

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DEL AGREGADO AL SUELO DE RESIDUOS PROCEDENTES DE  
PLANTAS PROCESADORAS DE MADERA EN SUS PROPIEDADES  
QUÍMICAS**

**por**

**Flabia Viviana FALCÓN LÓPEZ  
Leticia ROGEL GUARNIERI**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2016**

Tesis aprobada por:

Director: \_\_\_\_\_

Ing. Agr. (PhD.) Amabelia del Pino

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. (MSc.) Jorge Hernández

\_\_\_\_\_

Ing. Agr. (MSc.) Alejandro González

Fecha: 20 de diciembre de 2016

Autores: \_\_\_\_\_

Flabia Viviana Falcón López

\_\_\_\_\_

Leticia Rogel Guarnieri

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestros tutores Ing. Agr. Amabelia del Pino e Ing. Agr. Jorge Hernández por el constante apoyo y orientación, así como también a todas las personas que trabajan en el laboratorio del Departamento de Suelos y Aguas, especialmente a la Ing. Agr. Virginia Takata e Ing. Agr. Lucia Rocha.

A la Ing. Agr. Luciana Ingaramo y a la empresa Weyerhaeuser por permitirnos el espacio para la instalación del ensayo y a su personal por la ayuda brindada durante el trabajo de campo.

También agradecer a biblioteca de Facultad de Agronomía, particularmente a la Lic. Sully Toledo por su disposición.

Finalmente a nuestras respectivas familias por todo el apoyo recibido durante toda la carrera.

## TABLA DE CONTENIDO

Página

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	3
2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SUELOS Y CLIMA DE LA ZONA NORTE DONDE SE REALIZÓ EL EXPERIMENTO.....	3
2.1.1 <u>Suelos</u> .....	3
2.1.2 <u>Clima</u> .....	5
2.2 PARÁMETROS Y ORIGEN DE LA ACIDEZ DE LOS SUELOS.....	7
2.3 CORRECCIÓN DE LA ACIDEZ DE LOS SUELOS: LA PRÁCTICA DEL ENCALADO.....	8
2.3.1 <u>Neutralización de la acidez del suelo</u> .....	8
2.3.2 <u>Efecto del encalado sobre disponibilidad de nutrientes para las plantas</u> .....	10
2.4 USO DE CENIZAS - APLICACIÓN AL SUELO.....	10
2.4.1 <u>Características de las cenizas</u> .....	11
2.4.2 <u>Uso de cenizas como subproducto industrial</u> .....	16
2.4.3 <u>Aplicación de cenizas al suelo. Neutralización de acidez y aporte de nutrientes</u> .....	17
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	20
3.1. UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	20
3.2 INSTALACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	21
3.2.1 <u>Instalación</u> .....	21
3.2.2 <u>Diseño experimental</u> .....	21
3.3 METODOLOGÍA.....	23
3.3.1 <u>Trabajo de campo. Instalación y muestreo</u> .....	23
3.3.2 <u>Trabajo de laboratorio</u> .....	24
3.3.2.1 Análisis químico de suelo.....	24
3.3.2.2 Análisis químico foliar.....	25
3.3.2.3 Análisis de cenizas.....	25
3.3.3 <u>Análisis estadístico</u> .....	26

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	28
4.1 <u>COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE MADERA</u> .....	28
4.2 <u>EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE SUELO</u> .....	29
4.2.1 <u>Materia Orgánica</u> .....	29
4.2.2 <u>pH y acidez intercambiable de los suelos</u> .....	29
4.2.3 <u>Bases intercambiables (K, Mg, Ca y Na) y fósforo (P)</u> .....	33
4.3 <u>MEDICIONES EN EUCALIPTO</u> .....	37
4.3.1 <u>Contenido de nutrientes en hoja de eucalipto</u> .....	37
4.3.2 <u>Altura y diámetro</u> .....	41
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	44
6. <u>RESUMEN</u> .....	46
7. <u>SUMMARY</u> .....	47
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	48
9. <u>ANEXOS</u> .....	54

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Valores usuales de algunas características químicas de suelos de prioridad forestal en Uruguay para la zona CIDE 7 .....	4
2. Biomasa y extracción de nutrientes en la tala rasa de una plantación de <i>P. taeda</i> de 22 años de edad .....	12
3. Concentración de elementos por tipo de ceniza .....	13
4. Composición química de las cenizas empleadas en un estudio .....	14
5. Concentraciones de metales pesados y entrada de metales con ceniza de madera .....	15
6. Perfiles de los suelos predominantes .....	21
7. Tratamientos en el experimento de campo para muestreo foliar y datos dasométricos.....	22
8. Tratamientos de aplicación de cenizas considerados en el experimento de campo para el muestreo de suelo .....	22
9. Contenido de MO del suelo del estudio .....	29
10. Resultado de la medición de pH (H <sub>2</sub> O) .....	29
11. Resultado de la medición de pH (KCl) .....	30
12. Resultados de análisis de varianza (pH) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos.....	31
13. Resultados de análisis de varianza (Al) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos.....	33
14. Resultados de análisis de varianza (bases intercambiables y P) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos.....	34
15. Promedio de los contenidos de cationes intercambiables del suelo en el sitio y los rangos contenidos en los suelos del Uruguay en cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> .....	36
16. Resultados de análisis de varianza (bases, N y P foliar) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos.....	37
17. Contenido de bases, P y N foliar según tratamientos .....	38

18. Niveles de deficiencia, crítico y rangos para los distintos nutrientes.....	39
19. Resultados de análisis de varianza (diámetro a los 20 cm y altura) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos.....	41
20. Prueba de Tukey para comparar las medias de altura y diámetro de cuello a los 20 cm de los árboles.....	42

Figura No.

1. Precipitaciones media mensual de Tranqueras, período 1980 – 2009.....	5
2. Régimen térmico de Rivera, período 1980-2009. ....	6
3. Ocurrencia de heladas agrometeorológicas medias mensuales de Rivera (días y décimas de ocurrencia), para el periodo 1980-2009.....	7
4. Ubicación del experimento.....	20
5. Croquis del experimento .....	22
6. Aspecto de las cenizas que se aplicaron al suelo.....	23
7. Estado del cultivo perteneciente al último muestreo .....	24
8. Composición química de la ceniza.....	28
9. Contenido de acidez intercambiable por muestreos y profundidades.....	32
10. Contenido de K intercambiable en suelo a ambas profundidades .....	35
11. Promedio de la concentración de nutrientes en hoja obtenidos con los tratamientos no fertilizado y fertilizado .....	40

## 1. INTRODUCCIÓN

Uruguay tiene como antecedente en el sector forestal dos leyes de fomento a la forestación, lo que ha llevado a que en los últimos años se haya multiplicado por 30 la superficie plantada. El área de suelos declarada de prioridad forestal alcanza los 4 millones de hectáreas, 24% del total del área agropecuaria del país. En 2013 la superficie afectada a la forestación alcanzó el millón de hectáreas. De acuerdo a criterios del MGAP. DGF, citado por Uruguay XXI (2013), se divide al país en tres regiones: Sur-Este, Litoral-Oeste y Centro-Norte. Esta última es la región de mayor área forestada, concentrando el 46% de los bosques artificiales de Uruguay, la misma se caracteriza por mayores heladas en invierno, temperaturas más elevadas durante el verano, y por el predominio de suelos arenosos siendo la especie principal pino aunque con importante presencia de eucalipto. Según SPF (2011), en esta zona el pino ocupa aproximadamente 65%, y el eucalipto aproximadamente 35%, siendo el destino principal para madera sólida (aserrado-debobinado).

Debido a este aumento en el sector, grandes extensiones de bosques son y serán cosechadas en los años subsiguientes. Como consecuencia se espera que el uso de residuos de la tala de cosecha forestal como fuente de energía, junto con la producción de biomasa leñosa específicamente de energía aumente en el futuro (Rhen, Brunner et al., citados por Augusto et al., 2008). Esto es de especial interés en los casos donde la industria de la madera ha demostrado un activo crecimiento. La quema de estos residuos, es decir la utilización de biomasa como fuente de combustible en calderas de leña para la producción de vapor y electricidad es económica, permite producir energía de forma ecológicamente racional. Consecuentemente este proceso crea altas cantidades de cenizas, las cuales son posteriormente recogidas (Naylor y Schmidt, 1986).

A nivel internacional se ha estudiado que el reciclaje de las cenizas después de la quema de estos residuos potencialmente puede compensar los nutrientes minerales perdidos en el bosque, y neutralizar la acidez del suelo. Teniendo en cuenta que el ciclo de estos cultivos es más prolongado en el tiempo comparado con otros rubros, y que hacen un uso de la tierra por más tiempo, resulta de importancia caracterizar el impacto que puede generar su aplicación al suelo, de manera de asegurar una producción sustentable y amigable con el medio ambiente.

Por lo anteriormente mencionado se hace necesario la implementación de experimentos de campo y su seguimiento, con el principal objetivo de cuantificar los efectos de la ceniza de madera en las propiedades químicas del suelo.



El presente trabajo surge como una iniciativa por parte de la empresa Weyerhaeuser junto con el departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía, donde se planteó la posibilidad de utilización de las cenizas provenientes de las plantas de combustión de madera como enmiendas al suelo. Esto supone el desarrollo de una investigación acerca de la composición de dichos materiales, así como de estudios acerca de su reacción con el suelo, evaluada a través de metodologías de laboratorio, y campo. La empresa con la cual se realizó el experimento, dispone como destino final de las cenizas al vertedero municipal, por lo tanto se pretende buscar una alternativa a su uso, y en caso de encontrarse con un efecto positivo se distribuirá en los campos como mejorador de suelo.

En una primera etapa se caracterizaron las cenizas y se realizó un ajuste preliminar de las dosis posibles a ser utilizadas, a través de experimentos de laboratorio e invernáculo en 2013.

El presente trabajo se realizó con los siguientes objetivos:

- Cuantificar los efectos de la ceniza de madera en las propiedades químicas del suelo, y su efecto como material encalador, mediante experimentación a campo.
- Cuantificar las concentraciones de nutrientes absorbidos por los árboles plantados en el sitio experimental (híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*), mediante análisis de plantas.
- Evaluar la necesidad de complementar el agregado de cenizas con el agregado de nutrientes a través de fertilizantes químicos.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SUELOS Y CLIMA DE LA ZONA NORTE DONDE SE REALIZÓ EL EXPERIMENTO

#### 2.1.1 Suelos

Los suelos de prioridad forestal más comunes se clasifican a nivel de Gran Grupo, como Luvisoles, Acrisoles, y algunos Brunosoles, Planosoles y Argisoles. Estos son de aptitud forestal por sus condiciones que permite un buen crecimiento de los bosques con buena capacidad de enraizamiento, adecuado drenaje y baja fertilidad natural. Son aptos para plantaciones forestales a pesar de tener un índice de CONEAT del orden de 65 a 80, muy inferior a la media nacional. Debido a su baja productividad, poseen aptitud agrícola y ganadera baja o a lo sumo media, e históricamente fueron destinados a la ganadería extensiva (Califra y Durán, 2010). Legalmente han sido declarados de prioridad forestal debido a su baja fertilidad y severas limitantes para su uso en agricultura, por lo que la mayoría de los suelos con plantaciones forestales iniciales, provienen de campo natural. Comparados con los suelos de Brasil son notoriamente más fértiles. Los niveles de bases intercambiables son del orden de 10 veces mayores y la saturación en bases del orden de 5 veces mayor, por lo que en términos generales es de esperar en nuestro país menor número de nutrientes limitantes y cuando existen se observa respuesta hasta dosis menores que las aplicadas en aquel país. Este hecho además tiene implicancia en el comportamiento de algunos nutrientes: *“En el caso del N al realizarse una roturación del suelo, este tiende a mineralizar gran cantidad de N. Este proceso se concentrará en un tiempo corto por ser su materia orgánica frágil. Los laboreos excesivos liberan cantidades de N que no aprovecharán los árboles y se perderán. En el caso del P los contenidos naturales de nuestros suelos son bajos y la posible existencia de niveles medios o altos en los análisis de suelo, deriva de la residualidad de fertilizaciones anteriores. Los pocos casos observados de suelos forestados con niveles medios de P se concentraban en los suelos de mayor aptitud agrícola del Cretácico. Por otro lado debe tenerse en cuenta que la mineralización de la materia orgánica puede estar aportando cierta cantidad de P en formas asimilables. La mayoría de los suelos forestados en el país presentan contenidos medios a altos de K intercambiable. La mayoría presenta además una reserva significativa de este nutriente en formas no intercambiables. En otros rubros productivos se han comenzado a manifestar algunos casos de deficiencias de K, normalmente cuando se combinan suelos con pocas reservas con altas extracciones por los cultivos. Este proceso es posible que dentro de*

*cierto tiempo se comience a visualizar en casos de muchos años de forestación en ciertas zonas con menores reservas de K, como algunos suelos del Cretácico” (Zamalvide y Ferrando, 2010a).*

La zona en estudio está comprendida en la región Centro-Norte, dentro de las unidades de Tacuarembó y Rivera cuyos suelos dominantes son Luvisoles y Acrisoles, son considerados como bien desarrollados, profundos a muy profundos pudiendo alcanzar espesores de 1,5 a 2,0 m, por lo que son considerados como los más profundos del país. Estos suelos son considerados como los más ácidos del Uruguay. El pH es de 5,3 en promedio con poca variabilidad a través del perfil, incluso con tendencia a la disminución en profundidad, sobre todo en los Acrisoles. El aluminio intercambiable ( $Al^{+3}$ ), consecuencia de la fuerte acidez, existe en cantidades casi siempre elevadas aunque muy variables con promedios de  $0,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  en el horizonte A y  $3,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  en el horizonte B. También, considerando los valores medios, es más frecuente la existencia de niveles altos de  $Al^{+3}$  intercambiables en los suelos de Rivera que en los de Tacuarembó (Bennadji, 2001).

Según Hernández (2010) químicamente se trata de suelos ácidos a muy ácidos con bajos niveles de bases, texturas medias a livianas, y bajos contenidos de materia orgánica. Estas características se ilustran en el Cuadro No. 1.

Cuadro No. 1. Valores usuales de algunas características químicas de suelos de prioridad forestal en Uruguay para la zona CIDE 7

Suelo	pH	MO	P	K	Ca	Mg	CIC	Sat
Acrisol Unidad Tacuarembó	en agua	%	$\text{mg kg}^{-1}$	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				%
	5,2	1,7	4	0,3	0,9	0,5	3	53

Fuente: Zamalvide y Ferrando (2010a)

Según la Carta geológica del Uruguay, escala 1:500.000 (Bossi et al., 1998) la zona de estudio (zona próxima al experimento) se encuentra sobre la Formación Tacuarembó.

Según la clasificación CONEAT los suelos de la zona se encuentran dentro de los grupos 7.2 y 7.31. El grupo 7.2 se localiza en toda el área de areniscas de Tacuarembó, ocupando las zonas de relieve más fuerte. El relieve lo forman colinas sedimentarias no rocosas con pendientes de 10 a 15%. Los suelos dominantes son Inceptisoles Melánicos / Úmbricos, moderadamente profundos, de textura franco arenosa, color pardo muy oscuro, fertilidad muy baja y bien drenados. Asociados se encuentran Luvisoles Ócricos / Melánicos Abrúpticos / Típicos, muy profundos de color pardo amarillento oscuro, textura

arenoso franca, bien drenados y fertilidad muy baja. La vegetación natural es de pasturas estivales. Debido a sus limitantes, no son suelos aptos para realizar agricultura. Este grupo integra, como asociado, las unidades Tacuarembó y Rivera de la carta a escala 1:1.000.000 (MGAP. RENARE, s.f.).

El grupo 7.31 se localiza en los alrededores de la ciudad de Rivera, sobre las rutas 5, 27 y 30, hasta Tranqueras. El material geológico lo forman areniscas rojas de Tacuarembó. El relieve está constituido por colinas sedimentarias no rocosas, con pendientes de 6 - 10%. Los suelos dominantes son Acrisoles Ócricos Típicos muy profundos, de color pardo rojizo, textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad baja. Asociados, aparecen Acrisoles Ócricos Álbicos muy profundos de color pardo oscuro, textura franco arenosa, bien drenados y fertilidad baja. La vegetación es la normal de la zona; se puede hacer agricultura con medidas muy intensas de conservación, largas rotaciones con praderas y cuidando la toxicidad del  $Al^{+3}$ . Actualmente se hacen cultivos especiales (tabaco y sandía) y de verano (maíz), así mismo hay montes de eucaliptos. Este grupo integra la unidad Rivera de la carta a escala 1: 1.000.000 (MGAP. RENARE, s.f.).

### 2.1.2 Clima

A continuación se realiza una descripción de algunos parámetros climáticos de la región, los cuales son las precipitaciones, las temperaturas y también la ocurrencia de heladas.

Se tomaron los registros de precipitaciones para el período 1980-2009 de la localidad más cercana al sitio de ensayo, la cual es Tranqueras (Figura No. 1).

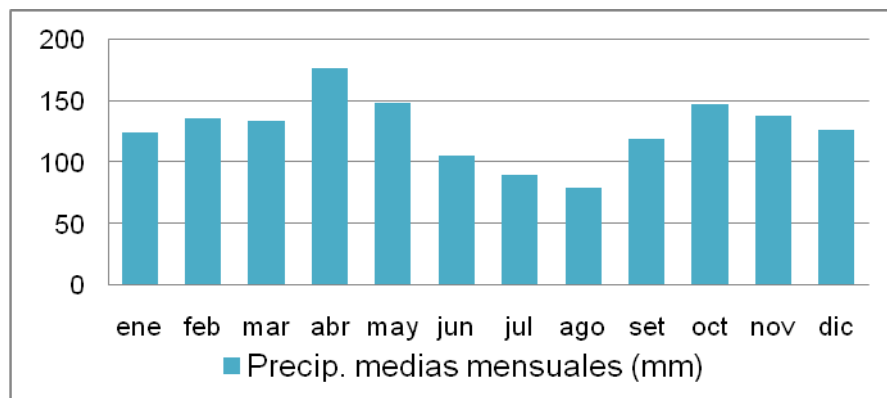


Figura No. 1. Precipitaciones media mensual de Tranqueras, período 1980-2009 (Fuente: INIA. GRAS, s.f.)

Como se puede observar en el gráfico, los menores registros medios de precipitaciones corresponden a los de meses julio y agosto, los mayores registros medios lo presenta el mes de abril, siguiéndole el mes de mayo y octubre. El valor medio de precipitaciones anuales de la localidad es de 1529 mm.

Tomando como base el período 1980-2009 se tomaron los registros térmicos de la estación meteorológica de la ciudad de Rivera, se considera las temperaturas mínimas y máximas medias mensuales y las temperaturas medias mensuales (Figura No. 2).

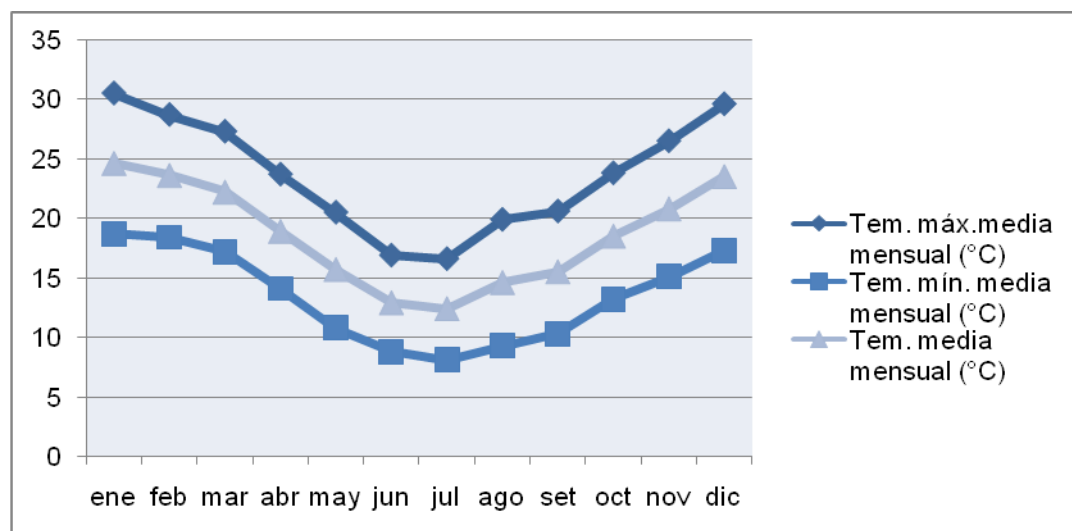


Figura No. 2. Régimen térmico de Rivera, período 1980-2009 (Fuente: INIA. GRAS, s.f.)

Los meses junio y julio registran las menores temperaturas, mientras que los meses de diciembre y enero registran las mayores temperaturas. Tomando los valores medios anuales, la temperatura máxima anual es de 29,6°C, la temperatura mínima anual es de 17,3°C, observándose una amplitud de 12°C entre dichas temperaturas.

Como se observa en la Figura No. 3 el período de heladas comprende desde el mes de mayo hasta el mes de setiembre. El mes con mayores ocurrencias corresponde a julio. Promedialmente en la zona se contabilizan un total de 16 días de heladas anuales.

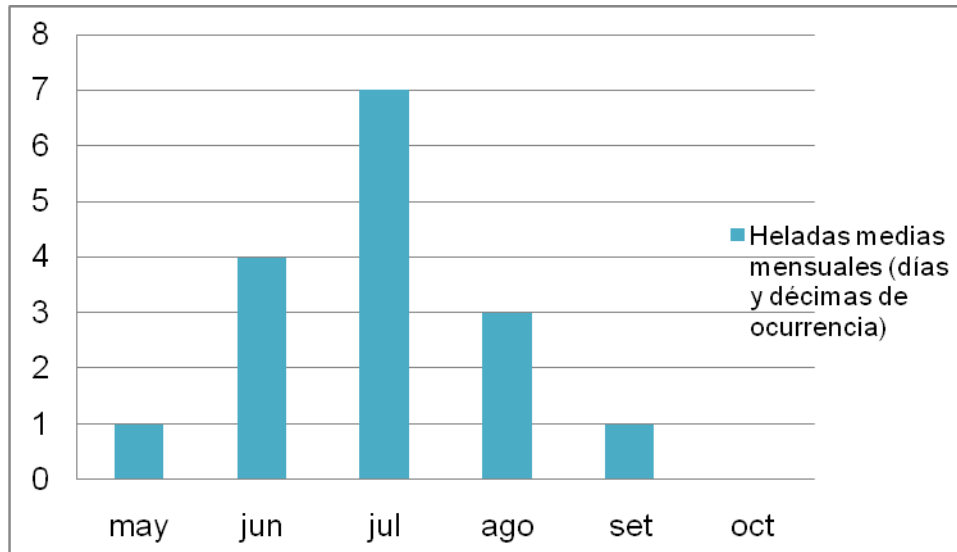


Figura No. 3. Ocurrencia de heladas agrometeorológicas medias mensuales de Rivera (días y décimas de ocurrencia), para el período 1980-2009 (Fuente: INIA. GRAS, s.f.)

## 2.2 PARÁMETROS Y ORÍGEN DE LA ACIDEZ DE LOS SUELOS

La reacción del suelo se refiere a la actividad del hidrógeno ( $H^+$ ) presente en la solución del suelo (pH). Es una propiedad fundamental del mismo. Es a la vez, causa y efecto de una serie de factores. No existe proceso físico, biológico y químico, que no esté influido por las condiciones de acidez, neutralidad o alcalinidad del suelo. La reacción del suelo se mide a través del pH (Conti, 2000).

Según Casanova (2008) la acidez se clasifica en: **activa o actual**, representando la abundancia de  $H^+$  en la solución del suelo. Se mide por el pH del suelo. **La acidez potencial, de reserva o intercambiable**, corresponde a la suma de  $H^+$  y  $Al^{3+}$  ocupando posiciones de intercambio al pH del suelo. **Acidez no intercambiable**, corresponde a las cargas que se disocian al aumentar el pH. **Acidez titulable**, es la cantidad de base fuerte requerida para llevar el pH del suelo a un valor determinado. Estas últimas se miden en meq/100 g o  $cmol_c kg^{-1}$ . La suma de la acidez intercambiable y la acidez no intercambiable corresponde a la acidez titulable.

De acuerdo a la bibliografía el origen de la acidez tiene múltiples causas:

- ✓ Lixiviación de bases

- ✓ Formación de ácidos solubles como ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) y otros ácidos producto de la acción de microorganismos
- ✓ Liberación de  $\text{H}^+$  por la raíces de las plantas al absorber bases
- ✓ Disociación de  $\text{H}^+$  por los coloides del suelo
- ✓ Hidrólisis de Al durante la meteorización de minerales aluminosilicatados
- ✓ Efectos del manejo, especialmente con altas dosis de fertilizantes amoniacales y nitrogenados

La acidez del suelo afecta el crecimiento de las plantas, esto se debe a la presencia de  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{+3}$  que se encuentran ocupando mayores posiciones de intercambio en los coloides del suelo, impidiendo que esas posiciones estén ocupadas por las bases de mayor interés para el crecimiento como el Ca, K, Mg; esto afecta la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Los suelos no ácidos tienen la mayor parte de las posiciones de intercambio ocupadas por bases (Casanova, 2008).

Según Hernández (2010) se ha constatado un proceso de acidificación de los suelos bajo uso forestal (*Eucalyptus sp.* y *Pinus sp.*), evidenciado por la reducción en el pH y aumento de la acidez intercambiable del suelo.

## 2.3 CORRECCIÓN DE LA ACIDEZ DE LOS SUELOS: LA PRÁCTICA DEL ENCALADO

### 2.3.1 Neutralización de la acidez del suelo

Para solucionar el problema de la acidez de estos suelos, se utiliza el encalado, esto es agregar algún material que produzca la neutralización de la acidez titulable. Encalar implica neutralizar la acidez hasta cierto nivel que no afecte el crecimiento vegetal. Los materiales a utilizar son:  $\text{CaCO}_3$  (calcita),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$  (dolomita), los más comunes son mezclas de carbonatos de Ca y Mg en diferentes proporciones, se utiliza dolomita cuando además de neutralizar la acidez se desea aumentar el nivel de Mg. La calidad de estos materiales depende del poder relativo de neutralización (equivalencia del  $\text{CaCO}_3$ ); la granulometría (menor tamaño mayor velocidad de reacción). Se recomienda que al menos 80% sea de grano fino, que pase por una malla No. 60 (tamaño de orificio de 0,25 mm). Este proceso es lento, por lo tanto en cuanto al momento de aplicación esta debe ser muy anticipada a la siembra del cultivo, especialmente en suelos muy ácidos, (por lo general 2 a 3 meses antes). Se destaca las siguientes condiciones para que se neutralice la acidez del suelo:

- ✓ Se necesita agua, no se produce en suelos secos

- ✓ El material debe estar finamente molido para poder solubilizarse fácilmente
- ✓ El material debe mezclarse con el suelo para que la reacción sea lo más homogénea posible. Esto se debe a que la distancia que difunde el Ca en el suelo es muy pequeña (1-2 cm)
- ✓ Los hechos mencionados llevan a que la reacción de neutralización no sea instantánea, requiere un cierto tiempo para producirse (Casanova, 2008).

Cuando se encala un suelo, el Ca y Mg provenientes de la adición del correctivo sustituyen al Al y Mn adsorbidos en el complejo coloidal, los cuales asumen formas insolubles en presencia de altas concentraciones de iones oxidrilos en la solución del suelo (Conti, 2000).

Los suelos de esta zona presentan alta acidez intercambiable ( $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ ) y tienen una baja capacidad buffer ya que esto está relacionado con la textura del suelo (en este caso arenoso), determinado por el contenido de materia orgánica y arcilla, los bajos niveles de estos coloides determinan que la necesidad de dosis del material encalador sean bajas. La mayoría de las especies de eucaliptos son tolerantes a la acidez, por lo que afecta en menor grado el desarrollo de los árboles, especialmente en las primeras etapas de crecimiento, por lo tanto no se justifica la aplicación de cal para corregir la misma (Aparicio, 2001).

En cuanto a los antecedentes de encalado en forestación, se realizó un experimento donde se aplicaron 3 dosis de dolomita (0, 2 y 4  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en dos sitios, uno en el departamento de Tacuarembó y otro en Río Negro, (ambos suelos de textura arenosa con bajo pH y alta acidez intercambiable, presentando mayor cantidad de bases intercambiables en éste último). Se pudo observar un cambio en las propiedades químicas del suelo al incorporar el material encalador, aumentando el pH y las concentraciones de Ca y Mg principalmente. El cambio más marcado fue con la dosis más alta. En el experimento de Tacuarembó el material había sido aplicado sin incorporación al suelo. Como resultado se observaron mayores diferencias significativas en los primeros 5 cm, disminuyendo el efecto de la dolomita a mayor profundidad. En cambio en el sitio de Río Negro al ser incorporado el material al suelo, hubo una disminución en la acidez intercambiable tanto de 0-20 y 20-40 cm de suelo; en el caso del pH aumentó en los primeros 20 cm y no más allá (Hernández et al., 2012).

En un Luvisol arenoso franco de Tacuarembó se agregaron diferentes dosis de caliza (0, 1,5 y 4,5  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Se midió la evolución del pH en agua y  $\text{Al}^{3+}$  intercambiable durante 44 meses. El pH del suelo mostró aumentos varios



meses después de aplicado el material y el Al disminuye con la aplicación del mismo. El efecto del encalado sobre el pH y el Al intercambiable se mantuvo durante todo el período de estudio. La respuesta al agregado de material fue más acentuada a mayores dosis (Bordoli y Casanova, 2004).

### 2.3.2 Efecto del encalado sobre disponibilidad de nutrientes para las plantas

Los efectos directos de la acidez son menos importantes que los efectos indirectos ya que las plantas tienen resistencia a condiciones de pH bajo. Entre los efectos indirectos se destacan: toxicidad producida por  $Al^{+3}$  y menor disponibilidad de nutrientes. El  $Al^{+3}$  afecta la división celular en el ápice de la raíz, aumenta la rigidez de las membranas celulares, reduce la replicación de ADN, interfiere con la absorción y transporte de otros nutrientes (Ca, Mg, K, P, Fe y otros). Como consecuencia en los suelos con alto nivel de  $Al^{+3}$  intercambiable hay un limitado desarrollo radicular, con raíces cortas y deformes provocando una menor absorción de nutrientes y agua (Conti, 2000). Por otra parte en suelos ácidos se afecta la disponibilidad de nutrientes por retención de P por compuestos de Fe y Al cargados positivamente. Esto no solo afecta la disponibilidad de P en el suelo sino también en la capacidad de absorción de las raíces y de utilización de P por la planta. Inhibición de absorción de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  debido a la competencia con  $Al^{3+}$  y  $Mn^{2+}$ . También se ha observado retención de Mo e inhibición de actividad de biomasa microbiana y por lo tanto inhibición de la nitrificación (Casanova, 2008).

El encalado favorece la actividad de los microorganismos que descomponen la materia orgánica, por lo cual se produce un aumento de nutrientes en la solución del suelo, tales como N, P, K y otros, aumenta la exploración radicular y por lo tanto aumenta la absorción de agua y de todos los nutrientes, aumenta la CIC y la retención de cationes. El efecto de la cal sobre la CIC efectiva es de dos tipos: en primer lugar, desplaza y precipita el  $Al^{+3}$  que en los suelos ácidos está muy fuertemente enlazado y es muy poco reemplazable por otros cationes. En segundo lugar, al aumentar el pH hay un mayor número de sitios activos para el intercambio (Casanova, 2008).

## 2.4 USO DE CENIZAS - APLICACIÓN AL SUELO

Durante cada ciclo de producción, la remoción de la biomasa puede agotar los nutrientes esenciales que se convierten en limitantes para el crecimiento del cultivo. Tanto la elección de las especies y la tasa de aplicación de ceniza de madera pueden tener efectos importantes en las concentraciones de nutrientes del suelo y en la producción de biomasa de las plantaciones (Sartori et al., 2007).

La aplicación de los desechos para mantener los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas puede ser beneficioso en el aumento de la producción de materia seca (Thornton et al., 2000).

Probablemente más relevante que la mitigación de las deficiencias de nutrientes a corto plazo puede ser el uso de cenizas para el mantenimiento de la productividad del sitio a largo plazo y el capital de nutrientes. La aplicación al suelo de cenizas de la caldera tiene el potencial de resolver un problema de eliminación de residuos mediante un enfoque coherente con los conceptos de la gestión sostenible y el reciclaje de nutrientes extraídos. Las respuestas positivas de los árboles y los cultivos agrícolas a la aplicación de ceniza se ha demostrado, pero se necesitan más datos para extrapolar las respuestas a través de una variedad de sitios (Vance, 1996).

#### 2.4.1 Características de las cenizas

Los datos publicados de las propiedades de la ceniza de madera, son muy variables y, por tanto, las generalizaciones son difíciles de hacer.

Una buena aproximación al estudio de las mismas es detallada por Augusto et al. (2008), que ha examinado los factores que afectan a las propiedades de las cenizas de los productos forestales. Las características de las mismas dependen de: (a) la naturaleza del producto original y (b) el proceso industrial de combustión y acondicionamiento. La composición de los elementos de las cenizas se determina primero por la calidad del compuesto quemado. De hecho, las concentraciones de nutrientes de las cenizas de corteza o follaje son entre cinco y diez veces más altas que las de ceniza de madera, así como las cenizas de árboles de madera dura es probable que tengan un efecto fertilizante más eficaz que el correspondiente al de maderas blandas, ya que contiene una mayor proporción de macronutrientes (Pitman, 2006). Del Pino et al. (2010) estudiaron la extracción de nutrientes y su exportación con las trozas de *Pinus taeda*. El Cuadro No. 2 muestra la extracción de biomasa en la tala rasa de una plantación de 22 años en el sitio Paso de Gaire, Rivera, Uruguay, donde se puede ver que si bien las trozas representan la mayoría de la biomasa aérea, la proporción de nutrientes exportados fue menor. También se puede observar que la mayor concentración de nutrientes se encuentra en acículas, ramas y ramillas. No se descortezó en el campo, es decir en las trozas extraídas estaban con corteza. Respecto al proceso de combustión y acondicionamiento, la temperatura a la que los productos forestales se queman es fundamental para determinar la composición de la ceniza. La volatilización de algunos elementos, como K o B, se produce a muy altas temperaturas, inducen una reducción drástica de su concentración en las cenizas. Después de la

combustión, dos tipos de cenizas se recogen del horno: cenizas finas y cenizas de fondo (partículas gruesas). La composición de elementos de estas dos fracciones puede ser muy diferente (Oberberger et al., citados por Augusto et al., 2008).

Cuadro No. 2. Biomasa y extracción de nutrientes en la tala rasa de una plantación de *P. taeda* de 22 años de edad

<i>P taeda</i> - tala rasa	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
	Mg ha <sup>-1</sup>					
Trozas	190	157	31	56	106	35
Ramas	48	206	20	93	149	28
Acículas	9	97	8	45	16	7
Total residuos	57	303	28	137	166	35
Total árboles	246	460	59	194	272	70
Exportación (%)	77	34	52	29	39	50

Fuente: del Pino et al. (2010)

En la planta de energía de la empresa en la cual se trabajó, también se generan 2 tipos de cenizas (fina y gruesa), en el caso de este ensayo se utilizó la ceniza de tipo gruesa, con mucho carbono y baja descomposición. Las cenizas provienen de la quema de todos los desechos forestales de la industria: o sea una mezcla de pino y eucalipto. En general el pino ingresa a la industria con corteza y el eucalipto sin corteza. También se queman los residuos generados en la industria (desechos de láminas, de tableros, etc.).<sup>1</sup>

Existe una tecnología de granulación de ceniza de madera que se ha ido perfeccionado en los países escandinavos, y cualquier uso de cenizas de madera en una escala comercial necesitará invertir en sistemas. En Suecia existen métodos de preparación para producir un "aplastado de ceniza" o "ceniza granulada". En el primer producto, se toma las cenizas del fondo de la caldera de lecho fluidizado (CFB) humedecida al 30 por ciento con agua, se deja endurecer durante 4 semanas y luego es secada: "proceso de auto-endurecimiento" (Nilsson et al., Korpilahti et al., citados por Pitman, 2006). Luego es triturado y tamizado para conseguir partículas menores a 5 mm. La ceniza granulada se produce mezclando las cenizas sueltas del fondo de la caldera CFB con agua y rodándolas para formar bolas de 4 a 20 mm de tamaño. Estas se secan hasta un contenido de agua de menos del 5% (Kellner y Weibull, citados por Pitman, 2006). Comparando estos tipos de cenizas con respecto a las cenizas "suelta" las cuales no llevan ningún tipo de elaboración,

<sup>1</sup> Ingaramo, L. 2016. Com. personal.

tienen diferente composición química con un menor contenido de calcio y un mayor contenido de fósforo en el producto más elaborado (Cuadro No. 3).

Cuadro No. 3. Concentración de elementos por tipo de ceniza

Tipo ceniza	Ca	Mg	K	Na	P	S	Zn	SiO <sub>2</sub>
%								
Fina	21,1	2,0	3,2	1,1	1,2	1,2	0,1	11,8
Aplastada	18,2	2,0	1,4	1,2	0,5	2,1	0,1	26,2
Granulada	16,4	1,6	4,0	0,9	2,2	2,2	0,1	22,0

Fuente: Pitman (2006)

Los constituyentes de ceniza de madera que le dan su naturaleza alcalina son principalmente óxidos y carbonatos de Ca y K. Su utilidad como sustituto de cal varía ampliamente en función de la eficiencia de combustión de la caldera. Los valores de la equivalencia de CaCO<sub>3</sub> de la ceniza de madera pueden variar de 10 a 90%. El contenido de C también varía ampliamente con la eficiencia de la combustión. Aunque el C restante de ceniza después de la combustión es en gran parte del carbón de leña y resistente a la descomposición microbiana, puede ser valiosa para mejorar las propiedades físicas del suelo. La ceniza de madera no solo tiene propiedades alcalinas que la vuelven propicia como sustituto de cal agrícola, sino que también contiene concentraciones significativas de P, K, y otros nutrientes importantes para el crecimiento de la planta (Vance y Mitchell, 2000).

Según Augusto et al. (2008) el valor medio de la capacidad neutralizante de la ceniza es de alrededor de 50%. En otras palabras, dos toneladas de ceniza deberían utilizarse para neutralizar la acidez relativa a una tonelada de carbonato de calcio. Esta capacidad de neutralización de los óxidos, hidróxidos, y carbonatos de Ca, Mg, y K en la ceniza de madera es probablemente su característica más importante en lo que se refiere a la enmienda del suelo (Vance, 1996).

La concentración de macro y micronutrientes provenientes de cenizas de la caldera de leña es muy variable. Según Chirenje y Ma (2002) es típicamente baja en N y S (y, a veces P) ya que estos elementos se volatilizan durante la combustión de biomasa, pudiendo contener además cantidades traza de metales. Vance (1996) ha encontrado que la media para macronutrientes es de 0,06% para N, 0,42% P, 18% de Ca, 0,97% de Mg y 2,27% para K, siendo para los microelementos el Fe más abundante.

A partir de residuos forestales, se determinó para una caldera de Weyerhaeuser en el departamento de Rivera, la siguiente composición media:

CaO 30%, SiO<sub>2</sub> 14%, MgO 4%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2%, MnO 1% (Weyerhaeuser Productos, 2011).

Gullón et al. (2001) estudiaron la evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio, la composición elemental de las cenizas empleadas se recoge en Cuadro No. 4.

Cuadro No. 4. Composición química de las cenizas empleadas en un estudio

	Totales	Asimilables
Humedad (%)	11,5	
pH (H <sub>2</sub> O)	10,4	
pH (KCl)	10,9	
Materia orgánica (%)	56,1	
C (g Kg <sup>-1</sup> )	505	
N (g Kg <sup>-1</sup> )	5,56	
S (g Kg <sup>-1</sup> )	0,32	
P (g Kg <sup>-1</sup> )	2,6	0,4 (15 %)
Ca (g Kg <sup>-1</sup> )	25,0	13,8 (55 %)
Mg (g Kg <sup>-1</sup> )	6,0	1,5 (25 %)
Na (g Kg <sup>-1</sup> )	2,4	1,2 (50 %)
K (g Kg <sup>-1</sup> )	11,1	5,0 (45 %)
Al (g Kg <sup>-1</sup> )	16,2	n.d
Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	1,8	1,1 (59 %)
Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	23,7	3,7 (15 %)
Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	32,9	4,5 (14 %)
Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	1390	380 (27 %)
Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	1470	354 (24 %)
Ni (mg Kg <sup>-1</sup> )	14,0	8,1 (58 %)
Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )	47,0	14,0 (30 %)
Zn (mg Kg <sup>-1</sup> )	1700	44,0 (2,6 %)

n.d.= no determinado

Fuente: Gullón et al. (2001)

Según estos autores se destaca la fuerte reacción alcalina y las importantes concentraciones de Ca, Mg y K, elementos que se encuentran en formas solubles. De igual modo, se pueden señalar las bajas concentraciones de N y de metales pesados. La capacidad encalante de este material, expresada como equivalentes de carbonato de calcio fue de 26%.

Debido a que la ceniza de madera es una forma concentrada de estos elementos constitutivos en la madera, es generalmente amigable con el medio ambiente y con bajas cantidades de contaminantes como metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos (Vance y Mitchell, 2000). Si bien existe

preocupación por la presencia de metales pesados sus concentraciones son generalmente similares o inferiores a fertilizantes comerciales (Pitman, 2006).

Trabajos realizados por Ozolincius y Varnagiryte (2005) encontraron la siguiente composición de metales en las cenizas:

Cuadro No. 5. Concentraciones de metales pesados y entrada de metales con ceniza de madera

Metales pesados	Concentración de metales en la ceniza	Concentraciones máximas recomendadas	Entrada de metales con la ceniza aplicada (5 Mg ha <sup>-1</sup> )	Entrada máxima de metal
	mg Kg <sup>-1</sup>		g ha <sup>-1</sup>	
Cr	9,51	100	47,6	200-300
Ni	8,05	70	40,3	200
Cu	13,1	400	65,4	500-800
Cd	0,62	30	3,1	25-100
Zn	73,7	7000	385,4	5000-10000
Pb	4,53	300	22,7	100-400

Fuente: Ozolincius y Varnagiryte (2005)

Estos valores muestran que entre los metales pesados aplicados con la ceniza, la entrada de Zn fue mayor (385,4 g ha<sup>-1</sup>), aun así, es 20 veces menor que la de entrada de metal máxima recomendada. Las entradas de Cr, Ni, Cu, Cd y Pb fueron menores. Según Adriano, citado por Ozolincius y Varnagiryte (2005) las plantas usan algunos metales como microelementos para sus procesos vitales importantes, y los metales pesados no siempre se consideran contaminantes. Por ejemplo, Cu y Zn son elementos esenciales para la mayoría de las plantas, que tienen efectos negativos solamente en altas concentraciones, mientras Cd y Pb son elementos tóxicos incluso a bajas concentraciones en el suelo.

Varios autores hacen hincapié en que la ceniza de madera utilizado como enmienda del suelo debe provenir únicamente de la quema de residuos forestales o de madera sin tratar (Bramryd y Fransman, Meiwes, Zollner y Remler, citados por Demeyer et al., 2001). La utilización de las cenizas de los residuos de madera, como la madera de demolición, pintada o con procesos de impregnación, se debe evitar, ya que pueden ser altamente contaminadas con metales pesados (Demeyer et al., 2001).

Otro problema con respecto de las enmiendas aplicadas al suelo con cenizas es la lixiviación de sustancias tóxicas a las aguas subterráneas (Williams, citado por Knapp e Insam, 2011), especialmente en combinación con

un pH elevado y alto contenido de Na (Morris et al., citados por Knapp e Insam, 2011). La lixiviación se evalúa con pruebas de laboratorio, pero tienden a sobreestimar o subestimar los procesos de lixiviación in situ y por lo tanto es difícil evaluar la situación real en el campo (Reijnders, citado por Knapp e Insam, 2011).

#### 2.4.2 Uso de cenizas como subproducto industrial

A nivel internacional Weyerhaeuser, ha investigado durante varios años el uso beneficioso de ceniza generada desde su industria de pulpa y papel como agente de encalado y suplemento de nutrientes. Weyerhaeuser había desarrollado un programa de aplicación de la ceniza con éxito en su utilización como sustituto de fertilizante comercial de P en pino (*Pinus spp*) en plantaciones en el sureste de los Estados Unidos. Se han realizado experimentos de campo los que han demostrado que las cenizas de las calderas pueden sustituir con éxito la cal agrícola y el suministro de nutrientes del suelo aumentó. Su aplicación también ha aumentado la disponibilidad de N del suelo en algunos casos, presumiblemente debido a una mayor actividad microbiana y la mineralización de la materia orgánica. En estos trabajos se vió que la ceniza fue tan eficaz como la cal en el aumento de pH del suelo y el aumento de las concentraciones de P, S, B. También se ha demostrado beneficios nutricionales adicionales con la ceniza en comparación con cal. Muestras recientes también han demostrado que los niveles de pH del suelo elevado se han mantenido durante al menos 4 años después de la aplicación de cenizas, mientras que el pH del suelo en las parcelas encaladas comenzó a disminuir antes (Vance y Mitchell, 2000).

Gullón et al. (2001) también evaluaron las posibilidades del empleo de cenizas de corteza procedentes de las industrias madereras como enmendante de la acidez y fertilizante de suelos ácidos. Encontraron que el aporte de cenizas produjo un aumento del pH del suelo, lo que derivó en una disminución del Al en disolución. El incremento del pH producido por la ceniza sólo derivó en aumentos de la nitrificación cuando el suelo recibió  $\text{NH}_4$ . La fracción sólida del suelo también experimentó incrementos de las concentraciones de P, Ca y Mg en formas asimilables. El aporte de cenizas incrementó las concentraciones de Ca y Mg en la planta, lo que produjo aumentos proporcionales de la producción. Por todo esto las cenizas se emplean en suelos forestales de carácter ácido puesto que cantidades moderadas de estas cenizas devuelven al sistema buena parte de los nutrientes extraídos durante el aprovechamiento forestal. En algunos casos, esta práctica se ha empleado para aliviar las deficiencias de P, Ca y Mg que presentan frecuentemente las plantaciones forestales desarrolladas sobre suelos ácidos.

En 1990, la International Paper Mansfield, Louisiana, EEUU, comenzó a investigar usos alternativos para la ceniza de madera proveniente de las calderas. Los suelos costeros de la región son típicamente ácidos y poco fértiles, y requieren de cal para sostener rendimientos óptimos del cultivo. Sin embargo, muchos agricultores de bajos ingresos de la región eligen no aplicar cal agrícola debido a su alto costo. El uso de la ceniza como un sustituto de cal por lo tanto parece ser una alternativa viable con un uso beneficioso. Como primer paso hacia este objetivo, la industria presentó una propuesta al Departamento de Calidad Ambiental de Luisiana para aplicar a la tierra la ceniza, y fue autorizado por el Estado para establecer parcelas de prueba para investigar sus efectos sobre los cultivos y suelo. Una vez que los efectos positivos de la ceniza se determinaron a partir de las parcelas de ensayo, un plan de aplicación de cenizas operativo fue desarrollado en cooperación con tres agricultores locales. El plan fue aprobado por el Departamento de Calidad Ambiental de Luisiana. Las pruebas posteriores de suelo y forraje de cada finca realizadas por parte de los científicos de Extensión y la Universidad Estatal de Louisiana (LSU) mostraron nuevamente sin efectos perjudiciales y plena aprobación del programa operativo (Vance y Mitchell, 2000).

#### 2.4.3 Aplicación de cenizas al suelo. Neutralización de acidez y aporte de nutrientes

Las cenizas de madera tienen un valor de pH alto (rango 8-13), esto da a la ceniza una alta capacidad de neutralización de ácidos, siendo ésta muy variable (Vance, 1996), por lo tanto son buenas enmiendas para suelos ácidos tropicales y forestales permitiendo reducir la toxicidad de Al y Mn (Demeyer et al., 2001). Puede además tener altas concentraciones de sales, por lo tanto puede tener un impacto adverso en el suelo mediante la elevación de pH y el aumento de la salinidad del mismo, especialmente cuando se aplican grandes cantidades de cenizas a la vez (Chirenje y Ma, 2002).

La disponibilidad de los nutrientes en ceniza de madera depende de la velocidad de disolución de cenizas en el suelo y posteriores reacciones químicas (Ohno, 1992). La velocidad y el orden de liberación de nutrientes a partir de la ceniza de madera en condiciones de laboratorio están bien establecidos, en cambio en el campo están sujetos a muchas otras variaciones de sitio a sitio, éstos incluyen las precipitaciones y el régimen de temperaturas, así como del suelo (Pitman, 2006).

Los cambios en la disponibilidad de nutrientes en el suelo del bosque después de la aplicación de cenizas pueden ser el resultado de tres factores: (i) la adición de nutrientes directa de la ceniza; (ii) los cambios en los equilibrios químicos del suelo dependientes del pH (Davies y Janes, Wild, citados por



Vance, 1996); y (iii) cambios en la descomposición de la materia orgánica del suelo por los microorganismos (Weber et al., Fritze et al., Khanna et al., citados por Vance, 1996).

En cuanto a la solubilidad de los elementos contenidos en la ceniza de madera, es muy variable. Los elementos pueden ser agrupados en tres clases: elementos fácilmente solubles (K, S, B, Na); elementos menos solubles (Ca, Mg, Si; Fe) y aquellos muy insolubles (P) (Augusto et al., 2008).

El K, S y Na están presentes en la ceniza de madera en forma de sal (Steenari et al., citados por Augusto et al., 2008), que se disuelve fácilmente en el agua de lluvia. El Ca esta principalmente en forma de carbonato. En las cenizas, el fósforo está ligado en compuestos con bajas solubilidades, como apatita (Steenari y Lindqvist, citados por Augusto et al., 2008) u óxidos Fe-Al. (Augusto et al., 2008). En caso de que los minerales dominantes identificados en la ceniza de madera sean muy solubles y no persistan en el suelo, la aplicación de la ceniza de madera tendrá un efecto mínimo en la mineralogía de los suelos (Ulery et al., citados por Demeyer et al., 2001).

A pesar de que la ceniza de madera no contiene N, su disponibilidad aumenta a menudo, indirectamente, debido a un aumento del pH y la consecuente mineralización de la materia orgánica del suelo (Pitman, 2006). En un experimento se encontró que los microorganismos amonificantes y nitrificantes eran mucho más numerosos en los tratamientos de ceniza que en el de control (Ozolincius et al., citados por Augusto et al., 2008). La estimulación de la microflora se debe principalmente a un aumento en el pH y a las concentraciones en el medio del carbono orgánico disuelto (COD) (Augusto et al., 2008).

También Gullón et al. (2001) encontraron que la adición de cenizas tuvo un efecto positivo sobre la acidez y el nivel de diferentes nutrientes del suelo que limitan la producción agrícola en suelos ácidos. La reducción de la acidez del suelo modificó la dinámica de diferentes elementos. Un efecto directo fue la reducción de las concentraciones de Al y Mn en la disolución del suelo y sus consiguientes efectos fitotóxicos en suelos ácidos (Kabata-Pendias y Pendias, Roy et al., citados por Gullón et al., 2001). El aporte de cenizas también derivó en aumentos de las concentraciones de Ca y Mg en la disolución, efecto que ha sido observado en otros experimentos similares (Clapham y Zibilske, citados por Gullón et al., 2001). La mayor liberación de estos elementos que se observa con la fertilización nitrogenada del suelo se debió tanto al aumento de  $\text{NO}_3^-$  y, posiblemente, de  $\text{SO}_4^{2-}$  (no determinado) en disolución, iones que podrían actuar como portadores de estos cationes.

Etiégni et al., citados por Pitman (2006) estudiaron los cambios estructurales de ceniza de madera durante la humectación, y sugirió que la ceniza es esencialmente hidrófila y absorbe el agua en los poros por capilaridad simultáneamente con los cambios químicos de la hidratación de los óxidos. Dadas sus propiedades de retención de líquidos, tanto los herbicidas y pesticidas se adsorben fácilmente, por lo tanto la aplicación de cenizas y otros productos de fumigación debe ser escalonada para evitar la posible reducción en la eficacia de los mismos.

De acuerdo a la bibliografía revisada, uno de los puntos clave para implementar la utilización de cenizas es la definición de las dosis a utilizar. Según Demeyer et al. (2001), la aplicación de altas dosis puede afectar fuertemente en la textura del suelo, la aireación, capacidad de retención de agua y la salinidad. De acuerdo a Pitman (2006), los efectos de la ceniza de madera se rigen principalmente por la tasa aplicación y tipo de suelo. El beneficio es maximizado en forma de dosis bajas, con la posible toxicidad de aplicaciones de más de  $10 \text{ ton.ha}^{-1}$ . Para la mayoría de los sitios de bosques, una sola aplicación ceniza de madera por rotación podría reemplazar todos los nutrientes perdidos después de la cosecha de árboles enteros exceptuando N. En lo que refiere al manejo, un número de problemas están asociados con la aplicación de la ceniza fina, es dificultoso de manejar y presenta riesgos para la salud de los operadores al estar las partículas suspendidas en el aire, además de que se dificulta para repartir uniformemente. En los sistemas de cultivos forestales, podría aplicarse una vez a la rotación de coníferas, en el punto de más rápido crecimiento en el cultivo o en la etapa de mediados de rotación temprana. De acuerdo a Saarsalmi y Levula, citados por Gullón et al. (2008) hay poca información sobre el efecto de la aplicación de la ceniza de madera en la siembra, como un fertilizante de arranque para el establecimiento de plántulas.

Se ha estudiado el efecto de los ajustes de ceniza de madera en las comunidades microbianas del suelo. Baath et al., citados por Demeyer et al. (2001) observaron que las altas tasas de enmiendas de ceniza de madera de coníferas redujeron significativamente la biomasa microbiana, y que los hongos fueron más afectados que las bacterias. Sin embargo, cuando se utiliza correctamente, la ceniza puede ser utilizada como un material de encalado (Chirenje y Ma, 2002).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO

El predio donde se encuentra el experimento, pertenece a la empresa Weyerhaeuser dentro de la localidad Paso de Gaire, ubicado en el departamento de Rivera, al cual se accede desde Montevideo, por Ruta 5 a la altura del km 444, por camino vecinal hacia el Este, aproximadamente 1 Km (Figura No. 4).



Figura No. 4. Ubicación del experimento. Fuente: Google Earth (2016)

## 3.2 INSTALACIÓN Y DISEÑO EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Instalación

El sitio donde se instaló el experimento corresponde a una reforestación con un Híbrido GC172 de *Eucalyptus* (*grandis* x *camaldulensis*), cuyo cultivo antecesor era *Pinus taeda*. Los suelos son predominantemente profundos de textura arenosa y pertenecen al grupo CONEAT 7.2. La descripción de los perfiles correspondientes a los bloques experimentales fueron los siguientes:

Cuadro No. 6. Perfiles de los suelos predominantes

Geomorfología: colinas		
Geología: sedimentos arenosos de la formación Tacuarembó		
Uso actual (29 de abril, 2014): cosecha de monte de <i>Pinus taeda</i>		
<b>Perfil 1 (Bloque I)</b>		
Profundidad (cm)	Horizonte	Observación
0- 68	Ap	Arenoso franco; raíces abundantes, transición clara
68-87	BA	Franco arcillo arenoso; raíces abundantes, transición clara.
87-110	Bt	Arcilloso
<b>Perfil 2 (Bloques II y III)</b>		
0-56	Ap	Arenoso franco; raíces abundantes, transición clara
56 – 70	BA	Franco arcillo arenoso; raíces abundantes, transición clara
70-79	Bt1	Arcilloso
79 +	C	Arenisca desagregada de la Formación Tacuarembó

### 3.2.2 Diseño experimental

Se planteó un diseño en bloques completamente al azar con arreglo factorial, con tres niveles de cenizas (0, 4 y 8 Mg ha<sup>-1</sup>) y dos niveles de fertilización (0 y 100 g de FDA 18-46-0) por planta, con tres repeticiones, resultando en 6 tratamientos (Cuadro No. 7). Este modelo se utilizó para muestreo foliar y datos dasométricos (altura y diámetro), mientras que para el muestreo de suelo no se tomó en cuenta la dosis de fertilizante (sin arreglo factorial) ya que el mismo fue aplicado junto al pie de los árboles y las muestras fueron extraídas en fila de plantación alejadas del pie. Por lo anterior, la

cantidad de tratamientos se reducen a 3 (testigo, 4 Mg ha<sup>-1</sup> y 8 Mg ha<sup>-1</sup>), quedando el planteo de los tratamientos como se muestra en el Cuadro No. 8.

Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de parcelas en bloques al azar con tres repeticiones, en franjas de terreno relativamente uniformes, Esto determina un total de 18 parcelas a evaluar de 900 m<sup>2</sup>, (Figura No. 5). Para un marco de plantación es de 5 x 4 m, en cada parcela se consideraron 4 filas de 8 plantas cada una. A los efectos de las mediciones y muestreo de suelo y planta realizados, se consideraron las dos filas centrales. Se realizó un sorteo de las parcelas para asignar de manera aleatoria los tratamientos.

Cuadro No. 7. Tratamientos en el experimento de campo para muestreo foliar y datos dasométricos

Tratamiento	Aplicación de cenizas	Fertilización
1	NO	NO
2	NO	100 g FDA*/planta
3	4000 Kg de ceniza/ha	NO
4	4000 Kg de ceniza/ha	100 g FDA*/planta
5	8000 Kg de ceniza/ha	NO
6	8000 Kg de ceniza/ha	100 g FDA*/planta

\*FDA: fertilización con fosfatodiamonico (18-46-0)

Cuadro No. 8. Tratamientos de aplicación de cenizas considerados en el experimento de campo para el muestreo de suelo

Tratamientos	dosis cenizas (Mg ha <sup>-1</sup> )
1 - testigo	0
2 - 4 ton.	4
3 - 8 ton.	8

Es importante notar que cuando se hace referencia al agregado de cierta cantidad de cenizas por hectárea, se está haciendo referencia a las toneladas agregadas por hectárea de suelo laboreado en la entrefila (futura fila), o sea área efectiva, y no por área real de terreno.

P1	P2	P3	P4	P5	P6	
T3	T5	T1	T6	T4	T2	Bloque 1
T4	T5	T1	T2	T6	T3	Bloque 2
T6	T1	T5	T2	T3	T4	Bloque 3

Figura No. 5. Croquis del experimento

### 3.3 METODOLOGÍA

#### 3.3.1 Trabajo de campo. Instalación y muestreo

El agregado de las cenizas se realizó dos meses antes de la plantación en setiembre de 2014, se realizó un muestreo de suelo previo a la aplicación (más adelante se llamará muestreo 1), tomando una muestra compuesta de 16 tomas por parcela a las profundidades de 0-20 y 20-40 cm con calador.

Una vez identificadas las parcelas con sus respectivos tratamientos, se procedió a la aplicación manual de la ceniza, cuyo tamaño promedio era de 2-3 cm (Figura No. 6), con baldes ya pesados con una balanza. Luego de su aplicación en los tratamientos, fueron incorporadas con una disquera a una profundidad de 30 cm.



Figura No. 6. Aspecto de las cenizas que se aplicaron al suelo

Luego se arribó dos veces más al lugar del experimento. En el mes de noviembre de 2014, se toman nuevamente muestras compuestas de suelo (16 tomas por parcela) en la fila de plantación, a una profundidad de 0-20 cm, y a una distancia intermedia entre dos plantas (más adelante se llamará muestreo 2). El último muestreo de suelo (muestreo 3) tuvo lugar en mayo del 2015 (de 0-20 y 20-40 cm), con la misma metodología en cuanto a lugar de muestreo y número de tomas por parcela para la muestra compuesta. Además se tomaron muestras foliares compuestas de 4 hojas/árbol (en los cuatro puntos cardinales) con mayor desarrollo y sanas a media copa, en 6 árboles/fila en las 2 filas centrales, no se muestrearon las del borde. Se hicieron mediciones de diámetro (a 20 cm de la base, debido al escaso tamaño de las plantas) y altura total utilizando una pértiga. En la Figura No. 7 se muestra el estado del cultivo correspondiente al último muestreo.



Figura No. 7. Estado del cultivo perteneciente al último muestreo

### 3.3.2 Trabajo de laboratorio

#### 3.3.2.1 Análisis químico de suelo

Las muestras fueron secadas a estufa 48 horas a 40° C, molidas hasta un tamaño menor a 2 mm y luego se mezclaron para asegurar su homogeneidad. Para determinar las propiedades químicas de los suelos, se realizaron análisis de:

- pH en agua (Van Lierop, 1990) y en KCl 1 M por potenciometría (relación suelo/agua o suelo/KCl = 1/2,5)
- Bases de intercambio (Ca, Mg, K y Na), la extracción se realizó con acetato de amonio 1 M bufferado a pH 7, luego se determinaron Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica y K y Na por espectrofotometría de emisión (Isaac y Kerber, 1971)
- Acidez intercambiable se determinó por desplazamiento con 1 M KCl y la titulación hasta el punto final de la fenolftaleína (Barnhisel y Bertsch, 1982)

- Contenido de P por método Bray No. 1 (Bray y Kurzt, 1945)
- El C orgánico (solo en el primer muestreo) fue determinado por titulación con sal de Mohr, luego de atacar una muestra con dicromato de K y ácido sulfúrico, sin aporte de calor exterior (Walkley y Black, 1934). La materia orgánica se determina multiplicando el contenido de carbono orgánico por el factor convencional de Vammelen (1,724), asumiendo una concentración de C en la materia orgánica de 58%.

### 3.3.2.2 Análisis químico foliar

Se realizó análisis foliar para establecer la relación con la disponibilidad de nutrientes en el suelo. El análisis de planta con fines de evaluación de la fertilidad de un suelo, es la determinación de la concentración de un elemento o fracción del mismo en una muestra proveniente de una parte definida de la planta, muestreada en determinada etapa de su desarrollo fisiológico. En este caso, el análisis de planta se basa en que la concentración de un nutriente dado en la planta (o en una parte de la misma) es un valor que integra todos los factores que han afectado su crecimiento, siendo los principales: suelo, condiciones climáticas, tiempo, la propia planta, manejo y fundamentalmente la disponibilidad de ese nutriente en el suelo (Barbazán, 1998).

Las muestras foliares luego de secadas en estufa a 60°C por 48 horas (hasta peso constante), fueron molidas hasta un tamaño menor a 1 mm. Para el análisis de P y bases se realizó la calcinación del material vegetal a 550°C y se disolvió la ceniza en HCl 10%. Luego se determinaron:

- Bases: en el caso del potasio (K) y sodio (Na) total se utilizó la técnica de espectrometría de emisión. Las concentraciones de magnesio (Mg) y calcio (Ca) fueron determinadas mediante Absorción Atómica.
- Nitrógeno: en una digestión de 0.5 g de muestra con ácido sulfúrico y catalizador, fueron determinados los contenidos totales de nitrógeno (N), por el método de Kjeldahl (Bremmer y Mulvaney, 1982)
- P se determinó mediante un método colorimétrico (Murphy y Riley, 1962)

### 3.3.2.3 Análisis de cenizas

En una dilución de una muestra de 1 g de la ceniza (obtenidas por calentamiento en mufla a 500°C) diluida en HCl 10%, se determinaron los contenidos totales de fósforo (P) con el método colorimétrico del ácido



ascórbico (Murphy y Riley, 1962), magnesio (Mg) y calcio (Ca), por absorción atómica y potasio (K) total por espectrometría de emisión (Isaac y Kerber, 1971).

### 3.3.3 Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza, tomándose como base el software R-Project. Basándose en el estudio de hipótesis, se realiza un análisis de varianza (ANAVA) para constatar la existencia o no de diferencias significativas entre los distintos tratamientos; si se llegaran a presentar diferencias (es decir que se rechaza  $H_0$  con un 95% de confianza) se procede a realizar una prueba de comparación de medias (Tukey), en donde las diferentes letras indicarán diferencias estadísticamente significativas.

El modelo utilizado para análisis de suelo, corresponde al modelo de diseño en bloque completamente al azar (Montgomery, 2010):

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad \begin{array}{l} i: 1, 2, 3 \text{ (tratamientos)} \\ j: 1, 2, 3 \text{ (repeticiones)} \end{array}$$

- $Y_{ij}$  - respuesta del  $i$  - ésimo tratamiento en el  $j$  - ésimo bloque
- $\varepsilon_{ij}$  - error experimental (residual) asociado al  $i$  - ésimo tratamiento en el  $j$  - ésimo bloque
- $\beta_j$  - efecto del  $j$  - ésimo bloque
- $\alpha_i$  - efecto del  $i$  - ésimo tratamiento
- $\mu$  - media poblacional

Para este modelo se plantean las siguientes hipótesis:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

$H_a$ : existe al menos un efecto diferente entre medias de los tratamientos (promedio de con o sin fertilización)

Para el caso de análisis foliares y dasométricos se estudió la respuesta en las concentraciones de nutrientes absorbidos por los árboles, en función de la aplicación al suelo de diferentes dosis de cenizas y fertilizante fosfatado, por lo que se realiza un DBCA, con arreglo factorial, con 3 repeticiones, con los siguientes niveles de los factores:

- Cenizas: 0, 4, 8 Mg ha<sup>-1</sup>
- Fertilizante: 0, 100 g/planta (FDA)

El modelo para análisis de plantas es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + F_j + (CF)_{ij} + \beta_k + \varepsilon_{ijk}$$

i: 1, 2, 3 (Cenizas)

j: 1, 2 (Fertilizante)

k: 1, 2, 3 (Bloques)

- $Y_{ijk}$  - respuesta del i - ésimo tratamiento en el j - ésimo bloque
- $\mu$  - media poblacional
- $C_i$  - efecto del i - ésimo nivel de aplicación de cenizas
- $N_j$  - efecto del j - ésimo nivel de aplicación de F
- $(CN)_{ij}$  - efecto de la interacción entre el i - ésimo nivel ceniza y el j - ésimo nivel de aplicación de F
- $B_k$  - efecto del k - ésimo bloque
- $\varepsilon_{ijk}$  - error experimental asociado al i - ésimo nivel ceniza, j - ésimo nivel de aplicación de F, en el k - ésimo bloque.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

$$H_{01}: \mu C_1 = \mu C_2 = \mu C_3$$

$$H_{02}: \mu F_1 = \mu F_2$$

$$H_{03}: \mu C_1F_1 = \mu C_1F_2 = \mu C_2F_1 = \dots = \mu C_3F_2$$

$H_a$ : existe al menos un efecto diferente entre medias de los tratamientos

Los criterios de decisión para ambos modelos son los siguientes:

P-valor  $> p = 0,05$  no rechazo  $H_0$  con 95% de confianza

P-valor  $<$  (o igual)  $p = 0,05$  rechazo  $H_0$  con 95% de confianza

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA DE MADERA

Se analizaron 3 muestras de cenizas para P, en el caso de bases se analizaron 4. Los resultados se presentan en la Figura No. 8.

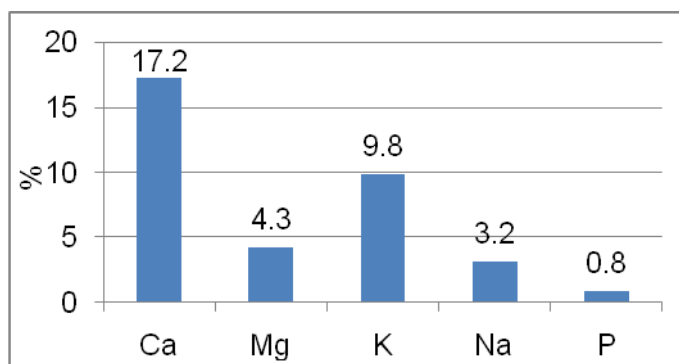


Figura No. 8. Composición química de la ceniza

Estos valores tienen una tendencia similar con los presentados en el Cuadro No. 3 para el caso de Ca y K, donde se puede ver un mayor contenido de Ca en las cenizas, siguiendo el K, esto le otorga a las mismas propiedades alcalinas y por ende capacidad neutralizante. El Mg y el Na están presentes en proporciones muy similares entre ellos, el P es el nutriente que se encuentra en menor proporción, esto se puede deber a las bajas concentraciones del mismo en la madera.

Los elementos que se van a disolver más fácilmente en el suelo son K y Na, ya que se encuentran en forma de sal, el Ca esta principalmente en forma de carbonato, por lo que es de solubilidad media, al igual que el Mg, en cambio el P forma compuestos de muy baja solubilidad.

La disponibilidad de estos nutrientes para las plantas está sujeta a varios factores, tanto climáticos, de suelo, así como del tamaño de las cenizas, en este caso en particular se aplicaron cenizas gruesas, lo que puede estar dificultando su disolución en el suelo.

## 4.2 EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE SUELO

### 4.2.1 Materia Orgánica

El Cuadro No. 9 presenta resultados correspondientes a datos preliminares, antes de la aplicación de la ceniza.

Cuadro No. 9. Contenido de MO del suelo del estudio

Profundidad (cm)	%C	%humus (%C * 1,724)	Des. est.	CV
0-20	0,72	1,24	0,11	0,09
20-40	0,61	1,05	0,41	0,39

En general, de acuerdo con su génesis el contenido de MO de los suelos varía entre 0,5 y 15%. De acuerdo a esto los contenidos se pueden clasificar en: < 1% bajo; 1-2% medio bajo; 2-4% medio; 4-8% alto; 8-12% muy alto y > 12% extremadamente alto (turberas) (Conti, 2000). Según los resultados obtenidos el contenido de MO es medio a bajo, como es común en esta zona se trata de un suelo pobre, de textura arenosa, con bajo tenor en arcilla, con baja capacidad buffer ante la aplicación de un material encalador. Se puede observar una relación inversa entre el contenido de MO y su CV, es decir, al disminuir el contenido de MO, aumenta el CV, esto se puede deber a la incorporación de restos de la forestación anterior generando mayor heterogeneidad en la mayor profundidad. En cuanto a la relación del %MO con la profundidad (0-20 y 20-40 cm), muestra una tendencia a decrecer con el aumento de la misma.

### 4.2.2 pH y acidez intercambiable de los suelos

El Cuadro No. 10 presenta los resultados de pH para cada muestreo a diferentes profundidades.

Cuadro No. 10. Resultado de la medición de pH (H<sub>2</sub>O)

	0 – 20 cm			20 – 40 cm	
	Muestreo 1*	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 1*	Muestreo 3
testigo	4,35	4,24	4,38	4,33	4,39
4 ton.	4,33	4,42	4,54	4,31	4,48
8 ton.	4,36	4,38	4,65	4,36	4,51

\*Previo a la aplicación de cenizas

Como se puede observar estos suelos presentan bajos valores de pH. Para la profundidad de 0-20, hubo un leve aumento de pH con el agregado de

cenizas (muestréos 2 y 3), destacándose a los 8 meses una diferencia más notoria, (muestreo 3), con la dosis más alta.

A la profundidad de 20-40 cm se ve una tendencia a un leve aumento en el tercer muestreo, pero en menor medida respecto a lo que se observó en la profundidad de 0-20 cm. El Cuadro No. 11 presenta los resultados de pH medido en KCl.

Cuadro No. 11. Resultado de la medición de pH (KCl)

	0-20 cm			20-40 cm	
	Muestreo 1*	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 1*	Muestreo 3
Testigo	3,66	3,67	3,80	3,68	3,91
4 ton.	3,68	3,71	3,88	3,68	3,84
8 ton.	3,67	3,75	3,91	3,67	3,85

\*Previo a la aplicación de cenizas

Se observa la misma tendencia para la profundidad de 0-20, es decir un aumento de pH por la aplicación de ceniza, más notorio también para el tercer muestreo con la mayor dosis.

La medida de pH en KCl suele ser de 0,5-1 unidades inferior al pH en agua, en el caso estudiado resultó ser 0,67 unidades inferior. Esto es debido a que al usar KCl ocurre cierta liberación de H<sup>+</sup> del complejo de intercambio.

Para 20-40 cm como se pudo observar con el pH en H<sub>2</sub>O, para KCl se presenta la misma tendencia, es decir aumenta el valor muy levemente a través del tiempo y con la dosis más alta, por lo que queda claro que a mayor profundidad, menores son estos cambios en el pH.

Estos valores de pH son menores a los encontrados por Bennadji (2001) de 5,3, o Zamalvide y Ferrando (2010a, Cuadro No. 1) de 5,2. Es necesario considerar que el ensayo se instaló en el mes de setiembre sobre un suelo que unos meses antes (abril) se estaba realizando la cosecha de un monte de pino, donde la mineralización de los restos y generación de H<sup>+</sup> puede ser un aspecto que puede estar contribuyendo a estos bajos valores de pH. Con respecto a esto, Arrarte et al. (2010) estudiaron patrones de mineralización de la MO de un suelo bajo vegetación de eucalipto de 23 años, pino de 17 años y pastura natural, y encontraron que el pH del suelo (0-15 cm) fue más alto bajo vegetación de eucalipto y campo natural, y menor bajo pino. Según estos autores, es posible que el bosque de pino promoviera la acidificación del suelo mediante la producción de ácidos orgánicos. Otra hipótesis es que la cantidad de bases recicladas por el bosque mediante el mantillo es menor en pino, que

en eucalipto y campo natural. Según Owen et al., citados por Arrarte et al. (2010), se ha observado que el pH del suelo está correlacionado con la composición de la comunidad bacteriana, lo que explicaría las diferencias entre vegetaciones.

Para comprobar si esas diferencias son significativas, se procede al análisis estadístico para los muestreos con aplicación de dosis, mediante el ANAVA (Cuadro No. 12).

Cuadro No. 12. Resultados de análisis de varianza (pH) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos. Diferente letra indica diferencia estadística (\*p < 0,05)

Fuente de Variación	Profundidad 0-20				Profundidad 20-40	
	Muestreo 2		Muestreo 3		Muestreo 3	
	pH agua	pH KCl	pH agua	pH KCl	pH agua	pH KCl
Tratamiento	ns	ns	0.00172*	0.019*	ns	ns
8 ton.			a	a		
4 ton.			a	ab		
testigo			b	b		
Bloque	ns	ns	0.00717*	ns	0.00387*	ns
1			a		a	
3			b		b	
2			b		b	

ns: no significativa (p>0,05)

Se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo. Para el caso de la variable pH agua para el muestreo 2 se procedió a la transformación de la misma para cumplir el supuesto de normalidad, utilizando la fórmula  $\sqrt{Y_{ij}}$  (Montgomery, 2010).

Para la profundidad de 0-20 cm, se observaron diferencias significativas para los tratamientos en el muestreo 3, tanto para pH en agua como en KCl. Los valores de pH agua para 8 y 4 Mg ha<sup>-1</sup> resultaron ser estadísticamente significativos, no habiendo diferencia entre ellos (ya que comparten la misma letra), pero sí con respecto al tratamiento sin dosis. Para KCl, el tratamiento de 4 Mg ha<sup>-1</sup> no presenta diferencias con respecto a los demás (comparte letra tanto con 8 Mg ha<sup>-1</sup> como con el testigo), pero si el tratamiento de 8 Mg ha<sup>-1</sup> difiere con respecto al tratamiento sin dosis. En el muestreo 3 la variable bloque para pH en agua presenta diferencias significativas, siendo el bloque 1 el que se diferencia significativamente de los demás, presentando mayor promedio.

De 20-40 cm se observaron diferencias significativas únicamente para bloque en pH agua, siendo el mismo resultado que para la profundidad de 0-20 cm, el bloque 1 se diferenció de los demás, con valores más altos de pH.

Ese aumento de pH se debe, tal como se ha mencionado en la bibliografía al contenido de óxidos e hidróxidos y carbonatos Ca, Mg y K en la ceniza, ya que la misma se origina de la quema de compuestos orgánicos formando esos componentes.

En lo que respecta a la acidez intercambiable (AI) en los suelos, en la Figura No. 9 se muestran los resultados del análisis.

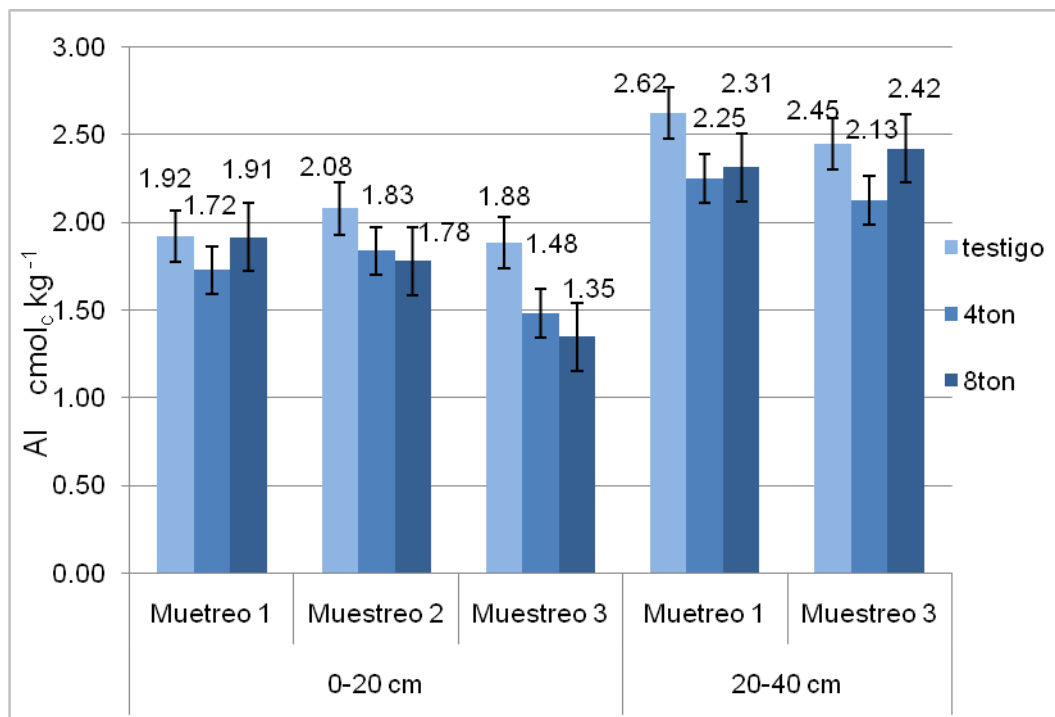


Figura No. 9. Contenido de acidez intercambiable por muestreos y profundidades

Se observan valores elevados de AI, sobre todo para la profundidad de 20-40. Para la profundidad de 0-20 el nivel de AI muestra una tendencia a disminuir a través del tiempo con la aplicación de dosis de cenizas, disminución más marcada aún en el muestreo 3 con la dosis mayor. En cambio para la profundidad de 20-40 no se observa ninguna tendencia, presentando valores mayores de acidez intercambiable que el horizonte 0-20 (2,33  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  vs 1,57  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  respectivamente, comparando los promedios entre los tres tratamientos para el muestreo 3).

De acuerdo a los resultados presentados en el Cuadro No. 13, se encontraron diferencias estadísticamente significativas, tanto para tratamiento (en la profundidad de 0-20) como para bloque (en ambas profundidades). De 0-20 cm, en el muestreo 3, el tratamiento que presentó mayor promedio de Al fue el testigo, en cambio con 8 Mg ha<sup>-1</sup> se puede observar un efecto de las cenizas ya que presentó el menor promedio. Esto respalda lo dicho anteriormente sobre la propiedad alcalinizante de la ceniza, permitiendo liberar sitios de intercambio en los coloides del suelo, implicando una disminución en la cantidad de Al. En lo que refiere a la profundidad de 20-40 cm, es más difícil observar un cambio, como resultado no se encontraron diferencias entre los tratamientos para ninguna de las variables.

Cuadro No. 13. Resultados de análisis de varianza (Al) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos. Diferente letra indica diferencia estadística (\*p < 0,05)

Fuente de variación	0-20		20-40
	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 3
Tratamiento	ns	0,0491*	ns
Testigo		a	
4 ton.		ab	
8 ton.		b	
Bloque	0,0019*	0,0010*	0,0012*
3	a	a	a
2	a	a	a
1	b	b	b

ns: no significativa (p>0,05)

En cuanto a los bloques se encontraron diferencias para todos los muestreos realizados y para ambas profundidades, dando los mismos resultados, se destaca la diferencia del bloque 1 con respecto a los demás, presentando los menores valores de Al, en tanto los bloques 2 y 3 se presentan sin diferencias entre ellos (ya que comparten la misma letra). Es importante notar que el bloque 1 estuvo ubicado en una loma separada de la correspondiente a los bloques 2 y 3.

#### 4.2.3 Bases intercambiables (K, Mg, Ca y Na) y fósforo (P)

El Cuadro No. 14 muestra los resultados del ANAVA de las bases intercambiables y de P. En algunos casos (muestreo 3) se necesitó transformar la variable para cumplir el supuesto de normalidad, esto se da para el Na (0-20 cm) con la fórmula:  $\ln_{y_{ij}}$  y para el K (20-40 cm) con:  $1/y_{ij}$  (Montgomery, 2010).



Cuadro No. 14. Resultados de análisis de varianza (bases intercambiables y P) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos. Diferente letra indica diferencia estadística (\*p < 0,05)

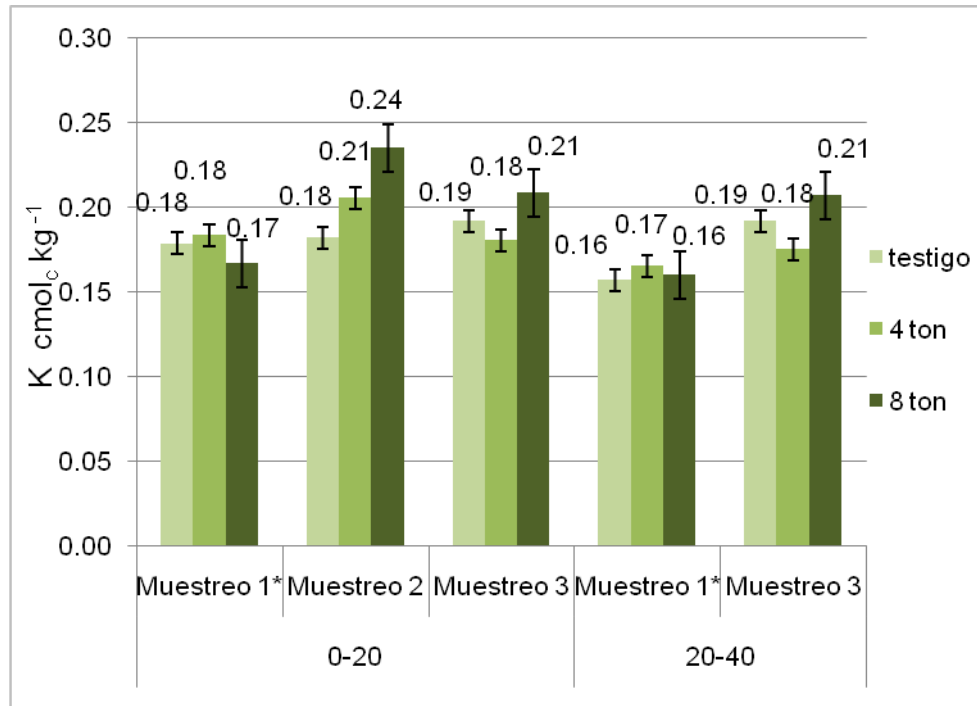
Fuente de Variación	Ca	Mg	K	Na	P
	Muestreo 2 0-20 cm				
Tratamiento	ns	ns	0,0054*	ns	ns
Testigo			b		
4 ton.			ab		
8 ton.			a		
Bloque	ns	0,0181*	0,0028*	ns	ns
3		a	a		
2		ab	ab		
1		b	b		
Muestreo 3 0-20 cm					
Tratamiento	ns	ns	ns	ns	ns
Bloque	ns	ns	ns	ns	ns
Muestreo 3 20-40 cm					
Tratamiento	ns	ns	ns	ns	ns
Bloque	ns	ns	ns	ns	ns

ns: no significativa (p>0,05)

Como se puede observar en el único caso en que se encontraron diferencias significativas entre tratamientos con 95% de confianza fue para el K, en el muestreo 2 (0-20 cm). Según la prueba de Tukey, los valores de K para 8 y 4 Mg ha<sup>-1</sup> resultaron ser estadísticamente significativos, presentando los mayores promedios (0,24 y 0,21 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> respectivamente), según se representa en la Figura No. 10, no habiendo diferencia entre ellos, pero sí con respecto al tratamiento sin dosis, en otras palabras el tratamiento testigo difiere significativamente del tratamiento de 8 ton., por tener letras diferentes (0,18 vs 0,24 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> respectivamente).

La posible causa de estas diferencias es que el K se presenta en forma de sal en las cenizas, siendo fácilmente soluble, pasando a la solución del suelo. Otra hipótesis, teniendo en cuenta la historia previa de plantación de pino, es que los residuos permanecieron en el lugar, con incidencia directa de factores abióticos (climáticos) y bióticos (microorganismos descomponedores) promoviendo la descomposición y una rápida liberación de K por parte de estos residuos. Experimentos realizados por del Pino et al. (2010) donde estudiaron la descomposición de residuos de *Pinus taeda* en Uruguay para dos sitios en Rivera con rodales de diferente edad (22 y 12 años) y modalidad de cosecha (tala rasa y raleo comercial), encontraron que de todos los nutrientes analizados, el K presentó una rápida liberación de los residuos en los primeros

meses de muestreo, y en forma prácticamente total durante el período que duró el estudio.



\* Previo a la aplicación de cenizas

Figura No. 10. Contenido de K intercambiable en suelo a ambas profundidades

En lo que refiere a los bloques se encontraron diferencias en el muestro 2 para Mg y K, dando los mismos resultados, el bloque 3 se diferencia significativamente del 1 presentando los mayores promedios, por no compartir igual letra. En tanto el bloque 2 comparte letras, tanto con el bloque 1 como el 3, por lo que no se puede afirmar que sea distinto significativamente de los otros.

Como regla general, las cantidades relativas de bases intercambiables en los suelos expresados en  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , siguen el orden siguiente:  $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$ , el contenido de Na intercambiable puede ser mayor o menor al del K. Para ilustrar esta situación el Cuadro No. 15 presenta los valores obtenidos de los muestreos de suelo en el sitio de estudio, comparando con datos preliminares correspondientes a ensayos realizados en el mismo suelo y el rango de cationes intercambiables en los suelos del Uruguay.

Cuadro No. 15. Promedio de los contenidos de cationes intercambiables del suelo en el sitio y los rangos contenidos en los suelos del Uruguay en  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

	Ensayo*		Datos preliminares**		Rangos suelos de Uruguay (0-20 cm)	
	0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm	inferior	superior
K	0,19	0,18	0,16	0,16	0,1	1,5
Mg	0,31	0,31	0,28	0,23	0,30	10
Ca	0,78	0,70	0,67	0,62	0,50	30
Na	0,31	0,32	0,26	0,25	0,1	2,0

\* Datos promedio de los tres muestreos. El detalle de los mismos se presenta en anexos

\*\* Datos preliminares tomados antes de iniciar el ensayo (ver anexos)

Fuente: del Pino (2011)

Los valores obtenidos en el análisis químico se acercan al límite inferior de los datos que muestra la bibliografía, indicando un nivel bajo en el contenido de cationes para el suelo de estudio, sin variación a lo largo del perfil. Esto es de esperarse ya que se trata de un suelo pobre, bajo en MO y textura arenosa como ya se ha mencionado. Si bien se observaron diferencias estadísticas para los tratamientos en el K, comparando con los contenidos presentados por los datos preliminares, muestra una leve tendencia al aumento, aun así sigue presente en bajas proporciones.

Cabe destacar que las deficiencias en los suelos agrícolas de Ca y Mg son raras, ya que la mayoría de los suelos ácidos contienen niveles de estos cationes suficientes para el crecimiento vegetal. En el caso de Ca los niveles tienen una tendencia a aumentar en el tercer muestreo de 0-20 cm con el agregado de cenizas, ya que la misma contiene este nutriente en mayores proporciones (ver anexos).

Con respecto al P, como se puede ver en el Cuadro No. 14, no se encontraron diferencias significativas ni para los diferentes tratamientos ni para los bloques. La Figura No. 8 muestra una baja composición de este elemento en las cenizas y posiblemente esté ligado a compuestos con bajas solubilidades, esto podría explicar por qué los tratamientos no se hayan presentado con diferencias. Esto coincide con algunos estudios que han señalado la menor eficacia de las cenizas para aumentar el contenido de P disponible en el suelo con respecto a los fertilizantes minerales convencionales (Erich y Ohno, citados por Gullón et al., 2001).

El P es uno de los nutrientes principales para las plantas, siendo necesario su adecuado suministro por parte de los suelos para condiciones no limitantes del crecimiento vegetal. Los suelos del Uruguay presentan niveles de

suministro de P naturalmente insuficientes para el normal desarrollo para la mayoría de los cultivos, por lo cual es necesario su agregado a través de los fertilizantes fosfatados (Hernández y Zamalvide, 1998).

El método utilizado para el análisis de P (Bray No. 1), intenta obtener un resultado numérico proporcional al P lábil del suelo. Si bien presentan algunas diferencias entre los tratamientos de acuerdo a los resultados presentados, estas no son significativas. En anexos se presentan los resultados del análisis de suelo. Las muestras tomadas de la capa superior, indican un mayor nivel que en las muestras que se toman a 20-40 cm (8,1 vs. 6,4 mg Kg<sup>-1</sup> de suelo), esto puede estar dado a que el P es un nutriente poco móvil en el suelo, además su valor está influenciado por el nivel del pH. A modo de comparación Hernández y Zamalvide (1998) encontraron para un Acrisol de Rivera (Formación Tacuarembó) 4,1 mg Kg<sup>-1</sup> de suelo de P Bray No.1.

#### 4.3 MEDICIONES EN EUCALIPTO

##### 4.3.1 Contenido de nutrientes en hoja de eucalipto

La valoración del estado nutricional del cultivo se realizó en base a los niveles foliares de nutrientes de la parte aérea, los resultados del ANAVA se presentan en el Cuadro No. 16.

Cuadro No. 16. Resultados de análisis de varianza (bases, N y P foliar) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos. Diferente letra indica diferencia estadística (\*p < 0,05)

Fuente de variación	Ca	Mg	K	Na	P	N
Cenizas	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fertilizante (CV)	ns	ns	ns	ns	0,0302* (11)	ns
0					b	
100					a	
cen:fert	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bloque (CV)	2,97 e <sup>-05*</sup> (5)	ns	ns	0,00766* (22)	ns	0,00348* (10)
1	b			b		a
2	a			a		b
3	a			ab		b

Se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo. Para el caso de Mg se procedió a la transformación de la misma para cumplir el supuesto de normalidad, utilizando la fórmula  $\sqrt{Y_{ij}}$  (Montgomery, 2010).

Como resultado de este ANAVA, con respecto al factor cenizas, se afirma con 95% de confianza que no existen diferencias significativas en el contenido de nutrientes de las hojas por la aplicación de la misma. Para fertilizante como es de esperarse, se hallaron diferencias significativas únicamente para el caso de P, aquellos tratamientos que aplicaron 100 g/planta presentaron contenidos de P superiores en hoja.

Se confirma la no existencia de la interacción entre cenizas x fertilizante, ya que el p-valor obtenido es  $> 0,05$  y por lo tanto, no se rechaza  $H_0$ .

Para bloques se observaron diferencias para el Ca, Na y N, se realizó la prueba Tukey: para Ca y Na, el bloque 1 presenta valores más bajos con respecto a los bloques 2 y 3. Para el N, sucede lo contrario, la media del bloque 1 es mayor que las del 2 y 3.

Los datos del contenido de nutrientes en hoja se presentan en el Cuadro No. 17 y se comparan con los niveles de referencia presentados en el Cuadro No. 18.

Cuadro No. 17. Contenido de bases, P y N foliar según tratamientos

Tratamientos		Ca	Mg	K	Na	P	N
		g Kg <sup>-1</sup>					
No fertilizado	testigo	6,7	1,8	6,6	0,3	0,9	20,2
	4 Mg ha <sup>-1</sup>	6,9	1,8	6,8	0,4	0,8	18,7
	8 Mg ha <sup>-1</sup>	7,0	1,8	7,3	0,4	0,9	20,1
	promedio	6,9	1,8	6,9	0,4	0,9	19,6
	CV (%)	2	2	5	14	3	4
Fertilizado	testigo	7,1	1,9	6,3	0,5	1,0	20,0
	4 Mg ha <sup>-1</sup>	6,6	1,7	6,7	0,4	1,0	22,1
	8 Mg ha <sup>-1</sup>	6,9	2,0	6,8	0,5	1,0	19,0
	promedio	6,9	1,8	6,6	0,4	1,0	20,3
	CV (%)	4	8	4	13	3	8

De acuerdo a estos resultados no se aprecian diferencias importantes entre los contenidos de nutrientes para los tratamientos no fertilizado y fertilizado (independientemente de la dosis de ceniza), por lo que se puede

decir que la concentración foliar de nutrientes en los tratamientos testigos pueden considerarse como suficientes para este cultivo. El promedio de K con la fertilización es menor, esto se puede deber a una competencia entre este elemento con otro como Ca o Mg en la adsorción por la planta.

El Ca y el K son los nutrientes que están en mayor proporción en la ceniza. En el caso del K que fue el nutriente que presentó aumentos disponibles en el suelo con los aportes de las mismas, no se encontraron diferencias significativas a nivel foliar, este elemento y el Ca tienden a aumentar con la mayor dosis independientemente si fue fertilizado o no.

Se muestran en el siguiente cuadro los niveles de los elementos estudiados, en base a referencias encontradas en diferentes bibliografías.

Cuadro No. 18. Niveles de deficiencia, crítico y rangos para los distintos nutrientes

Elemento	Nivel deficiente <i>E. grandis</i> en estado juvenil (Brasil)	Rangos para el Uruguay mín-máx g kg <sup>-1</sup>	Nivel crítico
N	< 15	3,5 – 18	12 – 18
P	< 0,7	0,8 – 2,2	0,8 – 1,2
K	< 5	3,9 – 9,6	6 – 8
Ca	< 1	7,9 – 17,8	--
Mg	< 0,6	1,4 – 3,1	--

Fuente: Boardman et al. (1997), Crucci (2007), Zamalvide y Ferrando (2010a)

La primera interpretación en la comparación de estos datos tomando como referencia los niveles deficientes de *E. grandis* para Brasil, con los presentados en el Cuadro No. 17, es que no se presentan niveles de deficiencia para ninguno de los nutrientes analizados.

En base a los rangos encontrados para el Uruguay en el trabajo de Crucci (2007), el orden de deficiencia en el contenido de los nutrientes encontrado en nuestro experimento es (de mayor a menor): Ca, P, Mg, K. El Ca se encontró por debajo del rango mínimo establecido, el P y el Mg se dieron en niveles bajos, en tanto que el K mostró niveles medios. El N aparece en niveles altos, incluso sobrepasando el nivel crítico. Estos rangos para Uruguay presentados en el cuadro anterior se toman a modo de referencia pero no son valores que reflejen de manea clara la situación encontrada para nuestro estudio, debido a que no hay un rango confiable de niveles críticos bien establecidos para Uruguay. En el campo no se visualizaron problemas de

deficiencia por lo que se afirma una vez más que los rangos encontrados son suficientes para el normal desarrollo y crecimiento de los árboles.

Es de importancia destacar que la edad de la planta influye sobre las concentraciones de los nutrientes. N, P y K son nutrientes móviles en el floema, cuando el suministro de los mismos es limitante, los tejidos jóvenes los obtienen a expensas de las hojas viejas, en las que su contenido disminuye. El Mg, en general, se comporta en forma similar a los nutrientes móviles. Por el contrario el Ca es inmóvil en la planta habiendo más concentración en las hojas maduras y menos en las jóvenes (Barbazán, 1998). Una posible hipótesis por la que no se visualizaron deficiencias es porque la edad del tejido muestreado para este ensayo era joven, de 12 meses. Según Zamalvide y Ferrando (2010b), *“los análisis foliares en plantas de 18 meses no suelen mostrar deficiencias claras de P ni diferencias en el estado nutricional entre tratamientos, lo cual indicaría que en esos estadios aun siendo bajo el aporte de P del suelo, cubriría los requerimientos de las plantas”*.

Después del agua, el N es el nutriente más importante en el desarrollo de la planta dada su abundancia en las principales biomoléculas de la materia viva. Dentro de la planta es muy móvil, a medida que envejece el cultivo, se transloca hacia las partes más nuevas, por lo que cuando se desarrollan síntomas de deficiencia las concentraciones de estos nutrientes son altas en hojas jóvenes y bajas en las hojas viejas (Bonilla, 2008).

De manera de poder visualizar gráficamente estos datos y teniendo en cuenta que no hay diferencias entre diferentes dosis de cenizas, se presentan en la Figura No. 11 sus promedios para los diferentes contenidos de nutrientes con fertilización y sin ella.

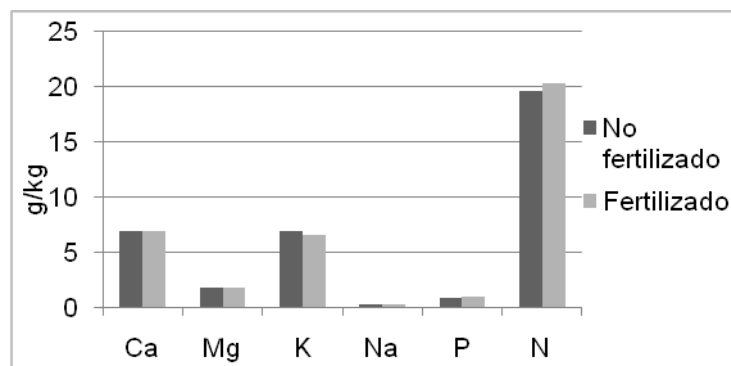


Figura No. 11. Promedio de la concentración de nutrientes en hoja obtenidos con los tratamientos no fertilizado y fertilizado

#### 4.3.2 Altura y diámetro

En el Cuadro No. 19 se presentan los resultados del ANAVA de estos datos dasométricos pertenecientes al último muestreo, correspondientes a la fecha de mayo de 2015, es decir después de 1 año de plantación.

Cuadro No. 19. Resultados de análisis de varianza (diámetro a los 20 cm y altura) – valor de probabilidad para la diferencia entre bloques y tratamientos. Diferente letra indica diferencia estadística (\* $p < 0,05$ )

Fuente de variación	Diámetro (CV=8%)	Altura (CV=9,5%)
Cenizas	ns	ns
Fertilizante	1,16e-06*	2,54e-06*
0	b	b
100	a	a
cen:fert	ns	ns
Bloque	0,0383*	ns
1	a	
2	ab	
3	b	

Se confirma la no existencia de la interacción entre cenizas x fertilizante, ya que el p-valor obtenido es  $> 0,05$  y por lo tanto, no se rechaza  $H_0$ .

Con respecto a los tratamientos, la aplicación de cenizas no muestra diferencias significativas para ninguna de las dos variables. Contrariamente la respuesta tanto en diámetro como en altura al agregado de fertilizante fue significativa, dándose un incremento en ambas variables con el agregado de 100 g/planta con respecto a los tratamientos no fertilizados. Los datos obtenidos con los diferentes tratamientos se presentan en el Cuadro No. 20.

Como se puede observar se aprecian diferencias significativas entre los bloques para el diámetro, encontrándose los mayores promedios en el bloque 1, y los menores en el bloque 3.



Cuadro No. 20. Prueba de Tukey para comparar las medias de altura y diámetro de cuello a los 20 cm de los árboles

Tratamiento		Diam a 20 cm	Altura (m)
No fertilizado	1 - testigo	2,40 b	1,64 b
	3 - 4 Mg ha <sup>-1</sup>	2,61 b	1,86 b
	5 - Mg ha <sup>-1</sup>	2,62 b	1,92 b
	Promedio	2,55	1,81
	CV (%)	4,8	8,1
Fertilizado	2 - testigo	3,85 a	2,82 a
	4 - 4 Mg ha <sup>-1</sup>	3,79 a	2,72 a
	5 - 8 Mg ha <sup>-1</sup>	3,75 a	2,84 a
	Promedio	3,80	2,80
	CV (%)	1,3	2,3

De acuerdo a Tukey se destaca claramente la importancia de la fertilización fosfatada para ambas variables dasométricas, los tratamientos que permiten obtener los mayores valores son los fertilizados, sin importar la dosis de ceniza aplicada, es decir que aquellos árboles que recibieron un aporte extra de nutrientes fueron beneficiados. Estos datos coinciden con ensayos realizados por Zamalvide y Ferrando (2010b), quienes estudiando la respuesta a la fertilización fosfatada en plantaciones de eucalipto, hallaron que existe una alta probabilidad de obtener una respuesta al agregado de fósforo en la etapa de instalación. Encontraron que los aumentos máximos en altura más frecuentes se dan en el rango del 10 al 20% con dosis de fertilización del orden de 50 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/planta. En este caso se encontró un aumento en altura de 48%, y en diámetro de 35%, tomando como base los promedios de los datos fertilizados.

Se observa que el agregado adicional de nutrientes con la fertilización aumenta la tasa de crecimiento en una proporción significativa, pese a esto no se observan diferencias en las concentraciones de los nutrientes en hoja (Cuadro No. 17). Es posible que junto con el incremento en el rendimiento ocurra un descenso de la concentración de nutrientes en el tejido, comportamiento conocido como dilución del nutriente, esto ocurre cuando la tasa de producción de materia seca es mayor que la velocidad de absorción o de transporte del elemento hacia el tejido foliar, causando su dilución. A medida que el crecimiento de una planta progresa, ocurren marcados cambios en la concentración de nutrientes en los tejidos o partes de la planta (Barbazán, 1998).

La respuesta de los cultivos al agregado de P, es generalmente máxima al principio de la estación, cuando la velocidad de crecimiento es alta y decrece gradualmente cuando se aproxima a la madurez. En ese momento la exploración radicular es escasa, la colonización de diferentes zonas del suelo de donde toma el P es reducida en plantas jóvenes (Hernández, 2008). Al desarrollar un sistema radicular vigoroso permite aprovechar por completo el potencial del sitio, mostrando una tasa de crecimiento superior, con una aceleración del cierre de copas disminuyendo los costos relacionados con el desmalezamiento. Los árboles requieren los mismos elementos para su crecimiento y reproducción que otras plantas superiores. Las deficiencias no son comunes en los árboles adultos esto se debe a su naturaleza conservadora de la recirculación de nutrientes, a los hábitos de arraigamiento profundo, así como la capacidad de las raíces micorríticas para extraer algunos nutrientes mínimamente disponibles de los suelos. Los niveles críticos de nutrientes para un adecuado crecimiento son bastante más elevados en la implantación que para el mantenimiento y desarrollo. Las raíces de la mayor parte de las plantas cultivadas y silvestres están infestadas de hongos micorríticos, sin las micorrizas la mayoría de los árboles no podrían sobrevivir por mucho tiempo contra la dinámica de las comunidades biológicas fuertemente competitivas que habitan en los suelos forestales. La elevada intensidad de luz y la baja a moderada fertilidad de los suelos ponen en relieve el desarrollo de micorrizas, en tanto en condiciones opuestas pueden reducir o impedir dicho desarrollo (Principi y Loza, 1998).

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

## 5. CONCLUSIONES

La composición química de la ceniza utilizada en el ensayo presentó una proporción mayor de Ca, siguiendo el K, Mg y Na, y muy bajos niveles de P, por lo que es de esperarse que tenga cierto poder de neutralización de la acidez al provenir de la quema de compuestos orgánicos, formándose óxidos e hidróxidos de Ca, Mg y K, y carbonatos de Ca, y además le aporte al suelo cationes para el crecimiento del cultivo. Físicamente se trata de una ceniza gruesa, con una granulometría de partículas del tamaño 2-3 cm, lo cual estuvo también asociado a una baja descomposición. Esto determinó una baja velocidad de reacción con el suelo, no observándose una respuesta muy clara en las propiedades químicas del mismo durante el tiempo que duró el ensayo.

A pesar de la limitante mencionada sobre la reacción que pudo ocurrir en el suelo, en el último muestreo (8 meses después de aplicada), se detectó un aumento en el pH tanto en agua como en KCl, hasta los 20 cm de suelo. Dicho aumento fue de 0,27 y 0,11 unidades promedio para agua y KCl respectivamente con la mayor dosis ( $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) comparando con el testigo. En concordancia con estos valores se detectó una disminución en el contenido de acidez intercambiable, siendo su contenido inicial en promedio de  $2,33 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , luego de 8 meses de acción de las cenizas este disminuyó a  $1,57 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

En cuanto a las bases de intercambio, el K presentó diferencias en el segundo muestreo (2 meses después de aplicada la ceniza) con un promedio más alto con la mayor dosis de ceniza. Si bien no se encontraron diferencias para los otros nutrientes para el caso del Ca muestra una tendencia a aumentar en los primeros estratos en el tercer muestreo. No se encontró efecto del agregado de ceniza sobre el fósforo disponible en el suelo (Bray No. 1).

Con respecto al contenido de nutrientes en hoja y a los parámetros dasométricos (altura y diámetro) de eucaliptos, no se observaron diferencias por el agregado de cenizas, sí hay un efecto de la fertilización fosfatada inicial que se vió reflejado en el aumento de los niveles de P en el tejido, y el promedio de estos parámetros. Dado que no se observó efecto de las cenizas sobre el P disponible y estas no aportan N, se considera necesario complementar el agregado de nutrientes con fertilizantes químicos, según sean las necesidades del cultivo. Los tratamientos sin fertilizar presentaron buen crecimiento de los árboles, ya que se trata de un cultivo que es poco exigente nutricionalmente y tolerantes a condiciones de acidez, como es el caso de la mayoría de los eucaliptos.

En cuanto al efecto global de las dosis de cenizas, en la mayoría de los casos los efectos más claros se dieron cuando se aplicaron  $8 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Se destaca la necesidad de caracterizar las cenizas a priori de ser incorporadas al suelo, ya que la composición es muy variable en función del tipo de material que es quemado en la caldera, y teniendo en cuenta además el tratamiento que se le da luego de retirada de la misma. El conocimiento de estos aspectos es el que permite plantear la posible dosis usar y el posible cambio en las propiedades químicas del suelo y su efecto como material encalador.

## 6. RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo principal cuantificar los efectos de la ceniza de madera en las propiedades químicas del suelo (pH, acidez intercambiable, bases de intercambio y P disponible), y su efecto como material encalador. Se realizó un experimento de campo en un Acrisol del departamento de Rivera, con tres niveles de ceniza incorporada al suelo con disquera (testigo, 4 y 8 Mg ha<sup>-1</sup> de ceniza fresca) y dos niveles de fertilización (0 y 100 g de 0-46-0 por planta), en un diseño factorial en bloques con tres repeticiones. Las cenizas provenían de la quema de biomasa forestal obtenidas de las calderas de la planta industrial de Weyerhaeuser (mezcla de pino y eucalipto), presentando el material una granulometría de partículas del tamaño 2-3 cm. Dos meses luego de la aplicación de la ceniza, se realizó una plantación de híbridos de eucaliptos (*E. grandis* x *E. camaldulensis*). Al momento de la plantación se realizó la fertilización de las parcelas correspondientes al agregado de fertilizante. Se realizaron tres muestreos de suelo: el muestreo 1 fue previo a la aplicación de cenizas (profundidades 0-20 y 20-40 cm), el muestreo 2 fue a los dos meses de la aplicación de las cenizas (solo de 0-20 cm) y el muestreo 3 a los ocho meses de aplicación de la ceniza (profundidades 0-20 y 20-40 cm). La caracterización de la ceniza mostró una mayor proporción de Ca, siguiéndole el K y en menor medida Mg y Na, y muy bajas proporciones de P. Se encontraron diferencias significativas en los niveles de pH del suelo en el muestreo 3 en el primer estrato y consecuentemente disminución de la acidez intercambiable. En cuanto a las bases de intercambio solo el K en el muestreo 2 mostró significancia. En el muestreo 3 se tomaron además datos dasométricos (altura y diámetro) y muestreo de hojas a los efectos de determinar el contenido de nutrientes en las mismas (bases, P y N). No existieron diferencias significativas entre las diferentes dosis de ceniza, mientras que los árboles que fueron fertilizados presentaron un promedio mayor de diámetro y altura. En cuanto a la concentración de nutrientes en el tejido, solo el P presentó diferencias significativas con una concentración mayor por la aplicación de fertilizante. Dado que el aporte de nutrientes como P y N realizado por la aplicación de ceniza fue escaso, se recomienda complementar la aplicación de cenizas con el agregado de fertilizante según sean las necesidades del cultivo.

Palabras clave: Rivera; Cenizas de madera; *E. grandis* x *E. camaldulensis*; Encalado; pH del suelo; Aluminio intercambiable; Bases de intercambio; Fósforo; Concentración nutrientes en hoja.

## 7. SUMMARY

The main objective of this work is to quantify the effects of wood ash on soil chemical properties (pH, exchangeable acidity, exchange bases and available P), and its effect as a lime material. A field experiment was carried out in an Acrisol in the department of Rivera, with three levels of ash incorporated into the soil with disquera (control, 4 and 8 Mg ha<sup>-1</sup> of fresh ash) and two levels of fertilization (0 and 100 g of 0-46-0 per plant), in a block factorial design with three replicates. The ashes came from the burning of forest biomass obtained from the boilers of the industrial plant of Weyerhaeuser (mixture of pine and eucalyptus), the material having a particle size of 2-3 cm. Two months after the application of the ash, a plantation of eucalyptus hybrids (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) was carried out. At the time of planting, fertilization of the plots corresponding to the fertilizer aggregate was performed. Three soil samples were taken: sampling 1 was prior to the application of ash (depths 0-20 and 20-40 cm), sampling 2 was two months after the application of ash (only 0-20 cm) and sampling 3 at eight months of application of the ash (depths 0-20 and 20-40 cm). Characterization of ash showed a higher proportion of Ca, followed by K and to a lesser extent Mg and Na, and very low proportions of P. Significant differences were found in soil pH levels at sampling 3 in the first stratum and consequently decrease of the exchangeable acidity. As for exchange bases only the K in sample 2 showed significance. Sampling 3 (bases, P and N) was used to determine the nutrient content in the samples (height and diameter). There were no significant differences between the different ash doses, while the trees that were fertilized presented a higher average diameter and height. As for the concentration of nutrients in the tissue, only the P presented significant differences with a higher concentration by the application of fertilizer. Since the contribution of nutrients such as P and N made by the application of ash was scarce, it is recommended to supplement the application of ash with the addition of fertilizer according to the needs of the crop.

Keywords: Rivera; Wood ash; *E. grandis* x *E. camaldulensis*; Liming; Soil pH; Exchangeable aluminum; Exchangeable bases; Phosphorus; Nutrient concentration in leaf.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio, J. 2001. Rendimiento y biomasa de *Eucalyptus nitens* con alternativas nutricionales para una silvicultura sustentable en un suelo rojo arcilloso. Tesis Magíster en Ciencias. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 170 p.
2. Arrarte, G.; Del Pino, A.; Hernández, J. 2010. Patrones de mineralización de la materia orgánica de un suelo bajo vegetación de eucalipto, pino y pastura. In: Jornadas de Actualización Técnica; 10 Años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 30-34.
3. Arruda, S. R.; Malavolta, E. 2001. Nutrição e adubação potássica em eucalyptus. (en línea). Informacoes Agronômicas. Encarte Técnico. 91:1-10. Consultado 25 jul. 2016. Disponible en <http://www.rragroflorestal.com.br/documents/108.pdf>
4. Augusto, L.; Bakker, M. R.; Meredieu, C. 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems-potential benefits and drawbacks. *Plant and Soil*. 306(1-2): 181-198.
5. Barbazán, M. 1998. Análisis de las plantas y síntomas visuales de deficiencias de nutrientes. Montevideo, Facultad de Agronomía. 27 p.
6. Barnihisel, R.; Bertsch, P. M. 1982. Aluminum. In: Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeney, D. R. eds. *Methods of soil analysis*. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pp. 283-288.
7. Bennadji, Z. 2001. Principales características ecológicas de la región sobre areniscas de Tacuarembó y Rivera. In: Seminario de Actualización en Tecnologías Forestales para Areniscas de Tacuarembó y Rivera (1º., 2001, Tacuarembó). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp.13-25 (Serie Técnica no.123).
8. Boardman, R.; Cromer, R. N.; Lambert, M. J.; Webb, M. J. 1997. Forest plantations. In: Reuter, D. J.; Robinson, J. B. eds. *Plant analysis, an interpretation manual*. 2<sup>nd</sup>. ed. Collingwood, CSIRO. pp. 505-561.
9. Bonilla, I. 2008. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In: Azcón-Bieto, J.; Talón, M. eds. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Barcelona, España, Mc Graw-Hill. pp. 103-121.

10. Bordoli, J. M.; Casanova, O. N. 2004. Encalado de soja en el NE de Uruguay. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (19º.), Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos (2º., 2004, Paraná, Entre Ríos, AR). Trabajos presentados. Buenos Aires, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 1 disco compacto.
11. Bossi, J.; Navarro, R. 1988. Geología del Uruguay. Montevideo, Universidad de la República. pp. 463-966.
12. \_\_\_\_\_.; Ferrando, L.; Montaña, J.; Campal, N.; Morales, H.; Gancio, F.; Schipilov, A.; Piñeyro, D.; Sprechman, P.; Campal, E. 1998. Geocarta; carta geológica del Uruguay. Montevideo, Geo Editores. Escala. 1:500.000. Color. 1 disco compacto.
13. Bray, R. H.; Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59(1): 39-46.
14. Bremner, J. M.; Mulvaney, C. S. 1982. Nitrogen-total. In: Page, A. L.; Miller, R. H.; Keeney, D. R. eds. *Methods of soil analysis*. 2<sup>nd</sup>. ed. Madison, WI, ASA/SSSA. pp. 595-624.
15. Califra, A.; Durán, A. 2010. Suelos de aptitud forestal: criterios para selección, área de distribución, características morfológicas, físicas y químicas. In: Jornadas de Actualización Técnica; 10 años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-5.
16. Casanova, O. 2008. Acidez y encalado en suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía. 17 p.
17. Chirenje, T.; Ma, L. Q. 1999. Effects of acidification on metal mobility in a papermill-ash amended soil. *Journal of Environmental Quality*. 28(3): 760-766.
18. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2002. Impact of high-volume wood-fired boiler ash amendment on soil properties and nutrients. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33(1-2): 1-17.
19. Conti, M. 2000. Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos. 2a. ed. Montevideo, Facultad de Agronomía. 430 p.
20. Crucci, M. 2007. Evaluación de DRIS y nivel crítico en el diagnóstico nutricional de *Eucalyptus grandis*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 60 p.



21. Del Pino, A.; Hernández, J.; Arrate, G. 2010. Descomposición de residuos de *Pinus taeda* en Uruguay. *In*: Jornadas de Actualización Técnica; 10 Años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 25-29.
22. \_\_\_\_\_. 2011. Nutrición catiónica. Montevideo, Facultad de Agronomía. 30 p.
23. Demeyer, A.; Nkana, J. V.; Verloo, M. G. 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake; an overview. *Bioresource Technology*. 77(3): 287-295.
24. Google Earth. 2016. Imágen satelital de Paso de Gaire. (en línea). s.l. Consultado 22 mar. 2015. Disponible en <http://www.googleEarth.com>
25. Gullón, F. S.; Merino, A.; Soalleiro, R. R. 2001. Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. *Investigación agraria. Producción y Protección Vegetales*. 16(3): 379-393.
26. \_\_\_\_\_.; Santalla, M.; Pérez-Cruzado, C.; Merino, A.; Rodríguez-Soalleiro, R. 2008. Response of *Pinus radiata* seedlings to application of mixed wood-bark ash at planting in a temperate region; nutrition and growth. *Forest ecology and Management*. 255(11): 3873-3884.
27. Hernández, J.; Zamalvide, J. P. 1998. Procesos de retención de fósforo por los suelos evaluados a través de parámetros de suelo y planta. *Agrociencia (Montevideo)*. 2(1): 48-63.
28. \_\_\_\_\_. 2008. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 85 p.
29. \_\_\_\_\_. 2010. Evolución de parámetros químicos de suelo bajo forestación; acidez, bases, materia orgánica. *In*: Jornadas de Actualización Técnica; 10 Años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 16-19.
30. \_\_\_\_\_.; del Pino, A; Vázquez, N; Aguerre, I; Arguibao, N; Demarco, L. 2012. Use of dolomite in *Eucalyptus* sp. Reforestations to revert soil acidification, and increase calcium and magnesium availability. *In*: ISTRO Conference (19th.), SUCS Meeting (4<sup>th</sup>., 2012, Montevideo).

Striving for sustainable high productivity. Montevideo, ISTRO. 1 disco compacto.

31. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agroclima y Sistemas de Información, UY). s.f. Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 28 jul. 2016. Disponible en [http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara\\_agro/index.html](http://www.inia.org.uy/gras/agroclima/cara_agro/index.html)
32. Isaac, R. A.; Kerber, J. D. 1971. Atomic absorption and flame photometry; techniques and uses in soil, plant and water analysis. *In*: Walsh, L. M. ed. Instrumental methods for analysis of soil and plant tissues. Madison, WI, SSSA. pp. 17-37.
33. Knapp, B.; Insam, H. 2011. Recycling of biomass ashes; current technologies and future research needs. *In*: Knapp, B.; Insam, H. eds. Recycling of biomass ashes. Berlin, Springer. pp. 1-16.
34. MGAP. RENARE (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales Renovables. División Suelos y Aguas, UY). s.f. Descripción de grupos de suelos CO.N.E.A.T. (en línea). Montevideo. 62 p. Consultado 29 jul. 2013. Disponible en <http://www.cebra.com.uy/renare/media/Descripci%C3%B3n-de-Grupos-de-Suelos-CONEAT-1.pdf>
35. Montgomery, D. 2010. Diseño y análisis de experimentos. 2ª. ed. México, Limusa. 686 p.
36. Murphy, J.; Riley, J. P. 1962. A modified single solution methods for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*. 27: 31-36.
37. Naylor, L.; Schmidt, E. 1986. Agricultural use of wood ash as a fertilizer and liming material. *Tappi Journal*. 69(10):114-119.
38. Ohno, T. 1992. Neutralization of soil acidity and release of phosphorus and potassium by wood ash. *Journal of Environmental Quality*. 21(3): 433-438.
39. Ozolincius, R.; Varnagiryte, I. 2005. Effects of wood ash application on heavy metal concentrations in soil, soil solution and vegetation in a Lithuanian Scots pine stand. *Metsanduslikud uurimused*. 42: 66-73.

40. Perdomo, C.; Crucci, M. 2010. Descomposición Respuesta de plantaciones de Eucaliptus a la fertilización nitrogenada. *In*: Jornadas de Actualización Técnica; 10 Años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 48-54
41. Pitman, R. M. 2006. Wood ash use in forestry-a review of the environmental impacts. *Forestry*. 79(5): 563-588.
42. Principi, H.; Loza, G. 1998. Respuesta de *Eucalyptus grandis* y *Eucllyptus globulus ssp. maidenii* a la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en suelos de Durazno, Paysandú y Rivera. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 78 p.
43. Sartori, F.; Lal, R.; Ebinger, M.; Miller, R. 2007. Tree species and wood ash affect soil in Michigan's Upper Peninsula. *Plant and Soil*. 298 (1-2): 125-144.
44. SPF (Sociedad de Productores Forestales del Uruguay, UY). 2011. El sector forestal en el Uruguay. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 12 ene. 2016. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~forestal/Archivos/Sector%20Forestal%20Uruguay%20marzo%202011.pdf>
45. Thornton, F.; Bock, B.; Behel, A.; Houston, A.; Tyler, D. 2000. Utilization of waste materials to promote hardwood tree growth. *Southern Journal of Applied Forestry*. 24 (4): 230-237.
46. Uruguay XXI. 2013. Promoción de inversiones y exportaciones. Sector Forestal. Oportunidades de inversión en Uruguay. (en línea). Montevideo. 38 p. Consultado 16 jun. 2015. Disponible en <http://www.uruguayxxi.gub.uy/inversiones/wp-content/uploads/sites/3/2016/01/Sector-Forestal-2015-Uruguay-XXI.doc.pdf>
47. Vance, E. D. 1996. Land application of wood-fired and combination boiler ashes; an overview. *Journal of Environmental Quality*. 25 (5): 937-944.
48. \_\_\_\_\_; Mitchell, C. 2000. Beneficial use of wood ash as an agricultural soil amendment; case studies from the United States forest products industry. *In*: Power, J. F.; Dick, W. A.; Kashmanian, R. M.; Sims, J. T.; Wright, R. J.; Dawson, M. D.; Bezdicek, D. eds. Land application of

agricultural, industrial, and municipal by-products. Madison, WI, SSSA. pp. 567-582 (SSSA Book Series no. 6).

49. Van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirement determinations. In: Westernam, R. L. ed. Soil testing and plant analysis. Madison, WI, SSSA. pp. 73-126 (SSSA Book Series no. 3).
50. Walkley, A.; Black, T. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1):29-38.
51. Weyerhaeuser Productos, UY. 2011. Proyecto; planta de generación de energía eléctrica a partir de residuos forestales. (en línea). Montevideo. 31 p. Consultado 14 feb. 2016. Disponible en [www.mvotma.gub.uy/bioseguridad/.../246\\_33a7a2495759731b7a86e27886491fae.ht](http://www.mvotma.gub.uy/bioseguridad/.../246_33a7a2495759731b7a86e27886491fae.ht)
52. Zamalvide, J.; Ferrando, M. 2010a. Algunas consideraciones generales en relación al tema fertilización de Eucalyptus. In: Jornadas de Actualización Técnica; 10 Años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 38-47.
53. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. 2010b. Respuesta a la fertilización fosfatada en la fertilización de eucaliptos. In: Jornadas de Actualización Técnica; 10 Años de Investigación en Producción Forestal (2010, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 43-47.

## 9. ANEXOS

### DATOS PRELIMINARES

Muestra	Profundidad	Ca	Mg	K	Na
Gaire 1	0-20	0,67	0,28	0,16	0,26
Gaire 1	20-40	0,62	0,23	0,16	0,25
Gaire 2	0-20	0,74	0,33	0,11	0,26
Gaire 2	20-40	0,61	0,2	0,1	0,27
Gaire 2	Bt	1,77	0,78	0,44	0,23
Gaire 3	0-20	0,79	0,3	0,16	0,22
Gaire 3	20-40	0,94	0,39	0,1	0,18
Gaire 3	Bt2	2,24	0,95	0,13	0,28

### DATOS COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SUELO

Datos niveles de pH en los tres muestreos

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 1*		Dosis cenizas
			pH Agua	pH KCl	
1	BI	0-20	4,5	3,8	4 ton.
1	BI	20-40	4,4	3,8	4 ton.
2	BI	0-20	4,4	3,76	8 ton.
2	BI	20-40	4,43	3,74	8 ton.
3	BI	0-20	4,6	3,84	testigo
3	BI	20-40	4,6	3,86	testigo
4	BI	0-20	4,4	3,7	8 ton.
4	BI	20-40	4,37	3,68	8 ton.
5	BI	0-20	4,3	3,7	4 ton.
5	BI	20-40	4,3	3,71	4 ton.
6	BI	0-20	4,3	3,69	testigo
6	BI	20-40	4,3	3,67	testigo
1	BII	0-20	4,28	3,61	4 ton.
1	BII	20-40	4,2	3,61	4 ton.
2	BII	0-20	4,3	3,61	8 ton.
2	BII	20-40	4,4	3,64	8 ton.
3	BII	0-20	4,2	3,61	testigo
3	BII	20-40	4,2	3,65	testigo

4	BII	0-20	4,4	3,58	testigo
4	BII	20-40	4,2	3,64	testigo
5	BII	0-20	4,37	3,68	8 ton.
5	BII	20-40	4,35	3,67	8 ton.
6	BII	0-20	4,37	3,69	4 ton.
6	BII	20-40	4,38	3,68	4 ton.
1	BIII	0-20	4,3	3,62	8 ton.
1	BIII	20-40	4,28	3,63	8 ton.
2	BIII	0-20	4,36	3,62	testigo
2	BIII	20-40	4,37	3,63	testigo
3	BIII	0-20	4,38	3,66	8 ton.
3	BIII	20-40	4,32	3,66	8 ton.
4	BIII	0-20	4,24	3,63	testigo
4	BIII	20-40	4,29	3,63	testigo
5	BIII	0-20	4,23	3,64	4 ton.
5	BIII	20-40	4,3	3,68	4 ton.
6	BIII	0-20	4,3	3,65	4 ton.
6	BIII	20-40	4,28	3,62	4 ton.

\*Previo a la aplicación de cenizas

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 2		Dosis cenizas
			pH Agua	pH KCl	
1	BI	0-20	4,4	3,7	4 ton.
2	BI	0-20	4,33	3,8	8 ton.
3	BI	0-20	4,39	3,83	testigo
4	BI	0-20	4,33	3,71	8 ton.
5	BI	0-20	4,2	3,67	4 ton.
6	BI	0-20	4,3	3,71	testigo
1	BII	0-20	5,16	3,88	4 ton.
2	BII	0-20	4,47	3,81	8 ton.
3	BII	0-20	4,16	3,61	testigo
4	BII	0-20	4,14	3,6	testigo
5	BII	0-20	4,35	3,74	8 ton.
6	BII	0-20	4,24	3,71	4 ton.
1	BIII	0-20	4,3	3,7	8 ton.
2	BIII	0-20	4,25	3,66	testigo
3	BIII	0-20	4,47	3,73	8 ton.

4	BIII	0-20	4,18	3,62	testigo
5	BIII	0-20	4,21	3,64	4 ton.
6	BIII	0-20	4,29	3,65	4 ton.

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 3		Dosis cenizas
			pH Agua	pH KCl	
1	BI	0-20	4,9	4,02	4 ton.
1	BI	20-40	4,8	3,99	4 ton.
2	BI	0-20	4,81	3,97	8 ton.
2	BI	20-40	4,73	3,9	8 ton.
3	BI	0-20	4,54	3,87	testigo
3	BI	20-40	4,51	3,96	testigo
4	BI	0-20	4,74	3,89	8 ton.
4	BI	20-40	4,58	3,86	8 ton.
5	BI	0-20	4,53	3,86	4 ton.
5	BI	20-40	4,45	3,85	4 ton.
6	BI	0-20	4,4	3,78	testigo
6	BI	20-40	4,41	3,85	testigo
1	BII	0-20	4,38	3,76	4 ton.
1	BII	20-40	4,33	3,81	4 ton.
2	BII	0-20	4,56	3,86	8 ton.
2	BII	20-40	4,44	3,81	8 ton.
3	BII	0-20	4,33	3,78	testigo
3	BII	20-40	4,34	3,85	testigo
4	BII	0-20	4,29	3,76	testigo
4	BII	20-40	4,3	3,84	testigo
5	BII	0-20	4,69	3,92	8 ton.
5	BII	20-40	4,45	3,89	8 ton.
6	BII	0-20	4,49	3,91	4 ton.
6	BII	20-40	4,42	3,88	4 ton.
1	BIII	0-20	4,55	3,89	8 ton.
1	BIII	20-40	4,41	3,83	8 ton.
2	BIII	0-20	4,45	3,85	testigo
2	BIII	20-40	4,41	3,83	testigo
3	BIII	0-20	4,55	3,92	8 ton.
3	BIII	20-40	4,42	3,84	8 ton.
4	BIII	0-20	4,28	3,78	testigo

4	BIII	20-40	4,36	3,85	testigo
5	BIII	0-20	4,48	3,88	4 ton.
5	BIII	20-40	4,44	3,89	4 ton.
6	BIII	0-20	4,47	3,83	4 ton.
6	BIII	20-40	4,45	3,85	4 ton.

Datos niveles de Al intercambiable en los tres muestreos (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>)

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 1*	Muestreo 2	Muestreo 3	Dosis cenizas
1	BI	0-20	1,02	1,032	0,687	4 ton.
5	BI	0-20	1,44	1,512	1,005	4 ton.
2	BI	0-20	0,92	0,862	0,642	8 ton.
4	BI	0-20	2,08	1,818	1,456	8 ton.
3	BI	0-20	0,66	0,704	0,706	testigo
6	BI	0-20	1,69	1,555	1,512	testigo
1	BI	20-40	1,40		1,199	4 ton.
5	BI	20-40	2,13		1,793	4 ton.
2	BI	20-40	0,79		0,979	8 ton.
4	BI	20-40	2,90		2,594	8 ton.
3	BI	20-40	2,04		0,886	testigo
6	BI	20-40	2,24		2,119	testigo
1	BII	0-20	1,76	1,584	1,820	4 ton.
6	BII	0-20	2,06	2,087	1,729	4 ton.
2	BII	0-20	1,72	1,283	1,387	8 ton.
5	BII	0-20	2,01	1,976	1,236	8 ton.
3	BII	0-20	1,87	2,058	1,822	testigo
4	BII	0-20	2,28	2,881	2,562	testigo
1	BII	20-40	2,20		2,170	4 ton.
6	BII	20-40	2,40		2,456	4 ton.
2	BII	20-40	1,69		1,907	8 ton.
5	BII	20-40	2,48		2,698	8 ton.
3	BII	20-40	2,23		2,337	testigo
4	BII	20-40	2,83		2,867	testigo
5	BIII	0-20	2,25	2,773	2,019	4 ton.
6	BIII	0-20	1,83	2,010	1,615	4 ton.



1	BIII	0-20	2,63	2,730	1,838	8 ton.
3	BIII	0-20	2,12	2,001	1,512	8 ton.
2	BIII	0-20	2,52	2,673	2,202	testigo
4	BIII	0-20	2,47	2,585	2,483	testigo
5	BIII	20-40	2,74		2,716	4 ton.
6	BIII	20-40	2,61		2,416	4 ton.
1	BIII	20-40	3,30		3,278	8 ton.
3	BIII	20-40	2,71		3,053	8 ton.
2	BIII	20-40	3,28		3,056	testigo
4	BIII	20-40	3,11		3,406	testigo

\*Previo a la aplicación de cenizas

Datos niveles de bases de intercambio en los tres muestreos ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 1*				Dosis cenizas
			Ca	Mg	K	Na	
1	BI	0-20	0,67	0,24	0,14	0,31	4 ton.
1	BI	20-40	0,79	0,41	0,16	0,28	4 ton.
2	BI	0-20	0,51	0,23	0,14	0,26	8 ton.
2	BI	20-40	0,53	0,31	0,15	0,24	8 ton.
3	BI	0-20	0,61	0,22	0,17	0,32	testigo
3	BI	20-40	0,64	0,32	0,13	0,3	testigo
4	BI	0-20	0,74	0,47	0,22	0,27	8 ton.
4	BI	20-40	0,77	0,46	0,23	0,29	8 ton.
5	BI	0-20	0,63	0,31	0,19	0,2	4 ton.
5	BI	20-40	0,56	0,33	0,18	0,2	4 ton.
6	BI	0-20	0,72	0,32	0,18	0,15	testigo
6	BI	20-40	0,68	0,29	0,16	0,19	testigo
1	BII	0-20	0,58	0,27	0,24	0,23	4 ton.
1	BII	20-40	0,51	0,28	0,19	0,32	4 ton.
2	BII	0-20	0,84	0,34	0,16	0,3	8 ton.
2	BII	20-40	0,67	0,27	0,12	0,26	8 ton.
3	BII	0-20	0,74	0,28	0,16	0,48	testigo
3	BII	20-40	0,45	0,25	0,15	0,27	testigo
4	BII	0-20	0,63	0,26	0,16	0,3	testigo
4	BII	20-40	0,47	0,24	0,17	0,34	testigo
5	BII	0-20	0,65	0,31	0,12	0,27	8 ton.
5	BII	20-40	0,76	0,34	0,12	0,58	8 ton.

6	BII	0-20	0,67	0,34	0,14	0,26	4 ton.
6	BII	20-40	0,6	0,29	0,11	0,26	4 ton.
1	BIII	0-20	0,7	0,43	0,21	0,25	8 ton.
1	BIII	20-40	0,86	0,53	0,22	0,08	8 ton.
2	BIII	0-20	0,9	0,43	0,21	0,53	testigo
2	BIII	20-40	0,94	0,54	0,2	0,28	testigo
3	BIII	0-20	0,66	0,36	0,15	0,17	8 ton.
3	BIII	20-40	0,51	0,29	0,12	0,24	8 ton.
4	BIII	0-20	0,55	0,32	0,19	0,27	testigo
4	BIII	20-40	0,48	0,3	0,13	0,24	testigo
5	BIII	0-20	0,64	0,3	0,22	0,34	4 ton.
5	BIII	20-40	0,57	0,28	0,17	0,29	4 ton.
6	BIII	0-20	0,63	0,32	0,17	0,06	4 ton.
6	BIII	20-40	0,84	0,41	0,18	0,56	4 ton.

\*Previo a la aplicación de cenizas

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 2				Dosis ceniza
			Ca	Mg	K	Na	
1	BI	0-20	0,84	0,27	0,17	0,29	4 ton.
2	BI	0-20	0,68	0,2	0,16	0,27	8 ton.
3	BI	0-20	0,88	0,26	0,16	0,25	testigo
4	BI	0-20	0,9	0,47	0,24	0,3	8 ton.
5	BI	0-20	0,66	0,23	0,17	0,23	4 ton.
6	BI	0-20	0,62	0,24	0,17	0,27	testigo
1	BII	0-20	0,75	0,29	0,22	0,3	4 ton.
2	BII	0-20	1,37	0,44	0,23	0,29	8 ton.
3	BII	0-20	0,87	0,32	0,18	0,21	testigo
4	BII	0-20	0,75	0,28	0,17	0,23	testigo
5	BII	0-20	1,15	0,43	0,26	0,54	8 ton.
6	BII	0-20	0,87	0,37	0,18	0,25	4 ton.
1	BIII	0-20	1,07	0,47	0,28	0,53	8 ton.
2	BIII	0-20	1	0,47	0,22	0,26	testigo
3	BIII	0-20	0,96	0,38	0,24	0,33	8 ton.
4	BIII	0-20	0,82	0,37	0,19	0,46	testigo
5	BIII	0-20	0,89	0,36	0,24	0,51	4 ton.
6	BIII	0-20	1,03	0,4	0,25	0,29	4 ton.

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 3				Dosis ceniza
			Ca	Mg	K	Na	
1	BI	0-20	0,56	0,21	0,18	0,28	4 ton.
1	BI	20-40	0,59	0,18	0,15	0,22	4 ton.
2	BI	0-20	0,46	0,17	0,18	0,27	8 ton.
2	BI	20-40	0,63	0,22	0,19	0,26	8 ton.
3	BI	0-20	0,5	0,2	0,16	0,3	testigo
3	BI	20-40	1,2	0,41	0,23	0,31	testigo
4	BI	0-20	0,8	0,27	0,16	0,27	8 ton.
4	BI	20-40	0,67	0,22	0,17	0,29	8 ton.
5	BI	0-20	0,45	0,17	0,15	0,3	4 ton.
5	BI	20-40	0,94	0,25	0,18	0,29	4 ton.
6	BI	0-20	0,7	0,2	0,15	0,12	testigo
6	BI	20-40	0,6	0,19	0,22	0,25	testigo
1	BII	0-20	0,64	0,22	0,2	0,28	4 ton.
1	BII	20-40	0,6	0,16	0,17	0,27	4 ton.
2	BII	0-20	0,65	0,18	0,17	0,27	8 ton.
2	BII	20-40	1,24	0,52	0,35	0,3	8 ton.
3	BII	0-20	0,97	0,51	0,26	0,31	testigo
3	BII	20-40	0,95	0,28	0,2	0,3	testigo
4	BII	0-20	0,68	0,22	0,16	0,25	testigo
4	BII	20-40	0,5	0,19	0,15	0,24	testigo
5	BII	0-20	1,44	0,42	0,28	0,69	8 ton.
5	BII	20-40	0,75	0,27	0,16	0,3	8 ton.
6	BII	0-20	0,84	0,31	0,18	0,35	4 ton.
6	BII	20-40	0,79	0,29	0,15	0,79	4 ton.
1	BIII	0-20	1,24	0,44	0,26	0,3	8 ton.
1	BIII	20-40	0,79	0,38	0,2	0,32	8 ton.
2	BIII	0-20	1,14	0,42	0,25	0,6	testigo
2	BIII	20-40	0,93	0,4	0,2	0,61	testigo
3	BIII	0-20	0,95	0,31	0,2	0,29	8 ton.
3	BIII	20-40	0,57	0,26	0,17	0,29	8 ton.
4	BIII	0-20	0,69	0,24	0,17	0,37	testigo
4	BIII	20-40	0,52	0,25	0,15	0,28	testigo

5	BIII	0-20	0,67	0,25	0,18	0,28	4 ton.
5	BIII	20-40	0,64	0,25	0,2	0,69	4 ton.
6	BIII	0-20	0,68	0,26	0,19	0,34	4 ton.
6	BIII	20-40	0,72	0,29	0,2	0,31	4 ton.

Datos niveles de P Bray (ppm)

Parcela	Bloque	Profun.	Muestreo 1*	Muestreo 2	Muestreo 3	Dosis cenizas
1	BI	0-20	8,9	8,5	7,3	4 ton.
1	BI	20-40	9,3		3,8	4 ton.
2	BI	0-20	8,1	7,7	5,9	8 ton.
2	BI	20-40	7,0		4,1	8 ton.
3	BI	0-20	7,3	6,6	7,0	testigo
3	BI	20-40	8,1		s/d	testigo
4	BI	0-20	9,7	8,9	7,7	8 ton.
4	BI	20-40	9,7		5,5	8 ton.
5	BI	0-20	8,1	9,3	9,7	4 ton.
5	BI	20-40	5,9		6,2	4 ton.
6	BI	0-20	7,0	7,7	5,1	testigo
6	BI	20-40	4,8		4,8	testigo
1	BII	0-20	5,5	s/d	8,5	4 ton.
1	BII	20-40	5,1		4,8	4 ton.
2	BII	0-20	6,2	12,2	7,0	8 ton.
2	BII	20-40	4,8		5,1	8 ton.
3	BII	0-20	7,7	8,1	8,1	testigo
3	BII	20-40	7,0		4,5	testigo
4	BII	0-20	10,9	10,1	7,0	testigo
4	BII	20-40	10,9		5,5	testigo
5	BII	0-20	8,5	7,3	9,7	8 ton.
5	BII	20-40	8,9		4,1	8 ton.
6	BII	0-20	9,7	7,3	7,3	4 ton.
6	BII	20-40	8,9		4,1	4 ton.
1	BIII	0-20	8,5	7,0	9,7	8 ton.
1	BIII	20-40	9,3		6,6	8 ton.
2	BIII	0-20	13,6	8,1	4,8	testigo
2	BIII	20-40	8,1		3,4	testigo
3	BIII	0-20	9,7	7,7	6,2	8 ton.
3	BIII	20-40	9,3		5,1	8 ton.
4	BIII	0-20	11,4	7,7	4,1	testigo

4	BIII	20-40	10,5		5,5	testigo
5	BIII	0-20	9,7	9,7	6,6	4 ton.
5	BIII	20-40	8,9		1,8	4 ton.
6	BIII	0-20	8,5	9,7	4,1	4 ton.
6	BIII	20-40	10,5		3,4	4 ton.

\*Previo a la aplicación de cenizas

## DATOS DASOMÉTRICOS Y CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN HOJA

Parcela	Bloque	Diámetro a los 20 cm	Altura	Tratamiento	
		Prom./parcela	Prom./parcela	Dosis ceniza	Fertilización
1	BI	2,89	2,13	4 t/ha	no
2	BI	3,21	2,32	8 t/ha	no
3	BI	2,56	1,72	testigo	no
4	BI	3,93	3,00	8 t/ha	si
5	BI	4,03	2,73	4 t/ha	si
6	BI	3,82	2,81	testigo	si
1	BII	3,91	2,90	4 t/ha	si
2	BII	2,63	1,99	8 t/ha	no
3	BII	2,37	1,65	testigo	no
4	BII	4,04	2,95	testigo	si
5	BII	3,57	2,60	8 t/ha	si
6	BII	2,35	1,61	4 t/ha	no
1	BIII	3,75	2,94	8 t/ha	si
2	BIII	2,28	1,55	testigo	no
3	BIII	2,02	1,45	8 t/ha	no
4	BIII	3,68	2,71	testigo	si
5	BIII	2,60	1,85	4 t/ha	no
6	BIII	3,44	2,54	4 t/ha	si

Contenido de N en hoja (g/Kg)

Parcela	Bloque	N	Tratamiento	
			Dosis	Fertilizado
1	BI	1,94	4 t/ha	no
2	BI	2,34	8 t/ha	no

3	BI	2,17	testigo	no
4	BI	2,14	8 t/ha	si
5	BI	2,78	4 t/ha	si
6	BI	2,43	testigo	si
1	BII	1,82	4 t/ha	si
2	BII	1,88	8 t/ha	no
3	BII	2,14	testigo	no
4	BII	1,68	testigo	si
5	BII	1,88	8 t/ha	si
6	BII	1,88	4 t/ha	no
1	BIII	1,68	8 t/ha	si
2	BIII	1,74	testigo	no
3	BIII	1,79	8 t/ha	no
4	BIII	1,88	testigo	si
5	BIII	1,79	4 t/ha	no
6	BIII	2,02	4 t/ha	si

Datos contenidos de bases (Ca, Mg, K y Na) en hoja (g/Kg)

Parcela	Bloque	Ca	Mg	K	Na	Tratamiento	
						Dosis	Fertilizado
1	BI	0,56	0,16	0,72	0,03	4 t/ha	no
2	BI	0,61	0,18	0,71	0,03	8 t/ha	no
3	BI	0,59	0,19	0,62	0,02	testigo	no
4	BI	0,56	0,17	0,71	0,03	8 t/ha	si
5	BI	0,57	0,14	0,77	0,02	4 t/ha	si
6	BI	0,61	0,17	0,69	0,04	testigo	si
1	BII	0,75	0,16	0,65	0,04	4 t/ha	si
2	BII	0,72	0,16	0,72	0,04	8 t/ha	no
3	BII	0,7	0,17	0,75	0,04	testigo	no
4	BII	0,71	0,19	0,58	0,06	testigo	si
5	BII	0,73	0,22	0,64	0,07	8 t/ha	si
6	BII	0,76	0,21	0,58	0,08	4 t/ha	no
1	BIII	0,78	0,2	0,68	0,04	8 t/ha	si
2	BIII	0,71	0,19	0,61	0,03	testigo	no
3	BIII	0,76	0,19	0,75	0,04	8 t/ha	no
4	BIII	0,82	0,2	0,63	0,04	testigo	si
5	BIII	0,76	0,18	0,73	0,05	4 t/ha	no

6	BIII	0,67	0,2	0,59	0,05	4 t/ha	si
---	------	------	-----	------	------	--------	----

Contenido de P en hoja (%)

Parcela	Bloque	P	Tratamiento	
			Dosis cenizas	Fertilización
1	BI	0,09	4 t/ha	no
2	BI	0,1	8 t/ha	no
3	BI	0,09	testigo	no
4	BI	0,1	8 t/ha	si
5	BI	0,1	4 t/ha	si
6	BI	0,1	testigo	si
1	BII	0,11	4 t/ha	si
2	BII	0,1	8 t/ha	no
3	BII	0,09	testigo	no
4	BII	0,1	testigo	si
5	BII	0,09	8 t/ha	si
6	BII	0,07	4 t/ha	no
1	BIII	0,09	8 t/ha	si
2	BIII	0,08	testigo	no
3	BIII	0,07	8 t/ha	no
4	BIII	0,11	testigo	si
5	BIII	0,09	4 t/ha	no
6	BIII	0,09	4 t/ha	si