

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES POR *Eucalyptus dunnii* Maiden  
DE 4 AÑOS CON DESTINO A LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA  
PARA ENERGÍA Y CELULOSA**

**por**

**Luis Francisco BENTANCOR BOSSIO**

TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
Magíster en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias del Suelo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
(DICIEMBRE 2017)

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. PhD Mario Pérez Bidegain, Ing. Agr. MSc Pablo González Barrios, Ing. Agr. MSc Fernando Resquín e Ing. Agr. PhD Ricardo Methol, el 4 de diciembre de 2017. Autor: Ing. Agr. Luis Bentancor. Director Ing. Agr. PhD Jorge Hernández, Co-directora Ing. Agr. PhD Amabelia del Pino.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia

Ing. Agr. PhD. Jorge Hernández

Ing. Agr. PhD. Amabelia del Pino

Ing. Agr. MSc. Pablo González

Ing. Agr. MSc. Álvaro Califra

Ing. Agr. MSc. Fernando Resquín

Ing. Agr. MSc. Alejandro González

Ing. Agr. PhD. Mario Pérez Bidegain

Ing. Agr. MSc. Leticia Martínez

Ing. Agr. Virginia Takata

Ing. Agr. Fabián del Giorgio

Leticia Martínez (laboratorio)

A todos los compañeros de la Cátedra

Ing. Agr. Pablo Iraola

Ing. Agr. Carlos Mantero

Ing. Agr. Pablo Hernández

FAGRO (UDELAR)

Montes del Plata

Weyerhaeuser

Abengoa Energy Crops

INIA

F.O.S.A

## TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VIII
<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. JUSTIFICACIÓN Y MARCO DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. CARACTERÍSTICAS DEL GÉNERO <i>Eucalyptus</i></b> .....	<b>4</b>
<b>1.2.1. <u>Características de la especie evaluada</u></b> .....	<b>4</b>
<b>1.3. SUELOS FORESTALES</b> .....	<b>7</b>
<b>1.4. EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES</b> .....	<b>10</b>
<b>1.4.1. <u>Edad de la plantación al final de la rotación</u></b> .....	<b>11</b>
<b>1.4.2. <u>Componente de la biomasa cosechado</u></b> .....	<b>12</b>
<b>1.4.3. <u>Distribución y contenido de nutrientes a lo largo del fuste</u></b> ...	<b>15</b>
<b>1.4.4. <u>Calidad del sitio</u></b> .....	<b>16</b>
<b>2. <u>NUTRIENT EXTRACTION BY THE BIOMASS OF <i>Eufalyptus</i> <i>dunnii</i> Maiden GROWN ON SHORT ROTATION COPPICE FOR ENERGY PRODUCTION</u></b> .....	<b>19</b>
<b>2.1. ABSTRACT</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2. INTRODUCTION</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3. MATERIALS AND METHODS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.1. <u>Study sites</u></b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.2. <u>Soil sampling</u></b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.3. <u>Experimental design</u></b> .....	<b>26</b>
<b>2.3.4. <u>Measurements</u></b> .....	<b>26</b>
<b>2.3.5. <u>Laboratory samples preparations and analysis performed</u></b> ..	<b>26</b>
<b>2.3.6. <u>Energy yield</u></b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.7. <u>Defined variables for the analysis</u></b> .....	<b>27</b>
<b>2.3.8. <u>Statistical analysis</u></b> .....	<b>28</b>
<b>2.4. RESULTS AND DISCUSSION</b>	<b>29</b>

2.4.1. <b><u>Biomass production</u></b> .....	29
2.4.2. <b><u>Energy yield</u></b> .....	31
2.4.3. <b><u>Nutrient export</u></b> .....	33
2.4.3.1. Nutrient concentration.....	33
2.4.3.2. Nutrient export per hectare.....	36
2.4.3.3. Energy production per kilogram of absorbed nutrient.....	42
2.5. CONCLUSION.....	44
2.6. ACKNOWLEDGMENTS.....	45
2.7. REFERENCES.....	45
<b>3. <u>NUTRIENT ABSORPTION BY THE BIOMASS OF FOUR YEARS OLD Eucalyptus dunnii Maiden PLANTATIONS FOR CELLULOSE PURPOSES AND THEIR RELATIONSHIP WITH SOIL PARAMETERS OF DIFFERENT SITES IN URUGUAY</u></b> .....	50
3.1. ABSTRACT.....	50
3.2. INTRODUCTION.....	51
3.3. MATERIALS AND METHODS.....	55
3.3.1. <b><u>Study sites</u></b> .....	55
3.3.2. <b><u>Soil characterization and sampling</u></b> .....	56
3.3.3. <b><u>Tree sampling</u></b> .....	58
3.3.4. <b><u>Laboratory samples preparation and analysis performed</u></b> .....	58
3.3.5. <b><u>Defined variables for the analysis</u></b> .....	59
3.3.6. <b><u>Statistical analysis</u></b> .....	60
3.4. RESULTS AND DISCUSSION.....	60
3.4.1. <b><u>Soil characterization of the different sites</u></b> .....	60
3.4.2. <b><u>Biomass production</u></b> .....	62
3.4.3. <b><u>Nutrients concentration</u></b> .....	64
3.4.4. <b><u>Nutrients absorption</u></b> .....	65
3.4.5. <b><u>Soil tree relationships</u></b> .....	69
3.4.6. <b><u>Nutrient assimilation index</u></b> .....	79
3.5 CONCLUSIONS.....	82

<b>3.6. ACKNOWLEDGEMENTS.....</b>	<b>82</b>
<b>3.7. REFERENCES.....</b>	<b>83</b>
<b>4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL</u>.....</b>	<b>87</b>
<b>4.1. DISCUSIÓN GENERAL.....</b>	<b>87</b>
<b>4.1.1. <u>Descripción de los suelos estudiados</u>.....</b>	<b>87</b>
<b>4.1.2. <u>Producción de biomasa</u>.....</b>	<b>88</b>
<b>4.1.3. <u>Concentración de nutrientes</u>.....</b>	<b>89</b>
<b>4.1.4. <u>Absorción de nutrientes</u>.....</b>	<b>91</b>
<b>4.1.5. <u>Comentarios generales</u>.....</b>	<b>92</b>
<b>5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>.....</b>	<b>95</b>

## RESUMEN

Desde finales de la década de los 90' el Departamento de Suelos y Aguas ha estudiado diferentes aspectos del suelo en sistemas forestales. Pero hasta la fecha no existe información acerca de la extracción de nutrientes a edades tempranas no solo en plantaciones con fines energéticos, sino también en aquellas con destino a la producción de celulosa. Debido a ello fueron desarrollados dos trabajos los cuales son partes componentes de la tesis que se presenta cuyos objetivos fueron: Cuantificar la concentración de nutrientes en diferentes componentes del árbol en rotaciones cortas de 4 años de *E. dunnii*; Comparar la magnitud de la extracción de nutrientes y rendimiento energético de la biomasa de madera sin descortezar para dos densidades de plantación en dos sitios con aptitud forestal del país; Caracterizar las variables edáficas que influyen en el crecimiento y extracción de nutrientes por los árboles para diferentes sitios con suelos de aptitud forestal. Como resultado general se puede decir que la producción de biomasa total por hectárea fue mayor en las plantaciones adensadas que en las plantaciones con destino a celulosa, pero dentro de las plantaciones adensadas no se observaron diferencias significativas entre las densidades evaluadas. Si bien se observaron algunas diferencias significativas en las concentraciones de nutrientes en algunos componentes de la biomasa para cada sistema, estas fueron de magnitud similar entre ambos tipos de sistemas, y también con respecto a plantaciones con destino a celulosa a turno final (9 años). La absorción de nutrientes por hectárea no se encontró estar relacionada con el stock de nutrientes en el sitio, aunque surgieron relaciones significativas con la concentración de algunos nutrientes en el suelo, como calcio y magnesio. Las extracciones de nutrientes mostraron relaciones significativas con la producción total de biomasa, indicando que las concentraciones encontradas en planta fueron de magnitud similar. El aumento de la densidad de plantación, el acortamiento del ciclo y la extracción de todos los componentes de cosecha en los sistemas de producción de biomasa comprometen la sostenibilidad del sistema, particularmente en suelos de baja fertilidad, como los utilizados en la forestación comercial.

**Palabras clave:** *Eucalyptus dunnii*., extracción de nutrientes, concentración de nutrientes en suelos

## **NUTRIENT EXTRACTION BY FOUR YEARS OLD *Eucalyptus dunnii* Maiden FOR ENERGY AND CELLULOSE PRODUCTION**

### **SUMMARY**

Since the late 1990s, the Soil and Water Department has studied different aspects of soil in forest systems. However, until today there is no information on the nutrient extraction at early stages of plantations for energy not only on those done with energetic purposes, nor the ones allocated for cellulose production. Because of that, two studies were developed, which are component parts of the thesis which objectives were: Quantify the nutrient concentration in different tree components within short rotations of four years old *E. dunnii*; Compare the magnitude of the nutrient extraction and energy yield of debarking wood biomass for two initial planting densities in two sites with forest aptitude; Characterize the edaphic variables that influence the growth and nutrient extraction by the trees for different sites of forest soils aptitude. As a general result it can be stated that the total biomass production per hectare was higher in high planting density plantations than in those for cellulose purposes, but within high planting densities plantations, there were no significant differences between treatments. Although some significant differences were observed in nutrient concentrations in some components of the biomass for each system, these were of similar magnitude between both types of systems, and also regarding to plantations destined to cellulose at the end of the cycle (9 years). Absorption of nutrients per hectare was not found to be related to the stock of nutrients at the site, although significant relationships arose with the concentration of some nutrients in the soil, such as calcium and magnesium. The nutrient extractions showed significant relationships with the total biomass production, indicating that the concentrations found in the plant were of similar magnitude. Increasing planting density, shortening the cycle and extracting all harvest components in biomass production systems compromise the sustainability of the system, particularly in low fertility soils, such as those used in commercial forestation.

**Key words:** *Eucalyptus dunnii*., Nutrient extraction, Soil nutrient concentration



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. JUSTIFICACIÓN Y MARCO DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS**

En la actualidad la población mundial es de aproximadamente 7 billones de personas y según las proyecciones existentes para el año 2050 será de 9.2 billones (United Nations, 2013), por lo que la presión sobre los recursos será cada vez mayor. Esto puede llegar a ser una ventaja comparativa para países productores de materias primas como Uruguay, siempre y cuando el desarrollo esté acompañado de políticas de estado que apunten a una producción sostenible.

La “Primera ley forestal” N°13723 promulgada en el año 1968 tuvo como objetivos la protección del bosque nativo, la definición de los suelos de prioridad forestal y la definición de las especies de prioridad forestal. Esta ley si bien sirvió para definir los sitios dónde se podría desarrollar el sector y las especies con las cuales se podría llevar a cabo los proyectos, no tuvo un impacto que permitiera desarrollar de manera importante el sector.

Pero en el año 1987 con la promulgación de la “Segunda ley forestal” N° 15.939, la cual se basó en la aplicación de subsidios y exoneraciones fiscales, produjo un fuerte impacto que hizo que Uruguay pasara de tener 44 mil hectáreas de plantaciones comerciales en el año 1988 a aproximadamente 1 millón de hectáreas en la actualidad (DIEA, 2013). Esta expansión se basó principalmente en la instalación de grandes proyectos industriales como las fábricas de celulosa, aserraderos y en la actualidad aparece la bioenergía como una clara alternativa hacia la cual el sector podría apuntar ya que no solo proveería energía renovable a la matriz energética sino que también le daría valor a los residuos que hoy en día quedan en el campo.

Este desarrollo ha llevado a que el sector forestal represente en su conjunto el 4,5% del PBI total del país y sea el segundo rubro exportador en importancia

económica (aproximadamente 1.600 M U\$S en el año 2016), habiendo unas 1800 empresas vinculadas al complejo forestal, de las cuales el 92% son micro y pequeños emprendimientos, lo que hace que el sector ocupe directa e indirectamente un total de 15.202 personas (Uruguay XXI, 2017).

A medida que se llevaba a cabo este rápido crecimiento del sector, se comenzaron a generar inquietudes a nivel de diferentes instituciones y de las empresas productoras acerca de cuáles podrían ser las implicancias en las propiedades de suelo como consecuencia del cambio de uso tradicional del mismo de pastoril o agrícola al forestal. Esto determinó la necesidad de iniciar investigaciones tendientes a evaluar el impacto que tienen y pueden llegar a tener las plantaciones comerciales de *Eucalyptus sp.* y *Pinus sp.* en los recursos suelo y agua, para así generar información tangible que permitiera diseñar las mejores estrategias para un desarrollo forestal sostenible y reducir los impactos sobre el ambiente (Giosa, 2008).

El Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República desde finales de los años 90, en convenio con diferentes empresas e instituciones, ha realizado investigaciones tendientes a estudiar aspectos que involucran: extracción, exportación y reciclaje de nutrientes; limitantes nutricionales y sus correcciones; cambios en parámetros químicos, físicos y biológicos del suelo; dinámica del agua en el suelo; y efectos del laboreo en parámetros de crecimiento y conservación de suelos. Hasta la fecha en lo que concierne a la extracción y exportación de nutrientes, los trabajos realizados en el país se han basado principalmente en el estudio de plantaciones destinadas a la producción de celulosa al final del turno (9 años), y algunos para plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda* para la producción de madera para aserrado (16 años). No obstante ello, aun no existe información en el país acerca de la extracción y exportación de nutrientes que ocurre a edades tempranas (en el entorno de 4 años) en plantaciones con destino a la producción de biomasa con fines energéticos, y su equivalencia en términos de una plantación con destino a la producción de celulosa. El trabajo que se presenta apunta a obtener una información preliminar sobre dichos

aspectos, en particular para la especie *E. dunnii*, una de las especies del género *Eucalyptus* que en los últimos años ha tenido una franca expansión en la producción forestal nacional.

Para dichos efectos, fueron desarrollados dos trabajos, los cuales son partes componentes de la tesis que se presenta:

Artículo 1: Extracción de nutrientes por la biomasa de *Eucalyptus dunnii* Maiden en plantaciones adensadas de 4 años de edad para la producción de biomasa con fines energéticos, para el cual los objetivos del trabajo fueron:

a) Cuantificar la concentración de nutrientes en diferentes componentes del árbol en rotaciones cortas de 4 años de *E. dunnii* con fines energéticos. b) Cuantificar la magnitud de la extracción de nutrientes y rendimiento energético de la biomasa de madera sin descortezar para dos densidades de plantación en dos sitios con aptitud forestal del país.

Artículo 2: Extracción de nutrientes por la biomasa de plantaciones de *Eucalyptus dunnii* Maiden de 4 años de edad con destino a la producción de celulosa y su relación con parámetros de suelo de diferentes sitios de aptitud forestal del Uruguay, cuyos objetivos fueron:

a) Cuantificar la concentración y distribución de nutrientes en distintos componentes del árbol en plantaciones de *E. dunnii* de 4 años de edad en diferentes grupos de suelos de aptitud forestal del Uruguay. b) Caracterizar las variables edáficas que influyen en el crecimiento y extracción de nutrientes por los árboles (concentración y stock de nutrientes a la profundidad de arraigamiento) para diferentes sitios con suelos de aptitud forestal.

Finalmente, en la discusión general se compara y analiza en forma comparativa la información de ambos trabajos.

El artículo N°1 se enviará a la revista Biomass and Bioenergy, mientras que el artículo N°2 se enviará a la revista Forest Ecology and Management.

## **1.2 CARACTERÍSTICAS DEL GÉNERO *Eucalyptus***

El género *Eucalyptus* pertenece a la familia de las Mirtáceas, subfamilia Leptospermoideas y presenta aproximadamente 600 taxones específicos y subespecíficos cuyo centro de origen es Australia, existiendo unas pocas especies distribuidas en las islas vecinas. La distribución en el continente australiano presenta relación directa con las diferentes situaciones ecológicas, fundamentalmente aspectos climáticos y edáficos (Brussa, 1994).

Dentro de este género se presentan especies altamente sensibles al sitio forestal y otras que poseen mayor grado de plasticidad. Se entiende por plasticidad la capacidad del árbol de adaptarse a zonas diferentes a la de su distribución natural, esto es fundamental tenerlo en cuenta cuando se trabaja en la introducción de especies (Brussa, 1994).

### **1.2.1 Características de la especie evaluada**

*Eucalyptus dunnii* (Gunn's White gum) es una especie que puede alcanzar alturas de 50m y diámetros de 1,5 m que ocasionalmente pueden llegar a ser de 2,5 m. Crece naturalmente en un área muy restringida del noreste de Nueva Gales del sur y del sur de Queensland, Australia (Boland et al., 2006).

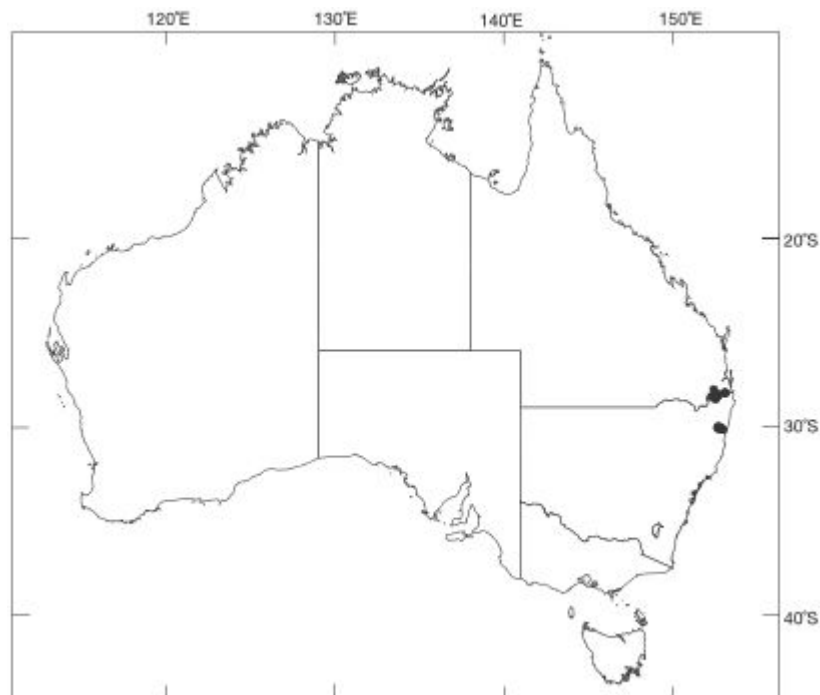


Figura N°1 Mapa de distribución natural de *E. dunnii*

Naturalmente crece en los valles y en las partes más bajas de los cerros, pero también puede crecer en las crestas de los cerros sobre suelos basálticos a lo largo de las partes menos densas de la selva. Prefiere suelos húmedos, fértiles, particularmente aquellos de origen basáltico, pero también pueden crecer en aquellos suelos derivados de rocas sedimentarias, especialmente de las lutitas mejor drenadas (Boland et al., 2006).

*E. dunnii* naturalmente crece asociado a especies como: *E. saligna*, *E. microcorys*, *E. grandis*, *E. propinqua*, *E. amplifolia sub especie sessiliflora* y *Allocasuarina torulosa* (Boland et al., 2006).

En lo que respecta a las condiciones climáticas, se encuentra a altitudes que van desde los 220-860m; las temperaturas máximas en los meses más calurosos van de 24-29°C y las mínimas de 2-5°C. La ocurrencia de heladas moderadas es de 20-60 por año y el régimen de precipitaciones varía entre 1000 a 1600 mm por año y se dan mayormente en verano (Boland et al., 2006).

En Australia, la madera de bosques naturales de esta especie es usada con propósitos de construcciones livianas pero no tiene la elevada reputación de *E. saligna* y *E. microcorys*. Una gran desventaja que ha sufrido esta especie es la severa defoliación por escarabajos del género *Anoplognatus* causando la restricción de su plantación para pulpa en las áreas donde son importantes las lluvias de verano (Hillis et al., 1984).

Esta especie no ha sido ampliamente evaluada creciendo como exótica, pero es una de las especies de más rápido crecimiento en Brasil y Sudáfrica. Tiene la ventaja de ser, en cierta forma más tolerante a las heladas que *E. grandis* y *E. globulus*, por tal motivo en Uruguay esta especie se planta principalmente en las zonas bajas del terreno.

La escasa producción de semillas era un problema que impedía que se utilizara a gran escala, pero actualmente debido al avance de técnicas silvícolas que han permitido su producción clonal ha permitido que se produzca un aumento importante de su área plantada comercialmente en el país.

En lo que respecta a Uruguay *E. dunnii* es la tercera especie más plantada en el país con una superficie de 81.365 ha. (11% de la superficie plantada con *Eucalyptus* sp.) (DIEA, 2013) y generalmente se la encuentra localizada en las partes más bajas ya que con respecto a las demás especies es más resistente a las bajas temperaturas lo cual determina que sea una buena alternativa no solo para evitar posibles pérdidas que se podrían sufrir por heladas sino que también permite diversificar la producción lo cual no solo es ventajoso desde el punto de vista económico sino que también desde el punto de vista sanitario.

### 1.3. SUELOS FORESTALES

Debido a que la Segunda Ley Forestal fue acompañada de subsidios y exoneraciones fiscales, de acuerdo a Durán (2005) tuvieron una influencia decisiva para que las áreas efectivamente forestadas se localizan casi totalmente en suelos de prioridad y aptitud forestal (Figura 2 y 3), los cuales pertenecen a las zonas de la carta de la CIDE (CIDE, 1967) que se describen brevemente a continuación, en base a Hernández (2016).

**Zona 2.** “Constituye una franja irregular que se extiende con dirección SW-NE desde el sur del Dpto. de Maldonado hasta el límite con Brasil en el Dpto. de Cerro Largo. Se incluyen además en esta zona la isla cristalina del Dpto. de Rivera, y las Sierras de Aceguá y Mal Abrigo. El paisaje es de sierras, con afloramientos rocosos de densidad variable, y colinas. El relieve es quebrado y ondulado fuerte. Los materiales geológicos están constituidos básicamente por rocas ígneas, metamórficas y algunas efusivas ácidas. Los suelos son superficiales o moderadamente profundos y de fertilidad media en las áreas de sierras, y moderadamente profundos o profundos y de fertilidad media en la región de colinas”.

**Zona 5.** “En esta zona se agrupan las asociaciones de suelos de la región central sur del país, con ocurrencia en los Dptos. de Florida, Flores, sur de Durazno, noreste de Colonia, norte de San José, este de Soriano, oeste de Lavalleja, suroeste de Maldonado y algunas áreas del Dpto. de Canelones. El relieve se caracteriza por colinas y lomadas fuertes, y los suelos –que son moderadamente profundos y superficiales- en algunas áreas tienen rocosidad asociada”.

**Zona 7.** “En esta zona se agrupan todas las asociaciones de suelos formadas por areniscas de Tacuarembó alteradas in situ o redepositadas. En general es donde

se encuentran los suelos más profundos y más pobres del país, inclusive con problemas de toxicidad de aluminio”.

**Zona 8.** “Esta zona agrupa asociaciones de suelos de texturas arenosas y fertilidad baja, aunque superior a la de los suelos de la zona 7, y en general, menos profundos. El material geológico está formado por areniscas de las formaciones devónicas y San Gregorio-Tres Islas, o materiales arenosos depositados sobre estas formaciones”.

**Zona 9.** “Se expresa en áreas de tamaño variable localizadas desde el centro norte del Dpto. de Soriano y en el centro este del Dpto. de Río Negro, y centro oeste del Dpto. de Paysandú. A esta zona pertenece también una región en el Dpto. de Canelones, identificada con la Formación Migués, perteneciente al período cretácico. El material geológico está formado por areniscas con cemento arcilloso, frecuentemente de tonos rosados, a veces rojizos o blanco grisáceos, y areniscas a veces litificadas, ambas correspondientes al período Cretácico. El relieve en general es suavemente ondulado con predominio de pendientes de 1 a 3 %, ocurriendo en otras zonas paisajes ondulados con formas mesetiformes y escarpas con pendientes más pronunciadas (6 a 12%). Los suelos son de texturas franco arenosas a franco arcillo arenosas, de alta diferenciación textural, moderadamente profundos, de fertilidad media a baja, y suelos superficiales asociados en algunos grupos”.

**Zona 07.** “Comprende áreas litorales marinas o continentales recubiertas con espesores variables de arenas”.

**Zona 09.** “A esta zona corresponden grupos desarrollados de sedimentos de texturas gruesas, pertenecientes a formaciones de fines del Terciario y a algunas etapas del cuaternario. Los grupos de suelos bajo uso forestal están formados a partir de areniscas de la Formación Salto. El relieve está constituido por laderas



asimétricas, donde las laderas sur son de marcada convexidad y pendientes de 4 a 8%, y las laderas de exposición norte son más extendidas y de pendientes suaves de 1 a 3%. Los suelos son de alta diferenciación textural (Argisoles y Planosoles)”.

“Es importante mencionar que la categorización de suelos de aptitud y prioridad forestal y su identificación con las zonas de la CIDE no implica que todos los grupos CONEAT incluidos en cada zona CIDE hayan sido catalogados como de prioridad forestal. Mediante actualizaciones recientes (Petraglia y Dell’Acqua, 2010) se han incluido algunos Grupos CONEAT, así como se han excluido otros” Hernández (2016).

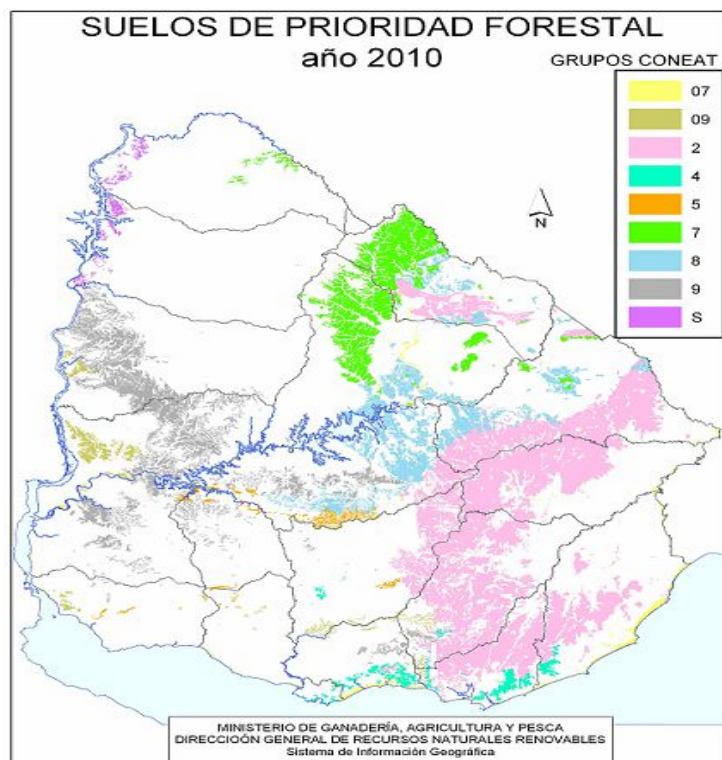


Figura N°2. Carta de suelos de prioridad forestal del Uruguay (Petraglia y Dell’Acqua, 2010).

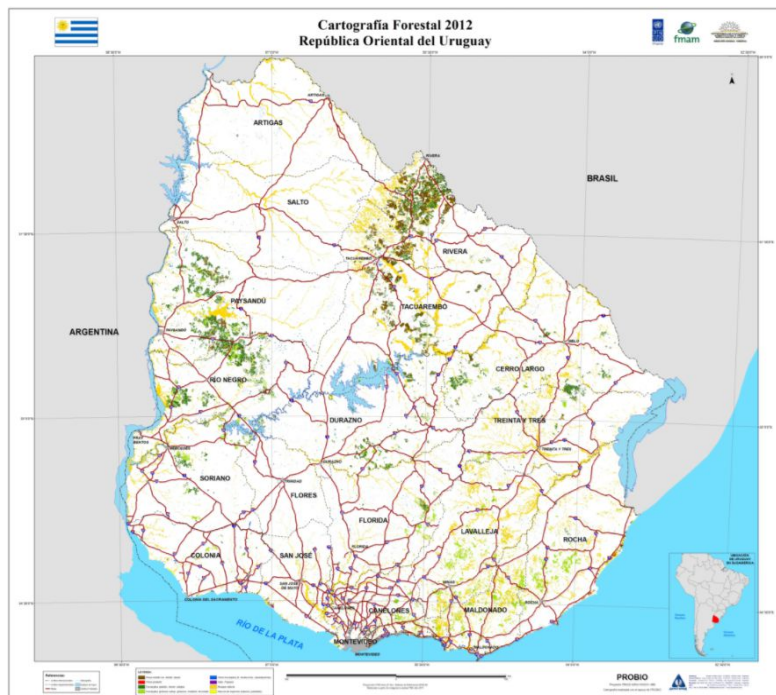


Figura N°3. DGF. Cartografía Forestal del Uruguay 2012

## 1.4 EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES

Según Switzer y Nelson (1972) el proceso de ciclaje de nutrientes en los ecosistemas forestales puede ser caracterizado de tres tipos: ciclo geoquímico, que hace referencia a la entrada y salida de elementos minerales entre los diversos ecosistemas, ciclo biogeoquímico que es aquel que establece las relaciones entre suelo, planta y atmósfera, y el ciclo bioquímico que se relaciona con la transferencia interna de los elementos dentro de los procesos vegetales.

De acuerdo a Schumacher y Caldeira (2001) un ecosistema forestal podrá tener una producción sostenible siempre y cuando las pérdidas de nutrientes de un sitio sean devueltas de alguna manera. Debido a esto es muy importante determinar las concentraciones de nutrientes de los componentes cosechados y su cantidad de biomasa producida para determinar qué cantidades de nutrientes están siendo extraídas. Según Freitas Melo et al. (1995) “el manejo nutricional de una plantación

forestal requiere la cuantificación de varios flujos de nutrientes en el ecosistema. En plantaciones en pie las cantidades de nutrientes existentes en el suelo y la exportada durante la exploración radicular son de gran importancia en la definición de balances de nutrientes”.

Según Goya et al. (1997) en las plantaciones forestales la meta debería ser lograr una productividad de las plantaciones no declinante o en aumento a través de las sucesivas rotaciones, manteniendo o mejorando la calidad del sitio en base a su capacidad para la disponibilidad de recursos. En este sentido los principales aspectos a considerar son la protección de la fertilidad de los suelos, y manejarse dentro de límites conocidos de resiliencia del sitio. Por último, el impacto sobre la productividad del sitio debe ser controlado a través del mejoramiento de las prácticas silviculturales (Goya et al., 1997).

Según Grove et al. (1996) existen 4 factores principales que determinan el contenido de nutrientes en la biomasa forestal los cuales son:

#### **1.4.1 Edad de la plantación al final de la rotación**

En las primeras etapas de crecimiento de una plantación (0 a 4 años), existe una gran concentración de nutrientes para la producción primaria, la redistribución de nutrientes dentro del árbol es casi inexistente, hay una gran proporción de nutrientes retenidos dentro del árbol, y el crecimiento es caracterizado por el incremento en la tasa de acumulación de nutrientes y limitado por la oferta de nutrientes desde el suelo. Según Leite et al. (2011) el 50% de potasio y fósforo, 56% de magnesio y 64% de calcio que los árboles utilizarán para todo el ciclo de crecimiento (9 años) serán absorbidos en estas etapas tempranas (0-4 años).

Por otro lado Ericsson (1994) muestra la importancia del impacto de la edad de cosecha en la extracción de Nitrógeno, Fósforo y Potasio comparando tres tipos de rotaciones: una de 20 años; cuatro de 5 años y diez de 2 años. Claramente se observa

que la absorción de nutrientes desde el suelo por tonelada cosechada de biomasa de madera decrece para nitrógeno desde 24,7 a 13,9 y 8,7 kg ha<sup>-1</sup>; para fósforo desde 1,8 a 1,1 y 0,6 kg ha<sup>-1</sup> y para potasio desde 6,7 a 2,6 y 0,9 kg ha<sup>-1</sup> si la cosecha es realizada a los 2, 5 o 20 años, respectivamente. El mismo autor sostiene además que la asimilabilidad de elementos como Ca y Mg, los cuales generalmente son tomados en exceso para los requerimientos de la especie, puede llegar a ser un problema para futuras rotaciones al ser extraídos en exceso del suelo.

#### **1.4.2. Compartimento de la biomasa cosechado**

En Uruguay, Hernández et al. (2009) para *E. dunnii* a edad de cosecha (9 años) encontraron que aunque las trozas comerciales representan el 61% del total de la biomasa producida, solo el 27% de N, 35% de P, 18% de K, 16% de Ca y 40% de Mg presente en el bosque fueron exportados con el producto. Pero también demostraron que cuando las trozas son llevadas con la corteza la exportación de nutrientes puede incrementar a 41%, 55%, 46%, 68% y 66% de la extracción total de N, P, K, Ca y Mg respectivamente.

En Australia Shammass et al. (2003) ponen como ejemplo lo frecuente que es a nivel de manejo forestal las prácticas de quema para tener un fácil acceso para la nueva plantación y como control de malezas, sin embargo remarcan lo negativo que es desde el punto de vista nutricional ya que esto trae aparejado significativas pérdidas de muchos nutrientes, especialmente de N. Por otro lado señalan la importancia de dejar los residuos no solo para el reciclaje de nutrientes, sino también para que la futura plantación cuente con una adecuada oferta de los mismos. Además destaca su importancia en la inmovilización de algunos nutrientes, especialmente el N, y en actuar como buffer contra las pérdidas por lavado que ocurren durante las primeras etapas de la replantación debido a que los sistemas radiculares de las plantas aún no tienen una cobertura importante como para absorber los nutrientes disponibles en el suelo.

Por otro lado, también en Australia, Carlyle (1993), muestra el efecto de decrecimiento a largo plazo en la productividad de las plantaciones por efecto de remover los residuos durante las etapas de preparación del sitio. En este trabajo se pone como ejemplo el efecto del mejoramiento en la disponibilidad de nitrógeno debido a la descomposición de los residuos de cosecha que fueron dejados en el sitio.

En España y Portugal Jones et al. (1999) encontraron que los crecimientos en *Eucalyptus globulus* eran menores cuando los residuos eran removidos comparado con los tratamientos en los que se incorporaban los residuos al suelo. Pero cabe remarcar que las diferencias eran significativas en algunos sitios y a la edad de 2 años.

Merino et al. (2005) estimaron la cantidad de nutrientes exportados de plantaciones bajo diferentes regímenes de intensidad de cosecha. En base a los resultados obtenidos, se propusieron diferentes métodos de manejo forestal para mejorar el estatus nutricional de las plantaciones. Se encontraron relaciones altas entre los nutrientes exportados por la cosecha y aquellos disponibles en el suelo, indicando limitaciones para P, Ca y Mg en el largo plazo. Prácticas corrientes de cosecha (remoción de trozas con corteza) resulta en altas tasas de extracción de P, K, Ca y Mg, especialmente en plantaciones de *Eucalyptus* por la alta productividad y baja eficiencia de nutrientes de esta especie.

En el Congo, Nzila et al. (2002) encontraron que después de 24 meses de haber removido todos los residuos hubo un marcado efecto negativo en la biomasa total producida en comparación con aquellos tratamientos en los que se había dejado o se había retirado en menor cantidad. ( $12,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  por año Vs  $22,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  por año). En este estudio los mejores crecimientos fueron registrados en aquellas parcelas dónde se había dejado la mayor cantidad de residuos orgánicos. También remarcan que el contenido de nutrientes en la biomasa ubicada sobre el suelo en las parcelas de un año era altamente dependiente del tipo y manejo de residuos.

Gonçalves et al. (1997) estudiaron la fertilidad del suelo y el crecimiento de bosques comerciales de *E. grandis* bajo diferentes prácticas de manejo de residuos. En su estudio demostraron que en aquellas parcelas dónde se realizó la remoción de todos los residuos de la plantación, la productividad disminuía alrededor del 30% en comparación con aquellas dónde los mismos eran retenidos. Por lo que llegaron a la conclusión de que el manejo de los residuos tiene un gran efecto en la fertilidad del suelo y el almacenamiento de nutrientes en el ecosistema, por lo que la sostenibilidad de la productividad del bosque puede verse comprometida en el corto plazo si los residuos son removidos.

Santana et al. (1999) indicaron que aunque la corteza de los árboles de *Eucalyptus sp.* representa sólo entre el 10 y 18% del total cosechado, presenta un alto contenido de nutrientes (73% del Ca, 65% del Mg, 46% del P, 41% del K y 24% del Na total absorbido) como promedio de las especies estudiadas. Por lo tanto el descortezado en el campo puede reducir sustancialmente la exportación de nutrientes, lo cual puede conducir a una mayor sostenibilidad o menor utilización de fertilizantes en plantaciones forestales de *Eucalyptus* en Brasil. Esto determinaría mejores posibilidades de mantener los niveles de nutrientes en el suelo, próximos al nivel crítico o por encima del mismo (Morais, 1990).

Møller (2000), estudió el efecto de diferentes intensidades de cosecha en la exportación de distintos nutrientes, encontrando que las cantidades removidas durante la cosecha de ejemplares enteros (en raleos), fueron significativamente mayores a aquellas cuando sólo se extrajo el fuste, independientemente de si el árbol era extraído inmediatamente del rodal o si se retiraba seis meses después. Al mismo tiempo, el secado del árbol en el sitio redujo la cantidad de nutrientes removidos entre un 20 y 45% comparada con la extracción inmediata en verde. Asimismo, se puede esperar efectos contrarios en el reciclaje de nutrientes ante la aplicación de prácticas intensivas, tales como la quema o la remoción total de la biomasa por cosecha (Binkley, 1993).

Smith et al. (1994) destacan la importancia de mantener los residuos en superficie, siendo considerada una estrategia adecuada ya que representa una reserva de nutrientes proporcionalmente importante; al mismo tiempo establecen que las prácticas que implican remoción o quema de los residuos producirán impactos negativos en la productividad, tanto por la disminución de la materia orgánica, como por la reducción en la cantidad de nutrientes.

### **1.4.3. Distribución y contenido de nutrientes a lo largo del fuste**

En Uruguay, González (2008) estudió la distribución de nutrientes a lo largo del fuste para *E. globulus* y *E. maidenii* encontrando que en general las variaciones a lo largo del mismo fueron relativamente pequeñas, salvo para N en *E. globulus* donde parecía haber una pequeña disminución hacia el ápice, y en *E. maidenii* un ligero aumento de P y K hacia el ápice. Por otro lado, Giosa (2008) trabajando con *E. grandis*, encontró una leve disminución de la concentración de N hacia el ápice. Para el caso de P y Mg observó un claro aumento de la concentración y en lo que respecta al K fue el único nutriente en que la distribución de la concentración fue homogénea a lo largo del fuste. Varela (2009) en *E. globulus* encontró que el N y Mg se encontraba en mayores concentraciones en las porciones bajas y altas del fuste con respecto a la porción media. Para P observó un pequeño aumento de la concentración hacia el ápice, encontrando lo mismo para K pero con mayor magnitud en las diferencias. Y para Ca notó un aumento desde la porción basal a la apical.

Debido a lo anterior, se puede decir que en Uruguay los diferentes estudios mostraron variación en las concentraciones según el nutriente y la zona del fuste muestreada y no se encontró una constante en el comportamiento, lo cual puede estar asociada a la especie evaluada y la época del año en la que se realizaron los muestreos en los diferentes trabajos.

En Brasil, Bellote et al. (1980) trabajando con *E. grandis* observaron que los nutrientes a lo largo del fuste se distribuyen de forma desigual, variando las

concentraciones según el mineral y la altura del fuste analizada. Este autor observó que para N las concentraciones aumentaban de manera importante desde la base hacia el ápice. Para el caso de P y Mg la concentración aumentó significativamente desde la porción basal a la media para mantenerse igual en la porción alta. Y en lo que corresponde al K y Ca, los menores valores se observaron en la porción basal, los mayores en la porción media y valores intermedios fueron observados en la porción alta de la troza.

Por otro lado, Foelkel (2005) menciona que el contenido de nutrientes no solo depende de la altura del fuste a la cual se considera, sino que además de si se trata de la albura o el duramen. En este sentido este autor encontró que los niveles nutricionales de la base y el ápice eran sensiblemente superiores a los de la porción media del fuste.

#### **1.4.4. Calidad del sitio**

El tipo de suelo es otro de los factores a tener en cuenta dadas las diferencias que existen en cuanto al material de origen y los contenidos de materia orgánica entre suelos, los cuales determinan el reservorio de nutrientes para las plantas (Turvey & Smethurst, 1994) .

Sganga (1980) señaló que los suelos con aptitud forestal del país son aquellos suelos desaturados, por tanto ácidos, de texturas gruesas con buena capacidad de retención de agua pero a su vez con facilidad para el enraizamiento y con drenaje bueno a moderadamente bueno. Debido a ello, según este autor, los mejores suelos para la producción forestal en orden decreciente son: 1) Luvisoles y Acrisoles; 2) Argisoles, Planosoles y Brunosoles de clases dísticas o subéutricas; 3) Arenosoles, Fluvisoles, Inceptisoles y Gleysoles e Histosoles (no salinos). Por lo anterior, el autor definió 5 clases de aptitud forestal, desde la Clase I (muy apta) que comprende las Unidades Rivera, Tacuarembó, Cuchilla Mangueras, Cuchilla Corrales, Chapicuy, Algorta, Tres Bocas, Cuchilla del Corralito y Río Tacuarembó hasta la Clase V (Poco



apta) que comprendería todas las unidades de buena aptitud agrícola o pastoril así como aquellas en que dominan los Litosoles y suelos sódicos pertenecientes a esta clase (Durán y García, 2007).

Herbert (2005) desarrolló un índice para la evaluación de la calidad de sitio en la zona litoral oeste que define las siguientes exigencias de los árboles en materia de sitio: temperatura, nutrición, disponibilidad de agua y la estabilidad mecánica. De estas propiedades, según este autor, en Uruguay según las exigencias de los árboles las más importantes serían la disponibilidad de agua y adecuado arraigamiento. Y además menciona que la nutrición, que determinaría el desarrollo vegetal, generalmente no es crítica en este país (Durán y García, 2007).

De acuerdo a Geldres et al. (2006) cada sitio tiene una producción de biomasa óptima sustentable la cual depende de la disponibilidad de nutrientes, la capacidad de retención de agua del suelo entre otros. Comparando el contenido de nutrientes en *Eucalyptus sp.* en diferentes regiones de Brasil Santana et al. (2008) encontró una relación positiva entre la producción de biomasa y el contenido de nutrientes y ambos eran menores en regiones con menor disponibilidad de agua.

Según Goya et al. (1997) en los rodales que presentan mayor producción de biomasa, la acumulación de nutrientes en la madera es mayor, lo cual podría estar mostrando relaciones directamente proporcionales con la productividad de materia seca por hectárea. Por otro lado, según Santana et al. (2002) la producción de biomasa también se encontraría determinada por características genéticas de las especies y mayores rendimientos estarían asociados con mayores exportaciones de nutrientes.

Fabres (2003) mencionan que algunas características del suelo como ser la profundidad, textura, densidad aparente y fertilidad del suelo son variables que afectan la productividad de las plantaciones comerciales de *Eucalyptus sp.*

Spangenberg et al. (1996) mencionan que la cuantificación del contenido de nutrientes en las plantaciones forestales y el conocimiento de la relación entre la exportación de nutrientes y la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo son importantes en la definición de la estrategia para mantener la sostenibilidad del sistema, más aún en suelos con baja disponibilidad de nutrientes totales dónde a largo plazo puede haber una reducción de la productividad potencial de los sitios (Santana, 1999). De acuerdo a González-García et al. (2016) existe falta de información de la concentración de nutrientes y su distribución en los árboles que sería importante clarificar para ayudar a los tomadores de decisión a asegurar la sustentabilidad del sistema. Más aún en una especie como *E. dunnii* en la que a nivel mundial existe escasa información y para la cual no existen datos publicados hasta la fecha en lo que refiere a extracciones de nutrientes a los 4 años de edad en plantaciones con destino a la producción de biomasa con fines celulósicos y energéticos.

## **2. Nutrient extraction by the biomass of *Eucalypts dunnii* Maiden grown on short rotation plantations for energy production**

Luis Bentancor <sup>a\*</sup>, Jorge Hernández <sup>a</sup>, Amabelia del Pino <sup>a</sup>, Álvaro Califra <sup>a</sup>

<sup>a</sup>University of the Republic, College of Agronomy, Soil and Water Department,  
Garzón Avenue 780, Montevideo, Uruguay, tel.: (+598) 23598272, CP 12900

\*Corresponding author

E-mail address: [lbent@fagro.edu.uy](mailto:lbent@fagro.edu.uy)/[lf2323@gmail.com](mailto:lf2323@gmail.com) (Luis Francisco Bentancor Bossio).

### **2.1. ABSTRACT**

The use of eucalypts grown on short rotation plantations is one alternative for energy production. Because all the components of the tree are harvested some questions arise: Can we call renewable energy the one in which all the components of the tree are removed from the soil every rotation of four year? What are the consequences from the nutrient cycling point of view? Energy production will vary depending on the number of trees per hectare? Because of this, the objectives of the research were: a) Quantify the nutrient concentration in different tree components of 4 years old *E. dunnii* plantations, b) Compare the magnitude of nutrient removals and energy yield in two initial planting densities, in two different sites. Trees were harvested, separated into: logs and the other tree components to estimate their nutrient content and potential energy production. There was no effect of the planting density on the biomass production per hectare, but owing to the higher proportion of wood in high planting density the production of energy was higher. Significant differences on

nutrient concentrations in different tree components were observed, but were generally of similar magnitude between the two densities. The nutrient export made by forest biomass varies depending on the nutrient, tree component and the number of trees. Increasing planting density, shortening the cycle and essentially the extraction of the total biomass, compromises the sustainability of the system, particularly in low fertility soils.

Keywords: *Eucalyptus sp.*, forest biomass, short rotation woody coppice, nutrients export

## 2.2. INTRODUCTION

From 1990 to 2015 world population increased in 2 billion and it is expected that it will increase by two billions for 2050 [1]. [2] Projects a growth of 48% in worldwide energy demand from 2012 to 2040. According to this source, among all the different sources of energy, total generation from renewable sources will increase by 2.9% per year, and the renewable share of world electricity generation will increase from 22% in 2012 to 29% in 2040. One of the options to generate renewable energy, is the use of forest biomass through the technique of cultivation of tree species with short rotation plantations (SRP) model [3], which differ from conventional forest in different aspects as high planting density and intensive silvicultural treatments [4] [5]. Some genera have been used with this purpose among which is *Eucalyptus sp.*, one of the most widely planted genera of the world [6]. In Uruguay, few *Eucalyptus* species were introduced 164 years ago and nowadays there are more than 100 species, all due to its capability to adapt easily to a wide range of environmental conditions [7]. Therefore in the country there are

991.000 hectares of commercial forest plantations out of which *Eucalyptus sp.* represent the 73% [8]. In 2008 Uruguay's Energy Bureau set the goal to achieve 50% of the energy production coming from renewable energy by 2015. Nowadays, Uruguay is on the forefront of renewable energy generation achieving 56% of renewable energy sources. In 2014 36% of the energy came from biomass or biofuels [9]. Due to this fact, some experiments with *Eucalyptus* were carried out with different population densities, species, and length of rotations for energy production using the system of SRC. The harvesting system used is the one called Whole-tree, where all components of the trees (stem, bark, branches, and leaves) are removed from the site, unlike conventional plantations where wood is harvested and the other harvest components are left on the site [10]. [11] mentions that at early stages of the cycle (0- 4 years) *Eucalyptus* present a high nutrient concentration for primary production. There is almost no nutrient redistribution in the tree, a great proportion of nutrients are retained inside of the tree and the growth is characterized by the increment in the nutrient accumulation rate and limited by the supply of nutrients from the soil. According to [12] 50% of K and P, 56% of Mg and 64% of Ca that trees need for the whole cycle are absorbed in this early stage. Furthermore, [13] showed that at the end of the rotation for cellulose production, timber represents around 70% of the total biomass production and the other harvested components (bark, branches and leaves) around 30%, the last ones have between 60 and 80% of the total nutrient content. Moreover, with high tree density, site productivity is likely to be affected faster, before the forest system can reach a nutrient balance [14]. [12] Demonstrated that in logs, the variations in population density did not affect the

nitrogen, phosphorus and calcium concentrations significantly. Nevertheless, the increase in tree density contributed to a higher nutrient depletion owing to the higher biomass productivity per unit of area. According to [15] based on [16] there is a lack of information on the nutrient concentration and its distribution in trees that is important to clarify in order to help decision makers to ensure sustainability of the system. On the other hand [17] mentions that is essential a better understand of the nutrient recycling processes to optimize silvicultural practices to maintain soil fertility over successive rotations. Even more in *E. dunnii* because there is no published data about nutrient extraction for energy grown trees that are being cut in early stages (0- 4 years).

In regard to abovementioned, some questions arise: Is it renewable energy that where all the components of the tree are removed from the soil every four years? What are the consequences from the nutrient cycling point of view? Will the energy production vary depending on the number of trees per hectare? Because of this, the objectives of this research were: a) Quantify the nutrient concentration in different tree components in short rotation plantations for four years old *E. dunnii* for energy purposes. b) Compare the magnitude of nutrient removals and energy yield for both planting densities, in two different sites.

## **2.3. MATERIALS AND METHODS**

### **2.3.1. Study sites**

The study was carried out in two different sites of Uruguay. Arroyo Malo farm (32°11'58.84"S; 55°54'12.22"O) in Tacuarembó Department, and La Merced farm

(32°24'17.53"S; 57°25'32.73"O) in Paysandú Department. In Arroyo Malo farm, the climate of the region is temperate, with an annual average temperature of 18.1°C. The highest average temperatures occur in January (24.1°C), and the lowest in June and July (12.3 °C). Changes in temperature are frequent and pronounced throughout the year. The mean annual rainfall for the study period was 1508 mm [18]. The soil parent material is in general sedimentary rocks (fine and very fine sandstones) from the Tertiary Era [19]. La Merced farm has a temperate climate with an average annual temperature of 18°C, an average temperature of 12°C in the coldest month (June) and 25°C in the warmest month (January), and annual rainfall of 1517.9 mm [18]. Soil parent material are cretacic sandstones [19].

### **2.3.2. Soil sampling**

In each site, soil characterization was done up to the rooting depth. A morphologic description was carried out and samples of all the horizons were taken for chemical analysis and to obtain bulk density for the nutrient stock calculations. Chemical analysis were: pH, organic carbon, exchangeable bases (Calcium, Magnesium, Potassium and Sodium), exchangeable acidity (Aluminum) and available Phosphorus (Bray 1-P). According to the characteristics shown in Tables 1 and 2 the soils of the experiments were defined as Fine-loamy, siliceous, active, thermic Mollic Hapludalf.

**Table 1**

Main physical and chemical characteristics of Arroyo Malo by soil horizon

Horizon	Depth	Clay	Silt	Sand	Organic C g kg <sup>-1</sup>	pH <sup>†</sup>		Extractable cations						Base	
						H <sub>2</sub> O	KCl	Al	Ca	Mg	K	Na	Total Bases	CECe	Sat.
	cm	----- % -----						----- cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> -----							%
A	46	14.7	24.3	61.0	7.0	4.7	3.8	1.0	2.7	1.0	0.3	0.2	4.2	5.3	79.2
AB	18	18.0	29.6	52.4	5.8	4.6	3.8	1.0	3.0	1.3	0.3	0.2	4.8	5.8	82.8
Bt	27	35.6	40.1	31.1	4.6	4.8	3.7	0.9	5.3	2.6	0.4	0.4	8.5	10.4	81.7
BC	18	36.4	31.7	32.0	4.6	5.1	4.1	0.7	6.5	3.1	0.3	0.6	10.5	11.2	93.8
C	13	27.5	36.8	35.8	4.6	5.1	4.1	0.6	5.1	2.5	0.3	0.2	8.0	8.6	93.0

Note: † pH: soil: solution relation v/v 1:2.5; Extractable Al: extracted by KCl 1M; Extractable bases: extracted by Ammonium Acetate 1M; CECe:

effective Cation Exchange Capacity; Base Sat.: (Total Bases/CECe)\*100.



**Table 2**

Main physical and chemical characteristics of La Merced by soil horizon

Horizon	Depth	Clay	Silt	Sand	Organic C g kg <sup>-1</sup>	pH†		Extractable cations						Base Sat.	
						H <sub>2</sub> O	KCl	Al	Ca	Mg	K	Na	Total Bases		CECe
	cm	g kg <sup>-1</sup>				cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>							%		
A	43	13.1	27.2	59.7	6.4	4.8	3.7	0.8	2.1	0.8	0.1	0.2	3.2	4.0	80.0
E	24	12.6	25.3	62.1	2.9	4.8	3.7	0.8	1.9	0.8	0.1	0.2	3.0	3.8	79.0
Bt	40	30.3	31.7	38.0	3.5	5.1	4.1	0.6	9.6	3.2	0.4	0.3	13.4	14.1	95.0
BC	26	29.0	36.2	34.8	1.7	5.4	4.2	0.3	11.0	3.7	0.4	0.4	15.4	15.7	98.1

Note: † pH: soil: solution relation v/v 1:2.5; Extractable Al: extracted by KCl 1M; Extractable bases: extracted by Ammonium Acetate 1M; CECe:

effective Cation Exchange Capacity; Base Sat.: (Total Bases/CECe)\*100

### **2.3.3. Experimental design**

In both sites, a randomized complete block design was established in 2010 with two initial planting densities in three replications: 3m x 1.5m, 2220 trees per hectare (low planting density) and 3m x 0.75m, 4440 trees per hectare (high planting density). In the case of La Merced the plant biomass and nutrient concentration evaluation was made at the ages of 24 and 49 month, meanwhile for Arroyo Malo the age was 46 months.

### **2.3.4. Measurements**

For each planting density, three trees per replication with average DBH and height were selected to harvest. After that, samples of each harvest component of each tree were analyzed. Logs and residues (leaves and branches) were weighted individually and one representative tree of each treatment was chosen to weight separately: logs and bark, leaves, coarse branches and fine branches to estimate the proportion of each component in the aerial biomass. In the case of the samples for the determination of Gross Calorific Values, a composite sample of the components wood + bark per block was taken.

### **2.3.5. Laboratory samples preparation and analysis performed**

Samples of each component were dried at 65°C until constant weight to estimate the dry matter (DM). After that, samples were grinded to < 0.5 mm to determine their nutrient content. Nitrogen was determined by Kjeldahl, whereas a dry mineralization was used for Ca, Mg, K and P extraction. Ca and Mg were determined by atomic

absorption spectrometry, K by emission spectrometry and P was measured by colorimetry [20]. Soil samples were dried at 40°C and grinded to <2mm particle size. Exchangeable Ca, Mg and K were determined from a 1M ammonium acetate extraction solution by atomic absorption (Ca, Mg) and emission (K, Na).

### **2.3.6. Energy yield**

Determination of Gross Calorific Value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter and calculation of net calorific value was obtained based on norms DIN 51900-1:2000 and the Determination of Gross Calorific Value of solid and liquid fuels using the isoperibol or static jacket calorimeter and calculation of net calorific value was made based on DIN 51900-2:2003.

### **2.3.7. Defined variables for the analysis**

The following productive variables were calculated as follow:

i) Timber biomass production ( $\text{kg DM tree}^{-1}$ ;  $\text{kg DM ha}^{-1}$ ):  $[\sum \text{logs wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ of timber in a log disc} * \% \text{ of wood disc DM}] * \text{N}^\circ \text{ of trees per hectare}$

ii) Bark biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) =  $[\sum \text{logs wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ of bark in log disc} * \% \text{ of bark disc DM}] * \text{N}^\circ \text{ of trees per hectare}$

iii) Branches biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) =  $\text{residues wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ branches (fine/coarse)} * \% \text{ branches DM (fine/coarse)} * \text{N}^\circ \text{ trees per hectare}$

iv) Leaves biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) =  $\text{residues wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ leaves} * \% \text{ leaves DM} * \text{N}^\circ \text{ of trees per hectare}$

v) Nutrient concentration in each harvest component ( $\text{g kg}^{-1}$ )

vi) Total nutrient absorbed ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) =  $\text{g kg}^{-1}$  of each nutrient\* DM ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) of each tree component

vii) Energy yield:  $\text{MJ Kg}^{-1}$  (data obtained in the analysis), MJ per tree (dry matter production per tree multiplied by the calorific value) and GJ per hectare (dry matter production per hectare multiplied by the calorific value).

viii) Energy production per kilogram of absorbed nutrient (EPAN) ( $\text{GJ kg}^{-1}$ ): energy yield in ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) divided the nutrients absorbed ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

### **2.3.8. Statistical Analysis**

The model used to analyze the variables: individual and total dry matter; nutrient concentration and nutrient export of the different tree components was:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \delta_{ij} + \gamma_k + \tau\gamma_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Where  $Y_{ijk}$  is the plant variable of the plot in the  $i$ -th density the  $j$ -th block and the  $k$ -th zone;  $\mu$  is the overall mean;  $\tau_i$  is the  $i$ -th density effect;  $\beta_j$  is the  $j$ -th block effect;  $\delta_{ij}$  are sub sampling errors;  $\gamma_k$  is the  $k$ -th zone effect;  $\tau\gamma_{ik}$  is the interaction effect between zone and density; and  $\varepsilon_{ijk}$  are the experimental errors.  $\delta_{ij}$  and  $\varepsilon_{ij}$  are independent random variables identically  $\sim N(0, \sigma_{\text{sub}}^2)$  and  $\sim N(0, \sigma_{\text{error}}^2)$  respectively.

The model used to analyze the energy yield by zone was:

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

Where  $Y_{ij}$  is the plant variable of the plot in the  $i$ -th density and the  $j$ -th block;  $\mu$  is the overall mean;  $\tau_i$  is the  $i$ -th density effect;  $\beta_j$  is the  $j$ -th block effect and  $\varepsilon_{ij}$  are the experimental errors.  $\varepsilon_{ij}$  are independent random variables identically  $\sim N(0, \sigma^2_{\text{error}})$ . Tukey test at  $\alpha=0.05$  level was used to compared treatment means when significant differences were found. All the analysis were implemented in the statistical software SAS Version 9.2.

## **2.4. RESULT AND DISCUSSION**

### **2.4.1. Biomass production**

Both for the low and high planting density no significant differences were observed between sites when comparing the individual and total DM production. That means that there was no effect of the site Table 3.

But when the comparison was made between treatments within each site, significant differences were observed for all tree components. This is probably because in low planting density, there is less competence and more light availability, which result in bigger trees with greater proportion of crown components Table 3.

When the comparison was made per hectare, no significant differences were found between planting density treatments within sites Table 3. Smaller size of trees in high planting density was compensated for the higher number of trees per hectare, resulting in similar production of kg DM ha<sup>-1</sup>. Despite of that, especially for Arroyo Malo, there was a tendency of higher biomass production in the treatment with

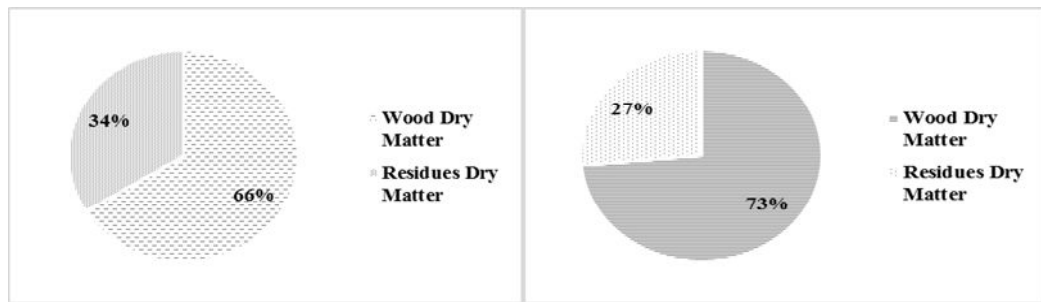
higher number of trees. The proportion of wood in the total harvested biomass showed the same pattern than that of individual trees, being higher in treatments with higher number of trees (Fig. 1 and 2). This was also observed by [21][4] because of the large proportion of crown components in trees with lower planting densities.

**Table 3**

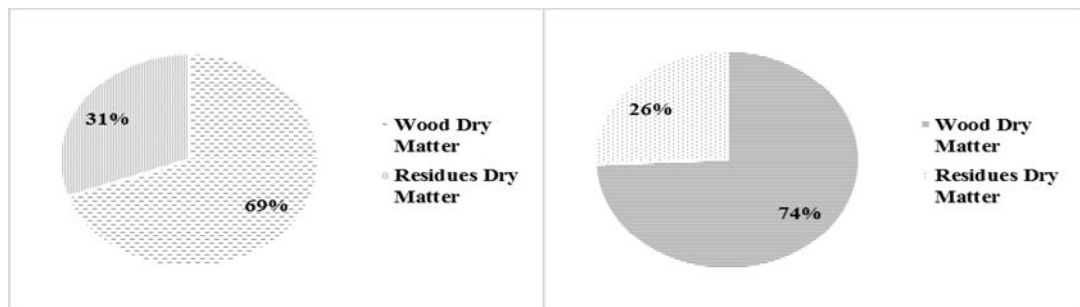
Biomass production (DM per tree and per hectare) according to spacing treatment and site

Spacing (m)	Site	Total biomass	Stem biomass	Residues biomass
<i>Kg DM per tree</i>				
3 x 1.5	AM	58.0A	38.4A	19.6A
3 x 1.5	LM	53.1A	36.9A	16.2B
3 x 0.75	AM	23.1B	17.0B	6.1C
3 x 0.75	LM	25.9B	19.2B	6.7C
<i>Mg DM per hectare</i>				
3 x 1.5	AM	85.4A	56.6A	28.8A
3 x 1.5	LM	93.2A	64.7A	28.9A
3 x 0.75	AM	100.5A	73.8A	26.6A
3 x 0.75	LM	91.9A	68.2A	23.6A

AM (Arroyo Malo); LM (La Merced); Different letters indicate significant differences between treatments at  $\alpha=0.05$  level.



**Figure 1** Proportion of Wood and Residues Dry Matter (%) for low (left) and high planting density in Arroyo Malo(right) in individual trees.



**Figure 2** Proportion of Wood and Residues in the total biomass (%) for low (left) and high planting density in La Merced (right) in individual trees.

#### **2.4.2. Energy Yield**

Similar results of heating values ( $\text{MJ Kg}^{-1}$ ) of stem + bark were found for both sites and densities Table 4. These results are in general similar with the ones presented by some authors who worked with different species of *Eucalyptus* ([22] [4][23][4] [24]), but smaller than the corresponding to other authors ([25] [15]), who also worked with *Eucalyptus sp.* The heating values were however higher, comparing to others genera used with the same purposes as willows and poplars [26] . The behavior observed for the energy production was similar to biomass production, at

individual tree level as the low planting density generated bigger trees which means higher biomass and therefore higher energy production. When biomass production was analysed at the hectare level, the smaller tree size was compensated with the higher number of trees per hectare. Considering that the proportion of wood in high planting density was higher in comparison with low planting density (Figures 1 and 2), the high planting density produced statistical significant higher amounts of energy per hectare Table 4.

**Table 4**

Biomass (per tree and per hectare) and energy yield of wood + bark for both sites and both densities

Spacing (m)	Wood + bark biomass			Energy yield	
	Kg DM per tree	Mg DM per hectare	MJ Kg <sup>-1</sup>	MJ per tree	GJ ha <sup>-1</sup>
AM 3x1.5	44.8A	66.0A	19.6A	878.1A	1293.6B
AM 3x0.75	19.0B	82.7A	19.5A	370.5B	1612.7A
LM 3x1.5	42.5A	74.6A	19.4A	824.5A	1447.2B
LM 3x0.75	22.5B	79.8A	19.4A	436.5B	1548.1A

Different letter indicate significant differences between treatments at alfa=0.05 level.



### **2.4.3. Nutrients export**

#### **2.4.3.1. Nutrient concentration**

Tables 5 and 6 show that nutrient concentration in wood was lower in comparison to the other tree components, which coincides with [13][27]. Likewise leaves, except for Ca, were the component with the highest nutrient concentration mean value. Meanwhile, the highest values of Ca were observed in the bark which is in line with the results of [12] [13]. For N and P, the magnitude of the concentration was: leaves > bark > fine branches > coarse branches > wood. For Ca and Mg it was bark > leaves > branches > wood. And for K, leaves were the fraction with the higher concentration, wood with the lowest, and the rest of the components had similar values. Analyzing the nutrient concentration between densities of the different sites, and between densities within each site we did not identify a pattern that determined if in one of the sites, or in one of the densities this variable were higher or lower. Reviewing data from [32] we observed that, for example, for N in leaves this author had bigger differences than in our study, but no significant differences were observed (due to that we hypothesized that he worked with a bigger experimental error). For that reason, it can be stated that the magnitude of the concentration was similar, and total nutrient export will depend to a greater extent on the biomass production and not on the nutrient concentration.

**Table 5**Nutrient concentration (g Kg<sup>-1</sup>) by density of different tree components in Arroyo Malo

Spacing	Wood		Bark		Leaves		Coarse Branches		Fine Branches	
	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75
N	1.77A	1.30A	4.29A	3.90B	23.04A	25.45B	2.12A	2.99A	3.47A	4.34B
P	0.14A	0.10B	0.17A	0.16A	1.01A	1.20A	0.10A	0.10A	0.32A	0.34A
K	0.52A	0.47B	2.53A	4.07B	8.18A	7.64A	2.13A	2.17A	5.03A	4.49A
Ca	0.56A	0.55A	12.28A	13.58B	8.43A	8.41A	4.30A	7.20B	6.11A	4.68A
Mg	0.35A	0.25B	2.22A	2.97B	1.94A	2.34A	1.10A	1.30A	0.98A	0.78A

Different letters indicate significant differences between treatments at  $\alpha=0.05$  level.

**Table 6**Nutrient concentration (g Kg<sup>-1</sup>) of different tree components in La Merced

Nutrient	Wood		Bark		Leaves		Coarse branches		Fine branches	
	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75
Spacing	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75	3 x 1.5	3 x 0.75
N	1.29A	1.28A	4.27A	4.38A	20.89A	19.15A	2.86A	2.31B	3.02A	3.05A
P	0.19A	0.16B	0.24A	0.24A	0.70A	0.60A	0.11A	0.18A	0.20A	0.19A
K	0.75A	0.93B	2.89A	3.95B	7.31A	5.81A	4.33A	2.87B	4.03A	3.90A
Ca	1.03A	1.29B	14.27A	12.55B	8.73A	11.03A	5.03A	5.27A	6.37A	7.42A
Mg	0.35A	0.40B	2.21A	2.07B	1.63A	1.71A	0.83A	1.73B	0.84A	0.74A

Different letters indicate significant differences between treatments at  $\alpha=0.05$  level.

#### **2.4.3.2. Nutrient export per hectare**

For Arroyo Malo, N was the nutrient with the highest exportation values, ranging from 313 Kg ha<sup>-1</sup> for low planting density to 380 Kg ha<sup>-1</sup> for high planting density Table 7. For this nutrient, leaves were the component with the higher proportion, ranging from 42 to 56% of the total nitrogen for low and high planting density respectively (Figure 3). For this site, Ca was the second nutrient with greater amount exported, ranging from 264 to 282 Kg ha<sup>-1</sup> for low and high planting density respectively Table 7. In this case, around 45% of the total Ca export was located in the bark (Figure 3). For phosphorus, the greater proportions were found in wood and leaves (around 40% in each one), meanwhile for Mg greater proportions were found in wood and bark, around 30% in each one (Figure 3). On the other hand, K was the nutrient with a more homogeneous distribution among the different harvest components, but greater proportions were located in leaves (around 30%) (Figure 3).

**Table 7**Nutrient export (Kg ha<sup>-1</sup>) of different tree components in Arroyo Malo

Nutrient	Spacing	Wood	Bark	C. branches	F. branches	Leaves	Total
N	3 x 1.5	106.3A	40.2A	18.4A	17.6B	130.6B	312.8B
N	3 x 0.75	96.0A	34.5A	8.6B	27.6A	213.8A	380.5A
P	3 x 1.5	8.0A	1.6A	0.6A	1.6A	6.2B	18.1A
P	3 x 0.75	5.9B	1.4A	0.2B	2.3A	10.1A	19.9A
K	3 x 1.5	29.2A	23.8B	18.5A	25.4A	46.7B	143.6B
K	3 x 0.75	34.6A	36.0A	6.2B	28.9A	64.1A	169.8A
Ca	3 x 1.5	31.8B	115.3A	37.4A	31.2A	48.5A	264.1A
Ca	3 x 0.75	40.6A	120.2A	20.8B	30.2A	71.0A	282.7A
Mg	3 x 1.5	20.0A	20.8B	9.6A	5.0A	10.9B	66.3A
Mg	3 x 0.75	18.4A	26.2A	3.8B	5.0A	19.6A	72.9A

Different letters indicate significant differences between treatments for each nutrient at alfa=0.05 level.

**Table 8**Nutrient export (Kg ha<sup>-1</sup>) of different tree components in La Merced

Nutrient	Spacing	Wood	Bark	C. branches	F. branches	Leaves	Total
N	3 x1.5	103.0A	53.5A	15.6A	24.3A	218.0A	414.4A
N	3x0.75	109.0A	63.6A	4.6B	16.0B	149.1B	342.3B
P	3 x1.5	15.6A	3.0A	0.6A	1.6A	6.9A	27.7A
P	3x0.75	13.7B	3.5A	0.3B	1.0B	4.8B	23.3B
K	3 x1.5	61.4B	36.3B	23.7A	32.4A	77.1A	230.9A
K	3x0.75	79.0A	57.3A	5.7B	20.3B	45.1B	207.4B
Ca	3 x1.5	84.5B	179.0A	27.6A	51.7A	91.3A	434.1A
Ca	3x0.75	110.1A	182.1A	10.5B	38.7B	87.0A	428.4A
Mg	3 x1.5	28.5B	27.8A	4.6A	6.9A	17.1A	84.9A
Mg	3x0.75	34.0A	30.0A	3.4A	3.9B	13.5A	84.8A

Different letters indicate significant differences between treatments for each nutrient at  $\alpha=0.05$  level.

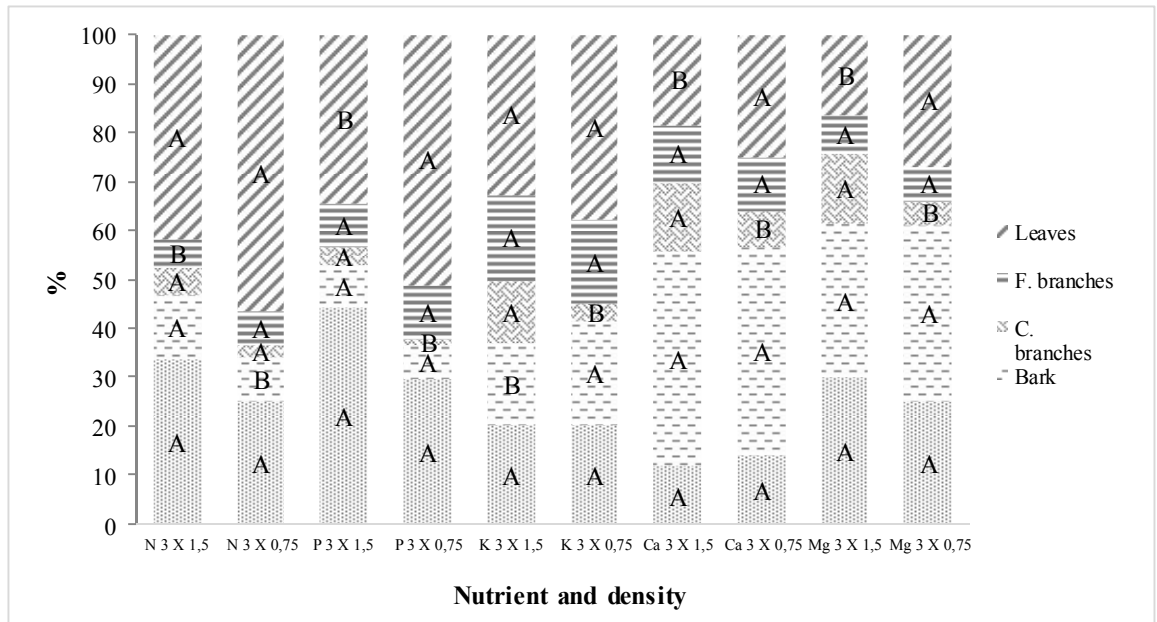
In La Merced site, bark was the component with the highest Ca exportations, ranging from 428 to 434 Kg ha<sup>-1</sup> for high and low planting densities, respectively Table 8 (around 45% of the total Ca extracted) (Figure 4). If we consider all the tree components except wood, around 76 and 85% of Ca is located in these components (Figure 4). Nitrogen was the second nutrient with greater amount exported ranging from 342 Kg ha<sup>-1</sup> in high planting density to 414 Kg ha<sup>-1</sup> in low planting density, Table 8. In this case, leaves were the component with highest values (among 44% to 53% for high and low planting density respectively (Figure 4)). With regard to P, almost 60% of this nutrient was exported in the wood for both planting densities (Figure 4). Meanwhile Mg was exported in similar proportions for wood and bark with values that represent around 70% of total export (Figure 4). Once again, K was the nutrient with a more homogenous distribution among the different harvested components localizing near 80% in wood, bark and leaves (Figure 4).

Comparing the total nutrient export per hectare between sites and densities, for Arroyo Malo significant differences were observed for N and K with greater values when planting density was higher. On the other hand, for La Merced significant differences were observed in N, P and K but in this case the low planting density produced higher exportations values. In Arroyo Malo despite no significant differences were found in the DM production between densities, the tendency was that high planting density produced more biomass (85.4 vs 100.3 Mg ha<sup>-1</sup>) Table 3. On the other hand, in La Merced, differences were less marked, although in the opposite way (93.2 vs 91.9 Mg ha<sup>-1</sup>) Table 3.

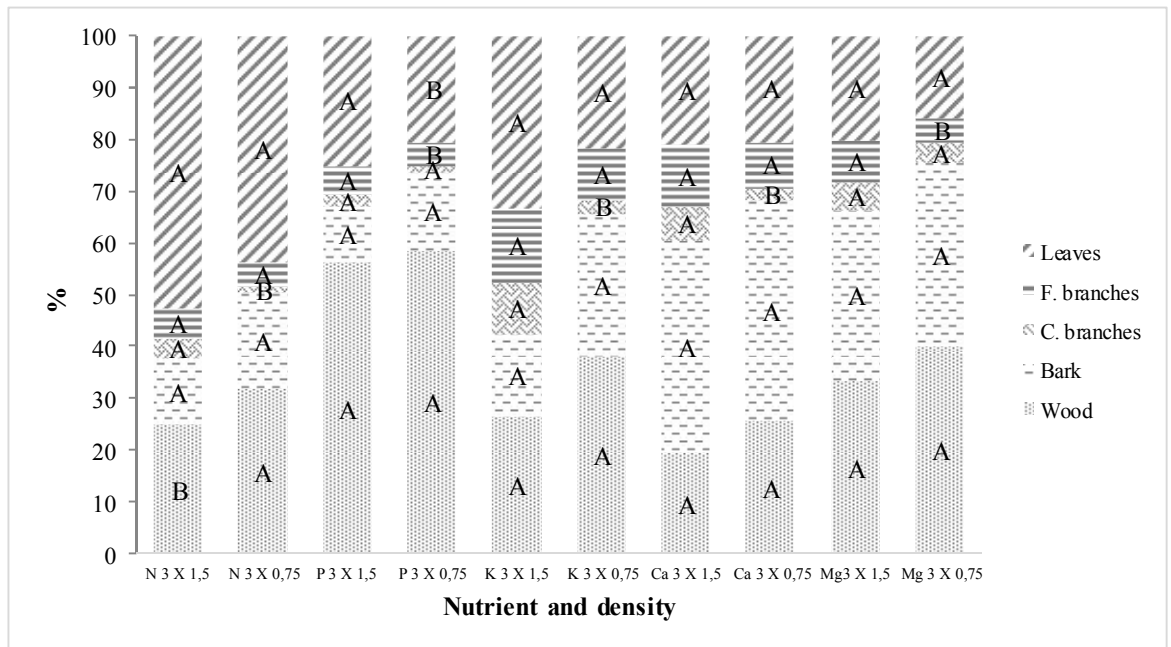
Considering the results for both sites, Ca and N had the higher amounts of exportation. But in La Merced Ca was the nutrient with highest exportations values meanwhile in Arroyo Malo N was the one with highest values. This can be explained due to the fact that the soil stock of exchangeable Ca in La Merced is around 15Mg ha<sup>-1</sup> (data not shown), meanwhile in Arroyo Malo is around 9.3 Mg ha<sup>-1</sup> (data not shown), and according to [28] this element is passively taken up by plants, therefore high tissue contents mirror the soil conditions.

For the aforementioned, taken in consideration a harvesting system where only the wood is harvested and the harvest residues (leaves, branches and bark) remain on site, among 70% of N, 50% of P, 75% of K, 82% of Ca and 65% of Mg would remain on the site. These proportions are similar with the ones found by [29] who found values of 65, 70, 64, 79 y 79% for N, P, K, Ca and Mg respectively and [30] who found values of 47, 57, 45, 67 and 70 for N, P, K, Ca and Mg respectively.





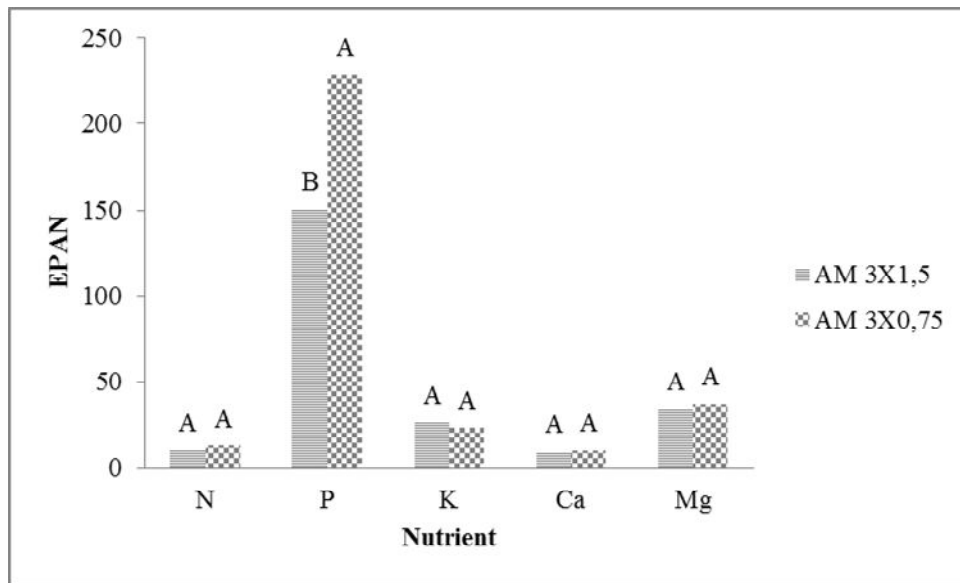
**Figure 3.** Proportion (%) of total nutrient export per tree fraction for Arroyo Malo. Different letters indicate significant differences between treatments at  $\alpha=0.05$  level.



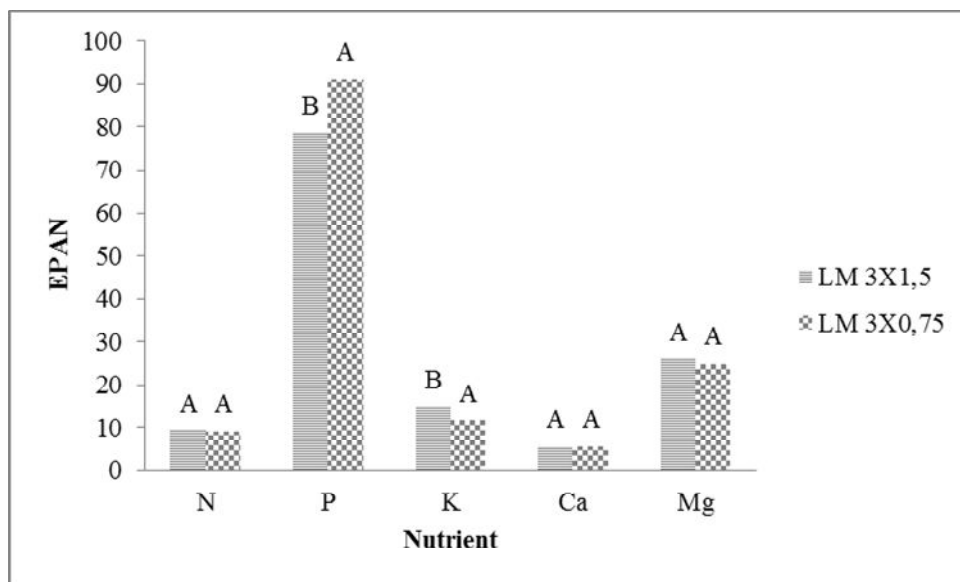
**Figure 4.** Proportion (%) of total nutrient export per tree fraction for La Merced. Different letters indicate significant differences between treatments at  $\alpha=0.05$  level.

#### **2.4.3.3. Energy production per Kg of absorbed Nutrient**

Many authors use the Utilization Quotient proposed by [31] or the Nutrient Assimilation Index (NAI) proposed by [32] to measure the dry matter produced per unit of nutrient, to evaluate the more sustainable condition. But we have to take in consideration that this index is calculated as the inverse of the nutrient concentration and because of that it must be interpreted cautiously. The relationships between nutrient requirement and plant growth depend on a number of interacting factors [33] such as the partitioning of assimilates, and inherently slow growth rates that can contribute to high Utilization Quotients. Due to the fact that this study has been done with plantations which final purpose is the production of energy, it was proposed to use an index that measures the amount of Energy Production per kg of Absorbed Nutrient (EPAN). From our point of view this index is a better way to evaluate the most sustainable condition from the nutrient cycling. The Energy production per kg of absorbed Nutrient in wood + bark is shown in Figures 8 and 9.



**Figure 5.** Energy production (GJ ha<sup>-1</sup>) per Kg of absorbed Nutrient in wood + bark for Arroyo Malo. Different letters indicate significant differences between treatments at alfa=0.05 level.



**Figure 6.** Energy production (GJ ha<sup>-1</sup>) per Kg of absorbed Nutrient in wood + bark for La Merced. Different letters indicate significant differences between treatments at alfa=0.05 level.

For both sites, the nutrients with the lowest EPAN were Ca and N, followed by K, Mg while the one with the highest values was P Figures 5 and 6. This is because the calculation to obtain this index is the total energy production per hectare ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ) divided the nutrient export ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ), due to that, the higher the nutrient exportation the lower the index result.

As shown in Figures 5 and 6, for Arroyo Malo significant differences between plantation densities were found only for P, being the high planting density more efficient in the use of this nutrient. Meanwhile in La Merced significant differences were observed for P and K, and for both nutrients also the high planting density was more efficient (as measured by the EPAN) with respect to the low planting density.

## **2.5. CONCLUSION**

Doubling the number of individuals per hectare did not translate into doubling total biomass production. While some significant differences in nutrient concentrations in some biomass components were observed, these were of similar magnitude between the two densities. The magnitude of withdrawals made by forest biomass varied depending on the nutrient, tree component and the number of trees per hectare (total biomass production), which determines the amount of nutrient export from the site. There was no effect of planting density on the biomass production per hectare, but due to the higher proportion of wood in high planting density, the production of energy was significantly higher. Increasing planting density, shortening the cycle and extracting the total biomass may compromise the

sustainability of the system, particularly in low fertility soils like the ones used in commercial forestry plantations.

## **2.6 ACKNOWLEDGEMENTS**

The author would like to thank to the co-authors of this study for their help and willingness to do this work. To the Soil and Water Department of the University of the Republic, National Institute of Agricultural Research of Uruguay (INIA), Abengoa Energy Crops and UPM Forestal Oriental for providing the logistical support necessary for the evaluations that were carried out in the field.

## **2.7. REFERENCES**

- [1] United Nations, World Population Prospects: The 2012 Revision. Highlights and Advance Tables, Department of Economic and Social Affairs Population, Population Division 36 (2013) 775–801.
- [2] U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2016, 0484(2016) p. 276.
- [3] A. Navarro, C. Pasquale, M. Mastroilli, G. Facciotto, Biomass production of fast growing woody species in a short rotation coppice in Apulia (Italy), 20th European Biomass Conference and Exhibition . (2012) 612–614.
- [4] H. J. Eufrede Junior, R. X. de Melo, M. M. P. Sartori, S. P. S. Guerra, and A. W. Ballarin, Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy, Biomass and Bioenergy. 90 (2016) 15–21.

- [5] N. S. Christopherson and J. A. Mattson, Mechanization of the operational aspects of short-rotation forestry, *Biomass*.22 (1) (1990) 123–133.
- [6] J. J. W. Coppen, *Eucalyptus*, The genus *Eucalyptus*, Taylor & Francis, London and New York, 2002, p.450.
- [7] C. A. Brussa, *Eucalyptus*, Hemisferio Sur, Montevideo, 1994, p.327.
- [8] DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias), Montevideo, 2016. Available on : <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario2016>.
- [9] Oportunidades de Inversión, Sector Forestal, Uruguay XXI, Promoción de inversiones y exportaciones 2017. Available on: <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/content/uploads/sites/9/2017/09/Sector-Forestal-Setiembre-2017.pdf> (2017).
- [10] R. Spinelli, S. Ward, P. Owende, A harvest and transport cost model for *Eucalyptus spp.* fast-growing short rotation plantations, *Biomass and Bioenergy* 33 (2009) 1265–1270.
- [11] P. Attiwill and M. Adams, Nutrition of eucalypts. CSIRO, Australia, 1996, p. 440.
- [12] F. P. Leite, I. R. Silva, R. F. Novais, N. F. de Barros, J. C. Neves, and E. M. Villani, Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities 35 (2011), 949–959.

- [13] J. Hernández, A. del Pino, L. Salvo, G. Arrarte, Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay, *For. Ecol. Management* 258 (2009) 92–99.
- [14] G. de Mello Cunha, G. da Gama-Rodrigues, A. and Santos Costa, Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no norte Fluminense, *Sociedade de Investigações Florestais*, 29 (3) (2005) 353-363.
- [15] M. González-García, A. Hevia, J. Majada, F. Rubiera, M. Barrio-Anta, Nutritional, carbon and energy evaluation of *Eucalyptus nitens* short rotation bioenergy plantations in northwestern Spain, *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9 (2) (2016) 303–310.
- [16] D. Paré, P. Bernier, B. Lafleur, B. D. Titus, E. Thiffault, D. G. Maynard, X. Guo, Estimating stand-scale biomass, nutrient contents, and associated uncertainties for tree species of Canadian forests, *Canadian Journal. Forest Research* 43 (2013) 599–608.
- [17] J.P. Laclau, P. Deleporte, J. Ranger, J.-P. Bouillet, and G. Kazotti, Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo, *Annals of Botany* 91 (2003) 879–892.
- [18] INUMET. 2017. Normales climatológicas 2010-2016. Instituto Nacional de Meteorología. Montevideo, Uruguay, 2017. Available on: <https://inumet.gub.uy/>

- [19] F. Preciozzi Porta, J. Spoturno Pioppo, W. Heinzen Marziotto, P. Rossi Kempa, Dirección Nacional de Minería y Geología, Programa Cartografía Geológica del Uruguay, 1985, p.87.
- [20] J. Murphy, J. P. Riley, Determination single solution method for the in natural, *Analytica Chimica Acta* 27 (1962) 31–36.
- [21] A. P. G. Schönau and J. Coetzee, Initial spacing, stand density and thinning in eucalypt plantations, *Forest Ecology and Management* 29(1989) 245–266.
- [22] S. P. S. Guerra, E. A. Garcia, K. P. Lanças, M. A. Rezende, R. Spinelli, Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production, *FUEL*, 137 (2014) 360–363.
- [23] C. Tenorio, R. Moya, D. Arias-Aguilar, E. Briceño-Elizondo, Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica 82 (2016) 63–73.
- [24] D. J. Frederick, H. A. I. Madgwick, M. F. Jurgensen, G. R. Oliver, Dry matter, energy, and nutrient contents of 8-year-old stands of *Eucalyptus regnans*, *Acacia dealbata*, and *Pinus radiata* in New Zealand., *New Zealand Journal of Forestry Sciences* 15 (2) (1986) 142–157.
- [25] S. Pérez, C. J. Renedo, A. Ortiz, M. Mañana, F. Delgado, C. Tejedor, Energetic density of different forest species of energy crops in Cantabria (Spain), *Biomass and Bioenergy* 35 (2011) 4657–4664.
- [26] P. Mckendry, Energy production from biomass ( part 1 ): overview of biomass, 83(2002) 37–46.



- [27] D. L. Achat, C. Deleuze, G. Landmann, N. Pousse, J. Ranger, L. Augusto, Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth - A meta-analysis, *Forest Ecology and Management* 348 (2015) 124–141.
- [28] T. Ericsson, Nutrient dynamics and requirements of forest crops, *New Zealand Journal of Forestry Science* 24 (2/3) (1994) 133–68.
- [29] R. C. Santana, N. F. de Barros, R. F. Novais, H. G. Leite, N. B. Comerford, Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no brasil 32 (2008). 2723–2733, 2008.
- [30] R. C. Santana, N. F. de Barros, J. C. L. Neves, Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo 56 (1999) 155–169.
- [31] F. Steenbjerg, S. T. Jakobsen, Plant nutrition and yield curves, *Soil Science* 95 (1963) 69–88.
- [32] S. J. Sochacki, R. J. Harper, K. R. J. Smettem, B. Dell, H. Wu, Evaluating a sustainability index for nutrients in a short rotation energy cropping system, *GCB Bioenergy* 5 (2013) 315–326.
- [33] J. F. Loneragan, Nutrient Requirements of Plants, *Nature* 220 (1968) 1307-1308.

### **3. Nutrient absorption by the biomass of four years old *Eucalypts dunnii* Maiden plantations for cellulose purposes and their relationship with soil parameters of different sites in Uruguay**

Luis Bentancor <sup>a\*</sup>, Jorge Hernández <sup>a</sup>, Amabelia del Pino <sup>a</sup>, Álvaro Califra <sup>a</sup>,

<sup>a</sup> University of the Republic, Agronomy Faculty, Soil and Water Department, Garzón Avenue 780, Montevideo, Uruguay, tel.: (+598) 23598272, CP 12900

\*Corresponding author

E-mail address: [lbent@fagro.edu.uy](mailto:lbent@fagro.edu.uy)/[lf2323@gmail.com](mailto:lf2323@gmail.com) (Luis Francisco Bentancor Bossio).

#### **3.1. ABSTRACT**

Changes in chemical, physical and biological soil parameters have been studied as consequence of the fast development of *Eucalyptus sp.* commercial plantations in Uruguay. With regard to the nutrient extraction, the majority of the studies have been carried out at the end of the rotation for cellulose purposes, but there is still no data of the nutrient extraction at early stages of the rotation (4 years) and their relation with different soil parameters, particularly for *E. dunnii*, one of the most planted specie in the country. Because of this, the objectives of the research are: a) Quantify the concentration and distribution of nutrients in different components of *E. dunnii* trees of 4-year-old plantations for the different groups of forest priority soils in Uruguay. b) Characterize the edaphic variables that influence the growth and nutrient absorption by trees for the different sites, covering three zones (7 sites). At each site,

soil was analyzed. Representative trees of the stands were harvested and their biomass was separated into its different components (wood, bark, leaves and branches). Samples of each biomass component were taken to analyze the N, P, K, Ca and Mg content. According to the results obtained, variability on chemical and physical soil properties was found among the different study zones. However, no significant differences were found in total biomass production. Higher stock of nutrients in the soil did not translate in higher nutrient concentration in the tree, but the higher the biomass production, the higher the nutrient absorption. The higher the nutrient absorption, the lower the Nutrient Assimilation Index will be.

Keywords: *Eucalyptus sp.*, Nutrients absorption, Cellulose purposes

### **3.2. INTRODUCTION**

One important aspect for the sustainability of commercial forest plantations is related to their nutrient extraction. In Uruguay, studies carried out until today on this subject have been focused on different species and soils, always at the end of the rotation like the ones by Hernandez et al. (2009) and González (2008). But there is still no data of the nutrient extraction at the middle of the rotation (four years) for *E. dunnii* and how soil parameters affect nutrient availability.

*E. dunnii* naturally grows in the Middle Eastern of Australia. Attains heights of 50 m and diameter at the breast height of 1– 1.5 m (occasionally 2.5 m), with clear stems up to 30–35 m (Boland et al., 2006). In Uruguay is the third most important commercial specie with 81.365 planted hectares (DIEA, 2013).

According to Grove et al. (1996) there are four main factors that determine the nutrient content in a forest biomass, which are:

1) The age of the plantation at the moment of the harvest: this author mention that at early stages of the plant cycle (0- 4 years) there is a high nutrient concentration for primary production, there is almost no nutrient redistribution into the tree and the growth is characterized by the increment in the nutrient accumulation rate and limited by the supply of nutrients from the soil. According to Leite et al. (2011) 50% of K and P, 56% of Mg and 64% of Ca requirements for the whole cycle are absorbed in this early stage.

Ericsson (1994), showed how important is the impact of the harvest age in the extraction of N, P and K comparing one rotation of 20 years vs four rotations of 5 years, and vs ten rotations of 2 years. Nutrient uptake from mineral soil per ton of stem biomass harvested decreased for N from 24.7 to 13.9 or 8.7; for P from 1.8 to 1.1 or 0.6; and for K from 6.7 to 2.6 or 0.9, when the harvest was done at 2, 5 and 20 years respectively.

2) Compartment of biomass harvested: Hernández et al. (2009) showed that although at the end of the rotation for cellulose (nine years), timber represent around 70% of the total biomass production and the other harvested components (bark, branches and leaves) around 30%, the last ones have between 60 and 80% of the total nutrient content. Other authors like Santana et al. (2008) also reported that approximately 75% of N, P, K, Ca and Mg are located in other aerial components and not in the wood. Because of that, they remark the importance of leaving the

residues on site at the moment of the harvest. The poorer the soil is, the more relevant the permanence of residues in the site, principally leaves and bark.

3) Distribution and nutrient content along the stem: in Uruguay different studies (Varela., 2009; Giosa., 2008; González., 2008) showed variations in nutrient concentrations according to the nutrient and the sampled area of the stem and a constant in the behavior was not found, which may be associated to the species analyzed and the time of year in which the samples were taken. On the other hand Bellote et al. (1980) found a variation according to the height of the stem and nutrient analyzed. And Foeckel (2005) indicated that there is a variation in nutrient concentration according to the stem height and also on the stem sampled area (sapwood;heartwood).

4) Site quality: according to Noble and Herbert (1989) each site has an optimum sustainable biomass production which depends on the nutrient availability, water retention soil capacity among others. Goncalves et al. (1997) mention that for the eucalypts biomass production, soil physical and chemical characteristics play a key role. Comparing the nutrient content of *Eucalyptus sp.* in different regions of Brazil, Santana et al. (2008) found a positive relationship between biomass production and nutrient content and both were lower in regions with lower water availability. Goya et al. (1997) found that in stands with higher biomass, the nutrient accumulation in wood was higher, which would show a relationship to the production of biomass per hectare. According to Turvey and Smethurst (1994) soil type affects the quantities of nutrients extracted and they observed correlations between concentrations of nutrients in different components of forest plantations and types of soils.

Biomass production is also determined by the genetic characteristics of the species and higher yields are associated with higher nutrient exports in the site (Santana et al. 2002). Other authors like Fabres (2003) mentioned some soil characteristics like soil depth, texture, bulk density and soil fertility are variables affecting eucalypts productivity.

Spangenberg et al. (1996) mentioned that quantification of nutrient contents in forest plantations and the knowledge of the relationship between nutrient exports and nutrient availability in the soil are important on the strategy definition to maintain the system sustainability, even more in soils with low available and total nutrients in the soil where there can be a reduction of the sites potential productivity in the long term (Santana, 1999). According to González-García et al. (2016) there is a lack of information of nutrient concentrations and their distribution in trees , that is important to clarify to help decisions makers to ensure sustainability of the system. Even more in *E. dunnii*, one of the most important species planted in Uruguay but of which there is worldwide scarce experimental information about its nutritional levels.

Because of this, the objectives of this research were: a) Quantify the concentration and distribution of nutrients in different components of *E. dunnii* trees of 4-year-old plantations for the different groups of forest priority soils in Uruguay. b) Characterize the edaphic variables that influence the growth and nutrient absorbed by trees (effective root exploration depth, as well as nutrient concentrations and stocks in the different soil horizons) for the different sites, covering the main groups of soils of forest aptitude.

### **3.3. MATERIALS AND METHODS**

#### **3.3.1. Study sites**

The work was carried out in 7 sites of Uruguay. According to the soil parent material we decided to group the study sites in three different zones: West Zone, which include two study sites: Molino Petiso (32°49'49.03"S; 57°57'24.03"O) and Santo Domingo (31°53'1.96"S; 57°45'30.44"O) in the northwest zone, where the soil parent material is cretacic sandstones, and the soils associated have a sandy loam A horizon, and a clayed Bt horizon. Center Zone, includes site El Milagro (a, b and c) (32°45'35.22"S; 55°13'1.65"O) in the central zone of the country. In this case the soil parent materials are metamorphic rocks which originate shallow soils with a loam A horizon and a clayed Bt horizon. And North Zone, which includes sites La Calera (31°29'27.17"S; 55°33'40.46"O) and El Recado (31°45'12.48"S; 56°11'0.50"O) in the northeast zone of the country. In this case, soil parent material is derived from sedimentary rocks (fine and very fine sandstones from the Triassic) originating very deep soils, acids, with a sandy loam A horizon and a clayed Bt horizon. The climate of this region is temperate with an annual mean temperature of 18°C. The highest mean temperature occur in January (between 24°C and 25°C), and the lowest in June and July (12°C). Changes in temperature are frequent and pronounced throughout the year. The mean annual rainfall is 1508 mm in the northwest and 1518 in the northeast (Instituto Uruguayo de Meteorología).

### **3.3.2 Soil characterization and sampling**

In each site, soil characterization was made until rooting depth. A morphological description was carried out and samples of all soil horizons were taken for Particle-Size Distribution Analysis (Bouyoucus method), bulk density to calculate the soil nutrient stock, and chemical analysis: pH, organic carbon (Walkley-Black method), extractable bases in 1M ammonium acetate solution (Calcium, Magnesium, Potassium and Sodium), extractable acidity (by KCl 1M solution) and available Phosphorus (Bray 1-P). This information is shown in Table 1.



**Table 1** Soil chemical analysis for the different sites and soil horizons

Zone	Site	Hor.	Depth	Clay	Silt	Sand	Bulk density	Organic C	pH <sup>†</sup>			Extractable cations					Base		
									H <sub>2</sub> O	KCl	Al	Ca	Mg	K	Na	Total Bases	CECe	Sat	
			cm	%			g cm <sup>-3</sup>	g kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>										%
West	Molino Petiso	A	50	152	28.1	56.7	1.5	5.8	4.9	3.8	1.0	3.2	0.9	0.2	0.2	4.5	5.5	81.9	
		Bt	30	28.9	35.7	35.4	1.4	5.2	5.3	4.0	0.7	9.8	2.3	0.3	0.4	12.9	13.6	94.8	
West	Santo Domingo	A	30	14.5	30.9	54.6	1.4	11.0	5.2	4.2	0.4	3.3	0.9	0.2	0.2	4.6	5.0	92.0	
		Bt	70	34.1	35.4	30.6	1.4	7.0	5.3	4.1	0.6	12.9	4.4	0.4	0.2	17.9	18.5	96.8	
Center	El Milagro A	A	30	25.6	36.1	38.3	1.3	24.4	4.95	4.1	0.6	7.0	3.0	0.4	0.3	10.7	11.3	94.7	
		Bt	30	34.3	36.6	29.1	1.4	4.1	4.2	4.2	0.7	11.2	8.3	0.3	0.3	20.1	20.8	94.6	
		C	70	28.6	38.6	32.8	1.4	11.0	4.3	4.3	0.7	13.5	9.9	0.2	0.3	23.9	24.6	97.2	
Center	El Milagro B	A	50	25.3	39.4	35.4	1.2	26.1	4.9	4.1	0.6	6.9	3.1	0.5	0.3	10.7	11.3	94.7	
		Bt	30	32.4	39.1	28.5	1.4	9.3	5.2	4.3	0.0	9.2	6.1	0.5	0.2	16.0	16.0	100.0	
		C	10	35.1	41.0	23.9	1.4	4.6	5.7	4.9	0.0	9.0	7.3	0.3	0.3	16.9	16.9	100.0	
Center	El Milagro C	A	40	24.9	38.5	36.6	1.2	34.2	5.2	4.3	0.6	7.1	3.4	0.6	0.2	11.4	12.0	95.0	
		Bt	30	35.4	33.0	31.6	1.4	13.3	5.2	4.2	0.3	14.2	7.0	0.3	0.3	21.8	22.1	98.6	
		C	10	29.0	42.6	28.4	1.4	6.4	5.6	4.2	0.2	20.7	11.8	0.2	0.3	33.0	33.2	99.4	
North	El Recado	A	60	13.9	26.6	60.0	1.5	3.5	5.2	4.2	0.4	2.4	0.9	0.3	0.2	3.7	4.1	90.2	
		E	40	11.8	23.7	64.5	1.5	0.58	5.1	4.3	0.0	1.9	0.7	0.2	0.2	3.0	3.0	100.0	
		Bt	20	30.2	31.5	38.3	1.5	1.2	5.0	4.0	0.8	6.7	3.8	0.8	0.2	11.5	12.3	93.5	
North	La Calera	A	40	24.8	42.5	35.8	1.4	8.7	5.0	3.8	1.2	4.3	0.9	0.2	0.3	5.7	6.9	82.7	
		Bt	60	35.2	40.0	24.9	1.4	6.4	5.4	4.2	0.2	11.3	1.7	0.3	0.6	13.9	14.1	98.6	

Note: Depth (cm) is the depth of each horizon; † pH: soil: solution relation v/v 1:2.5; Extractable Al: extracted by KCl 1M; Extractable bases: extracted by

Ammonium Acetate 1M; CECe: effective Cation Exchange Capacity; Base Sat.: (Total Bases/CECe)\*100.

### **3.3.3. Tree sampling**

In each farm, nine trees with average diameter at breast height (DBH) and height (Table 2) were selected to harvest. After that, logs+bark and residues (leaves and branches) were weighted individually. One representative tree was chosen to weight separately logs, bark, leaves, coarse branches and fine branches to estimate the proportion of each component in the aerial biomass. Samples of each harvest component of each tree were taken to analyze.

**Table N°2**

Dendrometric characterization of the different study sites

<b>Zone</b>	<b>Site</b>	<b>Density (Trees per hectare)</b>	<b>Dbh (cm)</b>	<b>Height (m)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)</b>
West	Molino Petiso	1200	13.9	10.8	98.33
West	Santo Domingo	1200	14.4	12.0	117.26
Center	El Milagro A	550	19.4	14.4	117.1
Center	El Milagro B	550	19.1	14.4	113.5
Center	El Milagro C	550	19.6	14.4	119.5
North	El Recado	1200	14.5	12.0	119.0
North	La Calera	1200	11.1	9.6	56.0

### **3.3.4. Laboratory samples preparation and analysis performed**

Samples of each component were dried at 65°C until constant weight to estimate the dry matter (DM). After that, all samples were grinded (< 0.5 mm particle size) to

determine their nutrient content. Nitrogen was determined by Kjeldahl, whereas a dry mineralization was used for Ca, Mg, K and P extraction. Ca and Mg were determined by atomic absorption spectrometry, K by emission spectrometry and P was measured by colorimetry (Murphy and Riley 1962). On the other hand, soil samples were dried at 40°C and grinded to <2mm particle size. Exchangeable Ca, Mg and K were determined from a 1M ammonium acetate extraction solution by atomic absorption (Ca, Mg) and emission (K, Na).

### **3.3.5. Defined variables for the analysis**

i) Timber biomass production ( $\text{kg DM tree}^{-1}$ ;  $\text{kg DM ha}^{-1}$ ):  $[\Sigma \text{ logs wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ of timber in a logs disc} * \% \text{ of wood disc DM}] * \text{N}^{\circ} \text{ of trees per hectare}$

ii) Bark biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) =  $[\Sigma \text{ logs wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ of bark in logs disc} * \% \text{ of bark disc DM}] * \text{N}^{\circ} \text{ of trees per hectare}$

iii) Branches biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) =  $\text{residues wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ branches (fine/coarse)} * \% \text{ branches DM (fine/coarse)} * \text{N}^{\circ} \text{ trees per hectare}$

iv) Leaves biomass ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) =  $\text{residues wet weight (Mg tree}^{-1}) * \% \text{ leaves} * \% \text{ leaves DM} * \text{N}^{\circ} \text{ of trees per hectare}$

v) Nutrient concentration in each harvest component ( $\text{g kg}^{-1}$ )

vi) Total nutrient absorbed ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) =  $\text{g kg}^{-1} \text{ of each nutrient} * \text{DM (Mg ha}^{-1}) \text{ of each tree component}$

vii) Stock of nutrients per soil horizon ( $\text{kg ha}^{-1}$ ): was calculated using nutrient concentrations of each nutrient, and the bulk density and thickness of each soil horizon

viii) Nutrient assimilation index (NAI) ( $\text{Mg DM kg}^{-1}$ ): defined as the biomass fraction ( $\text{Mg dry matter per hectare}$ ) divided by the nutrients absorbed ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

### **3.3.6. Statistical Analysis**

Student t-test at 0.05 confidence level was used for mean comparison for the variables: total dry matter production; nutrient concentration, nutrient absorption in the trees and nutrient assimilation index. Correlation analysis and principal component analysis were used to evaluate association among different groups of variables. All analyzes were implemented in the statistical software Infostat (Di Rienzo et al., 2011).

## **3.4. RESULTS AND DISCUSSION**

### **3.4.1 Soil characterization of the different sites**

According to the characteristics shown in (Table 1) the soils of the experiments were defined for zone 1 as Fine-loamy, siliceous, active, thermic Mollic Hapludalfs. They have sandy textures, with a B/A horizon clay ratio that vary from 1.9 in Molino Petiso to 2.31 in Santo Domingo which indicate an important process of clay lixiviation. Although in the same zone the soil OM content is the double in Santo Domingo with respect to Molino Petiso, not important differences were observed for pH or cation contents of the A horizon. In zone 2 the soils were defined as Abruptic Argiudolls which have a loamy texture. It is important to highlight their higher soil organic matter contents which varies from 4.2 to 5.9 with 95% of base saturation. And in zone 3, soils were more heterogeneous across sites. For El Recado they were

classified as Arenic Oxyaquic Hapludalf and for La Calera as Fine, mixed, semiactive, thermic, Typic Hapludalf. Texture in El Recado is sandy meanwhile in La Calera is loamy. With regard to the percentage of organic matter, La Calera has more than the double (1,5%) in comparison with El Recado (0.6%). But in the case of La Calera the presence of exchangeable aluminum is three times higher than El Recado. Exchangeable Mg and K are similar for both sites, but in the case of Ca La Calera has almost the double than El Recado. The effective cation exchange capacity is higher in La Calera than in El Recado, but the total bases saturation was 90% in El Recado and 82% in La Calera owing to the higher exchangeable Al content.

Due to the above, according to Table 1, soils from Center Zone have loamy texture and higher fertility than soils from West and North Zones. Sites of North Zone 3 were more heterogeneous, with higher exchangeable Al content and lower soil organic matter. It is important to highlight that meanwhile sites of Center and North Zones were forested for their first time, sites of West Zone have almost 30 years of forest history. Therefore, when we compare the analytical properties of a typical profile of these sites described in the 1970 decade (MAP/DSF., 1976) we observed that both pH and total bases as cation exchange capacity were much higher. This is coincident with the results from Pérez Bidegain et al. (2001) who determined that pH value was lower and the exchangeable acidity was higher under *Eucalyptus* sp. in comparison with native pastures.

Although commercial forestation in Uruguay is carried out on the soils with lower natural fertility compared to the average of the country, it is important to highlight that they have higher fertility than soils in other parts of the world where

*Eucalyptus sp.* plantations are established. For example, Santana et al. (1999) in Brazilian soils observed exchangeable Ca, Mg and K values of 24, 9 and 5 times lower, respectively, than in the soil of this study that presents the lowest exchangeable Ca, Mg and K (El Recado).

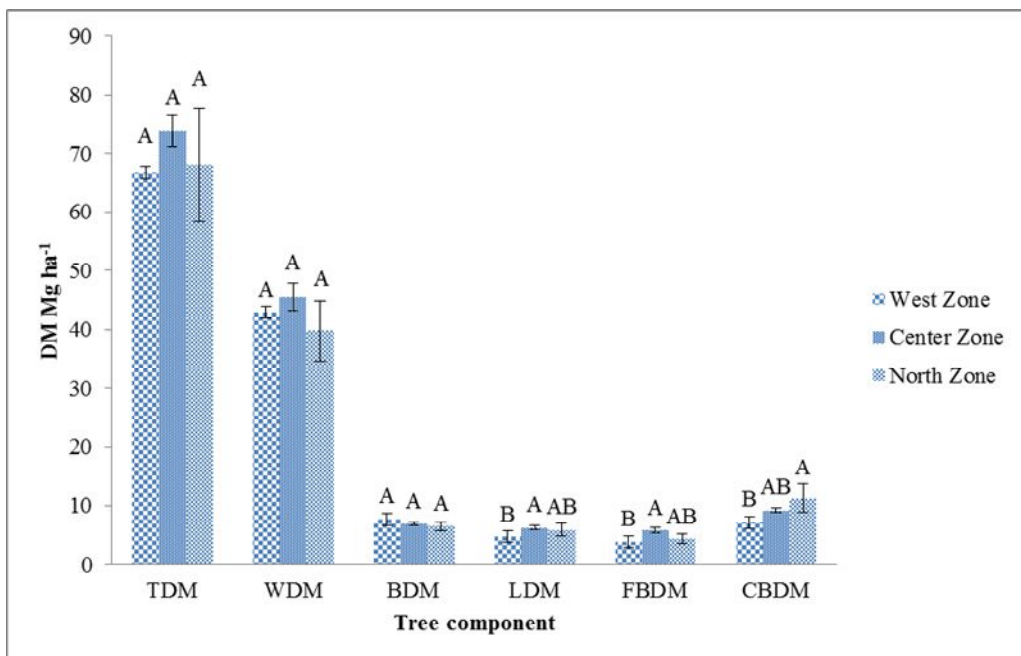
#### **3.4.2. Biomass production**

When we compare all the components together (total dry matter) there were no significant differences [Figure 1](#). This is mainly explained because wood is the most important component in terms of biomass production, and despite among zones, significant differences were observed in the components of the tree crown (leaves, fine branches and coarse branches) there were no significant differences for total biomass production.

Studies from others countries showed different results about the site effect. For example Santana (1999), Santana et al., (2008) and Barros et al., (1997 ) found a positive relationship between biomass production and nutrient content in the soil. These results could be showing that in conditions such as those in Brazil where fertility is very low, there is a correspondence between soil nutrient content and biomass production. Although, as mentioned, Uruguay forestry soils are less fertile respect to the average, we hypothesized that for the requirements of the eucalypts plantations, nutrient availability would be enough to express the maximum potential of the specie.

On the other hand, according to Ericsson (1994), this can be explained because normally in trees large fractions of the nutrients required for growth of new tissues

can be met by the internal nutrient cycling specially when the stand approaches canopy closure. According to this author, after that point, substantial parts of the yearly nutrient demands are covered by biochemical cycling. Also, retranslocation at the time of heartwood formation is another process which enables trees to make more efficient use of limited nutrient resources. For these reasons, despite the differences in nutrient content among zones, the total dry matter production per hectare remained the same. On the other hand, Miller (1995) mentioned that among the different factors that can influence tree growth (latitude, altitude, water supply and nutrients), water can vary erratically, while nutrient deficiencies are a more constant factor which causes a reduction in number and size of leaf and leaf longevity. And the effect of nutrient deficiencies is on the effect on leaf area and not on the rate of photosynthesis per unit of leaf area.



TDM = total dry matter; WDM = wood dry matter; BDM = bark dry matter; LDM = leaves dry matter; FBDM = fine branches dry matter; CBDM = coarse branches dry matter.

**Figure 1.** Dry matter production per hectare by tree component

### **3.4.3. Nutrients concentration**

Table 3 shows the variation in nutrient concentration among the different tree components. Wood is the component with the lowest values which coincides with the results of Hernández et al. (2009) and Achat et al. (2015). On the other hand, leaves are the component with the highest values of N and P, and bark is the component with the highest values of Ca and Mg. Potassium had a more homogeneous distribution among the different components except for wood where we observed low concentrations, which coincides with Hernández et al. (2009). These values illustrate how the different nutrients are stored in different amounts according to the component of the tree being possible to observe differences of 7 or 8 times for N and Ca between wood and leaves or bark. For N and P, the magnitude of the concentration was: leaves > bark > fine branches > coarse branches > wood. For Ca and Mg bark > leaves and fine branches > coarse branches > wood. Meanwhile K was the nutrient with the most homogenous distribution.

Analyzing the nutrient concentration between the different studied zones we could not observe a pattern that determined if the nutrient concentrations were higher or lower in any of them. According to the results observed in (Table 3), West Zone is the one with the lowest concentrations of N for all tree components and the one with the highest concentrations of Ca for leaves, fine branches and coarse branches. The low values observed in N can be explained because this zone has a long agricultural history and almost 30 years of commercial forest plantations. And the high values of Ca can be explained by the parent material which is rich in this nutrient. On the other hand, North Zone was the one with the highest concentration of K for all tree



components (which could be explained due to the presence of potassic minerals in the parent material). Comparing the concentration values obtained in our study with the corresponding for 9-year-old *E.dunnii* plantation, they are similar (Hernández et al., 2009). According to Attiwill & Adams (1996), trees at 4 years old are already in the second stage of stand growth, which is characterized among other things, by a decreasing accumulation of nutrients in the trees and nutrient cycling fully developed. For that reason, despite the differences in nutrients stocks in the soil of the different sites, there were no statistically significant differences in total biomass production among the different zones.

Reviewing data from Leite (1996) we observed that for N in leaves this author had differences similar to our study, but no significant effects were observed. This can be explained because of a bigger experimental error in Leite's work than in the present study, where significant differences were found. Because of this we can say that in general the magnitude of the concentration is similar, and total nutrient absorbed will depend to a greater extent on the biomass production and not in the nutrient availability.

#### **3.4.4. Nutrients absorption**

Table 4 shows that Ca was the nutrient with the highest absorbed amounts (from 320 Kg ha<sup>-1</sup> for North Zone to 440 kg ha<sup>-1</sup> for Center Zone). Bark was the component with highest Ca absorbed (around 30% of the total amount), and if we consider all the tree components except wood, around 76 and 87% of Ca is located in these components (Figure 2). Nitrogen was the second nutrient with greater amount

absorbed (from 150 kg ha<sup>-1</sup> for West Zone to 280 kg ha<sup>-1</sup> for North Zone). In this case, leaves were the component with highest values (among 35% and 50%). In descendent order of N absorbed, it would be Center Zone followed by West and North Zones respectively. With regard to P and Mg, these are the nutrients that are stored in greatest proportion in the wood. Depending on the zone, the values of P ranged from 45 to 60% in wood, being West Zone the one with the highest absorption, followed by North and Center Zones respectively. In the case of Mg, the range of wood content vary from 36 to 54% being West Zone the one with highest absorption, followed by North and Center Zones respectively. And finally K was the nutrient with the most homogeneous distribution between the different components of the tree, where between 70 and 80% remained in the harvest residues. In descendent order, North Zone showed higher K absorbed than West and Center Zones respectively. For the aforementioned, among 70 and 80% of N, Ca and K and around 50% of P and Mg would remain on the site. These proportions are similar with those reported by (Hernández et al., 2009) who found values of 73, 65, 82, 84 and 60% for N, P, K, Ca, and Mg respectively, while Santana et al., (2008) found values of 65, 70, 64 and 79% for N, P, K, Ca and Mg respectively and (Santana, 1999) who found values of 45, 57, 45, 67 and 70 for N, P, K, Ca and Mg respectively. These results would indicate that in the middle of the stand rotation nutrients are distributed proportionally in a similar way in the different tree components as they are in plantations close to the harvest (9 years) for cellulose purposes.

**Table 3**

Nutrient concentration for the different trees components by zone

	N(gkg <sup>-1</sup> )			P(gkg <sup>-1</sup> )			K(gkg <sup>-1</sup> )			Ca(gkg <sup>-1</sup> )			Mg(gkg <sup>-1</sup> )		
	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone
<b>Bark</b>	2.34C	3.38B	3.95A	0.37A	0.35A	0.27B	2.65B	2.36B	3.35A	16.65B	24.58A	12.75C	2.02C	2.72A	2.44B
<b>Leaves</b>	13.67C	20.97A	19.54B	0.42B	0.61B	1.18A	3.51B	3.80B	4.82A	13.89A	9.22B	11.04B	1.98A	1.78A	1.25B
<b>F.Branches</b>	3.07B	3.35B	3.99A	0.17A	0.28A	0.28A	2.85B	3.49B	4.73A	13.92A	10.86AB	9.46B	1.46B	2.10A	1.13B
<b>C.Branches</b>	1.87C	2.66B	2.25A	0.16B	0.29A	0.23A	2.41B	4.66A	4.38A	12.45A	9.86B	7.53C	1.83AB	2.05A	1.32B
<b>Wood</b>	1.02C	1.49B	1.88A	0.27A	0.19B	0.26A	0.39C	0.51B	0.91A	1.19B	2.22A	1.68A	0.48B	0.79A	1.22A

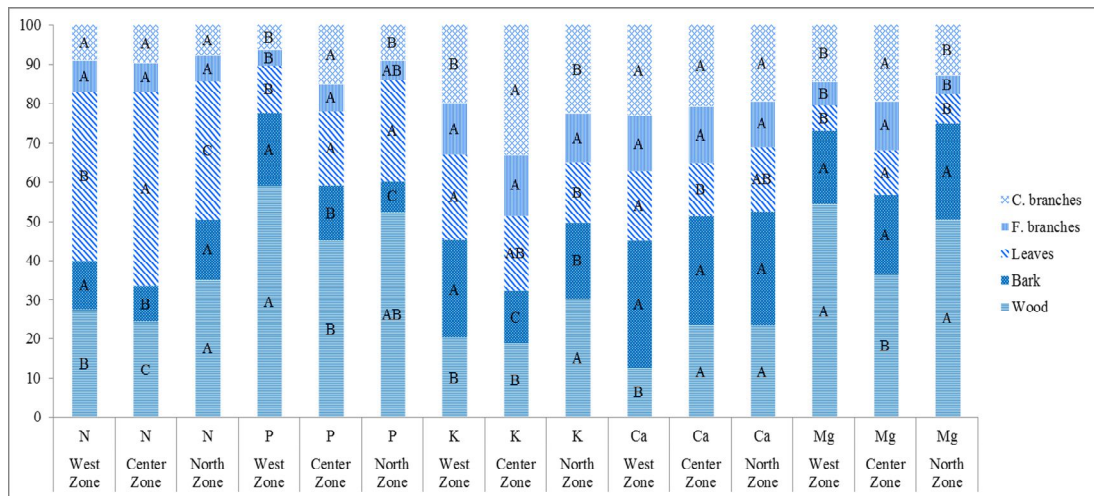
The means that do not differ from each other at the 0.05 significance level by Student t-test for each nutrient and biomass component combination are marked with the same capital letters.

**Table 4**

Nutrient absorption by different tree components by zone

	N (kg ha <sup>-1</sup> )			P (kg ha <sup>-1</sup> )			K (kg ha <sup>-1</sup> )			Ca (kg ha <sup>-1</sup> )			Mg (kg ha <sup>-1</sup> )		
	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone	West Zone	Center Zone	North Zone
<b>Bark</b>	18.2B	23.8A	25.4A	2.9A	2.5AB	2.0B	20.1A	16.2B	21.7A	128.8A	125.6A	82.9B	29.1A	19.0B	15.6C
<b>Leaves</b>	65.5B	132.7A	119.7A	2.0C	3.8B	9.8A	16.9B	24.3AB	28.8A	69.0A	57.0A	68.2A	9.18A	11.1A	8.6A
<b>F.Branches</b>	11.9B	19.1A	18.1A	0.7B	1.3A	1.8A	10.9B	21.0A	21.0A	55.4A	65.4A	44.2A	7.7B	12.6A	4.6C
<b>C.Branches</b>	13.4B	24.6A	28.3A	1.2B	2.8A	3.2A	17.2B	45.0A	35.2A	89.7A	90.7A	77.7A	13.8B	19.0A	11.9B
<b>Wood</b>	41.9B	64.5A	85.6A	10.8A	8.0B	9.4B	16.6C	22.6B	37.4A	51.3B	98.9A	50.2B	126.8A	35.7B	61.7A

The means that do not differ from each other at the 0.05 significance level by Student t-test for each nutrient and biomass component combination are marked with the same capital letters.



Bn The means that do not differ from each other at the 0.05 significance level by Student t-test are marked with the same capital letters.

**Figure 2.** Percentage of nutrient absorbed per hectare by tree fraction and zone

### 3.4.5 Soil tree relationships

Correlation analysis between the availability of Ca, Mg and K in soil (up to rooting depth) with biomass production and nutrient concentration was performed (Table 6). Significant and positive correlations between total dry matter production and the stock of Ca ( $r=0.86$ ), Mg ( $r=0.76$ ) and K ( $r=0.83$ ) were found. Correlations between the nutrient stock in the soil and nutrient concentration ( $\text{g Kg}^{-1}$ ) and nutrient stock in the trees ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) were also performed but there were not statistically significant correlation, except for Mg.

Due to the above, trying to identify if there could be an effect of the stock of nutrients per soil horizon a correlation analysis per horizon was carried out. In the case of A horizon (Table 7), only for Mg there was a positive and significant correlation between the stock of nutrients in the soil and nutrient concentration in the tree ( $r=0.83$ ;  $p=0.02$ ). On the other hand, positive and statistically significant

correlations between total dry matter and stock of Mg ( $r=0.79$ ;  $p=0.03$ ) and K ( $r=0.84$ ;  $p=0.02$ ) in the trees were found.

For B horizon (Table 8), there was also a positive and significant correlation between the total dry matter production and the stock of Mg ( $r=0.84$ ;  $p=0.02$ ) and K ( $0.82$ ;  $p=0.02$ ). For the correlation between the stock of nutrients in the soil and the nutrient concentration ( $\text{g Kg}^{-1}$ ) and stock ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) in trees no significant correlations were found.

These results show that there is no effect of the stock of Ca, Mg and K in the soil and the nutrient concentration or nutrient absorbed by the trees, what was also found by Varela (2009). But is clear that the higher the biomass production, the higher the amounts of absorbed nutrients are to be expected. That means that despite there was some statistically significant differences in some tree components the magnitude of these differences was similar. This positive relationship between biomass production and nutrient absorbed was also found by Santana et al. (1999). But this author also found positive relations between the stock of nutrients in the soil and the biomass production. These results do not coincide with those of Fabres (2003) who mentioned the incidence of specific soil characteristics like bulk density, soil depth and soil fertility among others in the eucalypts productivity.

**Table 5**

Calcium, Mg and K concentration and stock in the soils; Ca, Mg and K concentration and total absorbed by plants, and TDM production for the different study sites

Farm	Zone	Site	Horizon	Depth (cm)	Soil content			Tree content			TDM Mg ha <sup>-1</sup>						
					Ca (cmolc kg <sup>-1</sup> )	Mg (kg ha <sup>-1</sup> )	K	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (kg ha <sup>-1</sup> )	K							
<b>Molino Petiso</b>	1	1	A	50	3.20	0.90	0.21	4367.9	737.1	559.0	6.62	0.91	1.21	386.0	52.8	70.6	58.3
<b>Molino Petiso</b>	1	1	B	30	9.80	2.30	0.32	8400.5	1182.9	534.9	6.62	0.91	1.21	386.0	52.8	70.6	58.3
<b>Sto domingo</b>	1	2	A	30	3.30	0.90	0.23	2310.1	378.0	314.0	5.57	1.01	1.23	417.2	75.5	92.4	74.9
<b>Sto domingo</b>	1	2	B	70	12.93	4.35	0.37	23661.8	7953.0	674.2	5.57	1.01	1.23	417.2	75.5	92.4	74.9
<b>El Milagro a</b>	2	3	A	30	6.98	3.04	0.37	5796.4	2523.0	308.0	6.13	1.12	1.08	437.8	79.7	77.3	71.5
<b>El Milagro a</b>	2	3	B	30	11.20	8.30	0.33	9264.3	4119.3	532.3	6.13	1.12	1.08	437.8	79.7	77.3	71.5
<b>El Milagro b</b>	2	4	A	50	6.85	3.04	0.51	8461.2	3758.9	634.7	5.46	1.35	1.63	479.1	118.6	142.9	87.7
<b>El Milagro b</b>	2	4	B	30	9.20	6.10	0.48	6355.0	2528.2	646.6	5.46	1.35	1.63	479.1	118.6	142.9	87.7
<b>El Milagro c</b>	2	5	A	40	7.12	3.42	0.62	6276.9	3010.9	543.7	6.88	1.42	1.87	427.3	88.2	116.1	62.1
<b>El Milagro c</b>	2	5	B	30	14.20	7.00	0.33	12287.3	3634.3	556.8	6.88	1.42	1.87	427.3	88.2	116.1	62.1
<b>El Recado</b>	3	6	A	100	2.19	0.79	0.22	3328.7	1030.5	435.5	4.47	0.80	2.11	464.0	82.9	219.1	103.7
<b>El Recado</b>	3	6	B	20	6.70	3.80	0.77	2958.6	1006.8	663.0	4.47	0.80	2.11	464.0	82.9	219.1	103.7
<b>La calera</b>	3	7	A	40	4.27	0.94	0.21	4739.7	1039.1	237.8	5.15	0.97	2.06	166.2	31.3	66.5	32.3
<b>La calera</b>	3	7	B	60	11.29	1.68	0.31	17778.5	2637.8	485.9	5.15	0.97	2.06	166.2	31.3	66.5	32.3

**Table 6**

Adjusted Pearson correlation coefficients for nutrient plant concentration, nutrient soil stock until rooting depth and total dry matter (TDM)

Values below the diagonal are the correlation coefficients and values above the diagonal are the p-values.

	<b>cCaS</b>	<b>cMgs</b>	<b>cKs</b>	<b>sCas</b>	<b>sMgs</b>	<b>sKs</b>	<b>cCap</b>	<b>cMgp</b>	<b>cKp</b>	<b>TDM</b>	<b>sCap</b>	<b>sMgp</b>	<b>sKp</b>
<b>cCaS</b>	1	0.09	0.36	0.02	0.03	0.39	0.22	0.12	0.46	0.28	0.73	0.95	0.12
<b>cMgs</b>	0.69	1	0.05	0.73	1.60E-04	0.39	0.23	0.03	0.36	0.82	0.30	0.17	0.69
<b>cKs</b>	0.41	0.75	1	0.84	0.11	0.34	0.47	3.60E-03	0.98	0.45	0.16	0.01	0.59
<b>sCas</b>	0.82	0.16	-0.09	1	0.47	0.63	0.47	0.66	0.66	0.05	0.15	0.30	0.04
<b>sMgs</b>	0.79	0.98	0.66	0.33	1	0.43	0.18	0.06	0.23	1	0.40	0.30	0.48
<b>sKs</b>	0.39	0.39	0.43	0.22	0.36	1	0.29	0.15	0.37	0.53	1	0.60	0.26
<b>cCap</b>	0.53	0.52	0.33	0.33	0.58	0.46	1	0.23	0.25	0.39	0.8	0.99	0.17
<b>cMgp</b>	0.65	0.80	0.92	0.21	0.73	0.60	0.53	1	0.94	0.92	0.54	0.15	0.82
<b>cKp</b>	-0.34	-0.41	0.01	-0.21	-0.52	-0.4	-0.51	-0.04	1	0.99	0.49	0.88	0.20
<b>TDM</b>	-0.48	0.11	0.35	-0.76	2.80E-03	-0.29	-0.39	-0.05	4.10E-03	1	<b>0.01</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>
<b>sCap</b>	-0.16	0.46	0.59	-0.6	0.38	-1.30E-03	0.12	0.28	-0.31	<b>0.86</b>	1	0.01	0.20
<b>sMgp</b>	0.03	0.58	0.86	-0.46	0.46	0.24	0.01	0.60	-0.07	<b>0.76</b>	0.86	1	0.20
<b>sKp</b>	-0.64	-0.19	0.25	-0.78	-0.33	-0.50	-0.58	-0.11	0.55	<b>0.83</b>	0.55	0.55	1

cCas (g Kg<sup>-1</sup> Ca in the soil); cMgs (g Kg<sup>-1</sup> Mg in the soil); cKs (g Kg<sup>-1</sup> K in the soil); sCas (Kg ha<sup>-1</sup> Ca in the soil); sMgs (Kg ha<sup>-1</sup> Mg in the soil); sKs (Kg ha<sup>-1</sup> K in the soil); cCap (g Kg<sup>-1</sup> Ca in the tree); cMgp (g Kg<sup>-1</sup> Mg in the tree); cKp (g Kg<sup>-1</sup> K in the tree); sCap (Kg ha<sup>-1</sup> Ca in the plant); sMgp (Kg ha<sup>-1</sup> Mg in the plant); sKp (Kg ha<sup>-1</sup> K in the plant); TDM (Total Dry Matter production per hectare Mg ha<sup>-1</sup>);



**Table 7**

Adjusted Pearson correlation coefficients for nutrient plant concentration, nutrient soil stock, total dry matter (TDM), organic matter and bulk density for A horizon

Values below the diagonal are the correlation coefficients and values above the diagonal are the p-values.

	Bulk density (g cm <sup>3</sup> )	OM(%)	sCas	sMgs	sKs	cCap	cMgp	cKp	sCap	sMgp	sKp	TDM
Bulk density (g cm <sup>3</sup> )	1	3.80E-06	0.05	0.02	0.43	0.22	3.40E-04	0.90	0.09	0.42	0.54	0.88
Organic C (g kg <sup>-1</sup> )	-0.99	1	0.07	0.02	0.39	0.19	4.60E-04	0.84	0.07	0.38	0.50	0.98
sCas	-0.75	0.71	1	1.90E-03	0.15	0.63	0.05	0.79	0.06	0.19	0.18	0.87
sMgs	-0.85	0.84	0.94	1	0.20	0.65	<b>0.02</b>	0.79	0.01	0.07	0.09	0.56
sKs	-0.36	0.39	0.6	0.55	1	0.37	0.25	0.96	0.11	0.25	0.18	0.47
cCap	-0.53	0.56	0.22	0.21	0.40	1	0.23	0.25	0.58	0.56	0.48	0.39
cMgp	-0.97	0.96	0.75	<b>0.83</b>	0.50	0.53	1	0.94	0.08	0.4	0.47	0.92
cKp	0.06	-0.10	0.12	0.12	-0.03	-0.51	-0.04	1	0.65	0.65	0.48	0.99
sCap	-0.69	0.73	0.74	0.87	0.65	0.26	0.69	-0.21	1	0.02	0.05	0.16
sMgp	-0.37	0.40	0.57	0.72	0.50	-0.27	0.38	0.21	0.83	1	9.40E-05	<b>0.02</b>
sKp	-0.28	0.31	0.57	0.69	0.57	-0.32	0.33	0.33	0.76	0.98	1	<b>0.02</b>
TDM	0.07	-0.01	0.08	0.27	0.33	-0.39	-0.05	4.10E-03	0.59	<b>0.84</b>	<b>0.82</b>	1

sCas (Kg ha<sup>-1</sup> Ca in the soil); sMgs (Kg ha<sup>-1</sup> Mg in the soil); sKs (Kg ha<sup>-1</sup> K in the soil); cCap (g Kg<sup>-1</sup> Ca in the tree); cMgp (g Kg<sup>-1</sup> Mg in the tree); cKp (g Kg<sup>-1</sup> K in the tree); sCap (Kg ha<sup>-1</sup> Ca in the plant); sMgp (Kg ha<sup>-1</sup> Mg in the plant); sKp (Kg ha<sup>-1</sup> K in the plant); TDM (Total Dry Matter production per hectare Mg ha<sup>-1</sup>).

**Table 8**

Adjusted Pearson correlation coefficients for nutrient plant concentration, nutrient soil stock, total dry matter (TDM), organic matter and bulk density for B horizon

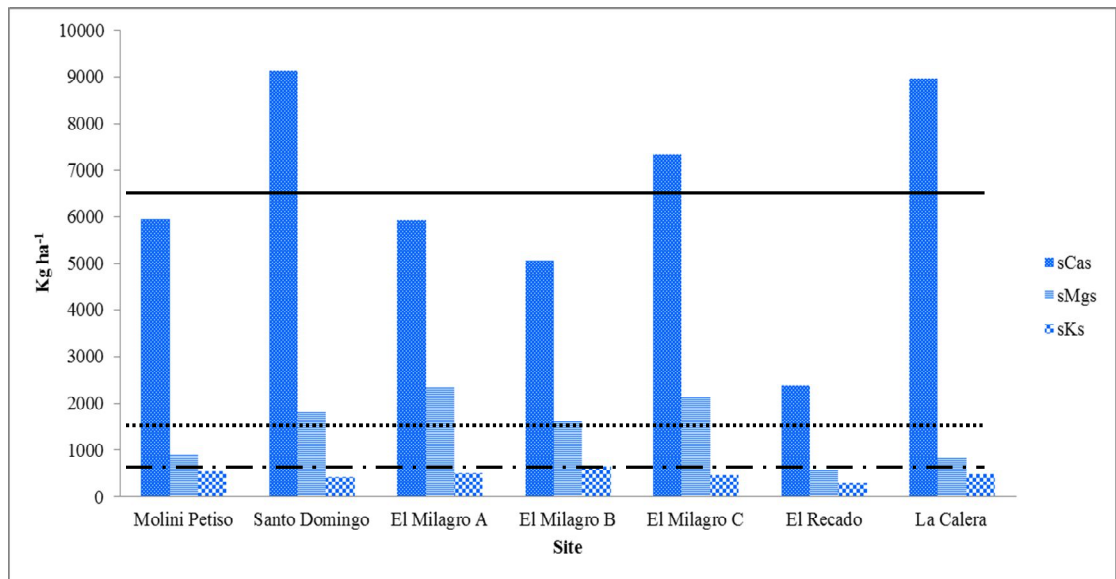
Values below the diagonal are the correlation coefficients and values above the diagonal are the p-values.

	<b>Bulk density(gcm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Organic C(g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>sCas</b>	<b>sMgs</b>	<b>sKs</b>	<b>cCap</b>	<b>cMgp</b>	<b>cKp</b>	<b>sCap</b>	<b>sMgp</b>	<b>sKp</b>	<b>TDM</b>
<b>Bulk density(gcm<sup>-3</sup>)</b>	1	9.60E-06	0.60	0.42	0.53	0.11	2.60E-03	0.65	0.26	0.87	0.98	0.49
<b>Organic C(g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0.99	1	0.64	0.41	0.56	0.07	3.10E-03	0.61	0.23	0.86	0.99	0.54
<b>sCas</b>	-0.24	0.22	1	0.03	0.86	0.82	0.97	0.68	0.22	0.11	0.08	0.20
<b>sMgs</b>	-0.37	0.37	0.81	1	0.53	0.78	0.65	0.31	0.93	0.65	0.47	0.89
<b>sKs</b>	0.29	-0.27	-0.08	0.29	1	0.32	0.94	0.98	0.43	0.14	0.14	0.02
<b>cCap</b>	-0.65	0.71	0.11	0.13	-0.45	1	0.23	0.25	0.58	0.56	0.48	0.39
<b>cMgp</b>	-0.93	0.92	0.02	0.21	-0.04	0.53	1	0.94	0.08	0.40	0.47	0.92
<b>cKp</b>	0.21	-0.24	-0.19	-0.45	0.01	-0.51	-0.04	1	0.65	0.65	0.48	0.99
<b>sCap</b>	-0.50	0.52	-0.53	-0.04	0.36	0.26	0.69	-0.21	1	0.02	0.05	0.16
<b>sMgp</b>	-0.08	0.09	-0.66	-0.21	0.62	-0.27	0.38	0.21	0.83	1	9.40E-05	<b>0.02</b>
<b>sKp</b>	0.01	-0.01	-0.70	-0.33	0.62	-0.32	0.33	0.33	0.76	0.98	1	<b>0.02</b>
<b>TDM</b>	0.32	-0.28	-0.55	-0.06	0.84	-0.39	-0.05	4.10E-03	0.59	<b>0.84</b>	<b>0.82</b>	1

sCas (Kg ha<sup>-1</sup> Ca in the soil); sMgs (Kg ha<sup>-1</sup> Mg in the soil); sKs (Kg ha<sup>-1</sup> K in the soil); cCap (g Kg<sup>-1</sup> Ca in the tree); cMgp (g Kg<sup>-1</sup> Mg in the tree); cKp (g Kg<sup>-1</sup> K in the tree); sCap (Kg ha<sup>-1</sup> Ca in the plant); sMgp (Kg ha<sup>-1</sup> Mg in the plant); sKp (Kg ha<sup>-1</sup> K in the plant); TDM (Total Dry Matter production per hectare Mg ha<sup>-1</sup>);

Figures 3, 4 and 5 show the association among different groups of variables across the different studied sites. As shown in Figure 3, sites 2, 5 and 7 have a stock of Ca in the soil higher than the average for the seven sites. Sites 2, 3, 4 and 5 showed Mg soil stocks higher than the and for the stock of K in the soil sites 1, 3, 4 and 7 are the ones with higher values than the average. According to the zone to which each of the evaluated sites belong, we could say that site 2 is the most representative of West zone since it is the one with the highest Ca content which would be expected since these soils were originated by cretacic sandstones with calcareous cement which determined high calcium contents. In the case of K, the stock present in the soil was relatively homogeneous among the different sites, but sites of Center Zone which are derived of metamorphic rocks, with higher amount of potassic minerals are the ones with highest values, especially site 4.

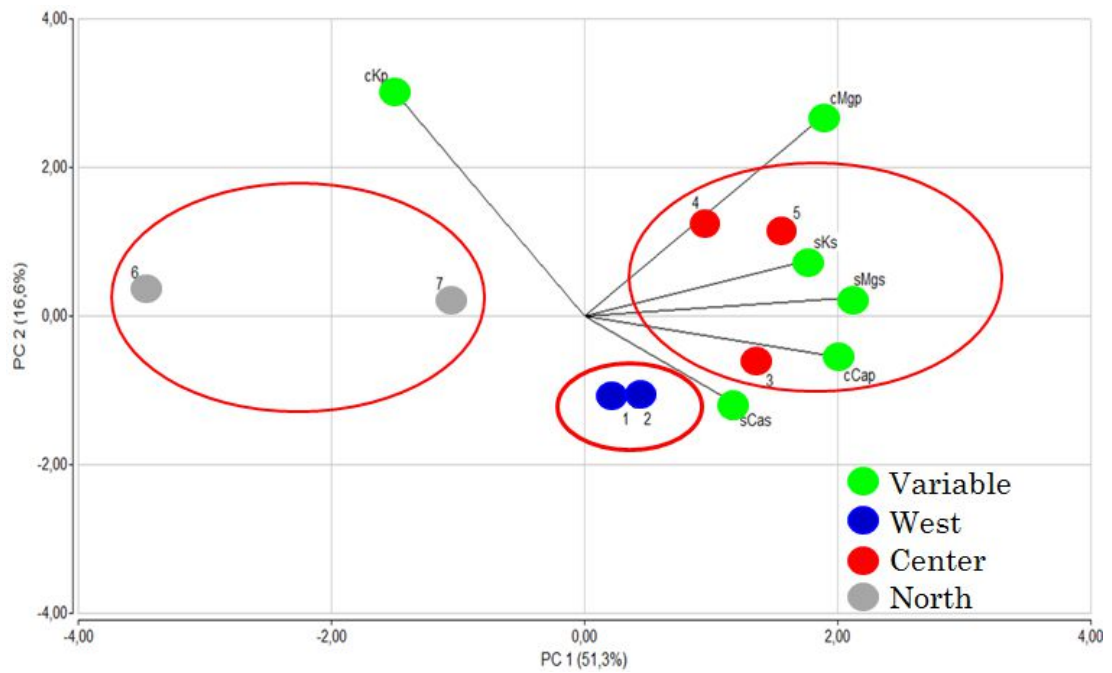
Based on the above, it is clear that site 6 is the one with the lowest stocks of Ca, Mg and K in the soil. Moreover sites from Center Zone (3, 4 and 5) have a more similar stock of nutrients in the soil, and site 5 showed higher stock of Ca, site 3 higher stock of Mg and site 4 higher stock of K. Sites form North Zone (6 and 7) have a similar stock of Mg and K, but very different stock for Ca with larger amounts in site 7. Sites from West Zone have a similar stock of K, but very different stock of Ca and Mg being site 2 the one with the highest values.



— Represent the average stock of Ca for the 7 sites; ..... Represent the average stock of Mg for the 7 sites; - . - Represent the average stock of K for the 7 sites

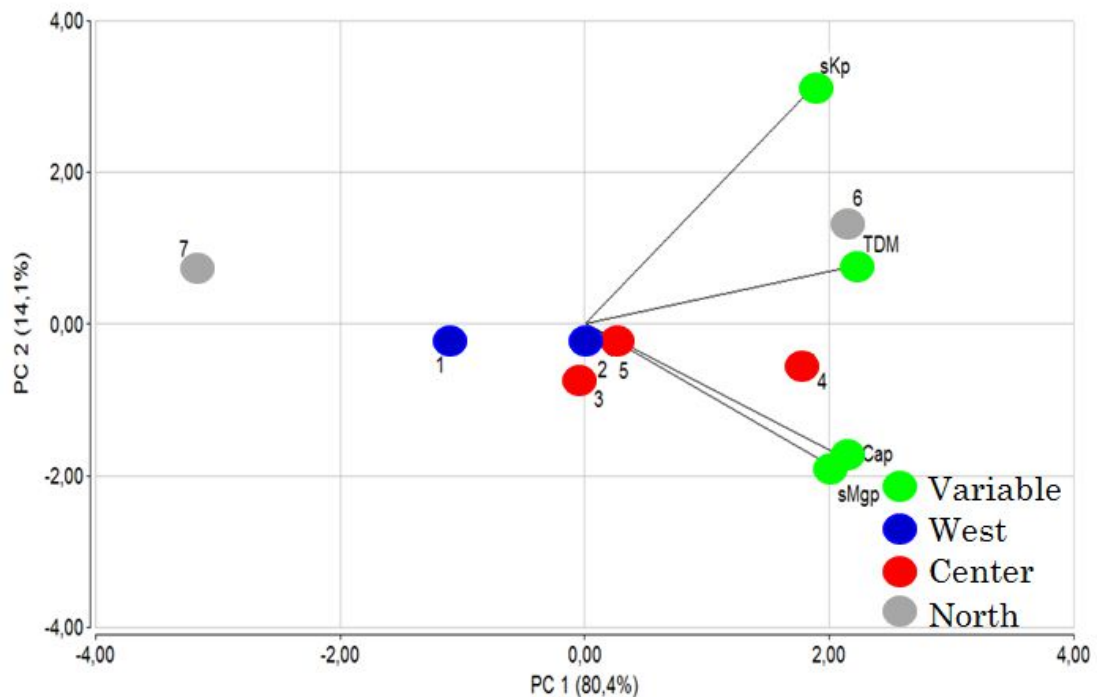
**Figure 3.** Calcium, Magnesium and Potassium soil stock (Kg ha<sup>-1</sup>) for the different sites.

In [Figure 4](#) a principal component analysis was designed to evaluate the association between the stock of nutrients in the soil and the nutrient concentration in the trees and in turn how they are ordered the different sites with these variables. For K, there is no relationship between the stock in the soil and its concentration in the trees. On the other hand, for Ca there is a positive association between the stock in the soil and its concentration in the tree and in the case of Mg there is a positive but not strong relationship between the stock in the soil and its concentration in the trees. Sites of Center Zone are the ones with highest stocks of nutrients in the soil and nutrient concentration in the trees, followed by sites of West Zone. On the other hand, sites of North Zone have a strong negative association between stocks of Ca and Mg in the soil and their concentration in the trees.



sCas ( $\text{Kg ha}^{-1}$  Ca in the soil); sMgs ( $\text{Kg ha}^{-1}$  Mg in the soil); sKs ( $\text{Kg ha}^{-1}$  K in the soil); cCap ( $\text{g Kg}^{-1}$  Ca in the tree); cMgp ( $\text{g Kg}^{-1}$  Mg in the tree); cKp ( $\text{g Kg}^{-1}$  K in the tree)

**Figure 4.** Biplot of soil nutrient stock among the different sites and nutrient concentration in the tree.



sCap ( $\text{Kg ha}^{-1}$  Ca in the plant); sMgp ( $\text{Kg ha}^{-1}$  Mg in the plant); sKp ( $\text{Kg ha}^{-1}$  K in the plant); TDM (Total Dry Matter production per hectare  $\text{Mg ha}^{-1}$ )

**Figure 5.** Biplot of soil nutrient stock and total dry matter production of the different sites

Figure 5 was designed to determine the relationship between biomass production and nutrient stocks as it was found by (Goya et al., 1997; Santana et al., 2008). In that case, sites in descendent order of total dry matter production are: 6, 4, 5, 2, 3, 1 and 7. Site 6 presented the lowest nutrient stock in the soil and amongst the lowest nutrients concentration in the tress, but nevertheless was the one with the highest dry matter production. The other sites that in descendent order of soil nutrient stock were 3, 5, 4, 2, while for Total Dry Matter production are ordered as: 4, 5, 2 and 3. And sites with the lowest values of nutrient stock that were ordered as 7 and 1, in Total Dry Matter production are ordered as 1 and 7.

### **3.4.6 Nutrient assimilation index**

The NAI index proposed by Sochacki et al. (2013) was used to evaluate the more sustainable condition of the different harvest components and zones. It must be noted that this index is calculated from the reciprocal of the nutrient concentration and thus it must be interpreted cautiously because the relationships between nutrient requirements and plant growth depend on a number of interacting factors (Loneragan, 1968). Taking this in consideration, as it is shown in (Table 9), we can say that wood is the component that had the most efficient use of the nutrients, which was also found by Eufrade Junior et al. (2016), except for P where the coarse branches was the component with the highest index values. On the other hand, leaves were the component with the lowest index for N, P and K, and bark for Ca and Mg.

These results for N, P and Mg are similar to those of Eufrade Junior et al., (2016) which in turn were much higher than those observed by Sochacki et al., (2013). In the case of K we found NAI indices 7 times higher and for Ca four times higher than Eufrade Junior et al., (2016).

Comparing the values of NAI by zones, the highest values were for North Zone in the case of Ca and Mg, in West and Center Zones for K and P, and in West Zone for N. Considering that there were no significant differences in the biomass production per hectare between zones, this results suggest that sites with higher nutrient absorption were the ones with lower assimilation index.

Because of the above, to decrease the addition of fertilizer due to environmental considerations and the economic cost involved, a good strategy according to Guo,

(2002) would be to remove the components of higher nutrient assimilation index. In other words, harvest the wood and leave the other tree components in the site to allow a nutrient cycling in the site, especially in plantations which final destination will be the pulp production because of the problems that can cause the excess of Ca for the industrial boilers or the excess of P which can be poured in excess on the water outlets close to the cellulose mills which may cause environmental problems.



**Table 9**Nutrient assimilation index – NAI (MG TDM kg<sup>-1</sup>) per biomass fraction

<b>Nutrient and Component</b>	<b>West Zone</b>	<b>Center Zone</b>	<b>North Zone</b>
<b>N Wood</b>	1.06A	0.72B	0.59C
<b>N Bark</b>	0.43A	0.30B	0.26C
<b>N leaves</b>	0.07A	0.05B	0.05B
<b>N fine branches</b>	0.33A	0.31A	0.26B
<b>N coarse branches</b>	0.54A	0.38C	0.46B
<b>P Wood</b>	5.21AB	6.04A	4.02B
<b>P Bark</b>	2.72A	2.92AB	4.46B
<b>P leaves</b>	2.39AB	2.52A	1.28B
<b>P fine branches</b>	7.85A	7.69A	7.80A
<b>P coarse branches</b>	8.46A	6.37AB	5.16B
<b>K Wood</b>	2.63A	2.11B	1.12C
<b>K Bark</b>	0.40AB	0.46A	0.32B
<b>K leaves</b>	0.28AB	0.36A	0.23B
<b>K fine branches</b>	0.40A	0.41A	0.22B
<b>K coarse branches</b>	0.59A	0.29B	0.28B
<b>Ca Wood</b>	0.94A	0.48B	0.86A
<b>Ca Bark</b>	0.06B	0.07AB	0.08A
<b>Ca leaves</b>	0.07C	0.13A	0.10B
<b>Ca fine branches</b>	0.08B	0.12A	0.11A
<b>Ca coarse branches</b>	0.08C	0.11B	0.14A
<b>Mg Wood</b>	1.15A	1.33A	1.30A
<b>Mg Bark</b>	0.33A	0.37A	0.42A
<b>Mg leaves</b>	0.55C	0.68B	0.99A
<b>Mg fine branches</b>	0.57B	0.53B	1.06A
<b>Mg coarse branches</b>	0.67AB	0.53B	0.82A

The means that do not differ from each other at the 0.05 significance level by Student t-test per nutrient and per tree component are marked with the same capital letters.

### **3.5. CONCLUSIONS**

Although chemical and physical characteristics between soils from three zones of forest production were different, the total dry matter production did not show statistically significant differences. Some significant differences in nutrient concentrations in biomass components were observed, but there were of similar magnitude among the different zones. Positive and significant correlations were found between the TDM production and the amounts of Ca, Mg and K absorbed. No relationships were found between nutrient stocks in the soil and nutrient concentrations or total absorption by trees. However, there was a positive and significant correlation between the stock of Mg in the A horizon of the soils and the concentration in the trees. These results could indicate that in these soils, the nutrient levels were sufficient for the biomass production in spite of the relatively low fertility. The Nutrient Assimilation Index indicate some differences between zones depending on the nutrient. In general, higher nutrients stock in soils, determined lower Nutrient Assimilation Index.

### **3.6. ACKNOWLEDGEMENTS**

The author would like to thank to the co-authors of this study for their help and willingness to do this work. To the Soil and Water Department of the University of the Republic, Weyerhaeuser and Montes del Plata for providing the logistical support necessary for the evaluations that were carried out in laboratory and field.

### 3.7. REFERENCES

- Achat, D. L., Deleuze, C., Landmann, G., Pousse, N., Ranger, J., Augusto, L. 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth - A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 348, 124–141.
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., Puentes, R., 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I: Clasificación de Suelos. Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo, Uruguay. 97p.
- Attiwill, P.M., Adams, M. A. 1996. Nutrition of Eucalypts. CSIRO Australia. 440 p.
- Barros, N.F., Neves, J.C.L., & Novais, R.F. 1997. Nutrição e adubação de eucalipto. *Inf. Agropec* 18, 70-75.
- Bellote, A. F., Saruague, J. R., Haag, H. P., Oliveira, G. D., 1980. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 1 - Macronutrientes. *IPEF*. 20, 1–23.
- Boland DJ, Brooker MIH., 2006. Forest Trees of Australia, CSIRO, Sidney, Australia, 736pp.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2016. In: Anuario estadístico agropecuario 2016. MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). Montevideo, Uruguay, 214pp.
- Di Rienzo J. A., Casanoves, F., Balzarini M. G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Ericsson, T., 1994. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 24(2/3), 133–68.
- Eufrade Junior, H. J., de Melo, R. X., Sartori, M. M., Guerra, S. P., Ballarin, A. W. 2016. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 90, 15–21.
- Fabres, A. 2003. Aspectos nutricionais de *Eucalyptus globulus* em Portugal. 1º Simposio Iberoamericano de *Eucalyptus globulus*. Montevideo, Uruguay.

- Giosa, R. 2008. Cuantificación del contenido de nutrientes en trozas comerciales de *Eucalyptus grandis* con destino a la fabricación de pulpa y su relación con el tipo de suelo. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay. 62p.
- Goncalves, J. L. M. Barros, E. K. S. and Novais, R. F. 1997. In: Soil and Stand Management for Short-rotation Plantations 11, 379-417.
- González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Rubiera, F., Barrio-Anta, M. 2016. Nutritional, carbon and energy evaluation of *Eucalyptus nitens* short rotation bioenergy plantations in northwestern Spain. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9(2), 303–310.
- González, A. 2008. Extracción y reciclaje de nutrientes por cosecha de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay, 49pp.
- Goya, J. F., Frangi, J. L., Dalla Tea, F., Marco, M. A., Larocca, F. 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el ne de la provincia de entre rios. XII Jornadas Forestales de Entre Rios, 34(34), 1–19.
- Grove, T.S., Thomson, B. D., Malajczuk, N. 1996. Nutritional physiology of eucalyptus: uptake, distribution and utilization. In: Attiwill, P.M., Mark, A.A. (Eds.), Nutrition of Eucalypts. CSIRO Publishing, Australia, pp. 77–108.
- Guo, L. B. 2002. Biomass production and nutrient cycling in *Eucalyptus* short rotation energy forests in New Zealand . I : biomass and nutrient accumulation 85, 273–283.
- Hernández, J., del Pino, A., Salvo, L., Arrarte, G. 2009. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management* 258(2), 92–99.
- INUMET. 2017. Normales climatológicas 2010-2016. Instituto Nacional de Meteorología. Montevideo, Uruguay. <https://inumet.gub.uy/>
- Leite, F. P., Silva, I. R., Novais, R. F., de Barros, N. F., Neves, J. C., L., Villani, E. M. 2011. Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities 35, 949–959.

- Leite, F. P., 1996. Crescimento, relações hídricas, nutricionais e lumínicas em povoamento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. Universidade federal de Viçosa. Brasil, Viçosa. 90 p.
- Loneragan, J. F. 1968. Nutrient Requirements of Plants. Nature 220, 1307-1308.
- Miller, H. G. 1995. The influence of stand development on nutrient demand , growth and allocation. Plant and Soil 168-169, 225–232.
- Murphy, J., Riley, J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta 27, 31–36.
- Noble, A., Herbert, M. 1989. Estimated nutrient removal in a short rotation *Eucalyptus grandis* crop on a fern wood soil. I.C.F.R. Annual Report 139-150.
- Pérez Bidegain, M., García Préchac, F. Methol, R. 2001. Long term effect of tillage intensity for *Eucalyptus grandis* planting on some soil physical properties in an uruguayan Alfisol. In: 3rd International Conference on Land Degradation and Meeting of the IUSS Subommission C- Soil land Water Conservation. September 17-21, 2001, Rio de Janeiro. Embrapa Solos.
- Santana, R. C., de Barros, N. F., Novais, R. F., Leite, H., Comerford, N. B. 2008. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil 32, 2723–2733.
- Santana, R. C. de Barros N. F., Neves, J. C. 2002. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* provenances em sítios florestais do Estado do São Paulo. R. Árvore, Viçosa- MG, 26(4), 447–457.
- Santana, R. C., de Barros N. F., Neves, J. C. 1999. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo 56. 155–169.
- Sochacki, S. J., Harper, R. J., Smettem, K. R. J., Dell, B., Wu, H. 2013. Evaluating a sustainability index for nutrients in a short rotation energy cropping system. GCB Bioenergy 5(3), 315–326.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 372p.

- Spangenberg, A., Grimm, U., Sepeda, R., Fiilster, H. 1996. Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia ( Jari ), 80, 225–234.
- Turvey, N. D., Smethurst, P. J., 1994. Nutrient concentration in foliage, litter and soil in relation to wood production of 7- to 15-year-old *Pinus radiata* in Victoria, Australia. *Australian Forestry* 57, 157-164.
- Varela, S. 2009. Cuantificación de la extracción de nutrientes por trozas comerciales de *Eucalyptus globulus* en suelos de basamento cristalino de la zona este del país. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay 84p.

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL**

### **4.1 DISCUSIÓN GENERAL**

#### **4.1.1 Descripción de los suelos estudiados**

Los suelos de los sitios Arroyo Malo, La Merced, Molino Petizo, El Recado y La Calera en función de sus propiedades físicas y químicas se clasificaron de acuerdo a la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay MAP/DSF (1976) dentro del Orden Desaturados Lixiviados por ser: suelos profundos, con secuencia de horizontes A-Bt-C siendo el horizonte B un horizonte argilúvico desarrollado como consecuencia de un proceso de lixiviación muy intenso el cual además de translocar arcillas también transloca bases causando una fuerte acidificación, no solo en los horizontes superficiales, sino que también en el horizonte argilúvico, lo que provoca un tenor elevado de aluminio dentro de los cationes intercambiables y como consecuencia de ese lavado presentan bajo tenor de bases intercambiables y estrecha relación Ca/Mg (alrededor de 2/1). Además por presentar bajo contenido de materia orgánica (0,55 a 1,9%), lo cual sumado a las características anteriores hace que los suelos que pertenecen a este Orden sean los de menor fertilidad natural del país. Dentro de este Orden, se ubican en el Gran Grupo de los Luvisoles por presentar horizonte Bt con más de 5% de aluminio intercambiable y saturación en bases mayor a 50% a pH 7.

Por otro lado, el sitio Santo Domingo se clasificó dentro del Orden Saturados lixiviados por presentar un horizonte argilúvico con más de 50% de saturación de bases (a pH 7,0) y por presentar un horizonte diagnóstico superficial Ócrico, una relación de contenido de arcilla entre los horizontes B/A mayor a 1,2 y además por no presentar más de 5% de Al intercambiable y carecer de horizonte gleico a menos de 120cm de profundidad. Dentro de este Orden se encuentra en el Gran Grupo de los Argisoles por carecer de horizonte álbico.

Mientras que los suelos evaluados en los sitios El Milagro a, El Milagro b y El Milagro c, se clasificaron dentro del Orden Melánicos por presentar un horizonte diagnóstico superficial Melánico, es decir, un horizonte oscurecido por su contenido relativamente alto de materia orgánica (mayor a 2%), saturación en bases mayor a 50% y espesor mayor a 20cm seguido por otro horizonte diagnóstico. Dentro de este Orden, los suelos de esta zona se clasificarían dentro del Gran Grupo de los Brunosoles y Clase Subéutricos por presentar horizonte argilúvico continuo, una relación de arcillas del horizonte B/A mayor a 1,2 y capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial menor a 20 cmolc kg<sup>-1</sup> y mayor a 10 cmolc kg<sup>-1</sup>.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, los suelos del presente estudio, tienen contenidos de bases intercambiables y materia orgánica variables siendo los de la Zona Centro los suelos en los que se presentan los mayores valores y los de la Zona Norte los menores. Si comparamos estos últimos, con los suelos de otros lugares del mundo dónde se han realizado investigaciones en plantaciones comerciales de *Eucalyptus sp.* como los descrito por Santana et al. (1999) en 5 sitios diferentes del Estado de San Pablo en Brasil, vemos que los valores de Ca, Mg y K intercambiables son 32, 9 y 5 veces superiores en el suelo con menor fertilidad natural del presente estudio.

#### **4.1.2 Producción de biomasa**

La producción de biomasa total por hectárea para las plantaciones adensadas con destino a la producción de energía de los dos experimentos varió entre 84,4 y 100,5 Mg ha<sup>-1</sup>, valores que corresponden a las dos densidades del sitio Arroyo Malo. En el sitio La Merced, la producción total de biomasa fue intermedia a los valores anteriormente mencionados, siendo muy similar entre ambas densidades. Cabe destacar que no se observaron diferencias estadísticas significativas entre sitios ni dentro de cada sitio entre las densidades evaluadas. Dichos resultados fueron similares a los encontrados por (Leite et al., 2011) en Brasil, con valores entre 94.1 y



100,9 Mg ha<sup>-1</sup> para densidades de 5000 y 2500 árboles por hectárea respectivamente. Sin embargo, en la densidad más elevada la proporción de madera con respecto a restos observada fue de 75/25, mientras que para la densidad más baja fue de 65/35 aproximadamente. Similares proporciones fueron encontradas por (Leite et al., 2011).

Para las plantaciones con destino a la producción de celulosa, los valores observados fueron menores, variando entre 65 y 75 Mg ha<sup>-1</sup> a los 4 años para las Zonas Litoral y Norte respectivamente y en este caso tampoco hubo diferencias estadísticas significativas entre las zonas evaluadas. En este caso, (Leite et al., 2011) reporta valores para densidades de 1250 árboles por hectárea de 75 Mg ha<sup>-1</sup>, los cuales son nuevamente similares a los encontrados en este estudio.

Por otra parte Santana et al. (2008) estudiaron la producción de biomasa y extracción de nutrientes de 20 sitios diferentes de Brasil a diferentes edades de la rotación. A los 4,5 años estos autores reportaron valores de producción de materia seca por hectárea entre 41 y 122 Mg ha<sup>-1</sup>, pero hacen énfasis en que la producción de biomasa y el contenido de nutrientes estuvieron positivamente relacionados entre sí, y ambos fueron menores en las regiones con menor disponibilidad de agua.

#### **4.1.3 Concentración de nutrientes**

Tanto para las plantaciones adensadas con destino a la producción de energía, como para las plantaciones con destino a la producción de celulosa, la madera es el componente que presenta menores valores de concentración de nutrientes, lo cual concuerda con los estudios de Hernández et al. (2009) y Achat et al.(2015) entre otros. Por otro lado, en ambos casos (biomasa y celulosa), las hojas son el componente que presenta mayores concentraciones de N y P (seguido por la corteza, las ramas y la madera). La corteza es el componente que presenta las mayores concentraciones de Ca y Mg (seguido por las hojas, ramas y madera). Mientras que K, es el elemento que se encuentra más homogéneamente distribuido entre cada uno

de los componentes de la copa (hojas, ramas y corteza) lo cual concuerda con Hernández et al. (2009) y Leite et al. (2011).

Para el caso de N en el componente hojas, los valores de concentración observados entre ambos tipos de sistemas (biomasa o celulosa), son en general de la misma magnitud variando en el entorno de 19 a 25 g kg<sup>-1</sup>, y similares a los encontrados por Leite et al. (2011) y Eufrede Junior et al. (2016). Sin embargo, en las plantaciones con destino a celulosa de la Zona Litoral se observaron valores más bajos (13,7 g kg<sup>-1</sup>), los cuales resultaron similares a los encontrados por Hernández et al. (2009) en plantaciones de 9 años para la misma zona.

En lo que respecta a la concentración de Ca en la corteza, en general también se encontraron valores de similar magnitud para ambos tipos de sistemas de plantación variando de 12,28 para la densidad baja en el sitio Arroyo Malo a 16,25 g kg<sup>-1</sup> en la Zona Litoral de las plantaciones con destino a celulosa. En este caso, la excepción se observó en la Zona Centro, donde los valores fueron de 24,58 g kg<sup>-1</sup>, similares a los encontrados por (Hernández et al., 2009) para *E. dunnii* a turno final. Dichos valores resultaron ser superiores a los reportados para otros países por González-García et al. (2016) y Leite et al. (2011), quienes obtuvieron concentraciones de Ca entre 10,92 y 9,9 g Kg<sup>-1</sup> respectivamente.

Para P en la madera, los valores encontrados fueron más variables ya que para las plantaciones con destino a biomasa se observaron valores entre 0,10 y 0,19 g kg<sup>-1</sup> y para el caso de las plantaciones con destino a celulosa el rango de valores fue de 0,19 a 0,27 g Kg<sup>-1</sup>. De todas maneras, fueron valores similares a los hallados por Hernández et al. (2009), y ampliamente superiores a los encontrados por Leite et al. (2011).

Magnesio en la corteza tuvo un comportamiento muy similar entre ambos tipos de sistemas, ya que el rango de concentraciones observadas varió de 2,02 en el caso de la Zona Litoral con destino a celulosa a 2,97 gr kg<sup>-1</sup> para la densidad más elevada del sitio Arroyo Malo. Estos son valores muy semejantes a los encontrados por

Hernández et al. (2009) y algo superiores a los encontrados por González-García et al. (2016) y Leite et al. (2011).

Por último, para K en hojas se observaron mayores concentraciones de este nutriente en las plantaciones adensadas, variando sus valores entre 5,8 y 8,2 g kg<sup>-1</sup>, mientras que para las plantaciones con destino a celulosa los valores observados variaron entre 3,5 y 4,8 g kg<sup>-1</sup> respectivamente. En este último caso, los valores fueron similares a los observados por González-García et al. (2016) y Hernández et al. (2009) y ampliamente menores a los encontrados por Leite et al. (2011).

#### **4.1.4 Absorción de nutrientes**

En el caso de las plantaciones con destino a celulosa, Ca fue el nutriente con mayores valores exportados, desde 320 a 440 Kg ha<sup>-1</sup> para la Zona Norte y Centro respectivamente. Del total de estas cantidades, entre el 76 y 87% del Ca se encontraba localizado en las hojas, ramas y corteza, representando este último componente la mayor proporción (alrededor de 30%) lo cual concuerda con las proporciones encontradas en plantaciones a cosecha, 9 años (González, 2014). En el caso de las plantaciones adensadas, La Merced tuvo el mismo comportamiento que las anteriores, ya que Ca fue el nutriente que se exportó en mayor cantidad con valores que variaron de acuerdo a las densidades entre 428 y 434 Kg ha<sup>-1</sup> para la densidad baja y alta respectivamente. En cambio, para el caso de Arroyo Malo, Ca fue el segundo nutriente exportado en mayores cantidades con valores para la densidad baja y alta de 264 y 282 Kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. En ambos sitios, la densidad más baja presentó mayores proporciones de este nutriente en los restos (88% en Arroyo Malo; 80% en La Merced) mientras que la densidad más alta, al presentar menor proporción de los componentes de copa y en especial de corteza las proporciones fueron algo menores (86% en Arroyo Malo y 75% en La Merced).

Para las plantaciones adensadas, N fue el nutriente exportado en mayores cantidades para el sitio Arroyo Malo con valores de entre 313 y 280 kg ha<sup>-1</sup> y el segundo nutriente más exportado para el caso de La Merced con valores de 342 a 414

kg ha<sup>-1</sup> para la densidad alta y baja respectivamente. Para este nutriente en ambos sitios, las hojas fueron el componente de cosecha con mayor proporción (entre 44 y 53% dependiendo de la densidad y del sitio). En el caso de las plantaciones con destino a celulosa los valores de exportación de N fueron inferiores, variando entre 150 y 280 Kg ha<sup>-1</sup> para las Zonas Litoral y Norte, respectivamente siendo las hojas nuevamente el componente con mayor proporción (entre 35 y 50%).

Para P y Mg, en el caso de las plantaciones con destino a celulosa, estos fueron los nutrientes que presentaron una mayor proporción en la madera, siendo entre 45 y 60% para P y entre 35 y 55% para Mg dependiendo de la Zona. Estas proporciones son similares a las encontradas en el caso de La Merced dónde para fósforo se observaron valores de alrededor de 60% y de Mg entre 35 y 40%, mientras que en Arroyo Malo estas proporciones fueron algo menores con valores de 40 y 30% respectivamente.

Por último K, al igual que se observó para el caso de las concentraciones, fue el nutriente con la distribución más homogénea entre los componentes estudiados. Para las plantaciones de celulosa, entre el 70 y 80% de este nutriente se encontró en las hojas, ramas y corteza, mientras que para las plantaciones adensadas estas proporciones fueron algo menores variando entre 40 y 60% para La Merced y Arroyo Malo, respectivamente.

#### **4.1.5 Comentarios generales**

A pesar de la variabilidad edáfica que abarcó el presente trabajo, y a que los suelos en estudio, en su mayoría, presentan una fertilidad por debajo de la media del país, se observaron valores de concentración de nutrientes de similar magnitud entre sitios y entre sistemas de plantación. Por otra parte, no se observaron correlaciones entre la producción de materia seca y los stocks de nutrientes presentes en los diferentes sitios, lo cual sí fue evidente en otros países. La hipótesis que surge es que los suelos dónde se realizan plantaciones comerciales en otros países son

sensiblemente menos fértiles que los suelos de Uruguay. Esto indicaría que los suelos de nuestro país, por el momento y de acuerdo al stock de nutrientes disponible, presentarían las condiciones nutricionales necesarias para que las plantaciones de *E. dunnii* puedan expresar su potencial productivo, aunque esto no solo depende de los nutrientes, sino también de otros factores muy importantes como son el agua, la luz, la temperatura y el material genético, entre otros.

La producción de biomasa fue mayor en los sistemas adensados con destino a la generación de energía respecto a las plantaciones con destino a celulosa, pero dentro de los primeros no hubo diferencias entre las densidades evaluadas lo que estaría marcando que el factor competencia por agua y luz a elevadas densidades comienza a hacerse importante y no permite una producción de biomasa mayor por hectárea.

Los valores de concentración de nutrientes obtenidos en las plantaciones de 4 años de edad, tanto para la producción de celulosa, como de biomasa con fines energéticos fueron de similar magnitud, y comparables con las encontradas por Hernández et al. (2009) para plantaciones cosechadas a los 9 años de edad para la producción de celulosa. Si a los 4 años las plantaciones de *Eucalyptus dunnii* se encuentran en la segunda etapa de crecimiento de un rodal, descrita por Attiwil and Adams (1996) (la cual se caracteriza por una estabilización de la biomasa foliar, formación de duramen, acumulación decreciente de nutrientes en los árboles y desarrollo máximo del ciclo bioquímico de los nutrientes dentro de la planta) y los valores de concentración observados a 9 años son similares, deberíamos preguntarnos si a los 9 años, los árboles aún continúan en esta etapa de crecimiento y por tanto desde el punto de vista de los nutrientes sería correcto cosecharlos a los 9 años, o a edades más avanzadas.

En la medida que las concentraciones de nutrientes son similares a cortas edades (4 años) en ambos sistemas, y equivalentes a plantaciones de edades mayores (9 años), la absorción de nutrientes estará en función de la producción de biomasa.

Asociado con este aspecto, las plantaciones con destino a la producción de biomasa realizarían una exportación más elevada de nutrientes desde el sitio no solo por su mayor productividad, sino que además por el hecho de que se cosechan la totalidad de los componentes de la biomasa. Por el contrario, en las plantaciones con destino a la producción de celulosa, en la medida que se retire del sitio solo la madera, la mayoría de los nutrientes permanecerán en el sitio y serán reciclados para futuras replantaciones, lo que asegura una mayor sostenibilidad de este sistema de producción forestal.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

- Achat DL, Deleuze C, Landmann G, Pousse N, Ranger J, Augusto L. 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth - A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*. 348: 124–141.
- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echevarría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo I: Clasificación de Suelos. Montevideo: Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes. 97p.
- Attiwill PM, Polglase JP, Weston JC, Adams MA. 1996. Nutrient cycling in forests of south-eastern Australia. En: Attiwill PM, Adams MA *Nutrition of Eucalypts*. Sydney: CSIRO. 440 p.
- Bellote AF, Saruugue JR, Haag HP de OGD. 1980. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden em função da idade: 1 - Macronutrientes. *IPEF*. 20: 1–23.
- Binkley D. 1993. *Nutrición forestal. Prácticas de manejo*. Barcelona: Editorial Limusa. 518 p.
- Boland DJ, Brooker MIH. 2006. *Forest Trees of Australia*. Sidney: CSIRO, 736p.
- Brussa CA. 1994. *Eucalyptus*. Montevideo: Hemisferio Sur.327p.
- Carlyle JC. 1993. Organic carbon in forested sandy soils : properties , processes , and the impact of forest management. *Australia. CSIRO*. 23: 390–402.
- CIDE (Comisión de Inversiones y Desarrollo Económico). 1967. *Los suelos del Uruguay, su uso y manejo*. Montevideo: Ministerio de Ganadería y Agricultura, Oficina de Programación y Política Agropecuaria, Comisión de Inversiones y Desarrollo Económico. 85p.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias) . 2013. En: *Anuario estadístico agropecuario 2013*. Montevideo: MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca).
- Durán A, García Préchac F.2007. *Suelos del Uruguay, origen, clasificación, manejo y conservación*. Montevideo, Hemisferio Sur. v.2, 358 p.

- Durán A. 2005. Política forestal y uso del suelo. Presentación en: Seminario sobre Programa Forestal, Producción de Celulosa y los Aportes de la UdelaR en la Construcción de una Política Forestal. Red Temática de Medio Ambiente, Universidad de la República. Montevideo.
- Ericsson T. 1994. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 24: 133–68.
- Eufrade Junior HJ, Melo RX, Sartori MMP, Guerra SPS, Ballarin AW. 2016. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 90: 15–21.
- Fabres A. 2003. Aspectos nutricionais de *Eucalyptus globulus* em Portugal. 1º Simposio Iberoamericano de Eucalyptus globulus. Montevideo, Uruguay.
- Folkel C. 2005. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos; aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores. (en línea). s.n.t. pp. 1-109 Consultado 17 may. 2017. Disponible en <http://www.eucalyptus.com.br>
- Freitas Melo V, Ferreira de Novais R, Félix de Barros N, Ferreira M, Da Costa L. 1995. Balanço nutricional, eficiência de utilização e avaliação da fertilidade do solo em P, K, Ca e Mg em plantios de Eucalipto no Rio Grande do Sul. *IPEF, Piracicaba*, 48/49: 8- 16.
- Geldres E, Gerding V, Schlatter JE. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región , Chile Biomass of 4-7 year-old *Eucalyptus nitens* in a stand in the X Region , Chile, 27(3): 223–230.
- Giosa R.2008. Cuantificación del contenido de nutrientes en trozas comerciales de *Eucalyptus grandis* con destino a la fabricación de pulpa y su relación con el tipo de suelo. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 62p.
- Gonçalves JLM, Poggiani F, Stape JL, Serrano MIP, Mello SLM, Mendez KCFS, Jorge LAC. 1997. Cultivo Mínimo do Solo em Florestas Efeito do cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. En: Anais do 1º Seminário sobre Cultivo Mínimo do Solo em Florestas (1º, 1995, Curitiba). Piracicaba, San Pablo. 43-60.



- González García M, Hevia A, Majada J, Rubiera F, Barrio-Anta M. 2016. Nutritional, carbon and energy evaluation of *Eucalyptus nitens* short rotation bioenergy plantations in northwestern Spain. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 9 (2): 303–310.
- González A. 2008. Extracción y reciclaje de nutrientes por cosecha de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 49p.
- Goya JF, Frangi JL, Dalla Tea F, Marco MA, Larocca F. 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en la provincia de Entre Ríos. In: Jornadas forestales de Entre Ríos (12º, 1997, Concordia, Entre Ríos). Trabajos presentados. s.n.t. pp. 1-19.
- Grove TS, Thomson BD, Malajczuk N. 1996. Nutritional physiology of eucalyptus: uptake, distribution and utilization. pp. 77-108. En: Attiwill PM. 1996. Nutrition of Eucalypts. CSIRO 440 p.
- Herbert M. 2005. An overview of forestry sites across FOSA holdings in Soriano, Paysandú and Río Negro. Prepared for Forestal Oriental S.A. Versión en CD. En: Duran A, García Préchac F. 2007. Suelos del Uruguay, origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. v.2, 358 p.
- Hernández J. 2016. Dinámica de los nutrientes y la materia orgánica del suelo en sistemas forestales. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 190p.
- Hernández J, del Pino A, Salvo L, & Arrarte G. 2009. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*, 258(2): 92–99.
- Hillis WE, and Brown AG. 1984. *Eucalyptus* for Wood production. Melbourne, Australia, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization). 434 p.
- Jones HE, Madeira M, Herraes L, Dighton J, Fabia A, Marcos MF, González-Río F, Fernández Marcos M, Gomez C, Tomé M, Feith H, Magalhaes MC, Howson G. 1999. The effect of organic-matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment, 122: 73-86.

- Leite FP, Silva IR, Novais RF, de Barros NF, Neves JC, Villani EM. 2011. Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 949–959.
- Merino A, Balboa MA, Rodríguez Soalleiro R, Álvarez González JG. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management*, 207(3): 325–339.
- Miller, HG. 1995. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. *Plant and Soil* 168-169, 225–232.
- Møller, I.S. 2000. Calculation of biomass and nutrient removal for different harvesting intensities. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 30:29-45.
- Morais EJ, Barros NF, Novais RF, Brandi RM. 1990. Biomassa e eficiência nutricional de espécies de eucalipto em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 14:353-362.
- Nzila DD, Bouillet J, Laclau JP, Ranger J. 2002. The effects of slash management on nutrient cycling and tree growth in Eucalyptus plantations in the Congo. *Forest Ecology and Management*, 171: 209–221.
- Petraglia C, Dell'Acqua M. 2010. Actualización de la Carta Forestal del Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Dirección General de Recursos Naturales Renovables. Montevideo, Uruguay. 27p.  
<http://web.renare.gub.uy/media/suelos/qview/SuelosdePrioridadForestal2010.jpg>
- Santana RC, Novais F, Comerford NB. 2008. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil (1), (1), 2723–2733.
- Santana RC, de Barros NF, Neves JC. 2002. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. *R. Árvore*, Vicosa- MG, 26(4): 447–457.

- Santana RC, de Barros NF, Neves JC. 1999. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo, 56: 155–169.
- Schumacher MV, Caldeira MV. 2001. Biomass estimation and nutrient content of a *Eucalyptus globulus* (Labillardière) Subspecie *maidenii* Plantation. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 11(1): 45–53.
- Sganga JC. 1980. La aptitud forestal de los suelos del Uruguay. Bol. Tec. N°6. Ministerio de Agricultura y Pesca/Dirección de Suelos y Fertilizantes.
- Shammas K, O’Connell AM, Grove TS, McMurtrie R, Damon P, Rance SJ. 2003. Contribution of decomposing harvest residues to nutrient cycling in a second rotation *Eucalyptus globulus* plantation in south-western Australia. *Biol. Fert. Soils*, 38:228-235.
- Smith CT, Lowe AT, and Beets PN. 1994. Nutrient accumulation in second-rotation *Pinus radiata* after harvest residue management and fertilizer treatment of coastal sand dunes. *New Zealand Journal of Forestry Sciences*, 24:362-389.
- Spangenberg A, Grimm U, Silva JRS, Fölster H. 1996. Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia (Jari). *Forest ecology and management*, 80: 225-234.
- Switzer GL, and Nelson LE. 1972. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations ecosystems: the first twenty years. *Soil Science Society of America Proceedings*, 36:143-147.
- Turvey ND, Smethurst PJ. 1994. Nutrient concentration in foliage, litter and soil in relation to wood production of 7- to 15-year-old *Pinus radiata* in Victoria, Australia. *Australian Forestry* 57:157-164.
- United Nations. 2013. World Population Prospects: The 2012 Revision. Highlights and Advance Tables. *Population and Development Review*, 36: 775–801.
- Uruguay XXI. Oportunidades de Inversión. Sector Forestal. 2017. Disponible en <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/knowledge-base/sector-forestal/>
- Varela S. 2009. Cuantificación de la extracción de nutrientes por trozas comerciales de *Eucalyptus globulus* en suelos de basamento cristalino de la zona este del país. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 84p.



