*) la aprobación de la Ley 13.723 en el año 1968, incentivando el desarrollo de plantaciones (Alvarado, 2009). Este nuevo marco institucional estimuló el aumento de la superficie forestal mediante plantaciones comerciales para el abastecimiento del mercado interno, sin embargo, no se colmaron las expectativas del sector (Carámbula y Piñeiro, 2006, Fossati y Van, 2006, Morales, 2007, Alvarado, 2009). No obstante, bajo este conjunto de estímulos se lograron establecer alrededor de 25.000 ha de plantaciones comerciales bajo capital nacional (Fossati y Van, 2006, Carámbula y Piñeiro, 2006).

El siguiente impulso ocurrió en la década de los 80's, momento en el que se elaboró el "Plan Maestro para el desarrollo de plantaciones forestales y su utilización en el Uruguay" (Gutiérrez y Panario, 2014). Este plan derivó en la aprobación de la Ley

15.939 en el año 1987 (Alvarado, 2005, Morales, 2007). En esta regulación, se declaró de interés nacional la actividad forestal en todas sus fases (Alvarado, 2005). Los objetivos de esta Ley fueron: *i*) promover la instalación de plantaciones comerciales para uso industrial y la protección del bosque nativo (Carámbula y Piñeiro, 2006, Fossati y Van, 2006) y *ii*) aumentar y diversificar la exportación de productos forestales (Morales, 2007). En este sentido, se establecieron subsidios directos a la plantación, exoneración total de impuestos y accesibilidad preferencial a créditos blandos (Fossati y Van, 2006). Como resultado de estos incentivos la superficie de plantaciones comerciales se incrementó fuertemente, superando las 700.000 ha plantadas en el año 2000 (Tamosiunas, 2011).

La política de estímulos produjo una revolución en el campo uruguayo donde la presencia de compañías extranjeras ha sido determinante para el desarrollo del sector maderero, permitiendo construir un modelo de desarrollo forestal (Gautreau, 2014). Estas empresas han desembarcado en el país dada la buena combinación de los factores que determinan la inversión: buenas tasas de crecimiento y rendimiento, bajos costos, duración de la rotación acotada, precios elevados de los productos y bajo riesgo (Cubbage et al., 2007, 2010). En este tipo de organizaciones, se ha observado una tendencia a incrementar el nivel tecnológico, practicándose una intensa preparación del suelo, fertilización y un cuidadoso control de malezas y hormigas, procurando no incurrir en costos excesivos y determinando que continuamente se estén ajustando las prácticas de manejo (Methol, 2001).

## **2.2 PLANTACIONES COMERCIALES**

FAO (2021) define a las plantaciones forestales como una subcategoría de bosque plantado el cual se maneja de manera intensiva. Las mismas cumplen con los siguientes requisitos: constituido por una o dos especies, tener clase de edad uniforme y espaciamiento regular, establecido para la producción de madera, fibra, energía y productos forestales no maderables. Las plantaciones forestales compuestas por especies introducidas (exóticas) representan las plantaciones comerciales. La ordenación intensiva

y producción sostenible son el nuevo paradigma en el sector forestal, concentrando la producción de madera en aquellos sitios donde el manejo de prácticas intensivas produce altas tasas de crecimiento (Fox, 2000).

### **2.2.1 Productividad potencial, sitio forestal y manejo**

La productividad potencial en el sentido estricto es la síntesis primaria de materia orgánica a partir de dióxido de carbono, agua y nutrientes a través de la absorción de energía lumínica, mientras que, en sentido amplio es la producción neta de biomasa en una unidad de área (sitio) por unidad de tiempo (Powers, 1999). La capacidad productiva de un sitio que se describe en el Anexo I, Figura No. 2, está dada por combinaciones únicas producto del: clima, suelo, topografía (Powers, 1999) y el nivel máximo de área foliar que un genotipo puede alcanzar (Rubilar et al., 2018).

La productividad actual es aquella medible en cualquier momento, es móvil y encuentra su techo en los factores principales: el clima y las propiedades no modificables del suelo (Powers, 1999). El manejo intensivo implica una activa manipulación de los factores que afectan la productividad a través de diversas prácticas silvícolas (Fox, 2000) donde la gestión puede incidir (Powers, 1999). Si el manejo silvícola se combina con una correcta comprensión de las limitantes del sitio, existe la oportunidad de acortar la brecha entre la productividad actual y la máxima alcanzable en un sitio específico (Rubilar et al., 2018). Por lo tanto la silvicultura implica una serie de tratamientos que interactúan de manera específica y simultánea mediante la ecuación Genotipo x Ambiente x Silvicultura, seleccionando la mejor combinación desde una perspectiva económica y silvícola a largo plazo (Rubilar et al., 2018).

### **2.2.2 Descripción de la especie *Eucalyptus grandis*.**

*Eucalyptus grandis* se describe como un gran árbol, de alto a muy alto porte, tronco recto y muy buen desrame natural: hasta 2/3 - 3/4 de la altura total. Posee follaje de textura media a gruesa; corteza rugosa grisácea y escamosa: caduca en largas fajas,

donde la porción basal es persistente (1 a 4 m de altura) (Boland y McDonald, 2006). Se emplea como insumos de diversas industrias: madera elaborada, celulósica, energética (Brussa, 1994, Boland y McDonald, 2006) y química (Uruguay XXI, 2016).

Naturalmente la especie se localiza en el este del continente australiano, en áreas disyuntas de la región norte y centro costero (sur). Esta área está caracterizada por su diversidad en las condiciones ambientales con precipitaciones estivales cuya media anual es de 1.000 a 3.500 mm, temperaturas promedio máximas de 24-32 °C y mínimas de 3-17 °C, heladas escasas en zonas alejadas de la costa, registros altitudinales de entre 0 y 1.100 m, clima templado al sur y continental al norte (Brussa, 1994, Boland y McDonald, 2006). Actualmente se trata de una de las especies más empleadas en plantaciones comerciales por su conformación y velocidad de crecimiento, las que pueden verse sensiblemente disminuidas en sitios poco aptos (Brussa, 1994).

### **2.2.3 Preparación del suelo.**

La decisión de laborear el suelo debe basarse principalmente en el análisis de tres factores: limitaciones de oxígeno de las raíces, resistencia mecánica al desarrollo radicular y disponibilidad de agua (Rubilar et al., 2018). La preparación del suelo puede ayudar a superar limitaciones disminuyendo la resistencia mecánica que éste ofrece a las raíces (Gonçalves et al., 2004) y aumentando la infiltración al romper capas compactadas o endurecidas (Gonçalves et al., 2013). La resistencia mecánica que ofrece el suelo al crecimiento de la raíz es proporcional a la compactación y cohesión del suelo (Gonçalves et al., 2004) por lo que la respuesta potencial a la preparación es menor en suelos friables (textura gruesa o ricos en óxidos) (Gonçalves et al., 2013).

La gran variabilidad de suelos en nuestro país genera combinaciones específicas de sitios, registrando variaciones en la productividad en función de la intensidad de laboreo en conjugación con otras prácticas silvícolas. Methol (1996) asegura una alta relación entre intensidad de laboreo y producción medida a los 10 meses, pero establece que hay que tener en cuenta los riesgos de erosión, donde el laboreo en fajas es una

alternativa. Sin embargo, García Préchac et al. (2001) detectaron que estos efectos se diluyeron al segundo año pero con incidencias de mayores pérdidas de materia orgánica y propiedades físicas a mayores intensidades. González Barrios et al. (2015) establecieron que en la medida que aumenta la calidad del sitio, no existen diferencias significativas para el crecimiento de los árboles a diferentes intensidades de laboreos. Estos estudios impulsan a interpretar correctamente las limitantes específicas del suelo para realizar operaciones de manera óptima y no incurrir en costos excesivos.

#### **2.2.4 Control de malezas**

La remoción de vegetación competidora puede ser la actividad silvícola más importante, especialmente porque proporciona a la especie cultivada acceso exclusivo a los recursos del ambiente: agua, nutrientes y luz (Rubilar et al., 2018). En términos generales, las malezas disminuyen la disponibilidad de nutrientes y agua al cultivo, dado que sus raíces se concentran en las capas superficiales del suelo con una densidad de raíces hasta 100 veces mayor que para las plántulas del cultivo (Sadanandan, 1990, Sadanandan y Sands, 1993). La importancia relativa de esta competencia depende de las características del sitio: suelo, clima y vegetación, a partir de las cuales, mediante la comprensión de los procesos involucrados en la competencia entre malezas y árboles, se definen prácticas apropiadas de control (Sadanandan y Sands, 1993).

En Uruguay, generalmente el control de malezas se realiza con herbicidas en el surco de plantación, aplicados en momentos previos y posteriores a la plantación, mediante el uso de glifosato y herbicidas pre-emergentes, respectivamente (Villalba et al., 2010). Este control permite una economía de herbicidas y una buena protección del suelo, reduciendo los costos del manejo (Gonçalves y De Barros, 1999).

#### **2.2.5 Control de hormigas**

Las hormigas cortadoras de hojas son consideradas una de las principales plagas de las plantaciones forestales en América tropical y subtropical. Estos himenópteros

presentan actividad durante todo el año afectando prácticamente a todos los cultivos y, en particular, a las plantaciones de pinos y eucaliptos (Dimarco, 2019). Sus ataques pueden causar la defoliación parcial o total de plántulas y rebrotes, lo que afecta el rendimiento económico de las plantaciones comerciales. El método usualmente utilizado para el control de las hormigas previo y posteriormente a la plantación es la aplicación de insecticidas (Fipronil) para eliminar los nidos, en forma de cebos granulados o polvos (Dimarco, 2019).

### **2.2.6 Fertilización**

El objetivo general de la fertilización es proporcionar niveles adecuados de nutrición a los árboles en sus primeras etapas de desarrollo (Gonçalves y De Barros, 1999). La disponibilidad de nutrientes en suelo es uno de los factores que afectan la capacidad de carga de la masa foliar y aprovechamiento del sitio (Sadanandan y Sands, 1993). La cantidad de fertilizante requerida varía considerablemente según: los factores del suelo, contenido de materia orgánica, el material parental y el régimen hídrico (Gonçalves y De Barros, 1999).

La fertilización es realizada al momento de la plantación, mientras que el método de aplicación suele variar dependiendo el tipo de fertilizante utilizado. Las fuentes más utilizadas son los fertilizantes solubles y últimamente los fertilizantes de liberación controlada (FLC). Las cantidades de fertilizante aplicadas son del orden de los 100 g por planta para los fertilizantes solubles, aplicados en 2 orificios a ambos costados de la planta (Methol, 2001) y 10 - 20 gr por planta para los FLC, colocados en contacto con las raíces de los árboles (Reyes-Millalón et al., 2012). En general, no se realizan re-fertilizaciones durante la rotación.

## **2.3 NUTRICIÓN DE LOS BOSQUES**

El crecimiento vegetal depende de la fotosíntesis, absorción de agua y nutrientes que puedan adquirir las plantas (Rabuffetti, 2017). Los nutrientes son elementos minerales

que están implicados en el metabolismo o fases metabólicas de las plantas y en su ausencia la planta es incapaz de completar su ciclo vital (Marschner y Rengel, 2012, Bonilla, 2013).

### **2.3.1 Nutrientes**

Los nutrientes (Anexo II, Figura No. 1) se clasifican según las concentraciones relativas halladas en los tejidos vegetales o cantidades necesarias en la solución del suelo:

- **Macronutrientes:** son aquellos requeridos en grandes cantidades.
- **Micronutrientes:** son aquellos requeridos en muy pequeñas concentraciones.

Los vegetales solo pueden absorber los nutrientes en formas iónicas desde la solución del suelo, absorción que depende de tres procesos: *i*) crecimiento e intercepción radicular, *ii*) flujo masal y, *iii*) difusión. Estos procesos son afectados por varios factores, como por ejemplo: por el nutriente en valoración, el suelo, la planta y el medio ambiente (Marschner y Rengel, 2012). La disponibilidad de los nutrientes en la solución del suelo depende de la interacción: suelo x planta x ambiente x nutriente, donde la concentración en la solución siempre es una pequeña fracción del total de nutriente en el suelo. En la medida que el suelo presenta limitantes para mantener una concentración adecuada para la planta, se recurre a la fertilización, actividad que tiene el objetivo de elevar los contenidos de nutrientes en la solución del suelo facilitando la absorción de los mismos por las plantas. El nitrógeno (N), junto con el fósforo (P) y el potasio (K) son elementos claves en la nutrición mineral, componentes principales de los fertilizantes de difusión comercial (Bonilla, 2013, Rabuffetti, 2017). La fertilización con micronutrientes, como el Boro (B), se ha visto favorecida en sitios empobrecidos y de alta demanda por sus condiciones ambientales (Ferrando y Zamalvide, 2012).

El N es el nutriente más importante para el desarrollo de la planta. La reserva más importante es la materia orgánica del suelo (MOS), dado que del total de N que hay en el suelo, aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos. Dichas formas no son asimilables para las plantas, debiendo el N ser mineralizado a

formas inorgánicas para su absorción por la planta. Por otra parte, las formas disponibles (inorgánicas) son fácilmente perdidas por su poca adsorción por parte del suelo (Rabuffetti, 2017). Dentro de sus funciones, este nutriente actúa como constituyente de proteínas (enzimas, nucleoproteínas), aminoácidos y clorofila (Barbazán, 1998, Marschner y Rengel, 2012, Bonilla, 2013).

El **P** cumple funciones de almacenamiento y transferencias de energía (ATP, ADP), así como constituyente de ácidos nucleicos y fosfolípidos (Barbazán, 1998, Dell et al., 2000). Este nutriente, se encuentra bajo formas orgánicas e inorgánicas y se clasifica en el suelo bajo tres pools, según la disponibilidad para las plantas: P en la solución del suelo, P lábil y P no lábil. Es el primer factor limitante nutricional al roturar campo natural para la producción vegetal en suelos del Uruguay. Las plantas absorben el P proveniente de la solución del suelo la cual va a depender de los equilibrios entre los pools, la planta y el ambiente. Contrariamente al N, para el P existen varios mecanismos de adsorción presentes en los suelos; confiriéndole una alta estabilidad a los compuestos fosfatados, como consecuencia de su baja solubilidad (Rabuffetti, 2017).

El **K** desempeña funciones en la translocación, apertura de estomas, balances de cationes y aniones, relaciones energéticas y como activador de enzimas. Este nutriente junto con el N, son los requeridos en mayor cantidad por las plantas (Hernández, 1992, Bonilla, 2013, Marschner y Rengel, 2012). El K en los suelos se encuentra en forma inorgánica y se ha clasificado en cuatro pools: mineral (estructural), no intercambiable (fijado o lentamente intercambiable), intercambiable y en solución. El K está asociado a formas inorgánicas y su dinámica depende de equilibrios químicos. El contenido de K en los suelos por lo general es mayor que los otros nutrientes, con una gran variabilidad en función del material parental y grado de meteorización de los suelos (Rabuffetti, 2017).

El **Ca** es un componente de la pared celular y como tal es esencial para mantener la estructura y la permeabilidad de las membranas celulares, así como la división y alargamiento celular (Del Pino, 1997, Hawkesford et al., 2012). Es abundante en la mayoría de los suelos y rara vez se comporta como factor limitante (Mongue et al., 1995,

Bonilla, 2013). El Ca se puede encontrar en los suelos en muy variada proporción, dependiendo en gran medida del material parental (Mongue et al., 1995, Del Pino, 1997). Sus formas minerales más frecuentes son: carbonatos, fosfatos, sulfatos y algunos silicatos; los dos primeros con una solubilidad muy variable y prácticamente insolubles el resto (Mongue et al., 1995).

El **Mg** se encuentra en el centro de la clorofila, siendo esencial para el proceso de fotosíntesis. A su vez, actúa como cofactor de prácticamente todas las enzimas y componente estructural de los ribosomas (Rabuffetti, 2017). No es casi nunca un factor limitante para las plantas, salvo en suelos muy ácidos o arenosos (Bonilla, 2013).

El **B** es un oligoelemento esencial para el desarrollo de las plantas. Desempeña funciones en los sitios de crecimiento, utilizado en paredes y membranas celulares (Barbazán, 1998, Marschner y Rengel, 2012, Bonilla, 2013). La mayoría de los suelos tienen bajos contenidos de B, entre el 5% y 10% del B total del suelo se encuentra fácilmente disponible para las plantas y proviene fundamentalmente de la descomposición de la MOS y del B adsorbido en la superficie de las partículas del suelo (Ferrando, 2010, Ferrando y Zamalvide, 2012). Su disponibilidad es afectada por el pH, temperatura, humedad, textura del suelo y la interacción con otros elementos (Ferrando, 2010).

### **2.3.2 Ciclo de nutrientes**

La interacción suelo x planta x ambiente x nutriente es tomada por Laclau et al. (2010) a partir del enfoque propuesto por Switzer y Nelson (1972) para describir los ciclos de nutrientes en los ecosistemas forestales (Anexo II, Figura No. 2), identificándose tres subciclos: *i*) el geoquímico que abarca las relaciones de importación-exportación de nutrientes, *ii*) el biogeoquímico ciclo que abarca la relación suelo-planta, y *iii*) el bioquímico que se refiere a translocaciones internas de nutrientes dentro de los árboles. Los bosques, a diferencia de los cultivos, poseen tres etapas de crecimiento claramente diferenciadas en las cuales existen variaciones en las demandas y suministros nutricionales (Miller, 1981).

La etapa I del desarrollo de las plantaciones comerciales ocurre desde la plantación hasta el cierre del dosel (Miller, 1981). Todos los meristemas están activos por lo que en esta etapa el crecimiento de los árboles depende de los nutrientes aportados por el suelo (Miller, 1981). La disponibilidad de nutrientes en la solución del suelo ajustarán la tasa de crecimiento del árbol dentro de las limitaciones de otras variables ambientales (Cromer et al., 1993). En el árbol, existe un aumento de la demanda nutritiva proporcional al crecimiento, hasta lograr la capacidad de carga foliar del sitio, momento que corresponde a la tasa máxima de absorción de nutrientes y los rodales aprovechan al máximo la capacidad del sitio para suministrar agua y nutrientes (Powers, 1999).

En la etapa II del crecimiento de las plantaciones, después del cierre del dosel, comienzan a bajar los requerimientos nutricionales, los residuos comienzan a acumularse, en conjunto con una inmovilización parcial de los nutrientes (Miller, 1981). En esta etapa la demanda de agua se vuelve constante y dependiente del área foliar (Powers, 1999). Esta situación desencadena en el cultivo una serie de eventos: el índice de área foliar alcanza su punto máximo, reducción de la demanda de nutrientes y mejora de los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes (Rocha et al., 2019). Las respuestas a la fertilización en esta etapa son poco probables a menos que la biomasa contenida en el follaje tenga que ser reconstruida (Powers, 1999). Los fertilizantes son valiosos antes del cierre del dosel aunque la eficiencia de la absorción es baja, este es el momento en que el administrador, mediante una aplicación adecuada de fertilizante, puede influir más en el desarrollo de la plantación (Miller, 1981). En esta etapa la demanda es máxima, requiriendo nutrientes fácilmente disponibles, por lo que si los fertilizantes no suministran adecuadamente los mismos, se convierten en el principal factor limitante del crecimiento (Rocha et al., 2019).

La etapa III, dependerá del capital de nitrógeno del sitio y aparecerá solamente en situaciones de deficiencia (Miller, 1981), en plantaciones comerciales de Uruguay no se han visto aún registros para esta etapa.

### **2.3.3 Evaluación de nutrientes en el agro-ecosistema suelo-árbol**

Los análisis de suelos y foliares son las principales herramientas disponibles para evaluar la disponibilidad de nutrientes del sistema; donde a partir de una correcta interpretación, se determina la necesidad de fertilización (Dell et al., 2000, Soares et al., 2021). Por ejemplo en Brasil, los análisis de suelos son comparados con tablas de interpretación conformadas por niveles o rangos para el cultivo de *Eucalyptus* propuestas y actualizadas por la Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (2016), que constituyen la base para la recomendación de la fertilización. Para nuestro país no se encuentran disponibles este tipo de tablas.

Los análisis foliares permiten conocer el estado nutricional del cultivo en base a concentraciones de nutrientes estandarizados, para una edad y productividad dada (Soares et al., 2021). La relación entre la concentración de un nutriente en una planta o en una parte de la misma y el rendimiento constituye la base de muchos esquemas para usar el análisis de tejido u órgano de la planta como herramienta para evaluar el estado nutricional del cultivo. Existen varios métodos de interpretación de los datos, sin embargo, los estudios recientes se han centrado en: *i*) Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS) (Walworth y Sumner, 1987), *ii*) DRIS-modificado (Hallmark, 1987) y *iii*) CND, diagnóstico de nutrientes composicionales (Parent y Dafir, 1992).

## **2.4 FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN CONTROLADA.**

### **2.4.1 Uso y aplicación de fertilizantes**

Las características del desarrollo del bosque brinda la oportunidad de maximizar la producción a través del manejo silvicultural, entre ellos la fertilización (Sadanandan, 1990). El administrador opta por el momento y método de aplicación del fertilizante con el fin de aumentar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, para que el árbol rápidamente logre ocupar el sitio (Cromer et al., 1993). En general, el método de aplicación de fertilizantes recomendados por INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria)

es: dosis del orden de 100 g por planta de fertilizantes balanceados, fosfatados (fosfato mono-amónico y di-amónico), distribuidos en 2 orificios a 20-40 cm del tallo y una profundidad de 10-15 cm en plantación (Methol, 2001). El uso de fertilizantes convencionales puede presentar algunos problemas potenciales: escorrentía superficial de nutrientes, desnitrificación, lixiviación y volatilización como consecuencia de su gran solubilidad, e interacción con factores de suelo, clima y manejo; provocando pérdidas económicas (baja eficiencia) y problemas ambientales (Irfan et al., 2018). Hoy la práctica de fertilización se ha visto cambiada en favor de nuevas tecnologías de fertilizantes de liberación controlada (FLC), las cuales han permitido modificar el método de aplicación y utilizar menores dosis. Dada la ganancia en popularidad de esta alternativa en la fertilización forestal (Rose et al., 2004), el trabajo reciente de los investigadores se ha centrado en la aplicación de FLC añadidos en contacto con las raíces durante la plantación (Silva et al., 2015, Rubilar et al., 2018), con dosis de 10 a 20 g por plantín (Reyes-Millalón et al., 2012). La presente investigación pretende generar conocimiento local sobre estas nuevas alternativas.

#### **2.4.2 Fertilizantes de Liberación Controlada.**

El término “fertilizante de liberación controlada” (FLC) describe a fertilizantes que no liberan el 100% de los nutrientes al momento de la aplicación, sino que la entrega de los nutrientes es variable y retardada (Rose et al., 2004). La tasa y perfil de liberación de los nutrientes depende de la tecnología de control que usa el fertilizante. Las tecnologías aplicadas a fertilizantes para controlar la solubilización de los nutrientes se encuentran registradas desde el año 1924, consecuencia de los inminentes problemas asociados al uso de fuentes de solubilidad inmediata (Varadachari y Goertz, 2010). Al día de hoy existe una nueva generación de fertilizantes disponibles, que pueden controlar la tasa de entrega de los nutrientes provenientes del fertilizante, constituyendo una potencial solución a los problemas derivados del uso de fertilizantes convencionales (Raimondi et al., 2021).

El uso de estas tecnologías ofrecen muchas ventajas en comparación con los fertilizantes tradicionales, entre ellas se destacan la mayor eficiencia de uso, menor contaminación ambiental, mayor duración y menores costos laborales (Qiao et al., 2016). Sin embargo, el fertilizante tiene que tener perfiles de tasas de liberación de nutrientes acompañados con las necesidades metabólicas de las plantas (Irfan et al., 2018).

#### **2.4.2.1 Tecnologías de control sobre la liberación del nutriente en fertilizantes.**

En esencia, existen dos métodos de control por los cuales los fertilizantes cumplen el objetivo de adaptar la entrega de nutrientes y obtener diferentes perfiles de liberación (Varadachari y Goertz, 2010, Raimondi et al., 2021):

1. Liberación por control bioquímico: implica retrasar la disponibilidad de nutrientes del fertilizante explotando procesos químicos y biológicos en la rizosfera, a partir de: *i)* utilización de inhibidores; *ii)* conversión a formas poliméricas menos solubles (Varadachari y Goertz, 2010) y; *iii)* utilización de sensores químicos y/o biológicos de los gránulos del fertilizante (Raimondi et al., 2021).
2. Liberación por control físico: mediante el uso de cápsulas, se recubren agregados de sales fertilizantes. Se utilizan estos recubrimientos con el fin de disminuir el potencial de degradación de los fertilizantes, a partir de uno o más de estos procesos: *i)* reducir la solubilidad de fertilizantes en agua; *ii)* incrementar la resistencia mecánica; *iii)* incrementar la resistencia a la abrasión y; *iv)* mejorar la capacidad de retención de agua (Varadachari y Goertz, 2010, Adams et al., 2013, Raimondi et al., 2021).

#### **2.4.3 Fertilizantes de liberación controlada recubierto de polímeros**

Los fertilizantes más utilizados se denominan “Fertilizante de Liberación Controlada (FLC)” y aplican tecnologías de control físico a partir de diversos recubrimientos haciéndolos predecibles (en laboratorio), presentando diferentes periodos de liberación (Beig et al., 2020). Estos fertilizantes son los más difundidos y consisten en

un núcleo de sales (uno o más nutrientes) solubles, rodeados por un recubrimiento para controlar la liberación de nutrientes del fertilizante (Landis y Dumroese, 2009). Los FLC adoptan tres formas dependiendo de cómo quedan agregadas las sales en los núcleos del fertilizante: mini gránulos (“*prills*”), gránulos o “*tablets*” (Beig et al., 2020). Los recubrimientos constan de una barrera física para el control de la liberación del nutriente y puede estar compuesta por sustancias poliméricas o mineral inorgánico (Varadachari y Goertz, 2010, Raimondi et al., 2021).

Los FLC recubiertos de polímeros son considerados los de mayor avance tecnológico debido a su alta eficiencia en el control de la entrega de nutrientes y la duración del producto (Landis y Dumroese, 2009). Los revestimientos están formados a partir de mezclas de polímeros, que según su origen se clasifican como: en base a petróleo, biodegradables y polisacáridos (Raimondi et al., 2021).

Los FLC recubiertos de polímeros más exitosos y disponibles tienen cubiertas en las cuales predominan las mezclas con alta proporción de polímeros basados en petróleo, ya que proporcionan en gran medida insensibilidad a la actividad biológica, el pH y el tipo o textura del sustrato (Adams et al., 2013, Majeed et al., 2015, Beig et al., 2020). Sin embargo, esta clase de FLC plantea algunos problemas ambientales, debido al uso de productos químicos y solventes difíciles de reciclar en la síntesis de la cubierta del fertilizante y baja degradabilidad (Raimondi et al., 2021). La mayoría de los FLC recubiertos con polímeros son multinutrientes y presentan formulaciones con proporción de N-P 2:1 (Haase et al., 2007).

#### **2.4.4 Proceso de liberación de nutrientes**

La liberación de nutrientes es controlada por los siguientes factores: la composición química, propiedades físicas, espesor y elasticidad del recubrimiento; el radio de los gránulos; los solutos internos y las interacciones con las condiciones ambientales (Adams et al., 2013, Raimondi et al., 2021). En función de los factores anteriormente mencionados, estos fertilizantes liberan sus nutrientes durante períodos de

3 a 18 meses (Landis y Dumroese, 2009, Raimondi et al., 2021). Según Adams et al. (2013) este proceso de liberación ocurre en 3 fases:

1. Fase de retraso: esta etapa ocurre cuando los gránulos de fertilizante se exponen a la humedad del suelo, donde el agua en forma de vapor difunde a través de la membrana e hidrata las sales fertilizantes. El aumento progresivo de la cantidad de agua en el interior comienza la disolución de las sales con consecuente aumento de la presión osmótica e hinchazón del gránulo (Gambash et al., 1990, Irfan et al., 2018, Raimondi et al., 2021). La duración de la fase depende del tiempo en que el agua llene todos los espacios dentro del gránulo (Adams et al., 2013).
2. Periodo de liberación: El mecanismo de liberación de los fertilizantes es resultado de procesos de transporte de los nutrientes a través de la película de recubrimiento (Irfan et al., 2018). Adams et al. (2013) caracteriza este periodo como lineal, destacando que la fuerza impulsora es la difusión y permanece constante en la medida que las sales no disueltas mantienen los gradientes de concentración. Aunque muchos investigadores consideran que el transporte por la membrana es impulsado por gradientes de concentración, otros han agregado procesos no lineales adicionales: antes, después o conjuntamente con la difusión (Irfan et al., 2018). Si la membrana resiste la presión interna, la liberación de los nutrientes es impulsada por dos mecanismos: difusión que responde a gradientes de concentración y flujo másico consecuencia de la presión y disolución o degradación de la membrana (rotura del revestimiento) (Irfan et al., 2018, Raimondi et al., 2021). Si la presión osmótica excede la resistencia de la membrana en recubrimiento, la liberación puede ser masiva y se denomina “mecanismo de falla” o “liberación catastrófica” (Irfan et al., 2018).
3. Descomposición/Degradación. La tasa de liberación del fertilizante decrece en la medida que la concentración de los nutrientes disminuye dentro del gránulo (Adams et al., 2013).

#### **2.4.5 Factores que afectan el proceso de liberación.**

Los efectos de los siguientes parámetros del fertilizante se consideran en modelos predictivos de liberación: *i)* solubilidad de los solutos del fertilizante; *ii)* conductancia de la membrana; *iii)* distribución de la densidad de la cápsula; *iv)* tamaño de la fuente y; *v)* contenido de humedad del suelo (Irfan et al., 2018). Dentro de los factores extrínsecos que afectan el proceso de liberación, el más importante es la humedad del suelo, determinando el periodo de retraso. La temperatura, puede cambiar los parámetros que afectan el proceso de liberación. Como resultado el periodo de liberación de nutrientes difiere según la temperatura y la formulación de la cubierta del FLC manteniendo los perfiles de liberación (Huett y Gogel, 2000).

Varias empresas han desarrollado materiales de revestimiento poliméricos y procesos de fabricación que son únicos para cada tipo de FLC (Adams et al., 2013). Por lo que cada FLC registrado en el mercado difiere uno de otro. Las etiquetas con la información sobre el tiempo de liberación designada a los fertilizantes es determinada en condiciones controladas de laboratorio, en agua y a temperatura constante generalmente 21°C (Haase et al., 2007). La tasa más alta de liberación ocurre en el comienzo de la segunda fase del proceso, descargando un porcentaje considerable de nutrientes después de que el gránulo se llena de agua luego de su aplicación (Huett y Gogel, 2000, Haase et al., 2007). La entrega real de nutrientes del fertilizante bajo condiciones de campo puede ser considerablemente variable entre distintos productos y sitios. Esto implica que, durante la aplicación en campo, debe considerarse la humedad y temperatura del suelo, ya que de estos factores dependerá la fase de retraso y los mecanismos de liberación de los nutrientes. Estudios indican que puede existir un incremento de la tasa de liberación de entre 13 y 19% con un aumento de 10° C (Haase et al., 2007). Por otro lado, existen indicios de una alta y diversa residualidad de nutrientes en los FLC medida a las 62 semanas después de la aplicación, situándose entre el 48 y 72% para periodos de liberación corta y larga, respectivamente (Huett y Gogel, 2000). La entrega de lo remanente

dependerá del tiempo de exposición, temperatura y la humedad del suelo (Rose et al., 2004).

#### **2.4.6 Aplicaciones**

El uso de FLC es una alternativa de fertilización viable y ampliamente utilizada en vivero. Para la utilización en campo, durante el trasplante, el FLC puede colocarse debajo o cerca de las plantas (Jacobs et al., 2003). Algunos investigadores recomiendan colocar los gránulos en el fondo del hoyo de plantación, lo que garantiza que los nutrientes liberados sean fácilmente accesibles para planta (Gleason et al., 1990). A su vez, dosis excesivas en el fondo del hoyo pueden generar acumulación de sales con el consecuente quemado de raíces (Huett y Gogel, 2000). Al estar en contacto con el cepellón del plantín, la aplicación de estos fertilizantes se realiza normalmente con dosis inferiores a aquellas de los fertilizantes hidrosolubles tradicionales (Reyes-Millalón et al., 2012).

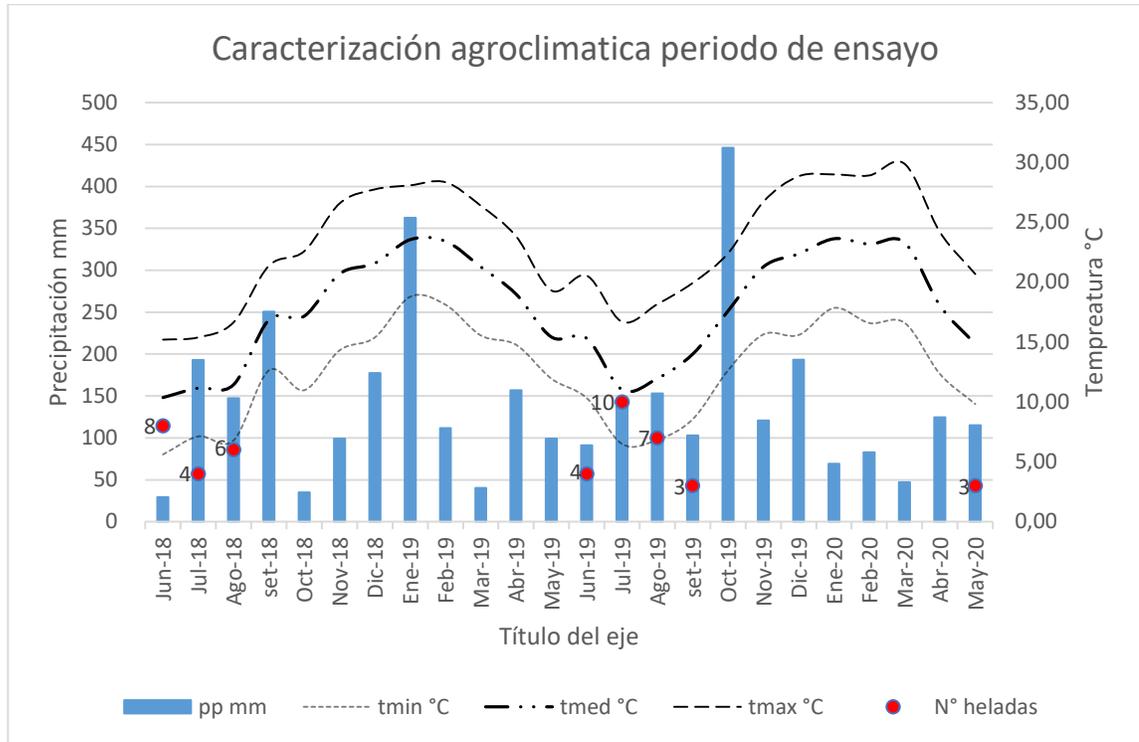
### **3 MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO**

En Uruguay existe gran variabilidad de los factores que componen al sitio, determinado por su situación geográfica y relieve. El país se encuentra ubicado en una región de importantes variaciones climáticas en todas las escalas de tiempo; sus condiciones climáticas son resultado de las corrientes atmosféricas continentales y las temperaturas de los océanos circundantes (Barreiro et al., 2019). El producto de la interacción clima, geología y topografía en el tiempo ha generado en el país, perfiles de suelos variables tanto horizontal como verticalmente.

En la clasificación Köppen (Cfa) Uruguay pertenece al grupo de clima templado sin estaciones secas, donde las temperaturas en el verano superan los 22°C. La media anual es de unos 17,7°C con variabilidad estacional (Castaño et al., 2011). El promedio anual de precipitaciones oscila entre los 1200 mm, en la zona suroeste (Colonia) aumentando en dirección noreste alcanzando como máximo los 1600 mm en el departamento de Rivera, sin la existencia de estacionalidad (Castaño et al., 2011). Los datos del periodo de ensayo se tomaron de la estación agrometeorológica de INIA Tacuarembó (Figura No. 1).

**FIGURA NO. 1: CARACTERIZACIÓN AGROCLIMÁTICA DEL PERIODO 2018-2020**

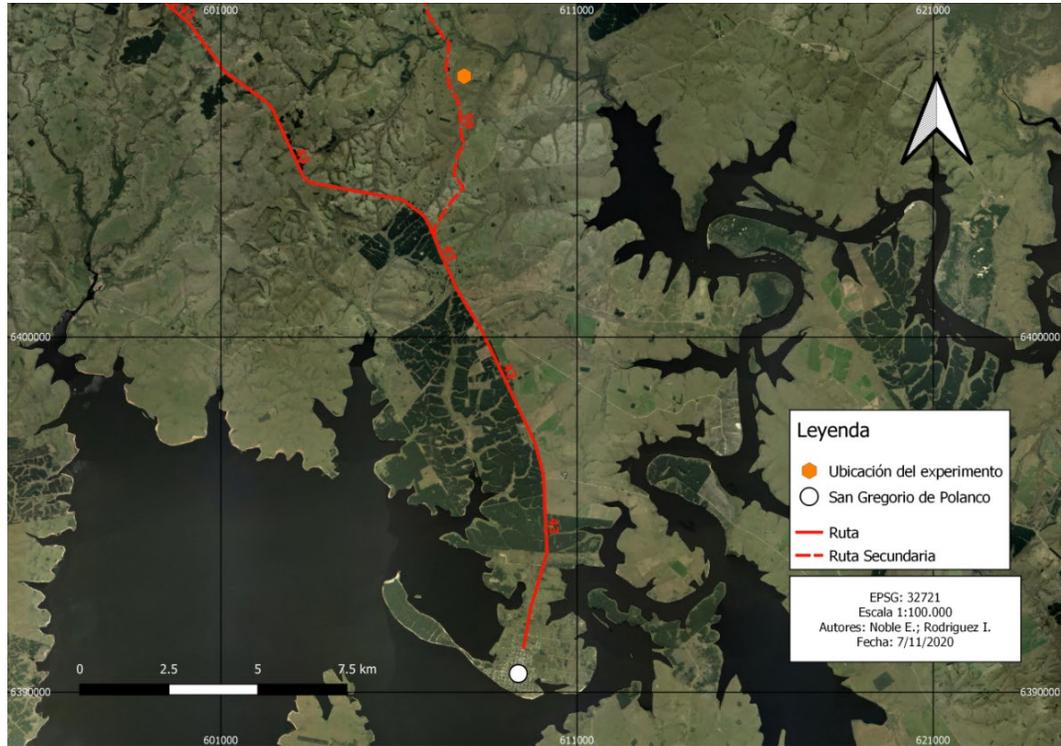


**Fuente:** elaborado en base a INIA (s.f.).

Donde: pp mm: Precipitación mensual en milímetros; t<sub>mín</sub>°C: Temperatura media mínima mensual; t<sub>med</sub>°C: Temperatura media mensual; t<sub>máx</sub>°C: Temperatura media máxima; N° heladas: Número de heladas mensuales.

El experimento se realizó y evaluó desde noviembre de 2018 a noviembre de 2019. El mismo se encuentra ubicado a 16 km al Norte de la localidad de San Gregorio de Polanco, departamento de Tacuarembó (32°27'54"S y 55°51'11"O) (Figura No. 2).

FIGURA NO. 2: LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



El área de estudio, según la Carta de Reconocimiento de suelos a escala 1:1.000.000 se encuentra la unidad Rincón de Zamora (Anexo III, Figura No. 1). Los suelos dominantes son: Brunsoles Subéuticos Típicos y Brunsoles Dístricos Lúvicos; asociados a: Argisoles Dístricos Ócricos Típicos, Luvisoles Melánicos Típicos y Acrisoles Ócricos Típicos. A su vez, el área se ubica sobre la Formación San Gregorio en la Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000 (Anexo III, Figura No. 2). El grupo de suelos CONEAT presente en el área de estudio es el 8.14 (Anexo III, Figura No. 3). La colecta de material perteneciente a la cantera ubicada en las coordenadas  $32^{\circ}46'51''S$   $55^{\circ}84'57''O$  a 700 m de la instalación del ensayo permitió determinar la presencia de tillitas arenosas y areniscas de la Formación San Gregorio (Anexo III, Figura No. 4).

### **3.1.1 Caracterización edafológica**

La evaluación edáfica se realizó mediante la descripción de perfiles de suelos obtenidos con taladro holandés, según ubicación topográfica en una ladera convexa de pendiente promedio 5%, de aproximadamente 1 hectárea de superficie dirección noroeste (Anexo III, Figura No. 5, 6 y 7). Los perfiles allí encontrados tienen mucha similitud con los perfiles modales que detalla la memoria de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 (MAP. DSF, 1976).

La zona presenta un relieve general de colinas y lomadas fuertes, con pendientes de 5% en promedio, sin afloramientos rocosos. La erosión actual es ligera, con susceptibilidad ante procesos erosivos. Los suelos son de textura franca en sus horizontes superficiales con presencia de gravillas medias-gruesas. El uso previo del suelo era de tipo pastoril, basado en campo natural.

En términos generales, los suelos del área experimental son moderadamente profundos, con características físicas que permiten un buen desempeño productivo de las plantaciones forestales. Su textura superficial franca sin transiciones abruptas junto a la profundidad le confiere buena aireación y permeabilidad e infiltración media. La clase de aptitud, según la clasificación Sganga, citado por Durán y García Préchac (2007), pertenece a Clase II, denominada como “tierras aptas con escasas limitaciones”. La principal limitante es la presencia de una “Stone line”.

### **3.1.2 Preparación del sitio**

La preparación del sitio constó de varias tareas en diferentes etapas y fue realizada de manera mecanizada. El control de malezas previo a la plantación fue realizado en área total, aplicando herbicidas con secuencial laboreo primario y secundario en las filas de plantación, aplicando técnicas de mínimo laboreo (1/3 del área total). El control de hormigas se llevó a cabo mediante la aplicación de cebo sistemático en el total del área y controles de malezas con caldos herbicidas pre y post emergentes en la fila de plantación, actividades que se realizaron antes y después de la plantación.

La plantación fue realizada el día 7 de noviembre de 2018, de forma manual, utilizando la herramienta sarapico con aplicación de fertilizante de liberación controlada en el hoyo de plantación con un espaciamiento medio de 4 x 2 metros, obteniendo de esta manera 1250 árb. /há. Esto permite que el fertilizante esté en contacto con el cepellón del plantín, así como la correcta dosificación por planta dependiendo del tratamiento a aplicar. Las actividades se detallan en la figura y tabla (Anexos IV: Figura No. 1, Tabla No. 3) las cuales fueron realizadas entre octubre de 2018 y noviembre de 2019.

### **3.1.3 Fertilizante**

Para el ensayo se utilizó el fertilizante de liberación controlada Basacote Plus<sup>®</sup>. Este es un fertilizante recubierto de polímeros, multinutriente, desarrollado por el Departamento de Investigación y Desarrollo de la empresa Compo Expert, Alemania (especificaciones en Anexo IV: Tabla No. 1 y 2). Las diferentes duraciones programadas por la cubierta polimérica Poligen<sup>®</sup> confieren al fertilizante diferentes periodos de liberación.

## **3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL**

El diseño experimental realizado fue de bloques completos al azar aumentado con tres repeticiones y un factor adicional. El criterio de bloqueo se determinó según la posición topográfica (Bloque 1: ladera alta, Bloque 2: ladera media, Bloque 3: ladera baja). Se utilizaron tres niveles de dosis: 6, 12 y 18 (g planta<sup>-1</sup>), para cada uno de los periodos de liberación del fertilizante (3, 6, 9 y 12 meses) y un tratamiento adicional sin fertilizar (Testigo). Cada una de las combinaciones de estos factores da como resultado un tratamiento (Tabla No. 2), Obteniendo un total de 39 observaciones.

A continuación, se presenta las dosis de nutrientes aplicada dependiendo la cantidad de fertilizante aplicado (Tabla No. 1).

**TABLA NO. 1 DOSIS DE NUTRIENTES POR PLANTA QUE APORTAN LOS TRATAMIENTOS PARA LAS CANTIDADES DE FERTILIZANTES AGREGADAS**

<b>Cantidad de Fertilizante (g)/Nutriente</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>B</b>
<b>6</b>	0,96	0,21	0,72	0,12	0,001
<b>12</b>	1,92	0,42	1,44	0,24	0,002
<b>18</b>	2,88	0,63	2,16	0,36	0,004

A nivel operativo se definieron parcelas de similar tamaño donde por lo menos se incluían 30 árboles por tratamiento. Las características de las variables dependientes determinaron que las evaluaciones sean diferentes. La primera parte se centró en la evaluación de la sobrevivencia y la segunda en las variables continuas, crecimiento y contenido foliar de nutrientes. La manipulación y análisis de datos se realizó mediante las herramientas disponibles en el software R4.2.2 (R Core Team, 2022).

**TABLA NO. 2 TRATAMIENTOS CORRESPONDIENTES A LAS UNIDADES EXPERIMENTALES, RESULTADO DE LA COMBINACIÓN DE LAS CANTIDADES AGREGADAS DE FERTILIZANTE BASACOTE PLUS, ® DOSIS EN G POR PLANTA (G) Y PERIODO DE LIBERACIÓN EN MESES (M)**

<b>Tratamiento</b>	<b>Dosis (g planta<sup>-1</sup>)</b>	<b>Periodo de liberación (meses)</b>
Testigo	0	0
3M6G	6	3
3M12G	12	3
3M18G	18	3
6M6G	6	6
6M12G	12	6
6M18G	18	6
9M6G	6	9
9M12G	12	9
9M18G	18	9
12M6G	6	12
12M12G	12	12
12M18G	18	12

### 3.2.1 Evaluación de la sobrevivencia

La sobrevivencia, se caracteriza en que el resultado de la evaluación de cada individuo tiene dos posibles resultados: vivo (éxito) o muerto (fracaso), obteniendo una distribución Bernoulli con probabilidad  $p$  de ocurrencia. En este sentido, la mortalidad se comporta como una variable con distribución binomial, definiéndose como un conjunto de  $n$  ensayos Bernoulli (independientes e idénticos), por lo tanto, tiene dos parámetros:  $p$ , probabilidad de ocurrencia y  $n$ , número de árboles evaluados (Bhattacharyya y Johnson, 1991).

Para su análisis se ajustó un modelo lineal generalizado, utilizando la familia de distribución binomial y una función de enlace tipo Logit (1).

$$y_{ijkl} = \frac{e^{\mu + \beta_k + \alpha_i + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + T_l}}{1 + e^{\mu + \beta_k + \alpha_i + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + T_l}} + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

Dónde:  $y_{ijkl}$ : es la variable dependiente sobrevivencia;  $\mu$ : la media general;  $\beta_k$ : el efecto del bloque;  $\alpha_i$ : el efecto de la dosis;  $\gamma_j$ : el efecto del periodo de liberación;  $(\alpha\gamma)_{ij}$ : el efecto de la interacción entre los factores mencionados;  $T_l$ : el tratamiento testigo y;  $\varepsilon_{ijkl}$ : el error aleatorio.

Se realizaron los ANOVA para dicha variable y posteriormente tests de diferencia mínima significativa para las comparaciones múltiples, con un intervalo de confianza del 95%, nivel de significancia igual a 0.05. En el caso de comparaciones para un número mayor a 4 medias se aplicó la corrección de Bonferroni. A su vez, se verificó la distribución aleatoria de los residuales del modelo ajustado, así como la independencia de estos mediante análisis gráficos.

La variable sobrevivencia se evaluó 15 días después de la plantación al momento de la replantación (Anexo IV. Figura No. 1), mediante el conteo de árboles totales y faltantes por tratamiento. Los árboles faltantes se repusieron sin el agregado de

fertilizante, para asegurar con el replante el equilibrio en la competencia, simulando una situación real de crecimiento.

### **3.2.2 Evaluación de las variables continuas**

Para la evaluación de los tratamientos sobre las variables continuas de crecimiento (área basal, altura y volumen) y contenido foliar de nutrientes se utilizaron datos promedios por unidad experimental de los individuos que sobrevivieron al momento del replante a los 12 meses de edad.

El modelo estadístico utilizado para las variables de área basal, altura, volumen y contenido foliar de nutrientes fue el siguiente (2).

$$y_{ijkl} = \mu + \beta_k + \alpha_i + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + T_l + \varepsilon_{ijkl} \quad (2)$$

Dónde:  $y_{ijkl}$ : es la variable dependiente área basal, altura o volumen;  $\mu$ : la media general;  $\beta_k$ : el efecto del bloque;  $\alpha_i$ : el efecto de la dosis;  $\gamma_j$ : el efecto del periodo de liberación;  $(\alpha\gamma)_{ij}$ : el efecto de la interacción entre los factores mencionados;  $T_l$  el tratamiento testigo y;  $\varepsilon_{ijkl}$ : el error aleatorio.

Se realizaron los ANOVA para dichas variables y posteriores tests de diferencia mínima significativa para las comparaciones múltiples, con un intervalo de confianza del 95% y nivel de significancia igual a 0.05. A su vez, se verificó la distribución aleatoria de los residuales del modelo ajustado, así como la independencia de estos mediante análisis gráficos y levene test.

### **3.2.2 Área basal y volumen**

Para el caso de las variables área basal (g) y volumen (v), los datos promedios utilizados corresponden a la altura (h), medida con una regla graduada y circunferencia a la altura del pecho (CAP), medida con cinta métrica y luego calculado su diámetro a la altura del pecho (DAP). Con estos valores se calculó el área basal ( $g = dap^2 * \pi / 4$ ) y el

volumen ( $v=g*h*f$ ) correspondiente a un individuo promedio por parcela. El factor de forma (f) utilizado para el cálculo del volumen corresponde a 0,5.

Para la comparación del volumen y área basal se expandieron a nivel de hectárea (ha).

### **3.2.3 Determinación del contenido de nutriente en hoja**

Para el caso del contenido foliar de nutrientes, se realizó un muestreo foliar a los 12 meses desde la plantación. Cada muestra compuesta se formó a partir de 4 árboles, donde se seleccionó la primera hoja totalmente desarrollada de la última estación de crecimiento, ubicada en la mitad de la copa y los cuatro puntos cardinales. Resultando en 16 hojas por parcela. Las muestras fueron secadas a 65°C por 48 horas y luego molidas a un tamaño menor a 1 mm.

Para analizar P, K, Ca, Mg y B se colocó 1 g de este material en un crisol de porcelana y se mineralizó en una mufla a 550 °C durante 5 h. Luego, las cenizas obtenidas se disolvieron en HCl al 10%. En el extracto resultante, se determinó P por colorimetría (Murphy y Riley, 1962). Las concentraciones de Ca, Mg se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica y las de K por espectrofotometría de emisión (Isaac y Kerber, 1971). La concentración de N se determinó por destilación Kjeldahl, luego de una mineralización con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 350 °C y una mezcla de catalizadores (CuSO<sub>4</sub> y K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) durante 90 min (Bremner y Mulvaney, 1983). El contenido total de B se determinó por el método colorimétrico de la Azometina-H (Malavolta et al., 1997).

## 4 RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1 SOBREVIVENCIA

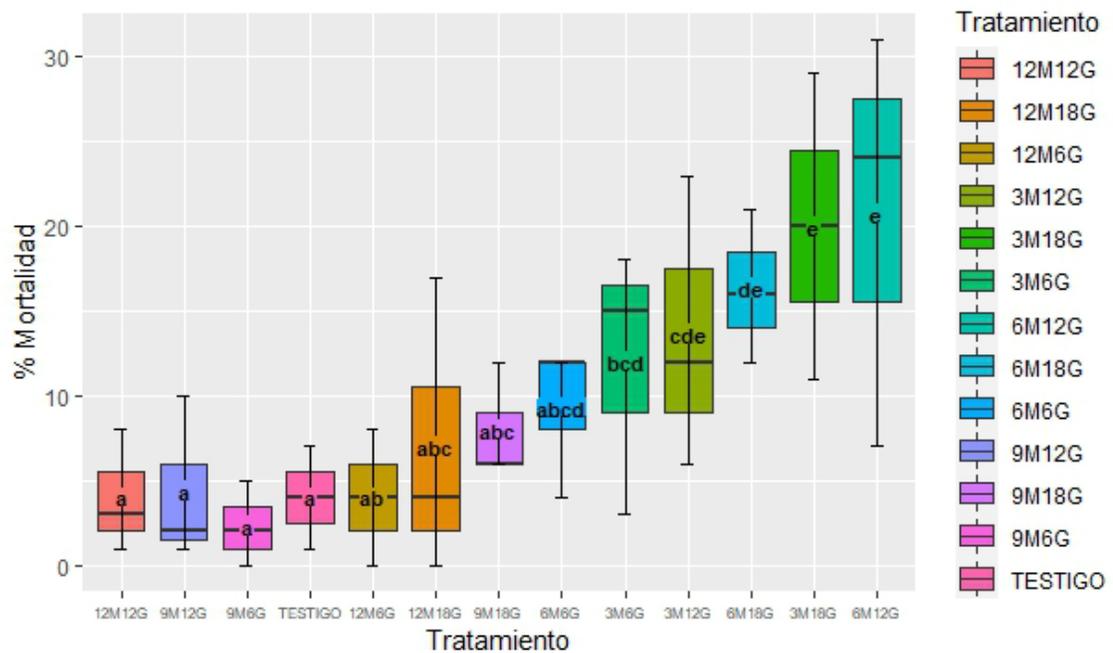
El análisis indica que todos los factores tienen efecto sobre la sobrevivencia (Tabla No. 3).

**TABLA NO. 3 TABLA DE P-VALOR PARA SOBREVIVENCIA**

Factor	p-value
Bloque	1.80E-08
Tasa	4.22E-30
Dosis	1.70E-09
Tasa: Dosis	4.00E-03
Tratamiento adicional	3.20E-40

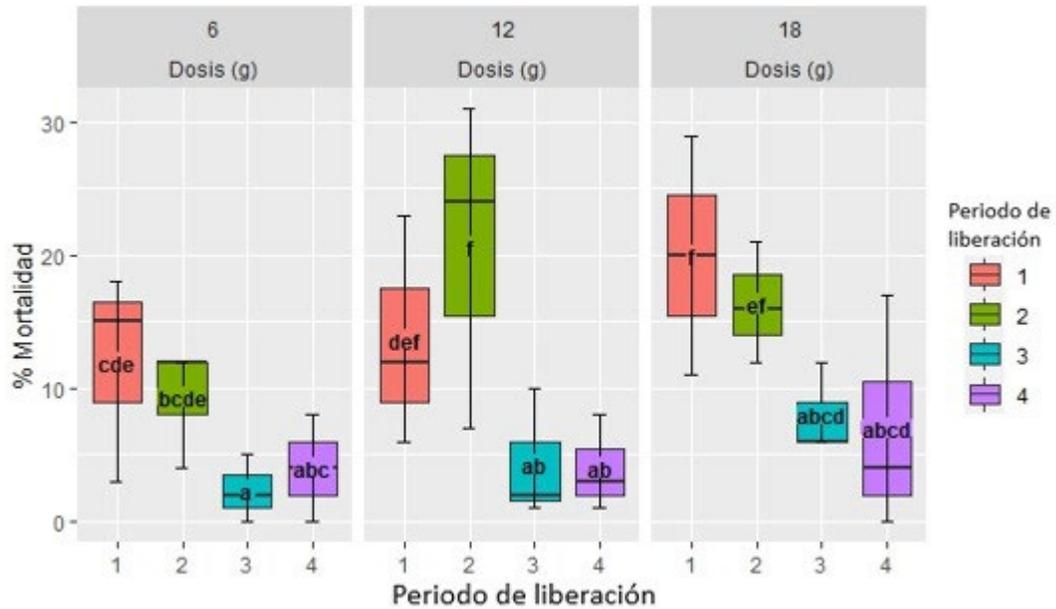
Para visualizar las diferencias entre los tratamientos se presenta el gráfico (Figura No. 3), desprendiendo como resultado un ranking de valores desde la letra “a” hasta la “e”.

**FIGURA NO. 3: MORTALIDAD SEGÚN TRATAMIENTO Y COMPARACIÓN DE MEDIAS**



Las medias de mortalidad se encuentran distribuidas en un continuo de valores. Muchos tratamientos comparten uno o más valores, formando distintos grupos. Existen tratamientos con bajos y altos valores de mortalidad que marcan diferencias en las antípodas del gráfico. Tratamientos que comparten el grupo con los valores “a” presentan menor mortalidad y pertenecen a periodos de liberación más alta y al testigo. Aquellos tratamientos que comparten el valor “e” presentan mayor mortalidad siendo los tratamientos de periodos de liberación más bajas. Los tratamientos del grupo “e” se encuentran asociados a periodos de liberación de 3 y 6 meses. De los resultados se desprende en este caso que la sobrevivencia no se ve afectada positivamente por el agregado del fertilizante; ya que, el testigo integra el grupo de mejor performance. Al analizar los factores periodo de liberación y dosis el modelo desprende que existe efecto en la interacción con un p-valor =  $4.22E^{-30}$ , efecto del periodo p-valor=  $1.70E^{-9}$  y dosis p-valor = 0.004 (Tabla No. 3). La comparación de medias para los factores periodo de liberación y dosis también desprende un continuo de valores y grupos, en el gráfico (Figura No. 4) se visualiza la mortalidad según estos factores, pudiendo diferenciar para todos los casos dos grupos distintos.

FIGURA NO. 1: MORTALIDAD SEGÚN PERIODO DE LIBERACIÓN Y DOSIS



Dónde: Periodos son los diferentes niveles del factor periodo de liberación. Siendo, 1: tres meses; 2: seis meses; 3: nueve meses y 4: doce meses.

Por un lado, se agrupan los periodos de liberación 3 y 6 meses y por otro lado los periodos de liberación 9 y 12 meses. En el mismo (Figura No. 4), se puede observar que la mortalidad siempre es mayor en periodos de liberación más bajas (3 y 6 meses) acrecentando la diferencia cuando se aumentan las dosis. Para la dosis de 6 gramos los periodos comparten grupos. Sin embargo, en dosis mayores son totalmente diferentes ya que no comparten valores. Los periodos de liberación de 9 y 12 meses obtienen mejor performance para cualquier dosis. Altas dosis aumentan la variabilidad de los tratamientos con altos periodos, ya que integran grupos más amplios y los niveles superiores de mortalidad alcanzan mayores valores hasta la letra “d”.

En caso de fertilizaciones con FLC, los mejores resultados se obtienen con periodos de liberación altos (Reyes-Millalón et al., 2012, Aparicio, 2012). Para el caso en estudio, el efecto dosis es menor al del periodo, aunque significativo para ambas variables.

Se debe considerar que una cantidad elevada de fertilizante podría afectar negativamente la supervivencia y crecimiento de las plantas (Jacobs et al., 2003, Huett y

Gogel, 2000), por lo que la utilización de dosis altas del fertilizante podría ser contraproducente. Las dosis a utilizar son mejores en niveles medios a bajos, altas dosis aumentan la mortalidad, sobre todo en períodos de liberación cortos (3 y 6 meses), debido a que aumenta la probabilidad de generar quemando de raíces (Huett y Gogel, 2000).

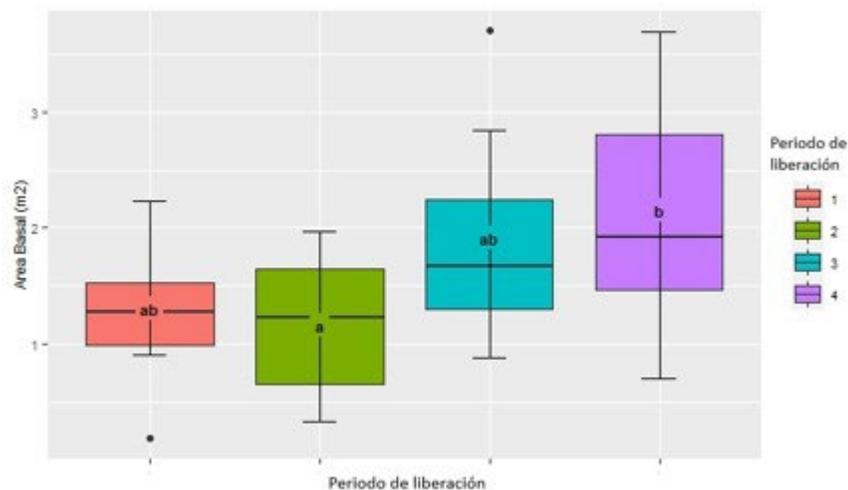
En este caso, ningún tratamiento tuvo una mejor performance que el testigo, por lo que, la aplicación de FLC tuvo efecto aumentando la mortalidad, acrecentándose en combinación de altas dosis y bajos periodos de liberación.

## 4.2 EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO

### 4.2.1 Área basal

Los resultados obtenidos muestran que el testigo no difiere significativamente de las restantes combinaciones (p-valor = 0.3008). Sin embargo, cuando se observan los resultados obtenidos para bloque, periodo, dosis y su interacción (Figura No. 5), el periodo (p-valor = 0.013) y el bloque (p-valor = 0.001) son los factores que revelan significancia estadística, existiendo incidencia en la variable. Siendo, los p-valor de la dosis y la interacción (Periodo:Dosis) de 0.604 y 0.979 respectivamente.

FIGURA NO. 5: ÁREA BASAL SEGÚN PERIODO



Dónde: Periodos son los diferentes niveles del factor periodo de liberación. Siendo, 1: tres meses; 2: seis meses; 3: nueve meses y 4: doce meses.

Las respuestas a la fertilización de plantaciones comerciales ha sido variable debido a estas probables causas: i) Baja demanda en etapas de desarrollo temprano y elevada disponibilidad de nutriente y ii) desconocimiento de las limitaciones nutricionales del sitio (Rubilar et al., 2009). Herbert (1990) destaca por sobre la disponibilidad de nutrientes a la profundidad efectiva de las raíces y la precipitación anual como determinantes del área basal. Existe tendencia que la fertilización con periodos de liberación más largos aumenta el área basal. La comparación entre periodo de liberación más alta (12 meses) y periodo de liberación de 6 meses es la única que se diferencia estadísticamente de las restantes, ya que las demás comparten grupo. Para el análisis de la variable se utilizaron los árboles que sobrevivieron, por lo que demuestra que el sitio compensa en parte los crecimientos, dado que, aunque hubo diferencias para la mortalidad esta no se ve tan notoria en el área basal dado que el testigo no difiere estadísticamente. Las diferencias en crecimiento se desvanecen a medida que crece la plantación (Garía Préchac et al., 2001), los crecimientos tienden a estabilizarse ya que las curvas de crecimiento convergen y dependen de sitios específicos (Miller, 1981, Gonçalves y De Barros, 1999, Rocha et al., 2019).

#### **4.2.2 Altura**

Para la variable altura, no se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos ( $p$  valor = 0.45). A su vez, tampoco se encuentran efectos de los factores periodo ( $p$  valor = 0.0998), dosis ( $p$  valor = 0.252) y su interacción ( $p$  valor = 0.496) sobre la variable altura. El bloque presenta significancia con un  $p$  valor =  $1.34E^{-07}$ .

En este caso, los resultados obtenidos muestran que la fertilización con FLC no tiene un efecto sobre la variable altura de los árboles. Ni la mineralización ni el contenido de materia orgánica estuvieron correlacionados con la productividad del suelo, para sitios donde el historial eran pastos (Caballero, 2009). Acosta (2008) encontró una tendencia que lleva a pensar que la topografía influye en el crecimiento de los árboles correlacionada

con la profundidad y humedad del suelo. El índice de sitio (IS) se refiere a la altura de los árboles dominantes en un rodal a una edad determinada y ha sido un criterio útil para determinar la productividad de los árboles (Caballero, 2009). Los indicadores ambientales considerados para evaluar IS pueden incluir la topografía, clasificaciones relacionadas con la geología y la geomorfología y, con mayor frecuencia, la física del suelo (Bontemps y Bouriaud, 2014) y determinan la altura por sobre los nutrientes.

#### **4.2.3 Volumen**

En el caso de la variable volumen, no se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos ( $p$  valor = 0.547). A su vez, tampoco se encuentran efectos de los factores periodo ( $p$  valor = 0.066), dosis ( $p$  valor = 0.627) y su interacción ( $p$  valor = 0.849) sobre la variable volumen. Sí existe efecto del bloque ( $p$  valor =  $7.77E^{-07}$ ).

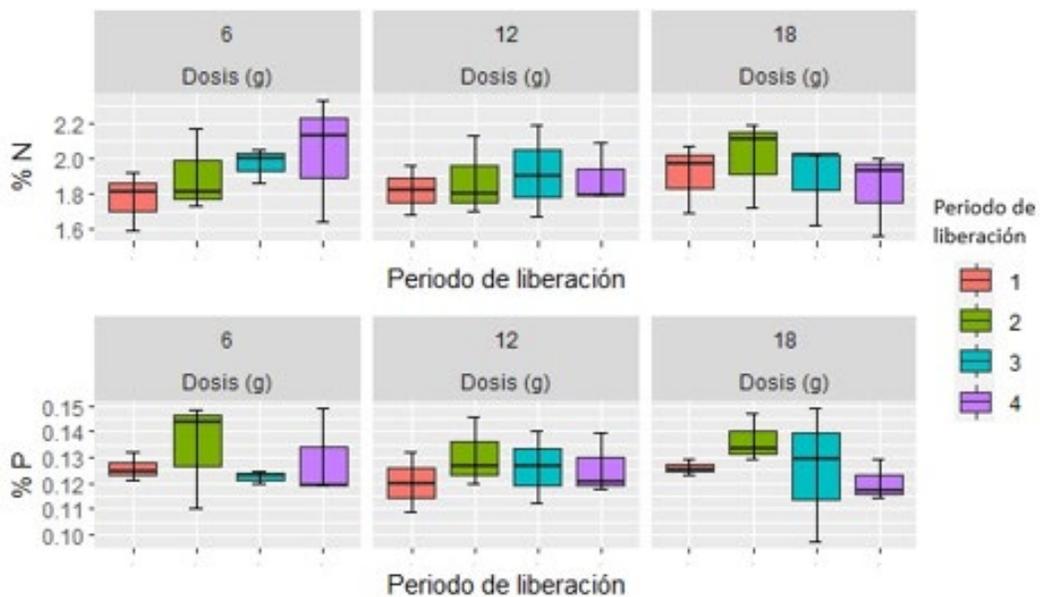
En el presente ensayo, la aplicación de FLC, no tuvo efecto sobre la variable volumen. Teniendo en cuenta que existe un efecto del periodo en el área basal, este se diluye dado que no existen diferencias en altura. Las ganancias del crecimiento se pierden, ya que, las curvas de crecimiento de las plantaciones (fertilizadas y no fertilizadas) convergen en un punto medio (Miller, 1981, Gonçalves y De Barros, 1999, Rocha et al., 2019). En la evaluación del crecimiento al año de edad, la altura es el componente principal ya que las diferencias observadas en el área basal no se encuentran expresadas en el volumen, incidiendo negativamente en la respuesta frente al agregado de fertilizantes. La tendencia es que la fertilización sea relativamente más importante en sitios más pobres en cuanto a disponibilidad de nutrientes (Herbert, 1990, Laclau et al., 2010). También hay que tener en cuenta que las dosis utilizadas son bajas en cuanto a los nutrientes. Mientras existen recomendaciones de dosis de 10 g de P y 20 g de N por árbol respectivamente de fuentes solubles (Herbert, 1990, Methol, 2001), para el caso de los FLC la dosis más alta contiene 2.8 g de N y 0.63 g de P. Las recomendaciones para nutrientes dependen de las concentraciones de materia orgánica en el suelo y arcilla (Gonçalves et al., 2013).

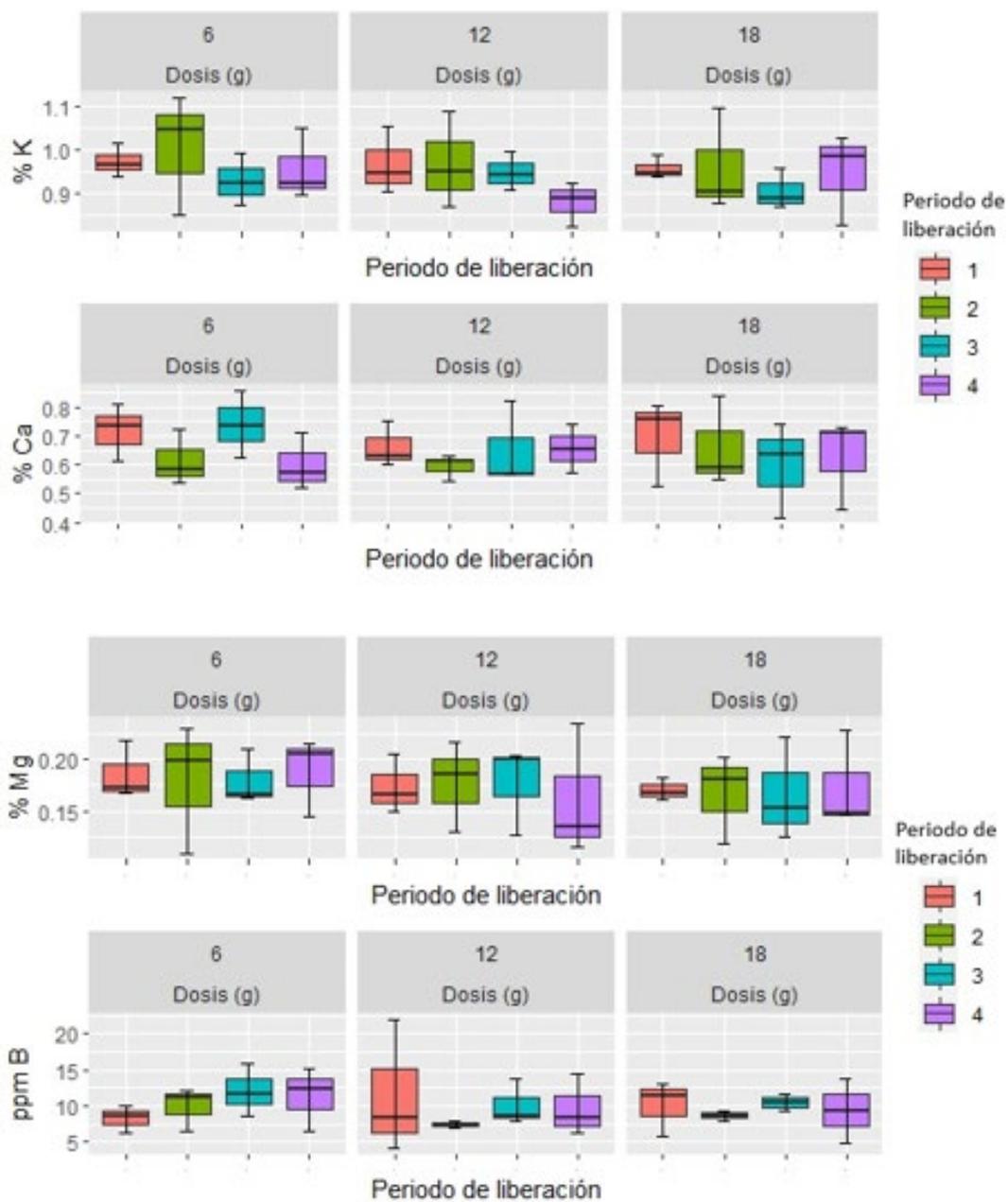
### 4.3 EVALUACIÓN DE NUTRIENTES EN HOJA

Para la totalidad de los nutrientes evaluados, no existen diferencias significativas entre los tratamientos. No se visualizan efectos del periodo, dosis y la interacción entre el periodo y la dosis, sí es posible observar efectos en el bloque (Anexo VI, Tabla No. 1) para la totalidad de los nutrientes con excepción del K.

A continuación, se presenta el contenido foliar de nutrientes con relación a la cantidad de fertilizante aplicada y el periodo de liberación (Figura No. 6).

FIGURA NO. 6 CONTENIDO FOLIAR DE NUTRIENTES CON RELACIÓN A LA CANTIDAD DE FERTILIZANTE APLICADA Y EL PERIODO DE LIBERACIÓN





La aplicación de FLC en este experimento, no generó un cambio en el contenido foliar de nutrientes evaluado al año de edad para los nutrientes en consideración. Tampoco se observa una tendencia a que mayores aplicaciones de fertilizante generen un aumento en el contenido foliar. Los contenidos nutricionales en hoja dependen de la productividad

y edad (Soares et al., 2021). La respuesta de los árboles al contenido de nutrientes en hoja se encuentra relacionado, entre otros factores, a la disponibilidad de nutrientes en el sitio (Miller, 1981, Rubilar et al., 2009). Los fertilizantes son beneficiosos para los árboles, no para el sitio, y la mejora permanente medible del sitio solo es probable si la cantidad de nutrientes aplicada es grande en relación con el stock del suelo (Miller, 1981). El estado nutricional de los árboles está determinado en gran medida por las características del ciclo biogeoquímico formado por la interacción entre el suelo y la plantación (Acosta, 2008, Grove et al., 1996, Laclau et al., 2010). En algunas regiones tropicales y subtropicales, la primera rotación de plantaciones de eucaliptos de crecimiento rápido no ha respondido a los fertilizantes (Gonçalves et al., 2004).

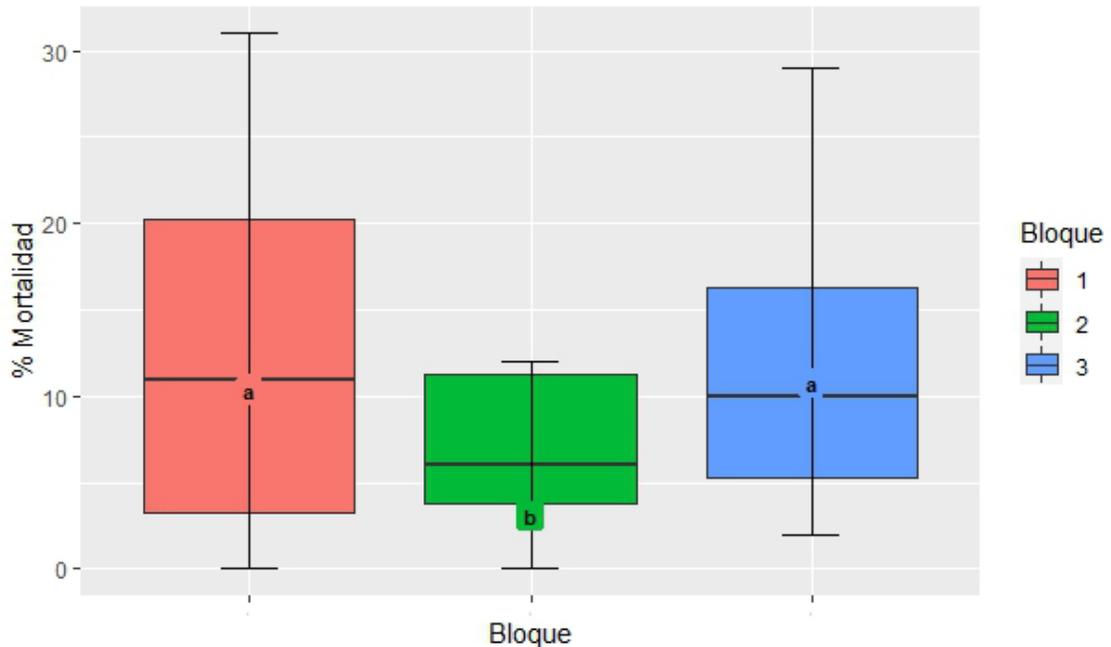
Es probable que la cantidad de nutrientes aplicada al no generar cambios en la productividad tampoco generó un cambio en los contenidos foliares, debido a un alto capital de nutrientes por parte del suelo. En situaciones de primer ciclo, mediante la roturación de campos naturales el mismo se encuentra en el máximo de materia orgánica, teniendo una alta disponibilidad de nutrientes mediante su mineralización. Sumado a los resultados obtenidos, se encuentra el costo ambiental derivado de la producción y utilización de este tipo de fertilizantes con cubiertas de difícil degradación (Raimondi et al., 2021). Teniendo en cuenta los efectos que produce en los árboles los FLC, lleva al cuestionamiento de utilizar este tipo de fertilizantes evaluando el costo ambiental y económico producido.

#### **4.4 EFECTO DE ALGUNOS PARÁMETROS DE SUELO EN LAS VARIABLES EVALUADAS**

Cabe destacar que para la totalidad de las evaluaciones el factor bloque incide sobre todas las variables, demostrado por su p-valor presentado para cada uno de los casos. Los resultados muestran que el bloqueo fue realizado de forma correcta.

Para la variable sobrevivencia, en la figura No. 7 se presenta la sobrevivencia según bloque y con un p-valor obtenido de  $= 7.60E^{-08}$ .

FIGURA NO. 7: MEDIA DE SOBREVIVENCIA SEGÚN BLOQUE.

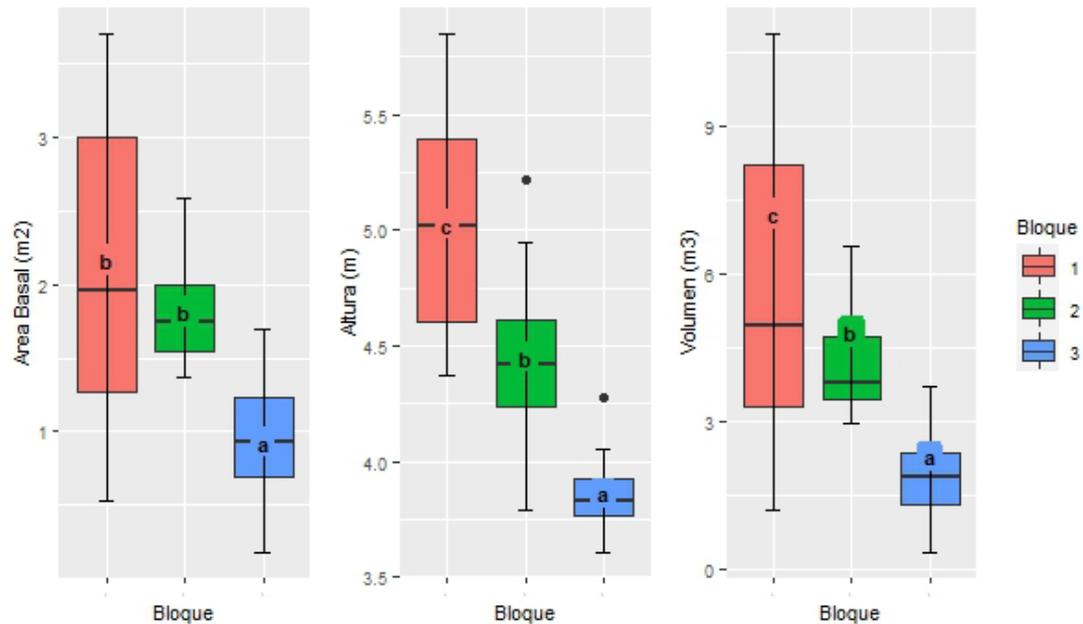


Dónde: Bloque refiere a diferentes posiciones topográficas. Siendo, 1: ladera alta; 2: ladera media; 3: ladera Baja.

No es muy claro el efecto del bloque sobre la sobrevivencia. Se observa (figura No. 6) que existe mayor variabilidad y mortalidad en la ladera alta y baja, con respecto a la ladera media. Podría estar vinculados a mecanismos de falla o liberación catastrófica (Irfan al., 2018), determinado por diferentes temperaturas y contenidos de agua debido a la posición topográfica de los perfiles.

Para la variable crecimiento y sus componentes, se presentan en la figura No. 8 las medias correspondientes a área basal, altura y volumen según bloque y con un p valor de 0.0004,  $3.08E^{-07}$  y  $3.98E^{-07}$  respectivamente.

FIGURA NO. 8: MEDIA ÁREA BASAL, ALTURA Y VOLUMEN SEGÚN BLOQUE

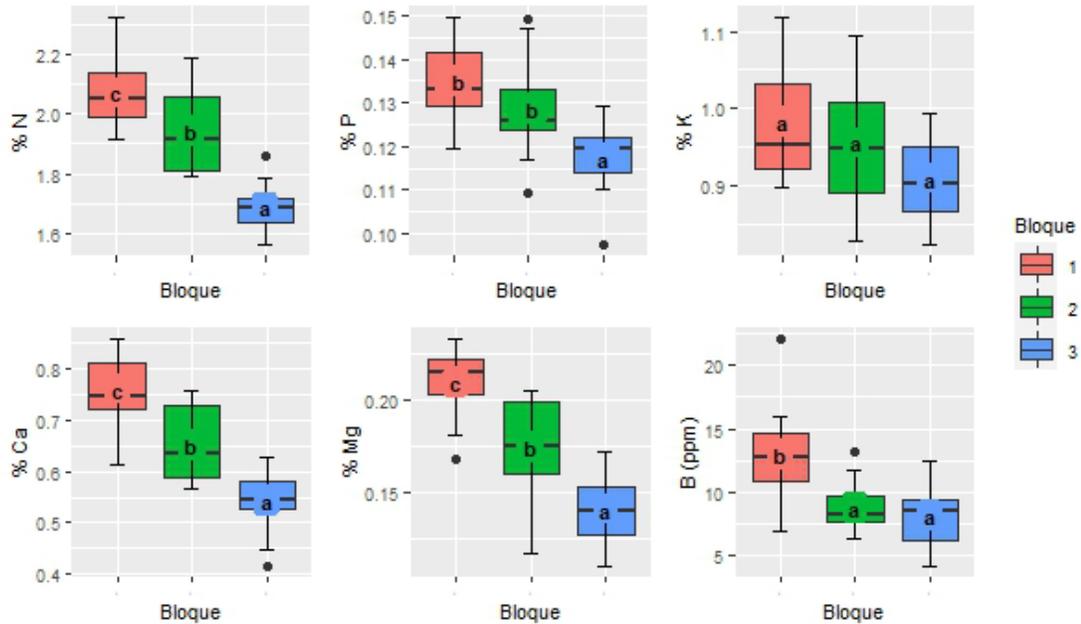


Dónde: Bloque refiere a diferentes posiciones topográficas. Siendo, 1: ladera alta; 2: ladera media; 3: ladera Baja.

De la gráfica se puede inferir que se obtienen mejores resultados en todos los componentes del crecimiento para la ladera alta. Existiendo un gradiente de crecimiento según posición topográfica, desde los mayores valores (ladera alta), seguido de la ladera media, hasta los valores más bajos en la ladera baja. La diferencia entre los componentes es del orden: dos a tres veces mayor entre la ladera alta y la baja.

Para el caso de los nutrientes se presenta la figura No. 9, donde se muestran las medias correspondientes a contenido de nutrientes foliar según nutriente, bloque y su p-valor obtenido (Anexo VI, Tabla No. 1).

FIGURA NO. 9: MEDIA DE CONTENIDO DE NUTRIENTES FOLIARES SEGÚN BLOQUE

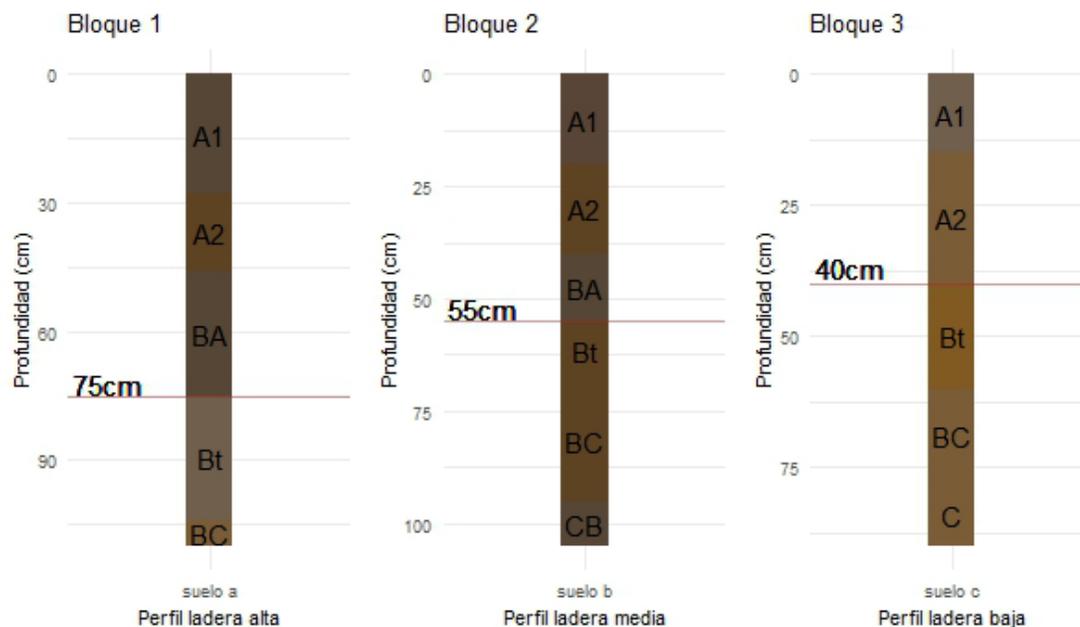


Dónde: Bloque refiere a diferentes posiciones topográficas. Siendo, 1: ladera alta; 2: ladera media; 3: ladera Baja.

Para el caso de los nutrientes, al igual que para el crecimiento, los valores más altos se observan en la ladera alta, mientras que de manera descendente se observan para la media y baja, respectivamente.

La representación gráfica y comparación de las descripciones de suelos correspondientes a cada bloque (Figura No. 10) advierte que la principal diferencia entre los perfiles de suelo se observa en la profundidad del horizonte A y BA. Considerando la profundidad del horizonte Bt como el primer impedimento físico importante para el desarrollo de las raíces, estos horizontes A y BA serían fácilmente colonizables por las raíces de los árboles. Para el caso del bloque 1 el Bt, se encuentra en una profundidad de unos 75 cm, mientras que para los bloques 2 y 3, las profundidades son de 55 y 40 cm, respectivamente.

**FIGURA NO. 10: COMPARACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELOS DE LOS BLOQUES**



Las variables continuas están relacionadas positivamente con la profundidad del suelo y, particularmente, sus horizontes superficiales, es decir, a mayor profundidad hasta el horizonte Bt, valores más altos. Cabe destacar que para la sobrevivencia no se da esta lógica. Las restricciones al desarrollo del sistema de raíces relacionado con las fuerzas del suelo y las relaciones de turgencia que median su desarrollo afectan el crecimiento temprano (Gonçalves et al., 2004). Herbert (1990) destaca la profundidad efectiva de las raíces como uno de los factores que influye en la determinación del área basal. Durante los primeros dos años luego de la plantación el crecimiento del frente de raíz fue similar al crecimiento en altura (Laclau et al., 2013). En este estudio se puede decir que la profundidad en la que se encuentra la restricción (Bt) influye en todas las variables continuas, siendo la concentración foliar de K la excepción. Sugiriendo que la profundidad del suelo es quien determina para este caso la productividad y con ella todas las variables continuas.

En términos relativos el perfil bloque 1 contiene casi el doble de profundidad, proporcionando mayor profundidad y espacio para la colonización radicular, facilitando el acceso a los nutrientes y agua disponibles consecuencia de mayor volumen de exploración del suelo (Rocha et al., 2019). La profundidad no solo limita el crecimiento radicular, sino que limita la altura de los árboles expresado en IS por lo que determina la potencialidad del volumen producido.

Estudios de plantaciones en zonas tropicales dan cuenta de que las raíces alcanzan los 6 m de profundidad entre el primer y segundo año de plantados, con una exhaustiva exploración radicular hasta los 3 m de profundidad (Laclau et al. 2010, 2013). La potencialidad de expresión del *Eucalyptus* en las plantaciones comerciales va a depender de los perfiles del suelo en cuestión. Cabe esperar que suelos que posean horizontes o transiciones sin restricciones al avance de las raíces, donde éstas puedan colonizar rápidamente, obtendrán mayores cantidades de agua y nutrientes del suelo. Siendo la profundidad un factor clave.

## **5 CONCLUSIONES**

La mayor diferencia entre los tratamientos fue observada en la mortalidad asignándose mayores porcentajes de mortalidad en niveles bajos de periodos de liberación (3 y 6 meses). El testigo integra el grupo de menor mortalidad en conjunto con los tratamientos conformados por periodos de liberación más largos (9 y 12 meses).

Los resultados obtenidos para el experimento determinan que no existe una diferencia significativa entre los tratamientos para las variables continuas: crecimiento en volumen y concentración de nutrientes en hoja.

Del estudio se desprende que en este caso es necesaria una mayor evaluación referida a la relación costo-beneficio de la fertilización con FLC.

El crecimiento en el establecimiento de una plantación comercial de *Eucalyptus grandis*, en este estudio, tiene relación con el suelo y está determinado por la profundidad hasta el comienzo del horizonte Bt. Lo que indica que es necesario para una correcta interpretación del desarrollo de plantaciones un relevamiento detallado de recursos naturales evaluando particularmente la secuencia de horizontes de suelo y la geología que le da origen con respecto a: acceso y disponibilidad de agua, y a la penetración y colonización de raíces.

La decisión de fertilizar debe de estar acompañada con una correcta interpretación de los ciclos que influyen sobre los nutrientes. Es necesario mayor conocimiento sobre las raíces su crecimiento y colonización, comprenderlo facilitaría la interpretación del ciclo biogeoquímico de los nutrientes en presencia de la plantación. La mejor comprensión de estos procesos permitirá tomar decisiones basadas en datos.

## **6 RESUMEN**

Se evaluó el establecimiento de una plantación comercial de *Eucalyptus grandis* al año de ser plantados en un sitio de Tacuarembó con el agregado de fertilizantes de liberación controlada. A la plantación se le aplicaron un total de 12 tratamientos y un control (testigo sin fertilizar) con tres repeticiones. Los tratamientos son resultado de la combinación de los factores periodo de liberación de los nutrientes y dosis aplicadas, donde para el periodo de liberación existen 4 niveles: 3 meses, 6 meses, 9 meses y 12 meses, y para las dosis 3 niveles: 6, 12 y 18 gramos por planta en el momento de la plantación del fertilizante Basacote Plus (16, 8, 12 + micro). La densidad de plantación fue de 1250 plantas por ha.

Fueron evaluados en este estudio la sobrevivencia, el crecimiento (descompuesto en sus componentes área basal, altura y volumen) y contenido de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y B) en hoja. Para este caso las diferencias se encontraron mayoritariamente en la sobrevivencia donde periodos de liberación bajas se relacionan con mayor mortalidad. No se encontraron diferencias significativas en altura, volumen y contenido foliar de nutrientes en comparación con el tratamiento testigo. Para el caso de la variable área basal se encontró un efecto del periodo solo para los niveles de periodo de liberación 6 meses vs periodo de liberación 12 meses.

Del estudio se observó una tendencia de que, en la medida de una mayor profundidad del suelo, se evidenciaron mayores valores de las variables área basal, volumen y contenido foliar de nutrientes.

**Palabras clave:** Basacote Plus, manejo intensivo, silvicultura

## **7 SUMMARY**

The establishment of a commercial plantation of *Eucalyptus grandis* a year after being planted in a Tacuarembó site with the addition of controlled release fertilizers was evaluated. A total of 12 treatments and a control (unfertilized control) with three replications were applied to the plantation. The treatments are the result of the combination of the factors nutrient release period and applied doses, where for the period of release there are 4 levels: 3 months, 6 months, 9 months and 12 months, and for the doses 3 levels: 6, 12 and 18 grams per plant at the time of planting with Basacote Plus fertilizer (16, 8, 12 + micro). The stand density was 1250 plants per ha.

The survival, growth (divided into its components basal area, height and volume) and nutrient content (N, P, K, Ca, Mg and B) in the leaf were evaluated in this study. In this case, the differences were found mainly in survival where low release periods are related to higher mortality. No significant differences were found in height, volume and foliar nutrient content compared to the control. In the case of the basal area, an effect of the period was found only for the 6-month release period vs. the 12-month release period levels.

From the study, a trend was observed that, as the depth of the soil increased, higher values of the variables basal area, volume, and foliar nutrient content were evidenced.

**Keywords:** Basacote Plus, intensive management, forestry

## **8 BIBLIOGRAFÍA**

1. Acosta, C. 2008. Evaluación de una fertilización en *Eucalyptus globulus labill.* aplicada en la etapa de máxima acumulación nutritiva, Valdivia, Chile. (en línea). Tesis Ing. For. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. 64 p. Consultado 12 abr. 2021. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/fifa185e/doc/fifa185e.pdf>
2. Adams, C.; Frantz, J.; Bugbee, B. 2013. Macro- and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. (en línea). Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 176(1): 76 - 88. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1002/jpln.201200156>
3. Alvarado, R. 2005. Política forestal, inversión transnacional y transformaciones territoriales en Uruguay. (en línea). In: Encontro de Geógrafos da América Latina (10º., 2005, Sao Paulo, Brasil). Anais. Sao Paulo, Universidade de São Paulo. pp. 566 - 591. Consultado 22 jul. 2021. Disponible en <http://www.observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal10/Geografiasocioeconomica/Geografiapolitica/03.pdf>
4. \_\_\_\_\_. 2009. La expansión forestal en el Cono Sur. Nueva sociedad. no. 223: 76 - 93. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <https://biblat.unam.mx/hevila/Nuevasociedad/2009/no223/6.pdf>
5. Aparicio, J. L. 2012. Respuesta de *Eucalyptus grandis* a fertilizantes de liberación controlada. In: Jornadas Forestales de Entre Ríos (26ª., 2012, Concordia, Argentina). Memorias. Concordia, INTA. 1 p. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en [https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2012/trab\\_res\\_pos/527.2.P.Aparicio.pdf](https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2012/trab_res_pos/527.2.P.Aparicio.pdf)

6. Barbazán, M. 1998. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 27 p. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/AnPlantas.pdf>
7. Barreiro, M.; Arizmendi, F.; Trinchin, R. 2019. Variabilidad observada del clima en Uruguay. (en línea). Montevideo, Facultad de Ciencias. Consultado 17 jun. 2022. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Producto%202.pdf>
8. Beig, B.; Niazi, M. B. K.; Jahan, Z.; Hussain, A.; Zia, M. H.; Mehran, M. T. 2020. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: A review. *Journal of Plant Nutrition*. 43(10): 1510 - 1533. Disponible en <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1744647>
9. Bhattacharyya, G.; Johnson, R. 1991. *Statistical concepts and methods*. New York, Wiley. 639 p
10. Boland, D. J.; McDonald, M. W. 2006. *Forest trees of Australia*. 5th. ed. Collingwood, CSIRO. 768 p.
11. Bonilla, I. 2013. Introducción a la nutrición mineral de las plantas: Los elementos minerales. *In*: Azcón-Bieto, J.; Talón, M. eds. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid, McGraw-Hill. pp. 103 - 121.
12. Bontemps, J.-D.; Bouriaud, O. 2014. Predictive approaches to forest site productivity: Recent trends, challenges and future perspectives. (en línea). *Forestry*. 87(1): 109 - 128. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt034>
13. Bremner, J. M.; Mulvaney, C. S. 1983. Nitrogen-Total. *In*: Page, A. L. ed. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*. Winsconsin, American Society of Agronomy. pp. 595 - 624.
14. Brussa, C. 1994. *Eucalyptus*: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 327 p.

15. Caballero, C. 2009. Índice de sitio y propiedades del suelo en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México. *Agrociencia* (Uruguay). 43(1): 61 - 72.
16. Carámbula, M.; Piñeiro, D. 2006. La forestación en Uruguay: Cambio demográfico y empleo en tres localidades. *Agrociencia* (Uruguay). 10(2): 63 - 73.
17. Castaño, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R. 2011. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo, INIA. 33 p. (Serie Técnica no. 193). Consultado dic. 2022. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/257023619\\_Caracterizacion\\_Agroclimatica\\_del\\_Uruguay\\_1980-2009](https://www.researchgate.net/publication/257023619_Caracterizacion_Agroclimatica_del_Uruguay_1980-2009)
18. Cromer, R. N.; Cameron, D. M.; Rance, S. J.; Ryan, P. A.; Brown, M. 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*: 2. Nitrogen accumulation. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 62(1-4): 231 - 243. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90052-O](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90052-O)
19. Cabbage, F.; Mac Donagh, P.; Sawinski Júnior, J.; Rubilar, R.; Donoso, P.; Ferreira, A.; Hoeflich, V.; Olmos, V. M.; Ferreira, G.; Balmelli, G.; Siry, J.; Báez, M. N.; Alvarez, J. 2007. Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States. (en línea). *New Forests*. 33: 237 - 255. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9025-4>
20. \_\_\_\_\_; Koesbandana, S.; Mac Donagh, P.; Rubilar, R.; Balmelli, G.; Olmos, V. M.; De La Torre, R.; Murara, M.; Hoeflich, V. A.; Kotze, H.; Gonzalez, R.; Carrero, O.; Frey, G.; Adams, T.; Turner, J.; Lord, R.; Huang, J.; MacIntyre, C.; McGinley, K.; Abt, R.; Phillips, R. 2010. Global timber investments, wood costs, regulation, and risk. (en línea). *Biomass and Bioenergy*. 34(12): 1667 - 1678. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.05.008>
21. Del Pino, A. 1997. Nutrición catiónica. Montevideo, Facultad de Agronomía. 30 p.

22. Dell, B.; Malajczuk, N.; Xu, D.; Grove, T. S. 2000. Nutrient disorders in plantation eucalypts. (en línea). 2nd. ed. Canberra, ACIAR. 194 p. Consultado 24 oct. 2020. Disponible en [https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/23819/1/nutrient\\_disorders\\_in\\_plantation\\_eucalypts.pdf](https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/23819/1/nutrient_disorders_in_plantation_eucalypts.pdf)
23. Dimarco, R. D. 2019. Insectos de importancia económica y sanitaria “La hormiga cortadora de hojas”, *Acromyrmex lobicornis*. (en línea). Presencia. 30(72): 47 - 49. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/6687>
24. Durán, A.; García Préchac, F. 2007. Suelos del Uruguay: Origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. Vol. 2, 358 p.
25. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2021. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020: Informe principal. (en línea). Roma. 190 p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
26. Ferrando, M. 2010. Fertilización de Eucalipto con Boro efecto sobre los contenidos foliares. (en línea). Tesis Mag. Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 67 p. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1808/1/0050fer.pdf>
27. \_\_\_\_\_.; Zamalvide, J. P. 2012. Aplicación de boro en eucalipto: Comparación de fuentes. (en línea). Revista *Árvore*. 36(6): 1191 - 1197. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600020>
28. Fossati, A.; Van, E. 2006. Estrategias y mecanismos financieros para la conservación y el uso sostenible de los bosques (Documento de trabajo). (en línea). Montevideo, FAO. 72 p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/forestry/11623-09df12c118bf235224e78938fea555141.pdf>

29. Fox, T. R. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 138(1-3): 187 - 202. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00396-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00396-0)
30. Gambash, S.; Kochba, M.; Avnimelech, Y. 1990. Studies on slow-release fertilizers: II. A method for evaluation of nutrient release rate from slow-releasing fertilizers. (en línea). *Soil Science*. 150(1): 446 - 450. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1097/00010694-199007000-00007>
31. García Préchac, F.; Pérez Bidegain, P.; Christie, S.; Santini, P. 2001. Efecto de la intensidad de laboreo en el crecimiento aéreo y radicular de *Eucalyptus dunnii* y sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo. *Agrociencia* (Uruguay). 5(1): 1 - 9.
32. \_\_\_\_\_. 2015. Contribución de la Facultad de Agronomía de la UdelaR al conocimiento, manejo y conservación de los suelos de Uruguay. *Cangüe*. no. 36: 29 - 35.
33. Gautreau, P. 2014. Forestación, territorio y ambiente: 25 años de silvicultura transnacional en Uruguay, Brasil y Argentina. Montevideo, Trilce. 293 p.
34. Gleason, J. F.; Duryea, M.; Rose, R.; Atkinson, M. 1990. Nursery and field fertilization of 2 + 0 ponderosa pine seedlings: The effect on morphology, physiology, and field performance. (en línea). *Canadian Journal of Forest Research*. 20(11): 1766 - 1772. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1139/x90-235>
35. Gonçalves, J. L. de M.; De Barros, N. F. 1999. Improvement of site productivity for short-rotation plantations in Brazil. (en línea). *Bosque*. 20(1): 89 - 106. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n1-09>
36. \_\_\_\_\_.; Stape, J. L.; Laclau, J.-P.; Smethurst, P.; Gava, J. L. 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 193(1-2): 45 - 61. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.022>

37. \_\_\_\_\_.; Alvares, C. A.; Higa, A. R.; Silva, L. D.; Alfenas, A. C.; Stahl, J.; Ferraz, S. F. de B.; Lima, W. de P.; Brancalion, P. H. S.; Hubner, A.; Bouillet, J.-P. D.; Laclau, J.-P.; Nouvellon, Y.; Epron, D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 301: 6 - 27. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030>
38. González Barrios, P.; Pérez Bidegain, M.; Gutiérrez, L. 2015. Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of *Eucalyptus grandis*. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 346: 41 - 50. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.031>
39. Grove, T. S.; Thomson, B. D.; Malajczuk, N. 1996. Nutritional philosophy of Eucalypts: Uptake, distribution and utilization. In: Attiwill, P. M.; Adams, M. A. eds. *Nutritions of Eucalypts*. Collingwood, CSIRO. pp. 77 - 108.
40. Gutiérrez, O.; Panario, D. 2014. Implementación de un complejo forestal industrial, ¿una política de Estado? Estudio de caso: Uruguay. (en línea). s.l., ENGOV. 22 p. Consultado 23 jul. 2021. Disponible en [http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/engov/20140526071243/WorkingPaperENGOV7\\_GutierrezyPanario.pdf](http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/engov/20140526071243/WorkingPaperENGOV7_GutierrezyPanario.pdf)
41. Haase, D. L.; Alzugaray, P.; Rose, R.; Jacobs, D. F. 2007. Nutrient-release rates of controlled-release fertilizers in forest soil. (en línea). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 38(5-6): 739 - 750. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1080/00103620701220692>
42. Hallmark, W. B.; Walworth, J. L.; Sumner, M. E.; De Mooy, C. J.; Pesek, J.; Shao, K. P. 1987. Fertilizer use efficiency. (en línea). *Journal of Plant Nutrition*. 10(9-16): 1381 - 1390. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1080/01904168709363670>

43. Hawkesford, M.; Horst, W.; Kichey, T.; Lambers, H.; Schjoerring, J.; Møller, I. S.; White, P. 2012. Functions of macronutrients. (en línea). In: Marschner, P. ed. Mineral nutrition of higher plants. Amsterdam, Elsevier. pp. 135 - 189. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
44. Herbert, M. A. 1990. Fertilizer/site interactions on the growth and foliar nutrient levels of *Eucalyptus grandis*. (en línea). Forest Ecology and Management. 30(1-4): 247 - 257. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90140-7)
45. Hernández, J. 1992. Potasio. Montevideo, Udelar. 35 p.
46. Huett, D. O.; Gogel, B. J. 2000. Longevities and nitrogen, phosphorus, and potassium release patterns of polymer-coated controlled-release fertilizers at 30°C and 40°C. (en línea). Communications in Soil Science and Plant Analysis. 31(7-8): 959 - 973. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1080/00103620009370490>
47. INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). s.f. Banco de datos agroclimático. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado ene. 2023. Disponible en <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
48. Irfan, S. A.; Razali, R.; KuShaari, K.; Mansor, N.; Azeem, B.; Ford Versypt, A. N. 2018. A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. (en línea). Journal of Controlled Release. 271: 45 - 54. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2017.12.017>
49. Isaac, R. A.; Kerber, J. D. 1971. Atomic absorption and flame photometry: Techniques and uses in soil, plant, and water analysis. In: Walsh, L. M. ed. Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. Wisconsin, Soil Science Society of America. pp. 17 - 37.

50. Jacobs, D. F.; Rose, R.; Haase, D. L. 2003. Incorporating controlled-release fertilizer technology into outplanting. In: Riley, L. E.; Dumroese, R. K.; Landis, T. D. eds. National proceedings: Forest and conservation nursery associations 2002. Ogden, USDA. pp. 37 - 42.
51. Laclau, J.-P.; Ranger, J.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Maquère, V.; Krusche, A. V.; M'Bou, A. T.; Nouvellon, Y.; Saint-André, L.; Bouillet, J.-P.; De Cassia Piccolo, M.; Deleporte, P. 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. (en línea). Forest Ecology and Management. 259(9): 1771 - 1785. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>
52. \_\_\_\_\_.; Da Silva, E. A.; Rodrigues Lambais, G.; Bernoux, M.; Le Maire, G.; Stape, J. L.; Bouillet, J.-P.; Gonçalves, J. L. de M.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y. 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. (en línea). Frontiers in Plant Science. 4: 243. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00243>
53. Landis, T. D.; Dumroese, R. K. 2009. Using polymer-coated controlled-release fertilizers in the nursery and after outplanting. Forest Nursery Notes. Winter: 5 - 12.
54. Majeed, Z.; Ramli, N. K.; Mansor, N.; Man, Z. 2015. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes. (en línea). Reviews in Chemical Engineering. 31(1): 69 - 95. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1515/revce-2014-0021>
55. Malavolta, E.; Vitti, G. C.; De Oliveira, S. A. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. 2a. ed. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 319 p.

56. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay. (en línea). Montevideo. Esc. 1:1.000.000. Color. Consultado may. 2022. Disponible en [https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619\\_carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_del\\_uruguay\\_1.1.000.000\\_imprimir\\_a0\\_0.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf)
57. Marschner, P.; Rengel, Z. 2012. Nutrient availability in soils. (en línea). In: Marschner, P. ed. Mineral nutrition of higher plants. Amsterdam, Elsevier. pp. 315 - 330. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00012-1>
58. Methol, R. 1996. Laboreo y fertilización en *Eucalyptus grandis* en la zona norte. (en línea). Montevideo, INIA. 4 p. (Hoja de divulgación no. 52). Consultado 24 oct. 2020. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12390/1/sad120ccap6p1-5.pdf>
59. \_\_\_\_\_. 2001. Técnicas de implantación para eucaliptus en suelos arenosos de Tacuarembó-Rivera. (en línea). In: Seminario de actualización en tecnologías forestales para areniscas de Tacuarembó y Rivera. Tacuarembó, INIA. pp. 105 - 118. (Serie Técnica no. 123). Consultado 12 abr. 2021. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8583/1/ST-123-Methol-p.105-118.pdf>
60. Miller, H. G. 1981. Forest fertilization: Some guiding concepts. (en línea). Forestry. 54(2): 157 - 167. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1093/forestry/54.2.157>
61. Mongue, E.; Val, J.; Samz, M.; Blanco, A.; Montañes, L. 1995. El calcio nutriente para las plantas: Bitter pit en manzano. Anales de la Estacion Experimental de Aula Dei. 21(3): 189 - 201
62. Morales, V. O. 2007. The economic impact of the forest sector in Uruguay: A cost-benefit analysis. Thesis Mag. Science. Athens, Georgia. The University of Georgia. 158 p.

63. Murphy, J.; Riley, J. A. 1962. Modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*. 27: 31 - 36.
64. Parent, L. E.; Dafir, M. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. (en línea). *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 117(2): 239 - 242. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239>
65. Powers, R. F. 1999. On the sustainable productivity of planted forests. (en línea). In: Boyle, J. R.; Winjum, J. K.; Kavanagh, K.; Jensen, E. C. eds. *Planted forests: Contributions to the quest for sustainable societies*. Dordrecht, Springer. pp. 236 - 306. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2689-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2689-4_18)
66. Qiao, M.-J.; Huang, T.-H.; Jiang, J.-Y.; Fu, Y.-L. 2016. Release characteristics and effects on *Eucalyptus* tree growth of fertilizer from good residue slow-release fertilizer shell. *Wood and Fiber Science*. 48(4): 217 - 227.
67. R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing version 4.2.2. (en línea). Vienna. s.p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.R-project.org/>
68. Rabuffetti, A. 2017. La fertilidad del suelo y su manejo. Montevideo, Hemisferio Sur. 2 vol.
69. Raimondi, G.; Maucieri, C.; Toffanin, A.; Renella, G.; Borin, M. 2021. Smart fertilizers: What should we mean and where should we go? (en línea). *Italian Journal of Agronomy*. 16(2): 1794. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1794>
70. Reyes-Millalón, J.; Gerding, V.; Thiers-Espinoza, O. 2012. Fertilizantes de liberación controlada aplicados al establecimiento de pinus radiata D. Don en Chile. (en línea). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 18(3): 313 - 328. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.08.060>

71. Rocha, J. H. T.; Gonçalves, J. L. de M.; Ferraz, A. de V.; Poiati, D. A.; Arthur Junior, J. C.; Hubner, A. 2019. Growth dynamics and productivity of an *Eucalyptus grandis* plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation. (en línea). Forest Ecology and Management. 447: 158 - 168. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.060>
72. Rose, R.; Haase, D. L.; Arellano, E. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: Potencial para mejorar la productividad de la reforestación. (en línea). Bosque (Valdivia). 25(2): 89 - 100. Consultado dic 2022. Disponible en <https://doi.org/10.4067/S0717-92002004000200009>
73. Rubilar, R. A.; Fox, T. R.; Alle, L.; Albaugh, T. J.; Carlson, C. 2009. Manejo intensivo al establecimiento de plantaciones forestales de *Pinus*. sp y *Eucalyptus* sp. en Chile y Argentina. (en línea). Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 40: 6 - 11. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/284053147>
74. \_\_\_\_\_; Lee Allen, H.; Fox, T. R.; Cook, R. L.; Albaugh, T. J.; Campoe, O. C. 2018. Advances in silviculture of intensively managed plantations. (en línea). Current Forestry Reports. 4: 23 - 34. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0072-9>
75. Sadanandan, E. K. 1990. Interplay between nutrients, water, root growth and productivity in young plantations. Forest Ecology and Management. 30(1-4): 213 - 232.
76. \_\_\_\_\_; Sands, R. 1993. Competition for water and nutrients in forests. (en línea). Canadian Journal of Forest Research. 23(10): 1955 - 1968. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1139/x93-247>

77. Silva, P. H. M. da; Poggiani, F.; Silva, A. A.; Prada Neto, I.; Paula, R. C. de. 2015. Mortalidade, crescimento e solução do solo em eucalipto com aplicação de fertilizante de liberação lenta. (en línea). CERNE. 21(3): 473 - 481. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1590/01047760201521031860>
78. Soares, M. T. S.; Maeda, S.; Wrege, M. S.; Gabira, M. M.; Bellote, A. F. J.; Andrade, G. de C.; Froufe, L. C. M.; Balieiro, F. de C.; Chaer, G. M.; Santos, F. 2021. Eucalipto: Desafios para a pesquisa em nutrição, na ótica da sustentabilidade florestal. (en línea). *In*: De Oliveira, E. B.; Pinto Junior, J. E. eds. O eucalipto e a Embrapa: Quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília, Embrapa. pp. 515 - 554. Consultado ene. 2023. Disponible en <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1131883>
79. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2016. Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11a. ed. Minas Gerais, Comissão de Química e Fertilidade do Solo. 376 p.
80. Switzer, G. L.; Nelson, L. E. 1972. Nutrient accumulation and cycling in Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: The first twenty years. (en línea). Soil Science Society of America Journal. 36(1): 143 - 147. Disponible en <https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600010033x>
81. Tamosiunas, M. 2011. Complejo forestal. *In*: Vasallo, M. ed. Dinámica y competencia intrasectorial en el agro: Uruguay 2000-2010. Montevideo, Udelar. pp. 105 - 123.
82. Uruguay XXI. 2016. Informe del sector forestal en Uruguay: Inteligencia competitiva. Montevideo. 35 p.
83. Varadachari, C.; Goertz, H. 2010. Slow-release and controlled-release nitrogen fertilizers. (en línea). New Delhi, SCON-ING. 33 p. (Bulletin no. 11). Consultado ene. 2023. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Chandrika-Varadachari/publication/262839872\\_Slow-release\\_and\\_Controlled-](https://www.researchgate.net/profile/Chandrika-Varadachari/publication/262839872_Slow-release_and_Controlled-)

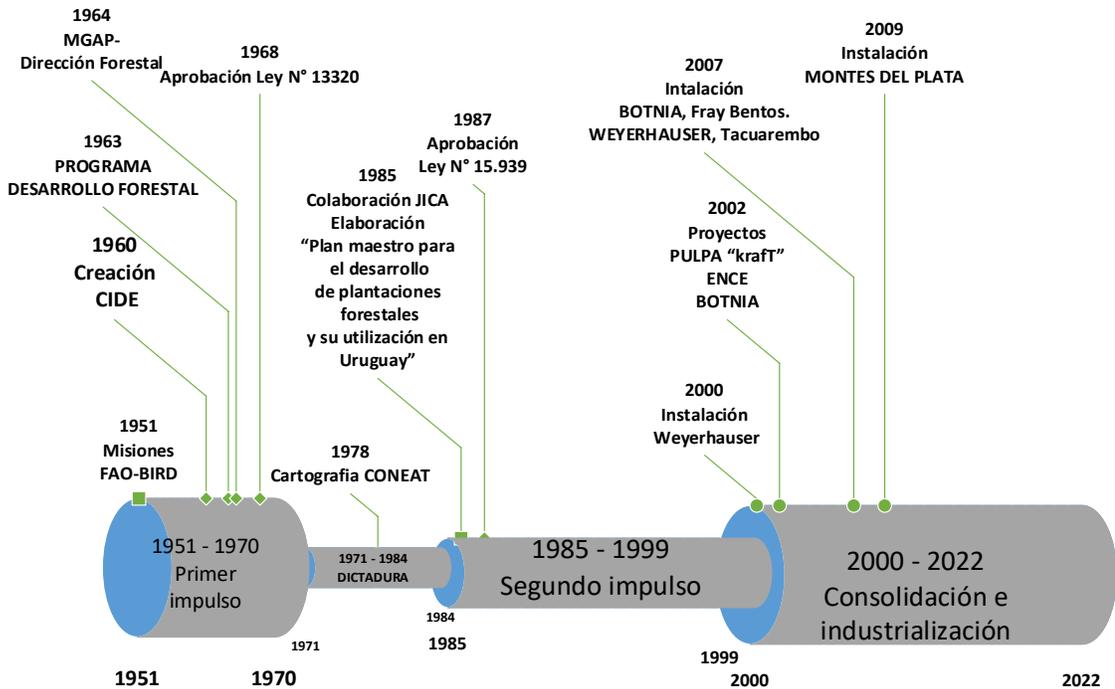
[release\\_Nitrogen\\_Fertilizers/links/0deec538fc7e12d299000000/Slow-release-and-Controlled-release-Nitrogen-Fertilizers.pdf](#)

84. Villalba, J.; Montouto, C.; Cazaban, J.; Caraballo, P.; Bentancur, O. 2010. Efecto del laboreo sobre la eficacia de herbicidas y el crecimiento de *Eucalyptus* spp. *Agrociencia* (Uruguay). 14(2): 45 - 54.
85. Walworth, J. L.; Sumner, M. E. 1987. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). (en línea). *In*: Stewart, B. A. ed. *Advances in Soil Science*. New York, Springer. pp. 149 - 188. Consultado ene. 2023. Disponible en [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4682-4_4)

## 9 ANEXOS

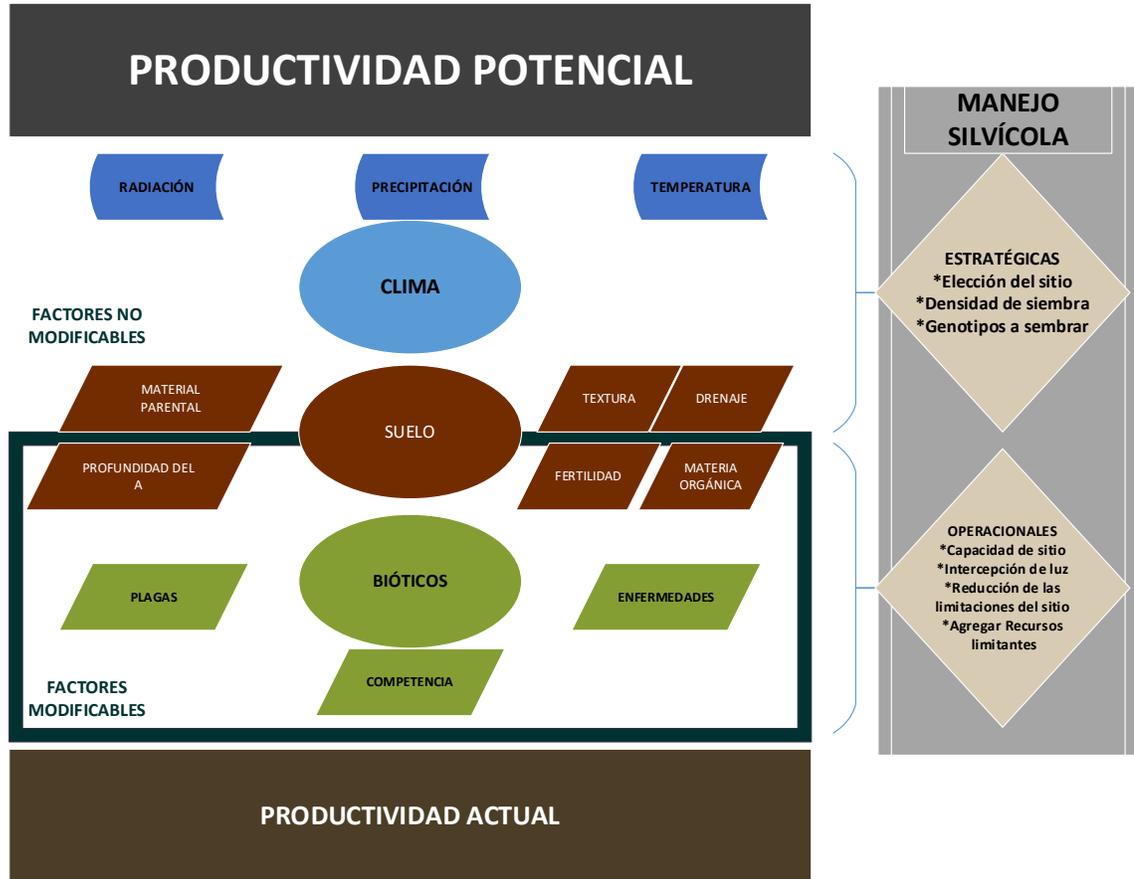
### ANEXO I:

FIGURA NO. 1: PRINCIPALES HITOS FORESTALES EN URUGUAY 1950-2022



**Fuente:** elaborado con base en Fossati y Van (2006), Morales (2007), Porcile (2007), Alvarado (2009), Gutiérrez y Panario (2014), Gautreau (2014).

**FIGURA NO. 2: FACTORES INCIDENTES EN LA PRODUCTIVIDAD FORESTAL**



**Fuente:** elaborado con base en Powers (1999), Fox (2000), Rubilar et al. (2018).

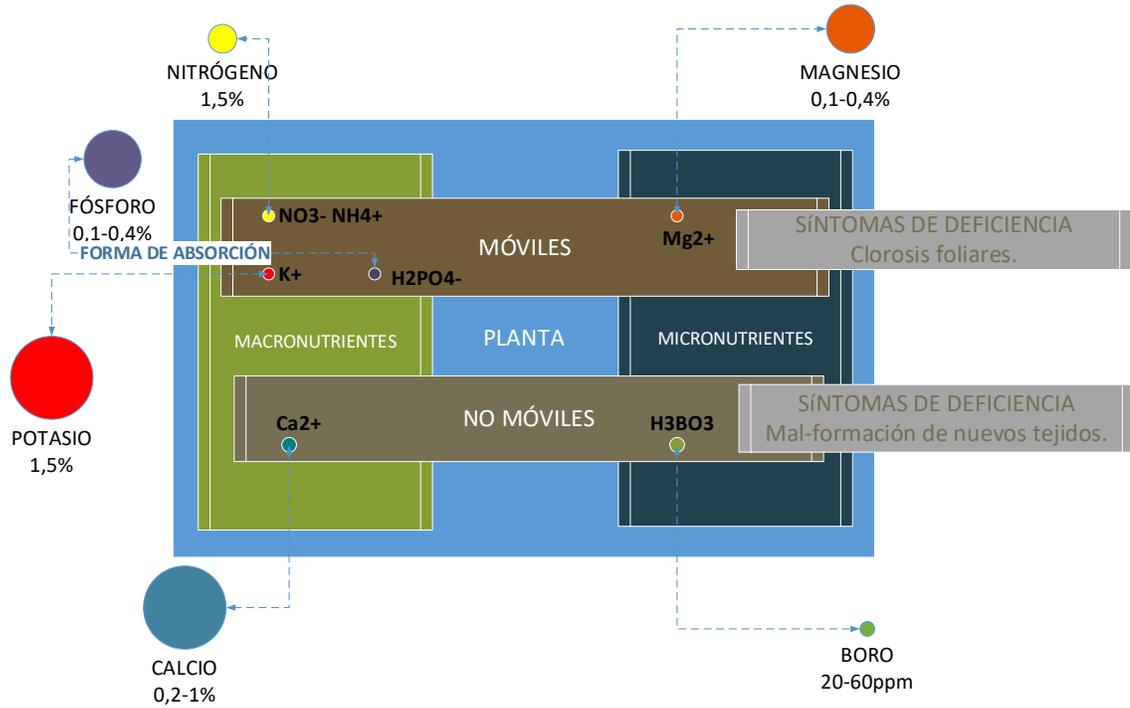
**Bibliografía Anexo I:**

- Alvarado, R. 2009. La expansión forestal en el Cono Sur. (en línea). Nueva sociedad. no. 223: 76 - 93. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <https://biblat.unam.mx/hevila/Nuevasociedad/2009/no223/6.pdf>
- Fossati, A.; Van, E. 2006. Estrategias y mecanismos financieros para la conservación y el uso sostenible de los bosques (Documento de trabajo). (en línea). Montevideo: FAO. 72 p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.fao.org/forestry/11623-09df12c118bf235224e78938fea555141.pdf>

3. Fox, T. R. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. (en línea). *Forest Ecology and Management*. 138(1-3): 187 - 202. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00396-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00396-0)
4. Gautreau, P. 2014. Forestación, territorio y ambiente: 25 años de silvicultura transnacional en Uruguay, Brasil y Argentina. Montevideo, Trilce. 293 p.
5. Gutiérrez, O.; Panario, D. 2014. Implementación de un complejo forestal industrial, ¿una política de Estado? Estudio de caso: Uruguay. (en línea). s.l., ENGOV. 22 p. Consultado 23 jul. 2021. Disponible en [http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/engov/20140526071243/WorkingPaperENGOV7\\_GutierrezyPanario.pdf](http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/engov/20140526071243/WorkingPaperENGOV7_GutierrezyPanario.pdf)
6. Morales, V. O. 2007. The economic impact of the forest sector in Uruguay: A cost-benefit analysis. Thesis Mag. Science. Athens, Georgia. The University of Georgia. 158 p.
7. Porcile, J. F. 2007. Crónicas del desarrollo forestal del Uruguay. (en línea). Montevideo, Fin de Siglo. 155 p. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/cronicas\\_del\\_desarrollo\\_forestal\\_del\\_uruguay\\_ii\\_0.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/cronicas_del_desarrollo_forestal_del_uruguay_ii_0.pdf)
8. Powers, R. F. 1999. On the sustainable productivity of planted forests. (en línea). In: Boyle, J. R.; Winjum, J. K.; Kavanagh, K.; Jensen, E. C. eds. *Planted forests: Contributions to the quest for sustainable societies*. Dordrecht, Springer. pp. 236 - 306. Consultado dic. 2022. Disponible en [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2689-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2689-4_18)
9. Rubilar, R. A.; Lee Allen, H.; Fox, T. R.; Cook, R. L.; Albaugh, T. J.; Campoe, O. C. 2018. Advances in silviculture of intensively managed plantations. (en línea). *Current Forestry Reports*. 4: 23 - 34. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0072-9>

ANEXO II:

FIGURA NO. 1: NUTRIENTES: CONTENIDO EN PLANTA, FORMAS, MOVILIDAD Y SÍNTOMAS DE DEFICIENCIA



**Fuente:** elaborado con base en Barbazán (1998), Marschner y Rengel (2012), Bonilla (2013).

**FIGURA NO. 2: CICLO DE LOS NUTRIENTES**



**Fuente:** elaborado con base en Laclau et al. (2010).

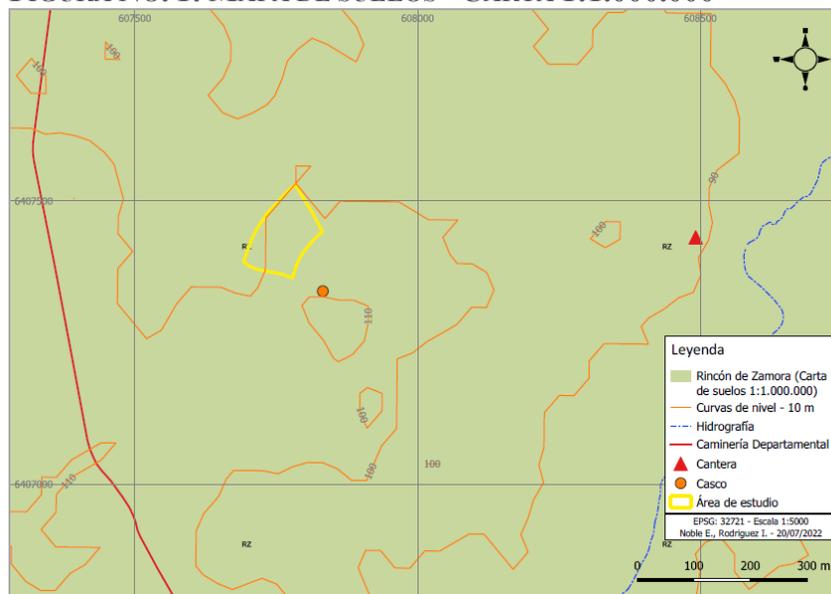
### **Bibliografía Anexo II**

1. Barbazán, M. 1998. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 27 p. Consultado 02 ene. 2023. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/AnPlantas.pdf>

2. Bonilla, I. 2013. Introducción a la nutrición mineral de las plantas: Los elementos minerales. In: Azcón-Bieto, J.; Talón, M. eds. Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid, McGraw-Hill. pp. 103-121.
3. Laclau, J.-P.; Ranger, J.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Maquère, V.; Krusche, A. V.; M'Bou, A. T.; Nouvellon, Y.; Saint-André, L.; Bouillet, J.-P.; De Cassia Piccolo, M.; Deleporte, P. 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. (en línea). Forest Ecology and Management. 259(9): 1771 - 1785. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>
4. Marschner, P.; Rengel, Z. 2012. Nutrient availability in soils. (en línea). In: Marschner, P. ed. Mineral nutrition of higher plants. Amsterdam, Elsevier. pp. 315 - 330. Consultado dic. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00012-1>

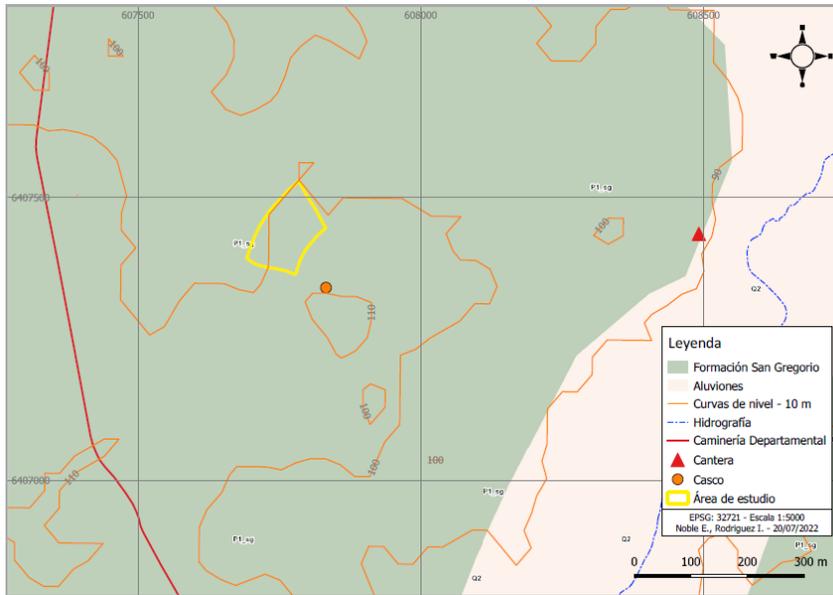
### ANEXO III:

**FIGURA NO. 1: MAPA DE SUELOS - CARTA 1:1.000.000**



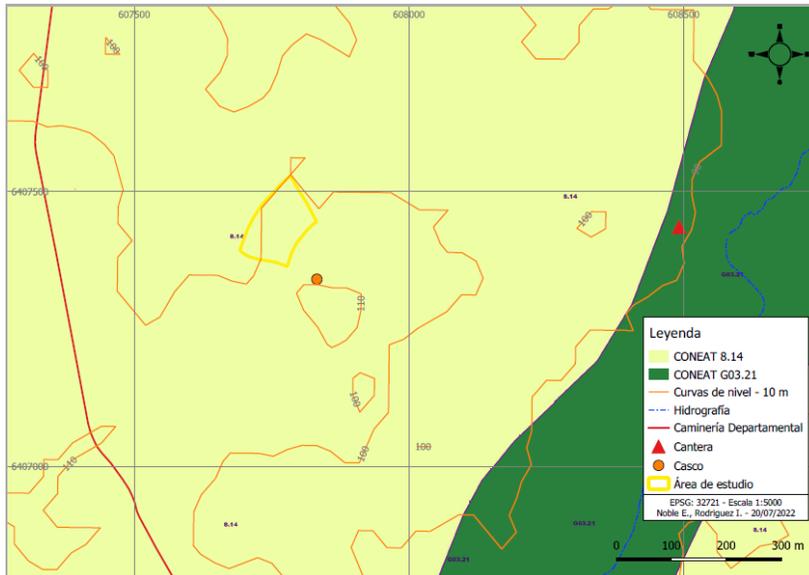
**Fuente:** tomado de MAP. DSF (1976).

**FIGURA NO. 2: MAPA GEOLÓGICO**



**Fuente:** tomado de MIEM. DINAMIGE (1985).

**FIGURA NO. 3: MAPA CONEAT**

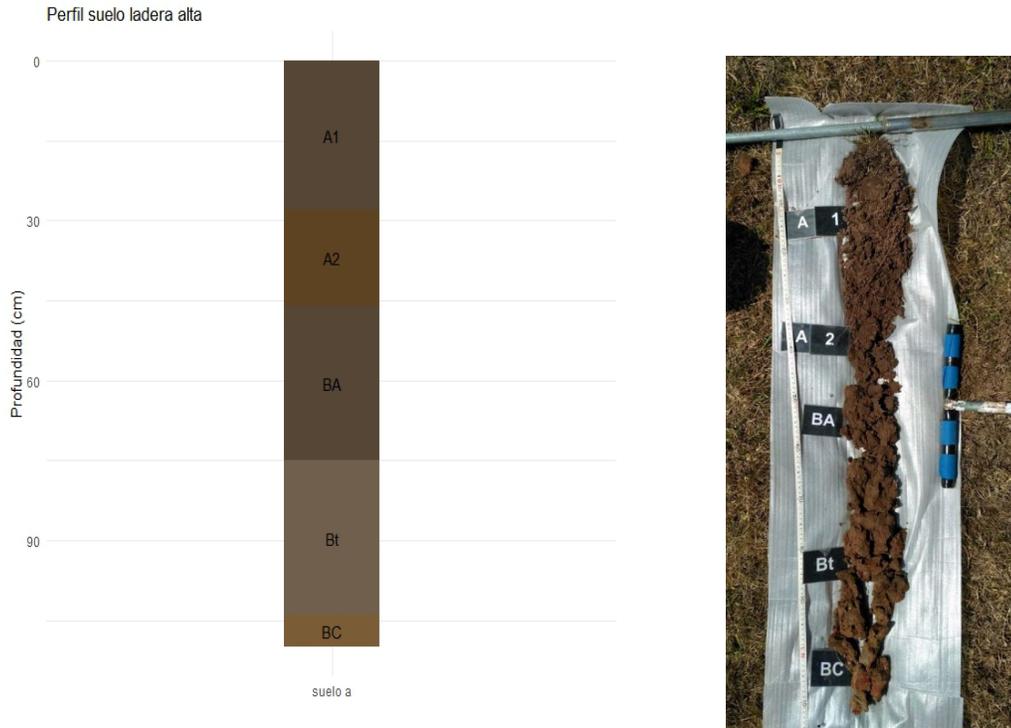


**Fuente:** tomado de MGAP. RENARE (1978).

**FIGURA NO. 4: MATERIALES COLECTADOS EN CANTERA**



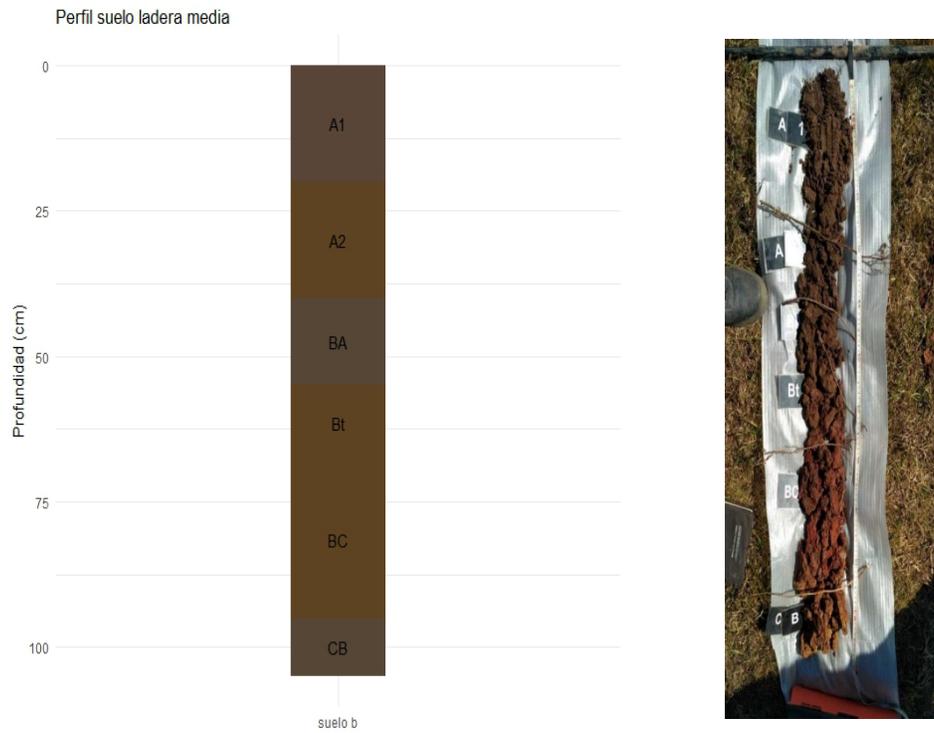
**FIGURA NO. 5: PERFIL DE SUELO BLOQUE 1**



**TABLA NO. 1 DESCRIPCIÓN DEL PERFIL BLOQUE 1**

Horizonte	Textura	Munsell	lim_sup (cm)	lim_inf (cm)	gravillas	moteados
A1	Franco	10YR 3/2	0	28		
A2	Franco	10YR 3/4	28	46		10YR 4/6
BA	franco-limoso	10YR 3/2	46	75	comunes	10YR 4/6
Bt	franco-arcillosa	10YR 4/2	75	104	comunes	2.5YR 4/8
BC	franco-arcillosa	10YR 4/4	104	110	comunes	

**FIGURA NO. 64: PERFIL DEL SUELO BLOQUE 2**



**TABLA NO. 2 DESCRIPCIÓN DEL PERFIL BLOQUE 2**

Horizonte	textura	Color	lim_sup (cm)	lim_inf (cm)	gravillas	moteados
A1	franco	7.5YR 3/2	0	20		
A2	franco	10YR <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	20	40		
BA	franco-limoso	10YR 3/2	40	55	pocas	10YR 4//6
Bt	franco-arcillosa	10YR <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	55	68	comunes	2.5 YR 4/8
BC	franco-arcillosa	10YR <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	68	95	comunes	2.5YR 4/8
CB	franco-arcillosa	10YR 3/2	95	105		2.5YR 4/8

**FIGURA NO. 5: PERFIL DEL SUELO BLOQUE 3**



**TABLA NO. 3 DESCRIPCIÓN DEL PERFIL BLOQUE 3**

horizonte	textura	color	lim_sup (cm)	lim_inf (cm)	gravillas	moteados
A1	franco	10YR 4/2	0	15		5 YR 4/6
A2	franco	10YR 4/4	15	40	pocas	10 YR 5/6
Bt	franco-arcillosa	10YR 4/6	40	60	Abundante "Stone line"	10 R 3/6
BC	franco-arcillosa	10YR 4/4	60	78	abundante	10 R 3/6
C	franco-arcillosa	10YR 4/4	78	90	abundante	10 R 3/6

### Bibliografía Anexo III

1. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay. (en línea). Montevideo. Esc. 1:1.000.000. Color. Consultado may. 2022. Disponible en

[https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619\\_carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_del\\_uruguay\\_1.1.000.000\\_imprimir\\_a0\\_0.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf)

2. MGAP. RENARE (Ministerio Ganadería Agricultura y Pesca. Recursos Naturales Renovables, UY). 1978. Cartografía CONEAT. Montevideo. Esc 1:20000. Color.
3. MIEM. DINAMIGE (Ministerio de Industria Energía y Minería. Dirección nacional de minería y geología, UY) 1985. Carta geológica del Uruguay. (en línea). Montevideo. Esc. 1:500.000. Color. Consultado 26 jul. 2022. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Mapa%20Geol%C3%B3gico%20del%20Uruguay.pdf>

#### ANEXO IV:

**TABLA NO. 1 COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIOS DE BASACOTE PLUS®**

<b>Nutriente</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>B</b>
<b>g/Kg</b>	150-160	80	120	20	2
<b>%</b>	15-16%	8% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	12% K <sub>2</sub> O	2% MgO	0,02%

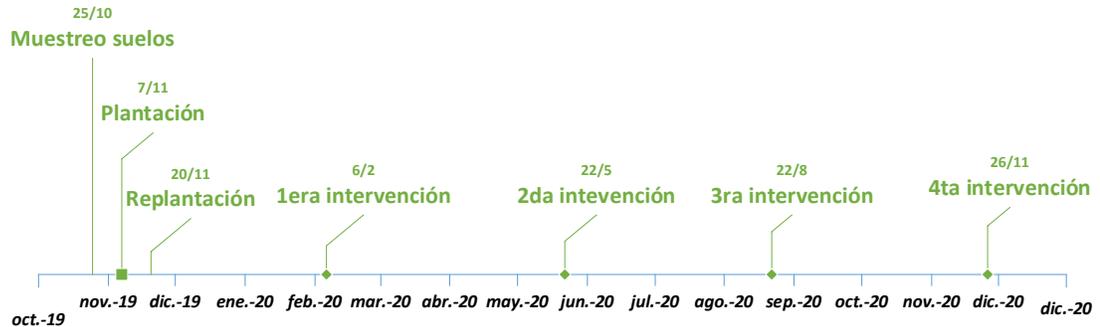
**Fuente:** adaptado de adaptado de Compo Expert (2021a, 2021b, 2021c, 2021d).

**TABLA NO. 2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PROMEDIO DE BASACOTE PLUS®**

<b>APARIENCIA</b>	Gránulos de 2,5 a 3,5 mm
<b>DENSIDAD a 20°C</b>	1.100 g/Kg
<b>pH (Sol 50g/l H<sub>2</sub>O)</b>	4
<b>TOXICIDAD</b>	NO TOXICO, NO INFLAMABLE, NO CORROSIVO y NO PELIGROSO
<b>ENVASES</b>	25 kg

**Fuente:** adaptado de Compo Expert (2021a, 2021b, 2021c, 2021d).

**FIGURA NO. 1: CALENDARIO DE ACTIVIDADES**



**TABLA NO. 3 Descripción y fecha de las actividades**

<b>Actividad</b>	<b>Fecha</b>
Evaluación y muestreo de suelos	24/10/2018
Plantación	07/11/2018
Replantación	20/11/2018
Medición altura y circunferencia a la base del cuello	05/02/2019
Medición altura y circunferencia a la base del cuello	21/05/2019
Medición altura y circunferencia a la base del cuello	21/08/2019
Medición altura y circunferencia a la base del cuello, CAP y toma de muestras foliares	25/11/2019

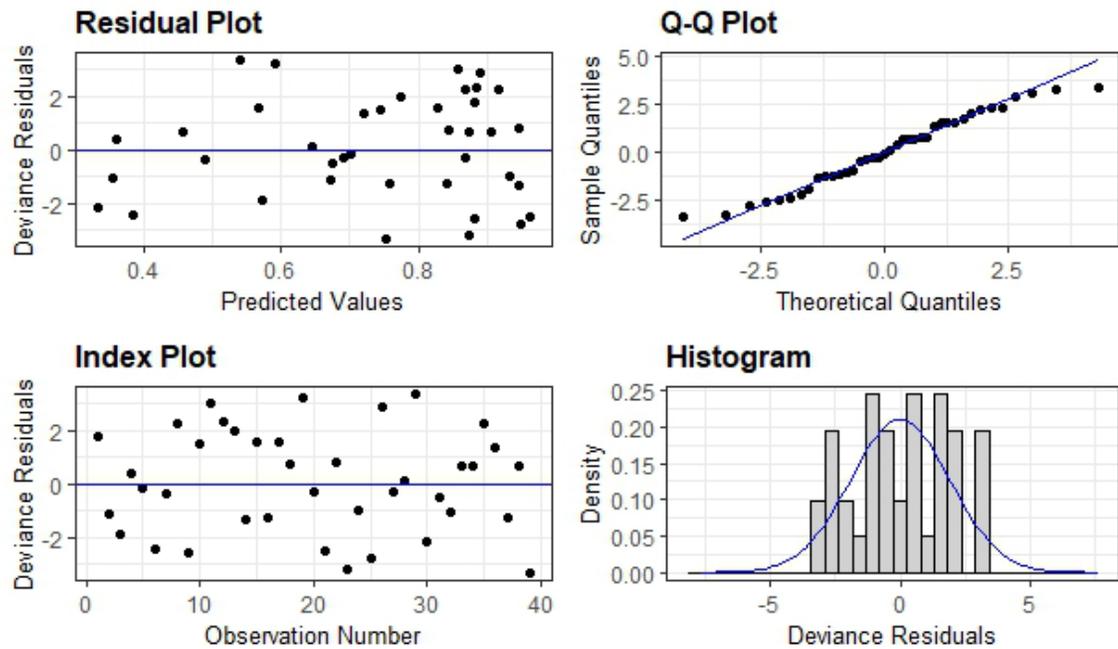
**Bibliografía Anexo IV**

1. Compo expert. 2021a. Ficha técnica Basacote Plus® 3M 16-8-12 (+2+TE). (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.compo-expert.com/es-ES/productos/basacote-plus-3m-16-8-122te>
2. \_\_\_\_\_. 2021b. Ficha técnica Basacote Plus® 6M 16-8-12(+2+TE). (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.compo-expert.com/es-ES/productos/basacote-plus-6m-16-8-122te>
3. \_\_\_\_\_. 2021c. Ficha técnica Basacote Plus® 9M 16-8-12(+2+TE). (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.compo-expert.com/es-ES/productos/basacote-plus-9m-16-8-122te>

4. \_\_\_\_\_ . 2021d. Ficha técnica Basacote Plus® 12M 15-8-12(+2+TE). (en línea). Buenos Aires. s.p. Consultado ene. 2023. Disponible en <https://www.compo-expert.com/es-ES/productos/basacote-plus-12m-15-8-12te>

ANEXO V:

FIGURA NO. 1: PANEL DE GRÁFICOS RESIDUALES SOBREVIVENCIA = TRATAMIENTO



ANEXO VI:

TABLA NO.1: TABLA DE P-VALOR PARA LOS NUTRIENTES EVALUADOS

	N	P	K	Ca	Mg	Bo
Bloque	7.29E <sup>-08</sup>	0.002	0.09	3.10E <sup>-08</sup>	6.21E <sup>-06</sup>	0.003
Tasa	0.24	0.219	0.40	0.06	0.997	0.531
Dosis	0.61	0.895	0.68	0.48	0.415	0.804
Tasa.Dosis	0.17	0.910	0.90	0.10	0.980	0.768
Tratamiento adicional	0.45	0.830	0.74	0.21	0.99	0.846