

**Proyecto:**  
**MEJORES PRÁCTICAS DE MANEJO DE SUELOS EN  
PLANTACIONES Y REPLANTACIONES DE EUCALIPTO Y  
PINO**  
**Informe Final**

**Financiación:**  
Cambium, Forestal Oriental, Montes del Plata, Weyerhaeuser S.A.,  
Sierras Calmas, UdelaR

**Equipo de trabajo:**  
Jorge Hernández, Amabelia del Pino, Mario Pérez Bidegain, Leticia  
Martínez, Álvaro Califra  
Ayudantes: Nicolás Vázquez, Gimena Arrarte, Virginia Takata, Alan  
Yusim, Noelia Arguibao  
Tesisistas de Grado: Marcos Lorenzo, Marcelo Hiita, Luciana Demarco,  
Inés Aguerre, Fabián del Giorgio  
Tesisistas de Posgrado: Pablo González, Nicolás Blanco,  
  
Alejandro González

**Dpto. Suelos y Aguas  
Facultad de Agronomía**

**Setiembre 2013**

RESUMEN DE LA PROPUESTA .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
Fundamentación y antecedentes. ....	2
Descripción del problema a ser abordado y relevancia del mismo para la contraparte en la producción. ....	4
Objetivos generales y específicos. ....	5
OBJETIVO ESPECÍFICO 1: Acelerar el proceso de restitución de nutrientes al suelo a partir de los restos de la cosecha forestal, y el eventual uso de enmiendas, mejorando su distribución en sentido horizontal y vertical. ....	6
Objetivo 1a) Manejo de restos de cosecha .....	6
Introducción.....	6
Materiales y métodos .....	6
Resultados y Discusión .....	15
Conclusiones.....	33
Formación de Recursos Humanos .....	34
1b) Encalado de suelos .....	34
Introducción.....	34
Materiales y Métodos .....	34
Resultados y Discusión .....	37
Conclusiones.....	47
OBJETIVO ESPECÍFICO 2. Estudiar el efecto de distintos sistemas de laboreo en suelos recientemente incorporados a la forestación y en replantaciones de sitios cosechados. ....	48
Introducción.....	48
Materiales y Métodos .....	48
Resultados y discusión.....	50
Conclusiones.....	53
Formación de Recursos Humanos .....	53
OBJETIVO ESPECÍFICO 3. Monitoreo del contenido de agua en el suelo y ajuste y validación del modelo de escurrimiento y erosión WEPP en sistemas forestales.....	53
3a) Evolución del contenido de agua en el suelo .....	53
Introducción.....	53
Materiales y Métodos .....	53
Resultados y Discusión .....	54
Conclusiones.....	60
3b) Monitoreo del contenido de agua en el suelo para el ajuste y validación del modelo de escurrimiento y erosión WEPP en sistemas forestales. ....	61
Introducción.....	61
Materiales y Métodos .....	61
Resultados y discusión.....	61
Conclusiones.....	64
Formación de Recursos Humanos .....	64
OBJETIVO ESPECÍFICO 4. Cuantificar los cambios en los contenidos de carbono orgánico del suelo por efecto del cambio de uso de pastoril/agrícola a forestal. ....	64
Objetivo 4a) Estudio de variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico y otras propiedades de suelo bajo manejo pastoril y forestal: pH, bases y acidez intercambiable.....	64
Introducción.....	64
Materiales y Métodos .....	64
Resultados y Discusión .....	65
Conclusiones.....	69
Objetivo 4b) Evaluación de cambios en contenidos y distribución de carbono en el suelo bajo forestación por efecto del cambio de uso de pastoril a forestal.....	70
Introducción.....	70
Materiales y Métodos .....	70
Resultados y discusión.....	71
Conclusiones.....	74
Formación de recursos humanos .....	74

## RESUMEN DE LA PROPUESTA

Desde el año 2001 se vienen realizando investigaciones tendientes a evaluar los cambios en propiedades químicas, físicas y biológicas de suelo afectados por la forestación con eucalipto y pino. Dichas investigaciones han surgido como inquietud de empresas forestales, así como de la comunidad científica del país, por conocer en qué medida estos sistemas de producción de amplia expansión en los últimos 20 años pueden estar determinando cambios en la productividad y calidad del suelo, así como en el medio ambiente. El proyecto motivo de este informe tiene como antecedentes los resultados obtenidos en proyectos ejecutados previamente por el Departamento de Suelos y Aguas. Por consiguiente, las investigaciones que se proponen resultan de la continuidad lógica de los trabajos realizados en investigaciones previas.

Un primer aspecto abarcó estudios de extracción y exportación de nutrientes en productos forestales comercializables. A pesar de existir una importante extracción de nutrientes del suelo, luego de la cosecha forestal existe un importante reciclaje de ellos a través de los restos de cosecha. No obstante, la velocidad de retorno al suelo, y su disponibilidad para la futura replantación dependerá en gran parte de las posibilidades de incorporación de estos restos para acelerar su tasa de descomposición. Complementariamente, la constatación de la disminución del contenido de cationes del suelo, así como del aumento en la acidificación durante el ciclo de plantación, lleva a la necesidad de revertir dichos procesos, con el objetivo de mantener la productividad del recurso. Realizar estas correcciones, mediante una mejora en la gestión de los restos de cosecha, así como del agregado de enmiendas como la caliza, no sólo resulta importante desde un punto de vista productivo, sino también para mantener la sostenibilidad del sistema, y la conservación del recurso suelo.

El segundo aspecto de estudio fue dirigido a evaluar las tecnologías de laboreo de suelos más apropiadas para plantaciones y re-plantaciones. Dicho estudio tiene como antecedentes dos experimentos realizados en suelos arenosos de la zona norte del país. No obstante, en suelos diferentes de las zonas sur y este del país existe poca información que permita ajustar la mejor tecnología desde el punto de vista productivo, así como en cuanto a minimizar los riesgos de erosión de suelos. Es así que se procuró evaluar tecnologías en uso, como el subsolador agrícola, el laboreo reducido y el uso de herbicida pre-plantación.

El tercer aspecto de estudio tuvo como objetivo el monitoreo del contenido de agua en los suelos afectados a la forestación, y en sus pares mantenidos bajo un manejo tradicional de pasturas para producción ganadera. Se continuó completando la base de datos ya existente desde el año 2000, lo cual permitirá, por otra parte, ajustar y validar el modelo WEPP de erosión. Este modelo permite, además, la estimación de pérdidas de suelo por erosión en eventos individuales de lluvia, el cual puede ser utilizado como herramienta de monitoreo de la erosión en situaciones específicas a nivel de predios forestales.

El cuarto aspecto de estudio apuntó a continuar recabando información acerca de la real capacidad de los sistemas forestales de capturar carbono, no sólo en la biomasa forestal, sino en el suelo. Como antecedentes se dispone de cuantificaciones de la captura de carbono por la biomasa forestal, y de la vida media de los restos de cosecha dejados en el sitio luego de la cosecha forestal. Sin embargo, los estudios acerca de los cambios en el contenido de carbono en los suelos son escasos, siendo necesario disponer de un mayor número de sitios de estudio, que permitan dilucidar si los suelos forestales realmente ganan, mantienen o pierden su carbono orgánico. Disponer de esta información permitirá mejorar la información a ser tenida en cuenta en futuros proyectos del MDL, además de ajustar y validar el uso de modelos predictivos de la evolución de la materia orgánica del suelo.

## INTRODUCCIÓN

### Fundamentación y antecedentes.

En el sector forestal ha habido un rápido incremento del área forestada desde la promulgación en el año 1988 de la ley 15.939, particularmente con especies de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*. A vía de ejemplo, al año 1989 la superficie forestada bajo proyecto era de 38.000 has, mientras que en la actualidad superan las 714.000 has (DGF, 2007). Este proceso de incremento del área forestada ha ido de la mano de un intenso proceso de certificación de la producción forestal. La inclusión de especies de rápido crecimiento y/o gran volumen de biomasa producida estaría generando cambios en la demanda de nutrientes y agua del suelo. Esto ha sido preocupación en diferentes ámbitos, ya sea productivo, como académicos, vista la carencia de información nacional al respecto. Esto ha determinado que a inicios de la pasada década haya ocurrido un acercamiento del sector productivo a la Universidad, a los efectos de desarrollar las investigaciones necesarias para dar respuesta a las interrogantes que se planteaban. De esta manera comenzaron a implementarse diferentes líneas de investigación de manera tal de conocer los impactos del cambio de uso tradicional del suelo de ganadero o agrícola al forestal, así como las posibilidades de manejar dichos cambios, con el objetivo de mantener la productividad de dichos suelos.

Las primeras investigaciones realizadas en el año 2000 (Durán et al., 2000), ya mencionan la existencia de un proceso de acidificación de los suelos afectados a la forestación con *Eucalyptus sp.*, independiente del proceso que normalmente ocurre como consecuencia del laboreo del suelo. Estudios posteriores relacionaron este proceso con la pérdida de cationes del suelo, particularmente en plantaciones de eucalipto de más de 15 años (Dieste, 1999; Cabrera y Cal, 2006). Los resultados recientes muestran, no obstante, que si bien existe una extracción importante de nutrientes del suelo, su exportación en los productos comercializables generalmente es baja, aunque dependiente del método de cosecha empleado (González, 2008; Hernández et al., 2009). Los residuos de cosecha, los cuales contienen concentraciones importantes de nutrientes, normalmente permanecen en superficie en el sitio en su totalidad. La velocidad con la cual estos nutrientes retornan al suelo es lenta y muy variable, dependiendo del tipo de resto y del nutriente en consideración. No se han explorado aun metodologías para mejorar la gestión de los residuos, y de esta manera, acelerar su proceso de descomposición y devolución de nutrientes al suelo.

En términos de laboreo de suelos, la investigación en este sector ha comenzado evaluando el impacto de distintas intensidades de laboreo sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, y la productividad forestal (García Préchac et al., 2001; Pérez Bidegain et al., 2001; García Préchac et al., 2004). Estos trabajos de intensidades de laboreo se centralizaron en suelos de aptitud forestal de la zona Norte del país. A nivel nacional, no obstante, no existe información publicada de trabajos de laboreo realizados en suelos con una importante diferenciación textural (zona litoral oeste del país), o suelos de basamento cristalino de la zona este-noreste del país. Dadas las diferencias existentes entre suelos de las diferentes zona de producción, no se tiene la certeza de que tecnologías de uso alternativo de herbicidas al laboreo de suelos tengan similares beneficios a los encontrados para los suelos de la zona norte del país (Delgado et al., 2006). Por otra parte, en los suelos de la zona sur, este y centro del país, dadas sus características de alta diferenciación textural y/o presencia de roca cerca de la superficie, en muchas situaciones se ha difundido el uso de la práctica del subsolado del suelo. Sin embargo, no existen evidencias claras que definan si esta práctica (de alto costo) resulta rentable en todos ellos.

En lo relativo a las estimaciones de la demanda de agua de estos sistemas, desde el año 2000 se viene desarrollando el monitoreo del contenido de agua del suelo en plantaciones de eucalipto y pino de diferentes edades, en comparación con el mismo suelo bajo uso pastoril. En la actualidad se cuenta con una base de datos que cubre un período de al menos 8 años. Dicha información se ha ampliado en los últimos años, estudiando el proceso en plantaciones a término, durante el período post-cosecha, y a partir de la re-plantación del sitio. Los resultados indican menores contenidos de agua en el suelo bajo plantaciones forestales, respecto al mismo suelo bajo vegetación de pasturas naturales. Si bien la evapotranspiración puede ser un factor decisivo en explicar dichas diferencias, han sido observado ciertos cambios en las propiedades hídricas de los suelos afectados a la forestación (Pérez Bidegain, 2001; Rodríguez, 2008), que indican la presencia de compuestos de carácter hidrofóbico en los suelos, lo cual determinaría una menor capacidad de retención de agua en suelos bajo bosque. Este proceso estaría afectando, entonces, la dinámica infiltración – escurrimiento, así como la percolación a napas profundas del agua de lluvia infiltrada. No obstante, los resultados muestran variaciones anuales, dependientes de las

condiciones climáticas. Es necesario, por consiguiente, disponer de mayor información, cubriendo períodos más prolongados en el tiempo.

Paralelamente, han sido realizado algunos trabajos de monitoreo de erosión (García Préchac et al, 2004) empleando la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos. Este modelo estima pérdidas medias de suelo por erosión no encauzada por unidad de superficie y año para períodos largos de tiempo. Si bien el mismo ha sido extensamente validado en Uruguay (Durán y García Préchac, 2007), posee algunas limitantes. Entre ellas se destacan la incapacidad de estimar pérdidas de suelos en eventos individuales de lluvia (Kinell, 2005), de estimar erosión encauzada en pequeños canaliculos, y estimar tasas de erosión en pequeñas cuencas hidrográficas. El ajuste y validación de otros modelos que levante estas limitantes es necesario. En este sentido cabe destacar que el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) inició un programa de investigación y desarrollo en el año 1985 a los efectos de levantar las limitantes que presentaba el modelo USLE. Esto dio origen al Water Erosion Prediction Project (WEPP), liderado por el Agricultural Research Service (ARS), U.S.Forest Service (FS), Natural Resources Conservation Service (NRCS), y el Bureau of Land Management (BLM). Como resultado, en el año 1995 se publica el modelo de estimación de pérdidas de suelo por erosión que lleva el mismo nombre que el proyecto que lo originó, WEPP (Flanagan y Nearing, 1995). Dicho modelo está basado en los procesos físicos que gobiernan el escurrimiento y la erosión, y opera a una escala espacial de ladera y pequeña cuenca, y a una escala temporal diaria. Los modelos basados en procesos tienen la ventaja de poder ser empleados más allá del ambiente en el que fueron desarrollados, sin embargo su parametrización puede ser dificultosa. El modelo puede estimar pérdidas de suelo para eventos individuales, o en forma continua. Además el modelo está vinculado con un Sistema de Información Geográfica (GIS), dando lugar a la interface denominada GeoWEPP (Renschler, 2003). Esta aplicación tiene la ventaja de poder derivar las características topográficas del terreno empleando modelos digitales del terreno provenientes de relevamientos topográficos locales o aportados por el usuario (Renschler et al., 2002). GeoWEPP es empleado en EE.UU en sistemas forestales, para la estimación de pérdidas de suelo al momento de la cosecha (Covert et al., 2005), o las pérdidas de suelo provenientes de la caminería forestal (Rhee et al., 2004). Recientemente este modelo ha sido incorporado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (FS-USDA) para el monitoreo de la erosión en las tierras forestadas (O'Neill et al., 2005). Dada las ventajas que posee este modelo, y el banco de datos que existe en nuestro país, en particular evolución de agua en el suelo, es adecuado comenzar un proceso de ajuste y validación del mismo.

Otro de los aspectos sujetos a estudio fueron los cambios en las formas, contenidos y distribución del carbono orgánico del suelo. En la última década ha aumentado la preocupación mundial por el aumento de los GEI causantes del calentamiento global de la atmósfera. En los sistemas forestales, si bien ocurren emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, la magnitud del secuestro de carbono es mayor, por lo que el balance neto del sistema en el tiempo es positivo (Bäethgen, 2000). En estos sistemas ocurre una acumulación de carbono muy importante en la biomasa vegetal, el cual, en la medida de permanecer en productos de larga duración (madera sólida) no contribuiría al efecto invernadero (Martino, 2000). Por otra parte, existirían otros reservorios de carbono, como los constituyen el mantillo (Apps, 2003), así como la acumulación por podas y raleos del monte, y restos de cosecha dejados sobre el suelo. Estas componentes van sufriendo un proceso de descomposición gradual, siendo el tiempo de residencia del carbono en los restos variable según la estabilidad del material (hojas, ramas, corteza). Investigaciones nacionales recientes han logrado arribar a cuantificaciones de las tasas de descomposición de los diferentes tipos de restos de cosecha (Hernández, et al., 2008; González, 2008). La mayor componente del ciclo terrestre del carbono lo constituye la materia orgánica del suelo (Swift, 2001). Aumentar la capacidad de los suelos de secuestrar carbono contribuye a mitigar el impacto ambiental del aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico. El potencial de secuestro de carbono de los suelos depende de su capacidad de almacenar compuestos de plantas resistentes en el mediano plazo y proteger y acumular las sustancias húmicas formadas durante la transformación de materiales orgánicos en el suelo.

Existen algunos resultados nacionales que muestran una distribución diferente del carbono orgánico del suelo bajo sistemas forestales, comparados con suelos bajo pasturas, observándose una importante estratificación en superficie (Hernández y Salvo, 2006). La misma se explica dada la existencia de un mantillo en superficie, el cual no sólo determina una acumulación superficial de carbono (residencia temporal), sino también una acumulación de productos orgánicos de descomposición del mismo en los primeros centímetros de suelo. Se ha encontrado también una tendencia a la acumulación de carbono orgánico en la parte inferior del horizonte A y en la parte

superior del horizonte B (Delgado et al., 2006). Mundialmente han sido encontrados resultados muy variados acerca de la acumulación de carbono en el suelo por parte de los sistemas forestales. Paul et al. (2002) realizando una revisión de 43 trabajos sobre el tema encontraron datos muy variables, con aumentos o disminuciones del carbono, por lo menos en los montes jóvenes de menos de 10 años. La acumulación resultaba maximizada cuando existen turnos de rotación largos (20 a 50 años). Sin embargo, cuando se considera para los cálculos el mantillo del monte, la tendencia es revertida, de manera que el contenido de carbono del suelo+mantillo supera al de la pastura precedente. La información para plantaciones comerciales de eucalipto y pino en regiones templadas como la nuestra, no obstante, son escasas. Se ha explorado en nuestro país el uso de técnicas isotópicas de análisis con  $^{13}\text{C}$ , con las cuales es posible aun obtener mayor información acerca del carbono incorporado al suelo por la vegetación de bosque. De esta manera, estudios preliminares han podido estimar contribuciones de la vegetación de bosque al carbono del suelo no sólo en los primeros estratos de suelo, sino también a mayores profundidades (Hernández y Salvo, 2006). El uso potencial de estas metodologías permite una cuantificación más precisa de los aportes de carbono realizados por las especies forestales, y su relación con la biomasa aérea producida.

### **Descripción del problema a ser abordado y relevancia del mismo para la contraparte en la producción.**

La producción forestal opera en un marco de certificación del proceso productivo. En tal sentido es necesario que cuente con herramientas que permitan monitorear el proceso, y de esta manera tomar medidas a los efectos de mitigar sus efectos negativos. La información resultante de los proyectos previamente ejecutados ha resultado de gran utilidad no sólo para cuantificar y determinar el sentido de los cambios en propiedades de suelo por efecto del cambio de uso del mismo de pastoril a forestal, sino que ha contribuido a estudiar sus relaciones causales. Esto ha permitido la extrapolación de algunos resultados a otras situaciones similares, y de esta manera, elaborar estrategias de manejo que permitan mejorar el desarrollo del proceso productivo, minimizando los cambios negativos a nivel ambiental. El grado de avance en el conocimiento -no obstante importante- requiere de profundizar las investigaciones, no sólo desde el punto de vista de mejorar la tecnología de producción, sino también de profundizar en los procesos que determinan dichos cambios, y alternativas para manejarlos. En tal sentido, el buscar alternativas para mejorar la gestión de residuos de cosecha con altos contenidos de nutrientes permitirá mejorar las reposiciones de nutrientes al suelo, y de esta manera ajustar las estrategias de fertilización. Este aspecto pasa operativamente por mejorar las condiciones de descomposición de los residuos, de manera de acelerar el retorno de nutrientes al suelo, y mejorar su distribución. Desde un punto de vista productivo, dichos nutrientes estarían disponibles más rápidamente para la replantación de las especies. Por otra parte, el uso complementario de enmiendas como el carbonato de calcio y magnesio permitiría no sólo mitigar el proceso de acidificación del suelo, sino que además estaría restituyendo cationes altamente extraídos por los árboles.

Otro aspecto de relevancia se relaciona con generar las tecnologías de manejo de suelos en plantaciones y replantaciones que provoquen menores impactos negativos en el suelo, minimizando las pérdidas de suelo por erosión. Si bien se han identificado tecnologías promisorias para algunos suelos (zona norte del país), su extrapolación debe ser testada para otros suelos/zonas del país. En muchos casos se vienen realizando algunas prácticas de manejo de suelos –como el subsolado- que han dado buenos resultados en otros países, pero muchas veces de dudosa extrapolación para la totalidad de las situaciones nacionales. Es importante destacar que dentro del proceso productivo, la erosión de suelos durante la plantación, replantación, y cosecha son los momentos más críticos. Contar con herramientas que puedan anticipar sus efectos es necesario, no sólo del punto de vista productivo, sino también desde el punto de vista de la conservación del recurso y la certificación del proceso productivo. El uso de herramientas como el ajuste y aplicación de modelos predictivos de las pérdidas por erosión permite conocer frente a cada situación particular las mejores estrategias de manejo de suelos para minimizar pérdidas.

En lo relativo a la capacidad de los sistemas forestales de mitigar el efecto invernadero, a través del secuestro de carbono atmosférico, no existen aun en nuestro país estudios suficientes que permitan disponer de la cuantificación real del carbono secuestrado por la materia orgánica del suelo y derivado de la vegetación de bosque. Resulta evidente la capacidad de estos sistemas de capturar carbono a través de la biomasa vegetal. En la actualidad, la utilización sostenible de productos forestales (con inclusión de la bioenergía para desplazar la utilización de combustibles

fósiles y evitar el uso de materiales alternativos con un mayor contenido energético), puede contribuir en gran medida a mitigar el cambio climático a largo plazo, ya que evita la introducción de nuevo carbono en el ciclo activo del carbono, al tiempo que suministra bienes y servicios a la sociedad. Es en este sentido que en la medida que la madera cosechada en un bosque sea utilizada en sustitución de combustibles fósiles o para la fabricación de productos duraderos, la capacidad de secuestro de carbono de los sumideros podría prolongarse indefinidamente en el tiempo (Martino, 2000). En forma complementaria, si los sistemas forestales están incorporando carbono orgánico al suelo, surge claro que esto resultaría un potencial sumidero del mismo, lo cual resaltaría la importancia de estos sistemas en la mitigación del efecto invernadero. Si se demuestra esta tendencia, no sólo contribuiría al proceso de certificación, sino que podría resultar de importancia frente a la elaboración de futuros proyectos de MDL.

### **Objetivos generales y específicos.**

#### Objetivo general:

Mejorar las prácticas de manejo en plantaciones y replantaciones de eucalipto y pino que permitan mantener la productividad y sostenibilidad del recurso suelo, y contribuir al logro de la certificación del proceso productivo.

#### Objetivos específicos:

- 1) Acelerar el proceso de restitución de nutrientes al suelo a partir de los restos de la cosecha forestal, y el eventual uso de enmiendas, mejorando su distribución en sentido horizontal y vertical.
- 2) Estudiar el efecto de distintos sistemas de laboreo en suelos recientemente incorporados a la forestación y en replantaciones de sitios cosechados.
- 3) Monitoreo del contenido de agua en el suelo y ajuste y validación del modelo de escurrimiento y erosión WEPP en sistemas forestales.
- 4) Cuantificar los cambios en los contenidos de carbono orgánico del suelo por efecto del cambio de uso de pastoril/agrícola a forestal.

A continuación se presentan los resultados de las investigaciones realizadas. Por una cuestión de orden, se presentará cada objetivo por separado, con su metodología de investigación, y los resultados obtenidos.

**OBJETIVO ESPECÍFICO 1: Acelerar el proceso de restitución de nutrientes al suelo a partir de los restos de la cosecha forestal, y el eventual uso de enmiendas, mejorando su distribución en sentido horizontal y vertical.**

**Objetivo 1a) Manejo de restos de cosecha**

**Introducción**

Luego de la cosecha forestal, quedan en el sitio restos vegetales de la misma (hojas/acículas, ramas, corteza), los cuales inician un proceso de descomposición dando como resultado el retorno de los nutrientes al suelo en cantidades y velocidades variables. A los efectos de acelerar este proceso, resulta de importancia evaluar alternativas de gestión de los restos de cosecha diferentes a las actuales (descomposición en superficie). Con el objetivo de caracterizar el efecto de diferentes modalidades de gestión de los residuos de cosecha en el retorno de los nutrientes al suelo, y su consecuencia en la disponibilidad de los mismos para la replantación, se planificaron los experimentos descriptos a continuación.

**Materiales y métodos**

En el marco del proyecto se realizó el seguimiento de dos experimentos con el género *Eucalyptus*, y un experimento con el género *Pinus*. Los experimentos con el género *Eucalyptus* fueron instalados en dos zonas del país: uno en el Dpto. de Paysandú (Experimento Ibirapitá), y el otro en el Dpto. de Tacuarembó (Experimento El Recado). El experimento con el género *Pinus* ya había sido instalado en el proyecto anterior en un sitio del Dpto. de Tacuarembó, por lo que en el presente proyecto se le dio continuidad a las evaluaciones del mismo.

Experimento Ibirapitá

Se instaló un experimento de campo el 22/06/2010 luego de la cosecha de una plantación de *Eucalyptus grandis* de 11 años de edad en la localidad Poblado Lavalleja, Dpto. de Paysandú (Coordenadas S31° 52' 55" W57° 30' 35").

Las características del monte cosechado de *E. grandis* se indican en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características del rodal de *E. grandis* en el sitio experimental Ibirapitá.

DAP (cm)	H (m)	Densidad (arb/ha)	Área de ensayo (ha)	Volumen comercial sin corteza (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
24.5	27.5	1111	0.43	582

El suelo del sitio experimental es un Argisol Subéutrico Ócrico de la Unidad Chapicuy (MAP-DSF, 1976), perteneciente al grupo CONEAT 9.6, cuyas características principales se indican en los Cuadros 2 y 3, y el perfil más representativo del sitio se indica en la Figura 1.

Cuadro 2. Descripción de dos perfiles de suelo del sitio experimental Ibirapitá.

Ladera Alta				
Horiz.	Prof.	Textura	Color	
Ap	0-20	F	7,5 YR 3/2	Con clastos
Bt	20-35	Fac-Ac	5 YR 3/3	
Bc	35-45	FAc	2,5 YR 4/8	
C	45+	F	2,5 YR 5/8	
Ladera Baja				
Horiz.	Prof.	Textura	Color	
Ap	0-30	FAr	10 YR 3/2	
Bt1	30-60	AcAr-Ac	10 YR 2/2	
Bt2	60-78	AcAr-Ac	10 YR 4/4	Moteados 10YR 5/8, 2-5 mm, abundantes, netos, borde difuso
BC	78+	AcAr-Ac	10 YR 5/4	Moteados 10YR 6/8, 5YR 5/8 hacia el centro, 5-10 mm, abundantes, netos, borde claro

Cuadro 3. Datos analíticos de los perfiles de suelo del experimento Ibirapitá.

Posición	Horiz.	pH		Corg g kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	Al	BT	*ClCe	SB %
		H <sub>2</sub> O	KCl									
Ladera Alta	Ap	5.12	4.15	11.40	7.62	1.00	0.16	0.41	0.33	9.19	9.52	97
	0-20											
	Bt	5.20	3.89	11.14	13.80	1.28	0.25	0.41	0.11	15.74	15.85	99
	20-35											
	Bc	5.75	4.26	10.78	20.54	1.77	0.33	0.70	0.04	23.34	23.38	100
Ladera Baja	35-45											
	C	6.56	5.01	10.33	24.51	1.81	0.25	0.41	0.01	26.98	26.97	100
	45+											
	Ap	4.82	3.55	11.36	4.88	0.86	0.14	0.37	0.83	6.25	7.08	88
	0-30											
	Bt <sub>1</sub>	5.55	4.20	10.97	10.96	0.88	0.23	0.38	0.11	12.45	12.56	99
	30-60											
	Bt <sub>2</sub>	5.70	4.27	10.71	13.29	1.02	0.27	0.37	0.05	14.95	15.00	100
	60-78											
	BC	5.90	4.54	10.62	12.61	1.00	0.27	0.40	0.02	14.28	14.30	100
78+												

\*ClCe: ClC efectiva a pH del suelo



Figura 1. Perfil de suelo de la posición dominante de ladera alta del experimento de Ibirapitá.

#### *Evaluación de la cosecha*

Se marcó el área del rodal donde iba a estar localizado el experimento de replantación, realizando el inventario de los ejemplares en pie de las futuras parcelas del experimento (medidas de DAP y altura). Se seleccionó un árbol con medidas promedio para cada parcela, el cual fue apeado. Las trozas fueron cortadas a 7.20 m de largo, midiendo el diámetro basal y apical de cada una de ellas. Posteriormente se cortó un disco basal de cada troza, a los efectos de separar posteriormente la corteza de la madera, y calcular la densidad básica de la madera. Se pesaron las ramas correspondientes a cada árbol, y se separaron las tres fracciones de la rama: hojas, ramas finas < 1 cm y ramas gruesas > 1 cm. Cada fracción fue pesada por separado, tomando posteriormente una muestra de cada una de ellas para cálculo de materia seca y posterior análisis químico. De esta manera se calculó el volumen de restos dejados por parcela (en función del número de ejemplares presentes).

#### *Experimento de campo de manejo de restos*

La cosecha del rodal se realizó con cosechadora, procurando distribuir homogéneamente los restos en toda la superficie cosechada, tarea que fue completada manualmente. Posteriormente se instaló el experimento, el cual consistió en cuatro tratamientos dispuestos en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron:

- 1) Restos homogéneamente distribuidos en superficie, sin enterrar, sin laboreo pre-plantación, y plantación al pozo (Tratamiento RS) (Figura 2).
- 2) Restos homogéneamente distribuidos en superficie, enterrados con disquera, sin laboreo pre-plantación, y plantación al pozo (Tratamiento RD) (Figura 3).
- 3) Restos homogéneamente distribuidos en superficie, sin enterrar, manejados posteriormente en rameros (pasaje de despejador, disquera en la entrefila, alomador y plantación; tratamiento RA) (Figura 4).
- 4) Restos retirados de la parcela, con posterior laboreo con disquera en la entrefila, alomador y plantación (Tratamiento SR) (Figura 5).



Figura 2. Plantación al pozo en parcelas con restos en superficie en el experimento de Ibirapitá.



Figura 3. Tratamiento de enterrado de restos con disquera en el experimento de Ibirapitá.



Figura 4. Pasaje de despejador en el experimento de Ibirapitá.



Figura 5. Plantación en parcelas con laboreo en la entrefila en tratamientos sin restos y con despejador en el experimento de Ibirapitá.

El tamaño de las parcelas fue de 4 filas de plantación de 12 m de ancho y 30 m de largo (10 plantas por fila).

La disquera en los tratamientos indicados fue pasada el 28/07/2010. La plantación fue realizada el 15/10/10 con el clon 2326 de *E. grandis*. El marco de plantación fue de 3 x 3 m. La fertilización fue con 113 g de 14-24-00 + 6% S + 0,2% B + 0,3% Zn por planta en 2 hoyos a ambos lados de la planta, en el momento de la plantación.

#### *Muestreo de suelos*

Previo a la cosecha del rodal se tomaron muestras compuestas de suelo con calador de los cuatro bloques a cuatro profundidades: 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm. A los 30 meses se tomaron muestras de suelo de cada parcela a las mismas profundidades realizadas en la instalación del experimento (0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm). Se realizó un muestreo intermedio de suelo de cada parcela a los 12 meses de instalado el experimento, tomando muestras de suelo a las profundidades de 0-10 y 10-20 cm en los diferentes tratamientos y posiciones (filas y entrefilas). En dichas muestras se realizó la determinación potenciométrica de pH (en agua y KCl, con una relación suelo:solución de 1:2.5), la acidez intercambiable (mediante extracción con KCl 1M y determinación por titulación con NaOH), Carbono orgánico (mediante el método de Walkley y Black), bases de intercambio (Ca, Mg, K y Na extraídos mediante acetato de amonio, y posterior determinación de Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica, y K y Na mediante espectrofotometría de emisión), y P asimilable mediante el método Bray N° 1.

#### *Experimento de descomposición de restos*

Se instaló un experimento de descomposición de restos de cosecha dentro del experimento de campo. Se colocaron sobre el suelo muestras de peso conocido de hojas, ramas finas (< 1 cm), ramas gruesas (> 1 cm), y corteza, simulando las condiciones de descomposición de restos sin enterrar. Para dicho efecto se colocaron las hojas y las ramas finas en bolsas de malla, en tanto que las ramas gruesas y la corteza fueron numeradas y colocadas sobre el suelo (Figura 6). Se realizaron tres repeticiones de dichos tratamientos. Por otro lado se colocaron las mismas fracciones de cosecha (hojas, ramas finas, ramas gruesas y corteza) y pesos, pero enterradas, simulando la situación de enterrado de restos con disquera (Figuras 7 y 8).

A los 3, 6, 9, 12, 18, 24 y 30 meses se tomaron muestras de cada resto en ambos tratamientos de manejo (en superficie y enterrado), a los efectos de cuantificar la tasa de descomposición de la biomasa y la evolución de los nutrientes del resto. Se secaron las muestras a 65°C, se molieron y tamizaron previo al análisis químico. En dichas muestras se determinó el contenido de N mediante digestión por vía húmeda y posterior destilación Kjeldahl. El contenido de P, K, Ca y Mg se realizó mediante calcinación de la muestra y disolución posterior de las cenizas con HCl al 20%. El P fue determinado colorimétricamente (Murphy y Riley, 1962), K por espectrofotometría de emisión y Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica.



Figura 6. Muestras de restos de cosecha (hojas, ramas finas, ramas gruesas y corteza) sobre la superficie del suelo en el experimento de Ibirapitá.



Figura 7. Muestras de restos de cosecha (hojas, ramas finas, ramas gruesas y corteza) sobre el camellón en el experimento de Ibirapitá.



Figura 8. Muestras de restos de cosecha (hojas, ramas finas, ramas gruesas y corteza) enterradas sobre el camellón en el experimento de Ibirapitá.

#### Experimento El Recado

Se instaló un experimento de campo el 30/05/2011 luego de la cosecha de una plantación de *Eucalyptus maidenii* de 8 años de edad en un suelo perteneciente al grupo CONEAT 7.32 (Localidad: Cerro Cementerio, Ruta 26, Dpto. de Tacuarembó, Coordenadas S31° 52' 55" W57° 30' 35"). El suelo del experimento corresponde a un Luvisol Ócrico Álbico de la Unidad Tacuarembó (MAP-DSF, 1976), cuyas características principales se indican en los Cuadros 4 y 5.

Cuadro 4. Descripción morfológica correspondiente al Luvisol Ócrico Álbico del Experimento El Recado.

Horiz.	Prof.	Textura	Color
Ap	0-20	ArF	10YR5/3
A	20-46	ArF	10YR4/4
E	46-67	ArF-Ar	10YR5/6
Bt	67-87	Ac-AcAr	10YR4/2
BC	87-100	AcAr	Mezcla 10YR6/2 - 7,5YR5/8 - 2,5YR4/8

Cuadro 5. Datos analíticos del perfil de suelo del Luvisol Ócrico Álbico del Experimento El Recado.

	pH (H <sub>2</sub> O)	pH KCl	C	Ca	Mg	K	Na	Ac. Int.	BT	*CICe	SB
cm			g kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						%	
Ap 0-20	4.99	4.03	6.11	0.62	0.41	0.23	0.28	0.65	1.57	2.19	72
A 20-46	4.95	3.95	5.30	0.55	0.34	0.3	0.32	0.77	1.73	2.28	76
E 46-67	4.63	3.91	2.64	0.72	0.33	0.16	0.34	0.76	1.59	2.31	69
Bt 67-87	4.95	3.85	7.11	2.36	1.54	0.62	0.27	2.71	5.14	7.50	69
BC 87-100	5.09	3.83	4.03	1.81	1.2	0.69	0.26	3.57	5.72	7.53	76

\*CICe: CIC efectiva a pH del suelo

En el Cuadro 6 se indican las características del rodal cosechado, sobre el cual se realizó el experimento de replantación.

Cuadro 6. Características del rodal de *E. maidenii* en el sitio experimental El Recado.

PARCELA	Edad	DAP (cm)	Hm	N arb/ha	Ncub. arb/ha	Gm	Vol medio	IMA	Vol árbol
20	8	14	17.5	1233	1233	20.62	128	16.01	0.10
25	8	15	16.7	900	900	16.86	100	12.46	0.11

La cosecha del rodal se realizó con cosechadora, procurando distribuir homogéneamente los restos en toda la superficie cosechada, tarea que fue completada manualmente. Previo a la misma se talaron 9 árboles con medidas promedio de DAP y altura correspondientes a las futuras parcelas del experimento. De los mismos se realizaron evaluaciones de biomasa producida,

separando por componentes (trozas, corteza, ramas gruesas y finas, y hojas). De cada componente se tomó el peso de campo y se extrajo una muestra para el cálculo de la materia seca de la biomasa. Dichas muestras, luego de secadas, fueron molidas y tamizadas para la realización de análisis químico. En cada componente se determinó la concentración de N, P, K, Ca y Mg presentes, calculando posteriormente la cantidad presente en cada componente en la hectárea. Se calculó el volumen de restos de cosecha dejados en el sitio por unidad experimental, así como la cantidad de nutrientes presentes en él.

Se instaló un experimento de campo, el cual consistió en tres tratamientos de manejo de restos, dispuestos en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Los tratamientos fueron:

- 1) Restos homogéneamente distribuidos en superficie, sin enterrar, manejados posteriormente en rameros (pasaje de despejador, disquera en la entrefila, alomador y plantación).
- 2) Restos homogéneamente distribuidos en superficie, picados con triturador de restos FAE 150 MH (Figuras 9, 10 y 11), pasaje de alomador y plantación.
- 3) Restos homogéneamente distribuidos en superficie, picados con triturador de restos y enterrados con disquera (Figura 12), pasaje de alomador y plantación.



Figura 9. Trituradora de restos FAE 150 MH.



Figura 10. Detalle de elemento de picado de Trituradora de restos FAE 150 MH.



Figura 11. Trituradora de restos FAE 150 MH operando sobre los restos de cosecha.



Figura 12. Pasaje de trituradora de restos y posterior disquera sobre los restos de cosecha.

Se realizó el encanterado con la incorporación de 200 kg ha de Hyperfos. La plantación fue realizada el 27/09/2011 con *Eucalyptus dunnii* (clon AST-10). El marco de plantación fue de 3.5 x 2.14 m. El tamaño de las parcelas fue de 4 filas de plantación (14 m de ancho x 21.4 m de largo, resultando 10 plantas por fila).

#### *Muestreo de suelos*

Previo a la cosecha del rodal se tomaron muestras compuestas de suelo de los tres bloques a dos profundidades: 0-20 y 20-40 cm. Al año de instalado el experimento, se tomaron muestras de suelo por parcela a las mismas profundidades. En dichas muestras se realizó la determinación potenciométrica de pH (en agua y KCl, con una relación suelo:solución de 1:2.5), la acidez intercambiable (mediante extracción con KCl 1M y determinación por titulación con NaOH), Carbono orgánico (mediante el método de Walkley y Black), bases de intercambio (Ca, Mg, K y Na extraídos mediante acetato de amonio y posterior determinación de Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica, y K y Na mediante espectrofotometría de emisión) y P asimilable mediante el método Bray N° 1.

#### *Experimento de descomposición de restos*

Al igual que en el Experimento Ibirapitá, se implementó un experimento de descomposición de restos de cosecha dentro del experimento de campo. Se colocaron muestras de peso conocido de hojas, ramas finas (< 1 cm), ramas gruesas (> 1 cm) y corteza sobre el suelo, simulando condiciones de descomposición de restos sin enterrar. Para dicho efecto se colocaron las hojas y las ramas finas en bolsas de malla, en tanto que las ramas gruesas y la corteza fueron numeradas y colocadas sobre el suelo. Se realizaron tres repeticiones de dichos tratamientos. Por otro lado se colocaron las mismas fracciones de cosecha (hojas, ramas finas, ramas gruesas y

corteza), pero enterradas a 15 cm, simulando la situación de manejo con el enterrado de los restos (triturador y disquera).

A los 3, 10, 18,5 y 24 meses se tomaron muestras de cada resto para ambos tratamientos (en superficie y enterrado), a los efectos de cuantificar la tasa de descomposición y pérdida de nutrientes del resto. Se secaron las muestras a 65°C, se molieron y tamizaron previo al análisis químico. En dichas muestras se determinó el contenido de N mediante digestión por vía húmeda y posterior destilación Kjeldahl. El contenido de P, K, Ca y Mg se realizó mediante calcinación de la muestra y disolución posterior de las cenizas con HCl al 20%. El P fue determinado colorimétricamente (Murphy y Riley, 1962), K por espectrofotometría de emisión y Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica.

### Experimento La Corona

En mayo del 2009 se instaló un experimento de campo de descomposición de restos "in situ" luego del raleo comercial de una plantación de *Pinus taeda* de 6 años de edad en un suelo perteneciente al grupo CONEAT 7.32 (Estancia La Corona, Ruta 5, km 418, Dpto. de Tacuarembó, Coordenadas S31° 52' 55" W57° 30' 35"). El suelo del experimento es un Luvisol Ócrico Álbico de la Unidad Tacuarembó (MAP-DSF, 1976), cuyas características principales se indican en los Cuadros 7 y 8. La densidad de plantación original fue de 1000 árboles ha<sup>-1</sup>, y en mayo del 2009 se cortaron 400 árboles ha<sup>-1</sup>, dejando los residuos en el sitio. Las ramas bajas (hasta una altura del 50%) de los 600 árboles remanentes fueron podadas y también dejadas en el sitio, donde iniciaron su proceso de descomposición.

Cuadro 7. Descripción morfológica correspondiente al Acrisol Ócrico del Experimento La Corona.

Horizonte	Profundidad	Textura	Color y Características
A11	0 - 37	FAr -ArF	10YR 6/2 (s)
A12	37 - 68	FAr - ArF	10YR 4/2 (h)
Bt1	68 - 78	AcAr;	10YR 5/1,5 películas de arcilla; moteado abundante 10YR 6/6, contraste tenue, borde difuso, que enmascara el color de la matriz.
Bt2	78 - 92	Ac - AcAr;	10YR5/5 películas de arcilla (10YR 5/1,5); moteado 2,5Y4/8, común a abundante, hacia el exterior se torna 10YR6/8.
BC	92 - 120	Ac;	2,5Y 6/4 (60%), 2,5Y 8/4 (10%); moteado abundante (30%), 2,5YR5/8, prominente, de contraste claro y borde neto.

Cuadro 8. Datos analíticos correspondientes al Acrisol Ócrico del Experimento La Corona.

Horizonte	Prof.	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	M.O. %	Ca	Mg	K	Na	Al	BT	*CIC	SB %
A11	0-38	5,2	4.1	1,4	1,6	0,2	0,3	0,4	0,5	2,5	3,0	83
A12	38-68	5,1	4.0	1,2	1,4	0,2	0,2	0,4	0,7	2,2	2,9	75
Bt1	68-78	5,1	4.0	1,0	1,9	0,3	0,2	0,3	1,4	2,7	4,1	66
Bt2	78-92	4,7	3.8	1,3	3,3	0,4	0,4	0,4	3,6	4,5	8,1	56
BC	92-120	4,8	3.6	1,2	3,1	0,5	0,3	0,3	4,2	4,2	8,4	50

\*CICe: CIC efectiva a pH del suelo

Para este estudio de descomposición "in situ" se separaron diferentes componentes de cosecha del árbol (acículas, ramas finas, ramas gruesas y despuntes). De cada una de dichas componentes se llenaron bolsas individuales con acículas (100 g), ramas finas (150 g), mezcla de acículas y ramas finas (75 g acículas + 75 g ramas finas). Las ramas gruesas fueron cortadas en trozos de aproximadamente 10 cm, marcados y pesados individualmente. Similar procedimiento se utilizó para madera no comercial, pero los trozos fueron de 30 cm de largo. Las ramas gruesas y madera fueron colocadas en una bandeja de alambre, en contacto con el suelo, al igual que las bolsas de tejido con acículas y ramas finas (juntas o por separado). Se colocó una cantidad de bolsas y ramas equivalente al número de muestreos a realizar durante un período de tres años. Luego fueron cubiertas con el mantillo de pino. Se realizaron tres repeticiones de cada grupo de muestras, distantes aproximadamente 50 m entre sí.

Se tomaron muestras periódicamente, a los 6, 12, 18, 24, 30 y 36 meses. Todas las muestras fueron secadas y pesadas para determinar la tasa de descomposición y la concentración de nutrientes en ellas. Se secaron las muestras a 65°C, se molieron y tamizaron previo al análisis químico. En dichas muestras se determinó el contenido de N mediante digestión por vía húmeda y

posterior destilación Kjeldahl. El contenido de P, K, Ca y Mg se realizó mediante calcinación de la muestra y disolución posterior de las cenizas con HCl al 20%. El P fue determinado colorimétricamente (Murphy y Riley, 1962), K por espectrofotometría de emisión y Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica.

## Resultados y Discusión

### Experimento Ibirapitá

#### Extracción de nutrientes

En el Cuadro 9 se indican los valores correspondientes a la producción de biomasa, concentración de nutrientes, y cantidades presentes en la hectárea para cada componente de cosecha.

De un total de producción de biomasa del sitio de 183 Mg ha<sup>-1</sup>, 140 Mg ha<sup>-1</sup> correspondieron a las trozas comerciales, en tanto que 43 Mg ha<sup>-1</sup> correspondieron a los diferentes restos de cosecha: hojas, ramas y corteza. Lo anterior indica que la exportación de biomasa del sitio constituyó un 76.5% del total producido.

La concentración de nutrientes muestra diferencias según el componente de cosecha considerado (Cuadro 9). Las trozas comerciales presentaron las menores concentraciones de todos los nutrientes. A pesar de constituir el mayor porcentaje de la biomasa producida por el rodal, la exportación de nutrientes contenidos en las trozas comerciales representa entre el 35 y el 56 % del total extraído por el monte, variando según el nutriente. De manera que gran parte de los nutrientes extraídos por el monte permanece en los diferentes componentes de cosecha en el sitio. Las concentraciones de nutrientes por componente muestran que las hojas poseen las mayores concentraciones de N, P, K y Mg. En cuanto al Ca, la corteza es la fracción que tiene la mayor concentración (47,2 g kg<sup>-1</sup>), seguido por las hojas. De esta forma se puede afirmar que si bien se exporta la mayor parte de la biomasa, esto no necesariamente implicaría que se exporte en esa misma proporción los distintos nutrientes. En la Figura 13 se indica la contribución individual de cada fracción en el reciclaje potencial de nutrientes.

Cuadro 9. Producción de biomasa aérea, concentración y extracción de nutrientes de los diferentes componentes de la cosecha de una plantación de *E. grandis*. Para cada fracción y parámetro se indica el valor promedio (en negrita) y el desvío standard correspondiente.

Componente	Biomasa Mg ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>					kg ha <sup>-1</sup>				
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Hojas	<b>7,4</b>	<b>16,6</b>	<b>1,4</b>	<b>7,2</b>	<b>12,7</b>	<b>2,6</b>	<b>122,6</b>	<b>10,5</b>	<b>53,0</b>	<b>94,2</b>	<b>19,3</b>
	1,3	2,0	0,3	1,8	3,5	0,6	15,0	2,6	13,0	26,0	4,5
Rama fina	<b>7,0</b>	<b>2,3</b>	<b>0,2</b>	<b>3,3</b>	<b>9,3</b>	<b>1,1</b>	<b>16,1</b>	<b>1,7</b>	<b>23,2</b>	<b>64,8</b>	<b>7,6</b>
	1,3	0,4	0,1	0,7	2,2	0,3	2,5	0,8	5,2	15,8	2,4
Rama gruesa	<b>15,5</b>	<b>1,1</b>	<b>0,2</b>	<b>1,4</b>	<b>8,2</b>	<b>0,6</b>	<b>17,3</b>	<b>2,4</b>	<b>21,3</b>	<b>127,6</b>	<b>9,7</b>
	2,8	0,4	0,1	0,4	1,7	0,3	6,3	1,2	6,3	25,7	3,9
Corteza	<b>13,2</b>	<b>2,1</b>	<b>0,3</b>	<b>3,3</b>	<b>47,2</b>	<b>1,3</b>	<b>26,9</b>	<b>2,9</b>	<b>35,2</b>	<b>623,7</b>	<b>13,9</b>
	4,0	0,4	0,2	0,9	8,8	0,4	6,0	3,0	14,5	118,2	8,9
Madera comercial	<b>140,0</b>	<b>0,7</b>	<b>0,2</b>	<b>1,0</b>	<b>3,6</b>	<b>0,4</b>	<b>97,4</b>	<b>22,3</b>	<b>139,0</b>	<b>504,2</b>	<b>58,1</b>
	43,7	0,3	0,2	0,6	1,4	0,2	37,3	32,8	79,0	203,1	29,2
<b>Total</b>	183,1						280,3	39,8	271,7	1414,4	108,6
% Exportado	76.5						35	56	51	36	53

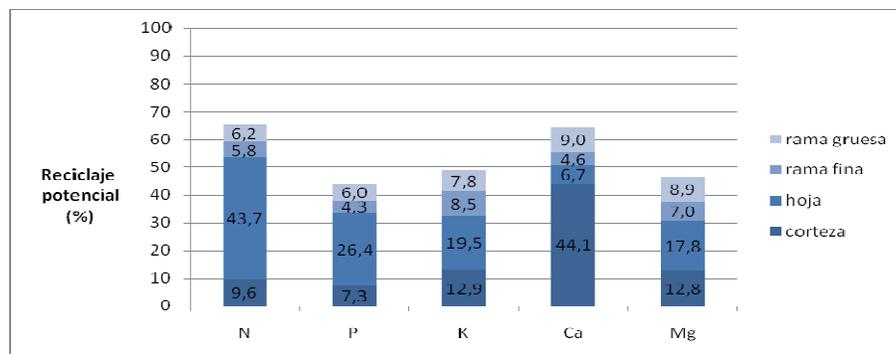


Figura 13. Proporción de los nutrientes potencialmente reciclables presentes en los restos de cosecha de una plantación de *E. grandis*.

En la Figura 14 se presentan las proporciones de los distintos nutrientes contenidos en madera y corteza del total de nutrientes del sitio.

En alternativas de cosecha donde se considere el efecto de no descortezar las trozas en el sitio, se incrementa la exportación de nutrientes, particularmente para el Ca, el cual pasa de una exportación del 36% a un 80% (Figura 14).

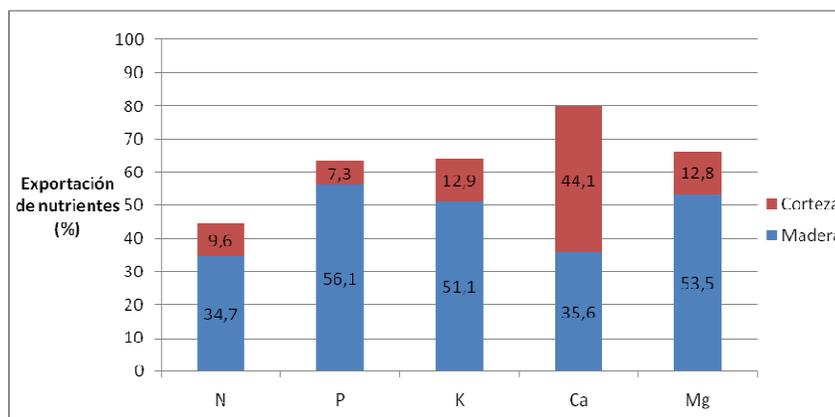


Figura 14. Proporción de nutrientes exportados por hectárea con y sin corteza del total de nutrientes del sitio.

#### Experimento de gestión de restos de cosecha

##### a) Evolución de la descomposición de restos de cosecha

A posteriori de la cosecha, se inició el experimento de descomposición de restos bajo dos modalidades de gestión de los mismos: manejo tradicional, donde los restos son dejados en superficie; y manejo de incorporación parcial de los mismos al suelo. Paralelamente al experimento de campo, se desarrolló un estudio de la descomposición de los restos bajo estas dos modalidades. Los resultados del mismo para el primer año de evaluación se indican en la Figura 15.

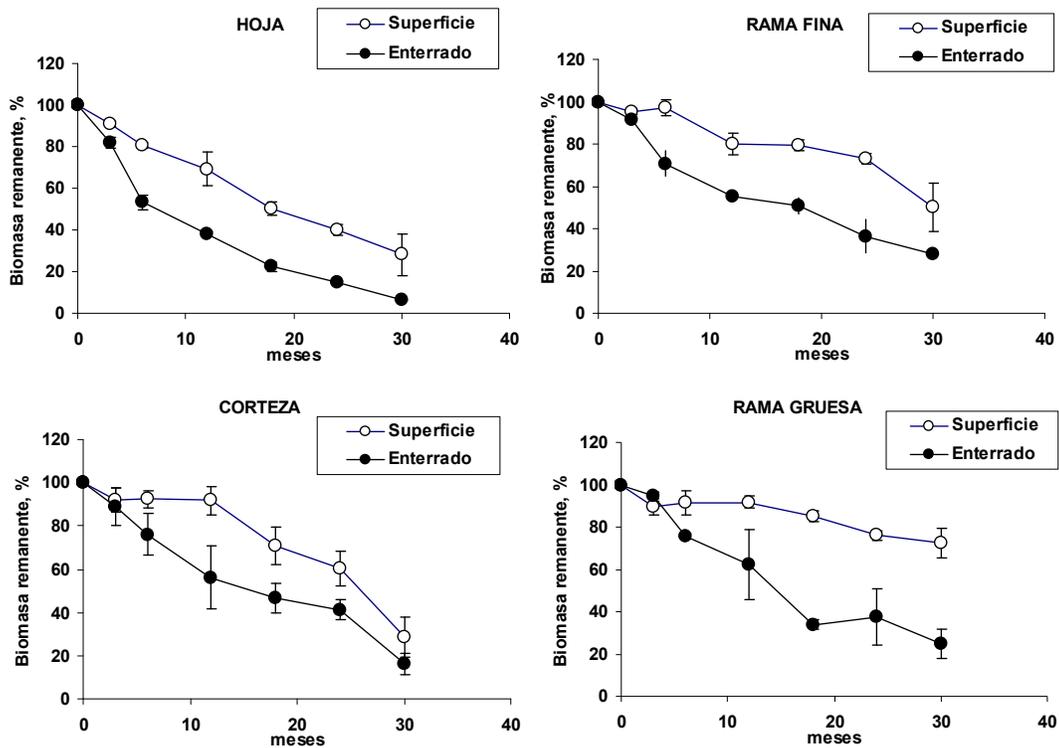


Figura 15. Evolución de la biomasa de los restos de cosecha de *E. grandis*, según las dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados. Valores promedio y desvíos standard.

Los patrones de descomposición de restos de cosecha durante los 30 meses que siguieron a la cosecha variaron según la modalidad de gestión de los mismos. Cuando éstos fueron enterrados, las tasas de descomposición se acentuaron, determinando en términos generales una menor cantidad de biomasa remanente en cada resto, que cuando se mantuvieron en superficie. El mayor contacto con los agentes de degradación, como son las poblaciones de hongos y bacterias del suelo, así como contenidos de humedad más favorables para su crecimiento, determinaron dicho comportamiento. Cuando los restos fueron dejados en superficie (situación que ocurre cuando se utiliza un despejador poscosecha), las hojas fueron el componente de los restos que mostró la mayor tasa de descomposición para el total del período de evaluación (72%), mientras que las ramas gruesas apenas alcanzaron un 28% de descomposición. Las ramas finas y la corteza no mostraron grandes cambios en los primeros meses, mientras que a partir de los 6 y 12 meses –respectivamente– mostraron una tasa de descomposición similar o mayor a la de las hojas. El enterrado de los restos aumentó su descomposición, siendo esto más notorio para las ramas gruesas, las cuales fueron degradadas en promedio un 75% cuando fueron enterradas contra un 28% en superficie. Le siguieron en importancia las ramas finas con valores de 72% y 50% para enterrado y en superficie, respectivamente. La corteza es una fracción gruesa que presenta dificultades para su descomposición. Cuando se mantuvo en superficie, recién después de los 12 meses de la cosecha aumenta su tasa de descomposición, mientras que al ser enterrada su tasa de descomposición es mayor desde el inicio. Al final del período de evaluación (30 meses) permanecen aun el 16 y 28% de la corteza enterrada y en superficie, respectivamente.

En la Figura 16 se indica la evolución del N contenido en los restos de cosecha. En la misma se observa que el N presente en hojas disminuyó en función del tiempo, siendo esta disminución más acentuada cuando las hojas fueron enterradas. En los restantes componentes de cosecha, por el contrario, se observó cierto aumento en el N presente en ellos, lo cual puede estar explicado por la inmovilización de formas minerales de N a partir del suelo por parte de los microorganismos que descomponen este tipo de restos que poseen elevadas relaciones C/N.

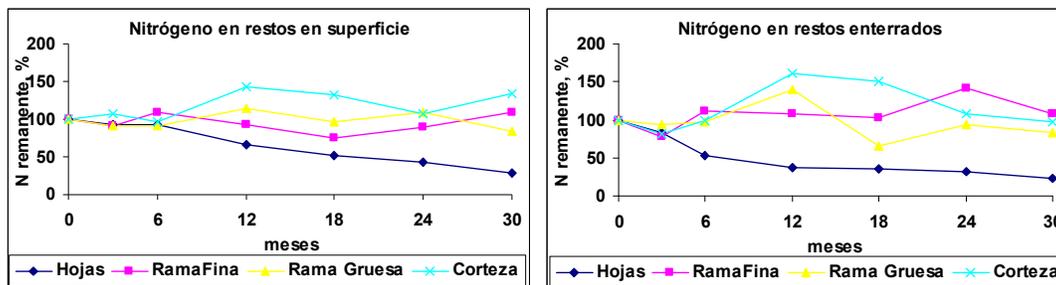


Figura 16. Evolución del N en los restos de cosecha de *E. grandis*, según dos modalidades de descomposición: a) restos dejados en superficie sobre el suelo, y b) restos enterrados.

En lo que respecta a la evolución del contenido de P en los restos, éste disminuyó en forma importante en las hojas y ramas finas, siendo esta disminución más acentuada cuando éstas estuvieron enterradas (Figura 17). A los 12 meses, no obstante, se observó un aumento en el contenido de P en las hojas que estaban en superficie. Una hipótesis posible para explicar este comportamiento puede ser a través del desarrollo de los microorganismos encargados de su descomposición, los cuales toman P del suelo y logran acumularlo en altas concentraciones en su biomasa (Hernández y del Pino, no publicado). Las ramas finas mostraron la mayor liberación de P al inicio, inclusive mayor que la correspondiente a las hojas. Dicho comportamiento es poco claro, ya que dicha fracción mostró una tasa de descomposición menor que las hojas. Con respecto a las ramas gruesas, se observan contenidos de P algo más elevados cuando éstas se encontraban en superficie. Esto podría ser interpretado por liberación de P de formas relativamente solubles, ya que las tasas de descomposición de este resto en superficie fue muy baja. El contenido de P en la corteza, sin embargo, disminuyó en mayor grado y en forma más constante cuando ésta fue enterrada que cuando se mantuvo en superficie, lo cual está asociado también a una mayor descomposición del resto enterrado.

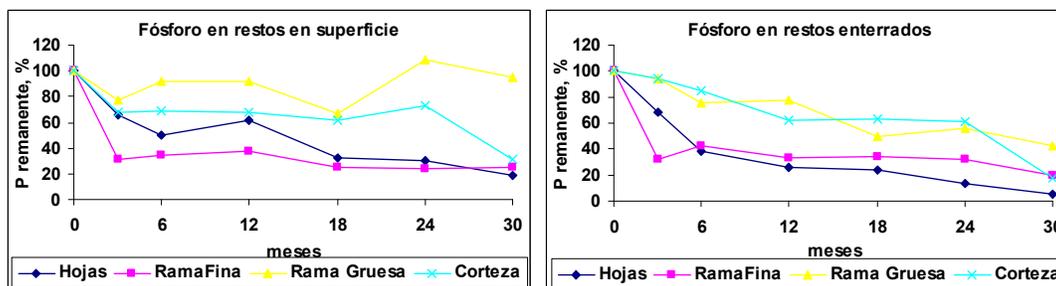


Figura 17. Evolución del P en los restos de cosecha de *E. grandis*, según dos modalidades de descomposición: a) restos dejados en superficie sobre el suelo, y b) restos enterrados.

El K fue el nutriente con la mayor tasa de liberación en todos los restos. Estas tasas fueron mayores para las hojas y la corteza que para las ramas finas y gruesas, independiente del tratamiento de manejo (Figura 18). Dicho efecto fue algo más notorio cuando los restos fueron enterrados que cuando se mantuvieron en superficie. De cualquier manera, a los 12 meses de iniciada la descomposición, el K remanente en todos los restos constituyó menos del 22%, aun para aquellos restos dejados en superficie.

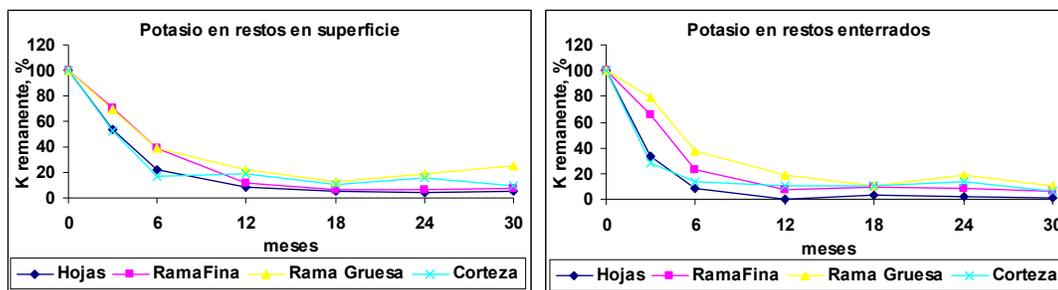


Figura 18. Evolución del K en los restos de cosecha de *E. grandis*, según dos modalidades de descomposición: a) restos dejados en superficie sobre el suelo, y b) restos enterrados.

El contenido de Ca en los restos de cosecha mostró algunas diferencias según el manejo de los mismos y el tipo de resto. Cuando fueron mantenidos en superficie, las hojas y ramas finas mostraron una disminución paulatina del contenido de Ca, llegando a liberar el 57 y 47% durante el período evaluado, respectivamente. Los restos más groseros (corteza y ramas gruesas) permanecieron relativamente constantes en función del tiempo, aunque al final del período de evaluación alcanzaron una liberación del orden de las ramas finas. Cuando los restos fueron incorporados se acentuó la liberación de Ca de las hojas, en tanto que en las ramas finas hubo una liberación similar a cuando estuvieron en superficie. Los otros restos se mantuvieron relativamente estables durante los 24 meses siguientes a la cosecha, mostrando recién una disminución importante en los últimos seis meses (60 y 33% para la corteza y las ramas gruesas, respectivamente).

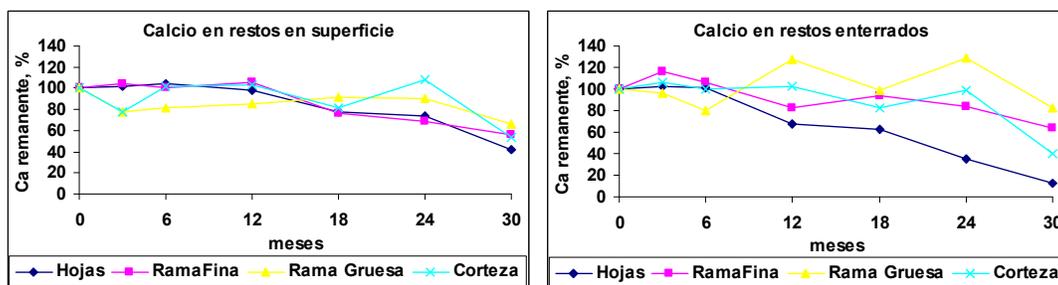


Figura 19. Evolución del Ca en los restos de cosecha de *E. grandis*, según dos modalidades de descomposición: a) restos dejados en superficie sobre el suelo, y b) restos enterrados.

Finalmente, el contenido de Mg en los restos de cosecha mostró disminuir en todos los restos, independiente del tratamiento de manejo (Figura 20). En la situación donde los restos fueron mantenidos en superficie, con excepción de las ramas gruesas, todos los restos mostraron las mismas tasas de liberación de Mg a lo largo del período. Las ramas gruesas solo mostraron una disminución al comienzo del período, no observándose pérdidas de Mg a partir de ellas luego de los seis meses. Este comportamiento cambió cuando las ramas gruesas fueron incorporadas al suelo, donde liberaron aproximadamente un 60% del Mg al final del período de 30 días. Las hojas y la corteza mostraron una mayor liberación de Mg cuando fueron incorporadas, mientras que las ramas finas mostraron un comportamiento similar a las ramas gruesas, lo cual resulta poco claro, ya que resulta una menor liberación de Mg que aquellas colocadas sobre la superficie del suelo.

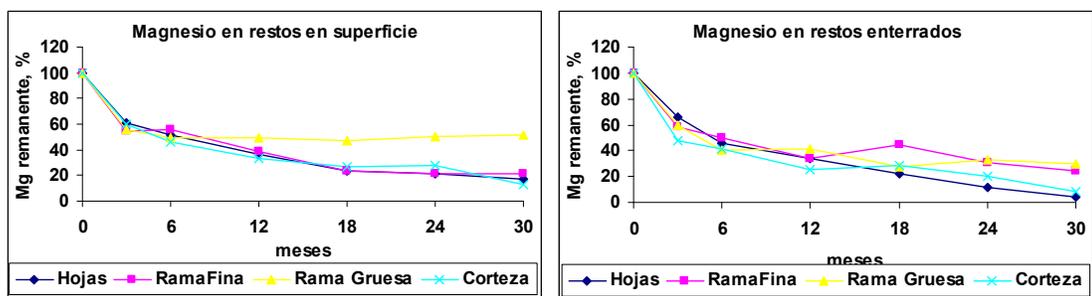


Figura 20. Evolución del Mg en los restos de cosecha de *E. grandis*, según dos modalidades de descomposición: a) restos dejados en superficie sobre el suelo, y b) restos enterrados

b) Concentración de nutrientes en el suelo

La concentración de Ca, Mg y K en el suelo después de un año de iniciado el experimento, con los diferentes manejos de restos se indican en la Figura 21. En los tratamientos sin restos (SR) y manejo de restos con ramero (RR) se muestreó en la entrefila de plantación el suelo no perturbado por el laboreo, para que no hubiera un efecto confundido con el laboreo.

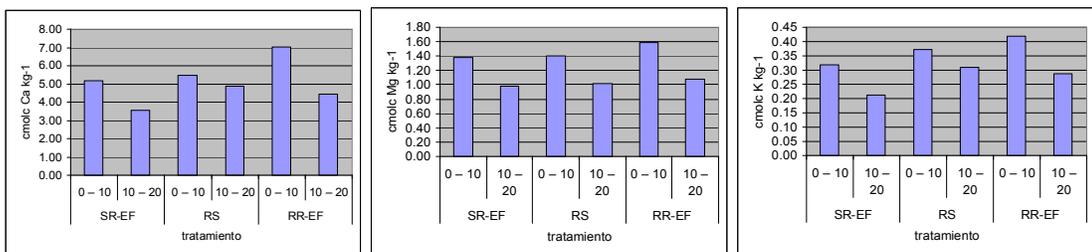


Figura 21. Concentración de Ca, Mg y K en las profundidades de 0-10 y 10-20 cm de suelo sin laborear, con el retiro de los restos de cosecha (SR-EF), con los restos distribuidos en superficie (RS) y con los restos acumulados en rameros (RR-EF).

Si bien los resultados no resultaron significativos, los datos muestran una tendencia a que mantener los restos en superficie, comparado con retirarlos, tuvo un efecto positivo en el aumento de los cationes Ca, Mg y K del suelo, no sólo en los primeros 10 cm, sino también a mayor profundidad (10-20 cm).

Las comparaciones entre los contenidos de Ca, Mg y K del suelo en la fila y en la entrefila cuando los restos fueron dejados en superficie y cuando fueron enterrados se indican en la Figura 22. Si bien se observaron diferencias entre ambos manejos, las mismas no resultaron significativas. No obstante, se observa una tendencia a que la incorporación de los restos con disquera (RD) aumentó las concentraciones de Ca y Mg en los primeros 20 cm respecto al manejo con restos en superficie (RS), aunque no así la de K. El tratamiento de manejo clásico con rameros mostró mayores concentraciones de Ca y Mg en la entrefila de plantación (RR-EF) que en la fila (RR-F), lo cual puede estar asociado a que los restos fueron acumulados en ella. Dicha tendencia no fue constatada para el K. Finalmente, el tratamiento donde hubo un retiro de los restos de cosecha mostró una tendencia a menores concentraciones de Ca, Mg y K que los tratamientos con rameros o disquera, aunque resultó poco clara la tendencia hacia mayores concentraciones de Ca y Mg en la fila (SR-F) que en la entrefila (SR-EF). Una posible explicación es que al realizar el laboreo con excéntrica y encanterador, fue incorporado al suelo el mantillo del bosque, el cual aun contiene Ca y Mg, generándose condiciones favorables para su degradación.

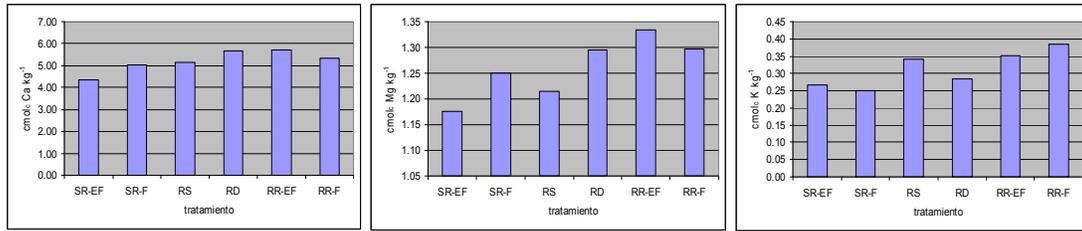


Figura 22. Concentración de Ca, Mg y K en los primeros 20 cm de suelo para los diferentes tratamientos de gestión de restos: sin restos (en la entrefila: SR-EF; en la fila: SR-F), con los restos distribuidos en superficie (RS), con los restos incorporados con disquera (RD), y con los restos acumulados en rameros (en la entrefila: RR-EF; en la fila: RR-F).

Los resultados del muestreo realizado a los 30 meses de la cosecha y manejo diferencial de restos se indican en las Figuras 23, 24 y 25.

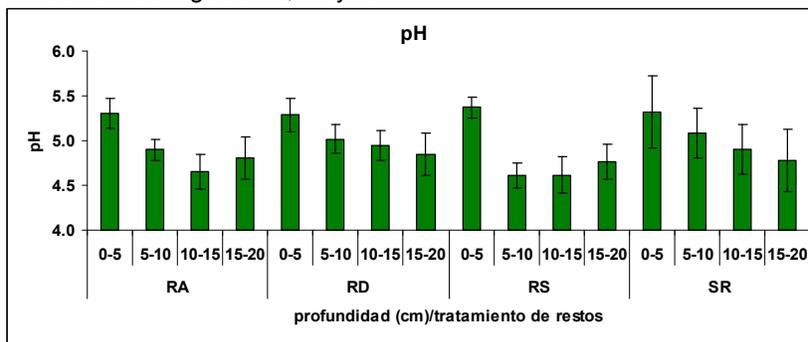


Figura 23. Valores de pH a diferentes profundidades de suelo para los diferentes tratamientos de manejo de restos en el Sitio Ibirapitá a los 30 meses de la cosecha. (RA: restos en rameros; RD: restos incorporados con disquera; RS: restos sin incorporar sobre la superficie; SR: sin restos en superficie).

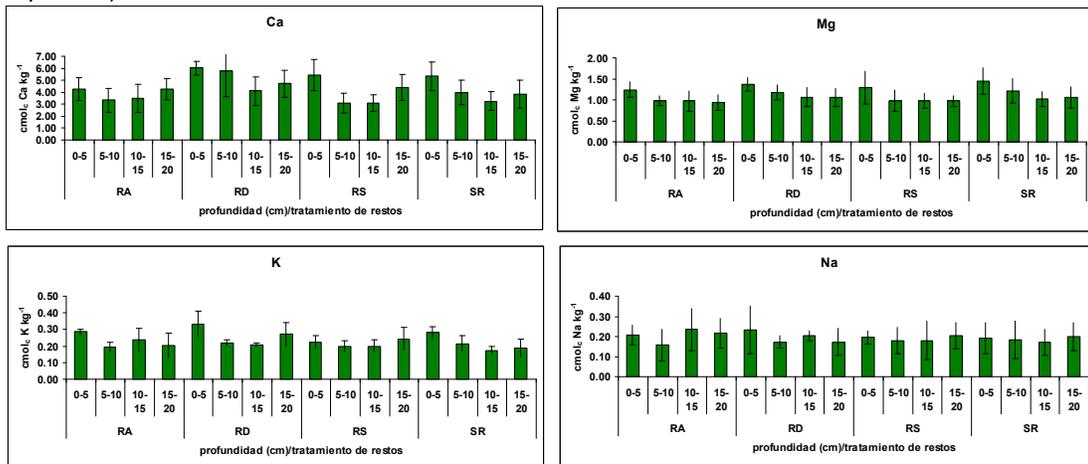


Figura 24. Concentraciones de bases a diferentes profundidades de suelo para los diferentes tratamientos de manejo de restos en el Sitio Ibirapitá a los 30 meses de la cosecha. (RA: restos en rameros; RD: restos incorporados con disquera; RS: restos sin incorporar sobre la superficie; SR: sin restos en superficie).

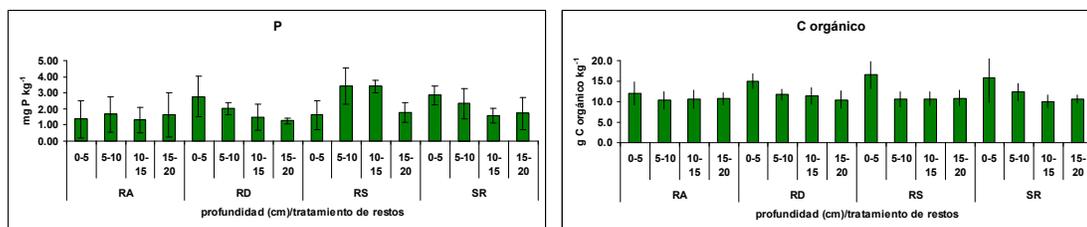


Figura 25. Concentraciones de fósforo y carbono orgánico a diferentes profundidades de suelo para los diferentes tratamientos de manejo de restos en el Sitio Ibirapitá a los 30 meses de la cosecha. (RA: restos en rameros; RD: restos incorporados con disquera; RS: restos sin incorporar sobre la superficie; SR: sin restos en superficie).

El cálculo de los valores promedio de los diferentes parámetros analíticos de suelo para la profundidad de 0 a 20 cm se indica en el Cuadro 10.

Cuadro 10: Valores promedio de los diferentes parámetros analíticos de suelo a la profundidad de 0 a 20 cm en el Experimento de Ibirapitá.

	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	Al	Ca	Mg	K	Na	P	Corg
			cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>					mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
RA	4.9	4.0	0.89	3.84	1.03	0.23	0.20	1.5	10.9
RD	5.0	4.2	0.41	5.15	1.17	0.26	0.20	1.9	12.1
RS	4.8	4.0	1.18	4.00	1.05	0.22	0.19	2.6	12.2
SR	5.0	4.1	0.86	4.11	1.18	0.21	0.19	2.1	12.2

Los resultados muestran diferencias entre los tratamientos, donde por lo general el tratamiento en el cual los restos fueron incorporados al suelo mostró los mayores niveles de bases de intercambio respecto a los otros, producto del incentivo en la descomposición de restos. Las mayores diferencias fueron para el Ca, donde el tratamiento de incorporación de restos con disquera (RD) mostró un aumento significativo de este nutriente, comparado con los demás tratamientos. Esto se explica por el incentivo en la descomposición de restos de cosecha incorporados al suelo. Si se compara los tratamientos donde los restos fueron eliminados (RA y SR) con los tratamientos donde fueron conservados en la línea de plantación (RS y RD), se observa una superioridad significativa de los niveles de Ca del suelo. Similar comportamiento fue observado también para K, donde la incorporación de restos mejoró los niveles de K en el suelo.

Con respecto a los parámetros de acidez del suelo, los resultados mostraron también una tendencia hacia menores condiciones de acidificación en el tratamiento con incorporación de restos. Se observaron diferencias significativas para el contenido de Al entre los tratamientos RS y RD, donde los menores valores de Al en el tratamiento con restos incorporados (RD) podrían estar asociados a la descomposición de los restos y formación de moléculas orgánicas que podrían quelatar al Al.

### c) Efecto de los tratamientos en parámetros de rendimiento.

Se evaluó el efecto de los tratamientos en la altura y el DAP del monte un año después de la plantación. Los resultados se indican en la Figura 26.

Los resultados muestran diferencias significativas entre los tratamientos de manejo de restos y laboreo en la altura y el DAP. El tratamiento que resultó en menores alturas y valores de DAP fue el tratamiento con restos en superficie, el cual no presentó sin embargo diferencias significativas con los restos incorporados, aunque sí con los restantes tratamientos. Por el contrario, los tratamientos sin restos y el manejo con rameros fueron superiores a los restantes, aunque no mostraron diferencias significativas entre sí. El tratamiento con restos incorporados sólo fue significativamente diferente del tratamiento sin restos. El mayor valor de los parámetros de crecimiento en el tratamiento con rameros no está en concordancia con el hecho de haber sido el tratamiento que mostró los valores más reducidos de Ca, Mg y K en el suelo. Sin embargo, es posible que dicha superioridad esté más relacionada con el efecto positivo del laboreo preplantación con disquera y alomador, ya que también el tratamiento sin restos mostró mayores alturas y DAP, pese a ser el tratamiento con menor contenido de Ca, Mg y K en el suelo,

comparado con los restantes tratamientos. En los tratamientos con restos en superficie y con incorporación de restos, se realizó la plantación al pozo, sin afinado del suelo con disquera y alomador, lo cual puede haber enlentecido la implantación y crecimiento inicial del monte. Determinaciones realizadas a los 30 meses de implantación del monte mostraron aún una superioridad significativa en altura de los árboles del tratamiento sin restos, en comparación con el tratamiento de restos incorporados con disquera, aunque no hubo diferencias significativas en el DAP entre los diferentes tratamientos. (Figura 27).

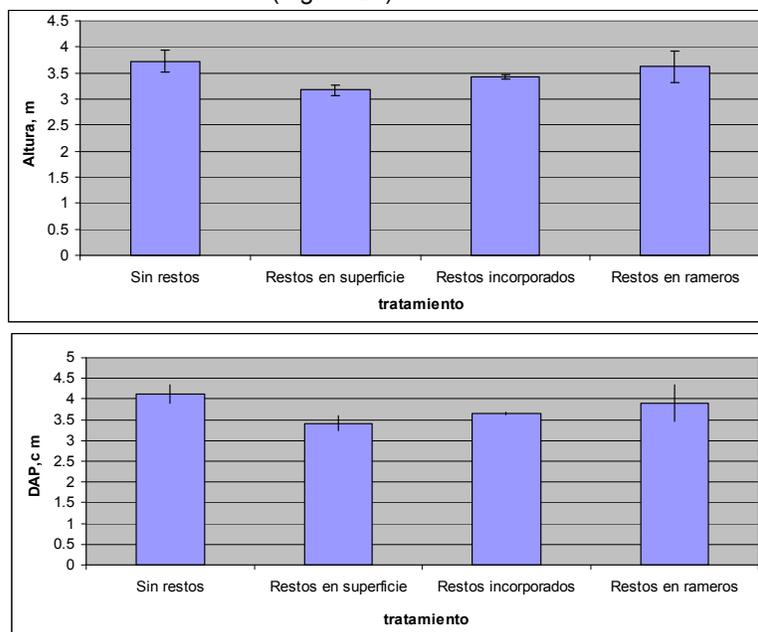


Figura 26. Efecto de los tratamientos de manejo de restos en la altura (gráfica superior) y el DAP (gráfica inferior) al año de la plantación de *E. grandis*.

La concentración de nutrientes (N, Ca, Mg y K) en la hoja de *E. grandis* al año mostró diferencias que pueden estar relacionadas con los manejos, así como con los niveles de nutrientes en los suelos y en los residuos (Figura 28). En el caso de la concentración de N en hojas en el tratamiento de restos incorporados fue significativamente menor a los de restos en superficie y sin restos, lo que puede explicarse por una mayor inmovilización del N mineral del suelo en este tratamiento. En el caso del Ca y Mg, en cambio, el tratamiento de residuos en superficie fue significativamente menor a los demás, seguido por el de restos incorporados, lo que podría relacionarse a un menor desarrollo radicular de los tratamientos con plantación al pozo. Es interesante destacar que las concentraciones de Ca y Mg fueron menores en los tratamientos que a su vez presentaron menores alturas y DAP. En el caso de la concentración de K en hojas no hubo diferencias entre tratamientos, probablemente debido a los altos niveles de K intercambiable medidos en todos los manejos (Figuras 21 y 22).

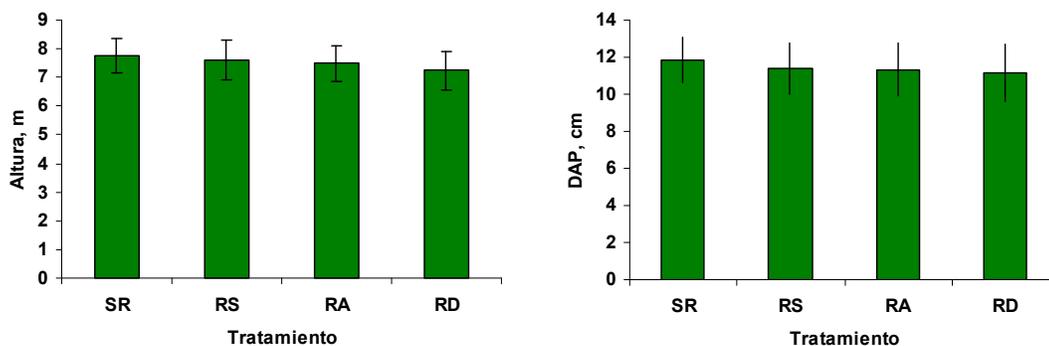


Figura 27. Parámetros de rendimiento (Altura y Diámetro a la Altura del Pecho, DAP) a los 30 meses de crecimiento de la plantación de *E. grandis* del Experimento Ibirapitá (RA: restos en rameros; RD: restos incorporados con disquera; RS: restos sin incorporar sobre la superficie; SR: sin restos en superficie). Valores promedio y Desvíos Standard.

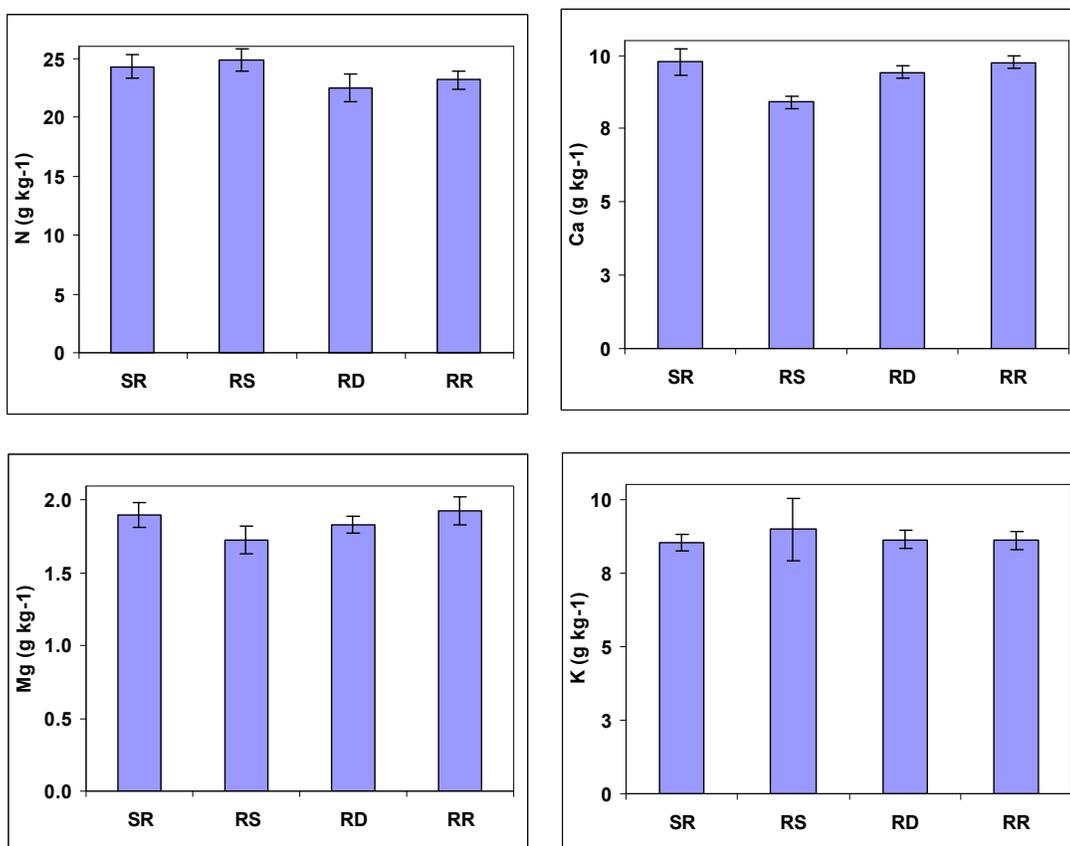


Figura 28. Efecto de los tratamientos de manejo de restos en el contenido foliar de nutrientes (N, Ca, Mg y K) al año de la plantación de *E. grandis*. (RA: restos en rameros; RD: restos incorporados con disquera; RS: restos sin incorporar sobre la superficie; SR: sin restos en superficie).

#### Experimento El Recado

Los componentes de la cosecha del rodal del sitio experimental El Recado se indican en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Producción de biomasa aérea, concentración y extracción de nutrientes de los diferentes componentes de la cosecha de una plantación de *E. maidenii*. Para cada fracción y parámetro se indica el valor promedio (en negrita) y el desvío standard correspondiente.

	MS	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
	Biomasa			g kg <sup>-1</sup>			kg ha <sup>-1</sup>				
	Mg ha <sup>-1</sup>										
Madera	<b>71.6</b> 18.2	<b>1.04</b>	<b>0.10</b>	<b>0.71</b>	<b>1.02</b>	<b>0.25</b>	<b>74.5</b> 13.7	<b>7.2</b> 1.3	<b>50.5</b> 9.3	<b>72.9</b> 13.4	<b>17.9</b> 3.3
Corteza	<b>12.8</b> 2.6	<b>2.10</b>	<b>0.19</b>	<b>4.27</b>	<b>31.10</b>	<b>2.55</b>	<b>26.9</b> 4.9	<b>2.4</b> 0.4	<b>54.7</b> 10.0	<b>398.5</b> 73.1	<b>32.7</b> 6.0
Hojas	<b>8.6</b> 1.8	<b>10.31</b>	<b>0.79</b>	<b>5.97</b>	<b>8.43</b>	<b>1.11</b>	<b>88.7</b> 18.8	<b>6.7</b> 0.5	<b>51.9</b> 13.4	<b>74.1</b> 24.6	<b>9.5</b> 2.0
Ramas	<b>5.8</b> 1.2	<b>4.21</b>	<b>0.34</b>	<b>5.85</b>	<b>12.84</b>	<b>0.74</b>	<b>24.1</b> 3.8	<b>1.9</b> 0.4	<b>33.6</b> 6.8	<b>74.8</b> 18.3	<b>4.3</b> 1.4
Finas	<b>5.2</b> 1.1	<b>1.02</b>	<b>0.14</b>	<b>2.04</b>	<b>5.99</b>	<b>0.53</b>	<b>5.2</b> 1.1	<b>0.7</b> 0.3	<b>10.6</b> 3.3	<b>31.6</b> 12.6	<b>2.8</b> 0.8
Ramas Gruesas	<b>104.0</b> 22.0						<b>219</b> 38	<b>19</b> 3	<b>201</b> 38	<b>652</b> 136	<b>67</b> 12
Total											

De acuerdo con dichos resultados, del total de biomasa producida por el rodal (104 Mg ha<sup>-1</sup>), el 71.6% correspondió a las trozas comerciales. Entre los restos de cosecha, el 12.3, 8.3, 5.6 y 5.0% correspondió a la corteza, las hojas, ramas finas y ramas gruesas, respectivamente.

Desde el punto de vista de los nutrientes, la exportación de ellos en la madera es variable según el nutriente, pero en ningún caso superó el 38%. Proporcionalmente, N y P fueron los exportados en mayor proporción (34 y 38%, respectivamente, aunque, en cantidades absolutas muy diferentes (75 y 7 kg ha<sup>-1</sup> para N y P, respectivamente). Esto indica un reciclaje potencial de los nutrientes elevado a través de los diferentes restos de cosecha, donde la corteza y las hojas son los componentes más relevantes en dicho reciclaje (Figura 29). El N se encuentra mayoritariamente en las hojas, en tanto que el 61% del total de Ca de la biomasa aérea está presente en la corteza. Esto muestra la importancia de realizar el descortezado en el sitio, a los efectos de preservar este nutriente en el sistema. En la Figura 30 se indica la repercusión que tiene el realizar la exportación de la madera junto con la corteza para cada uno de los nutrientes estudiados.

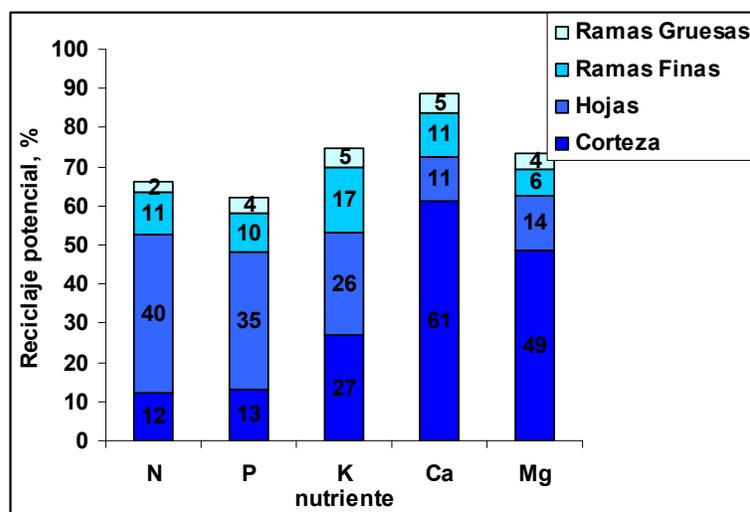


Figura 29. Proporción de los nutrientes potencialmente reciclables presentes en los restos de cosecha de una plantación de *E. maidenii*.

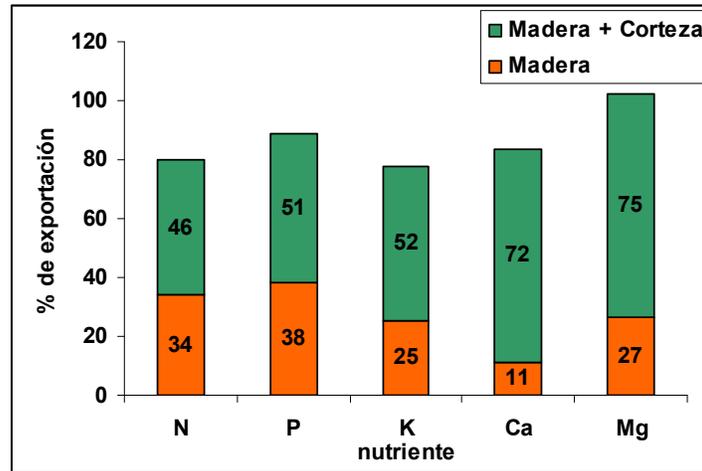


Figura 30. Exportación de nutrientes por las trozas comerciales (madera) con y sin descortezado en el sitio.

*Experimento de gestión de restos de cosecha*

*a) Evolución de la descomposición de restos de cosecha*

A posteriori de la cosecha, se inició el experimento de descomposición de restos bajo tres modalidades de gestión de los mismos: a) manejo tradicional, donde los restos son dejados en superficie, pasaje de despejador, y formación de rameros; b) manejo de incorporación de los restos al suelo, conjuntamente con su picado; y c) similar operación, pero con un pasaje posterior de disquera. Paralelamente al experimento de campo, se desarrolló un estudio de la descomposición de los restos bajo estas dos modalidades. Los resultados del mismo para los dos años de evaluación se indican en la Figura 31.

Los patrones de descomposición de restos de cosecha durante los 24 meses que siguieron a la cosecha variaron según la modalidad de gestión de los mismos. Al igual que en el experimento de Ibirapitá, cuando éstos fueron enterrados, las tasas de descomposición se acentuaron, determinando en términos generales una menor cantidad de biomasa remanente en cada resto, que cuando se mantuvieron en superficie. Esto mejoró la descomposición de los restos más groseros (corteza y ramas), constatado por una mayor pérdida de biomasa (61% en promedio de las tres fracciones) que cuando fueron dejados en superficie (32%). Sin embargo en las hojas no se observaron diferencias muy notorias. En los últimos muestreos surge para las hojas una tendencia hacia una mayor descomposición estando en superficie, lo cual es contradictorio de acuerdo con los procesos de los otros restos. Es probable que esto se deba a limitantes metodológicas para obtener una muestra totalmente limpia de suelo cuando estuvieron enterradas.

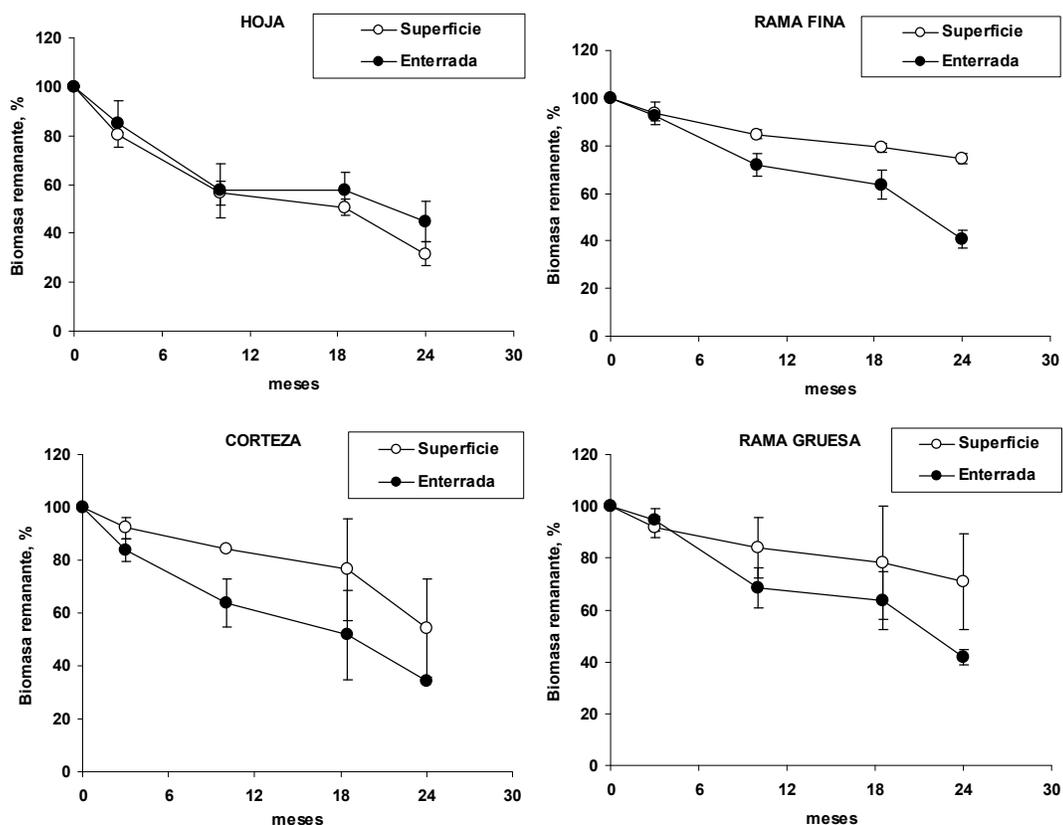


Figura 31. Evolución de la biomasa de los restos de cosecha de *E. maidenii* en el Experimento El Recado según las dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados. Valores promedio y desvíos standard.

Como consecuencia de dicha descomposición, la dinámica de los nutrientes presentes en dichos restos se vio afectada. En la Figura 32 se indica la evolución en el contenido de N de los restos.

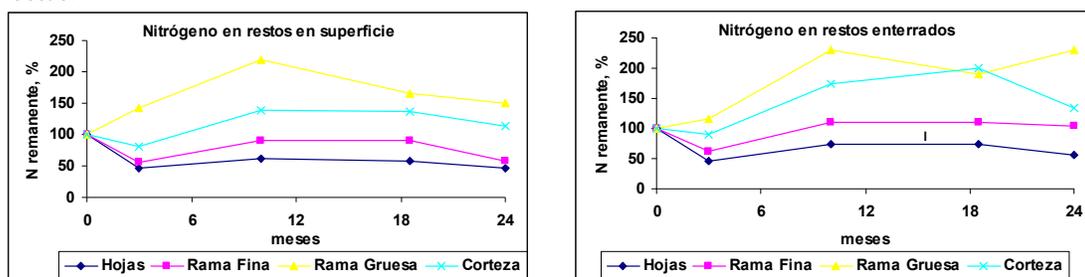


Figura 32. Evolución del N en los restos de cosecha de *E. maidenii* en el Experimento El Recado según dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados.

Las hojas y las ramas finas fueron los restos que perdieron N durante el proceso de descomposición, mientras que en las ramas gruesas y la corteza se observó un aumento del contenido de N, lo cual estaría indicando la inmovilización de N mineral del suelo. Dicho efecto se vio más acentuado en las ramas gruesas, independiente de la modalidad de gestión del resto (en superficie o enterrado). La corteza mostró una mayor inmovilización al ser enterrada, probablemente debido a la mayor proporción de material descompuesto, con la consiguiente mayor disponibilidad de carbono.

Con respecto a la evolución del P en los restos, el proceso fue muy similar al N, aunque para este nutriente el único resto que liberó P fueron las hojas. La corteza y las ramas gruesas, por el contrario, mostraron una inmovilización del nutriente, siendo en las primeras con el manejo de enterrado que se observó con más intensidad el proceso.

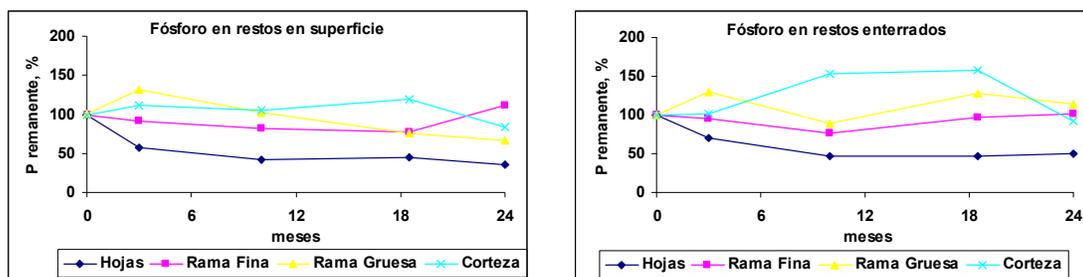


Figura 33. Evolución del P en los restos de cosecha de *E. maidenii* en el Experimento El Recado, según dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados.

La evolución del K fue más clara en cuanto a su liberación rápida de todos los restos (Figura 34). A los 18 meses más del 80% del K de los restos fue liberado al suelo.

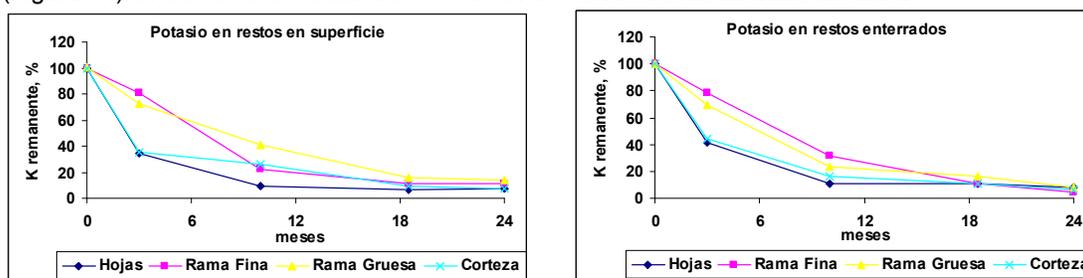


Figura 34. Evolución del K en los restos de cosecha de *E. maidenii* en el Experimento El Recado, según dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados.

Con respecto al Ca, en este experimento se observó una liberación de Ca a partir de la descomposición de hojas y corteza en superficie, mientras que las ramas mostraron pocos cambios en sus contenidos de Ca. El enterrado aumentó la liberación de Ca durante la descomposición de las ramas finas, pero no de las ramas gruesas. Se observó una relativamente similar pérdida de Ca a partir de hojas y corteza cuando estas fueron enterradas que cuando estuvieron en superficie, lo cual podría relacionarse con la escasez de diferencias en las tasas de descomposición de hojas en ambos manejos.

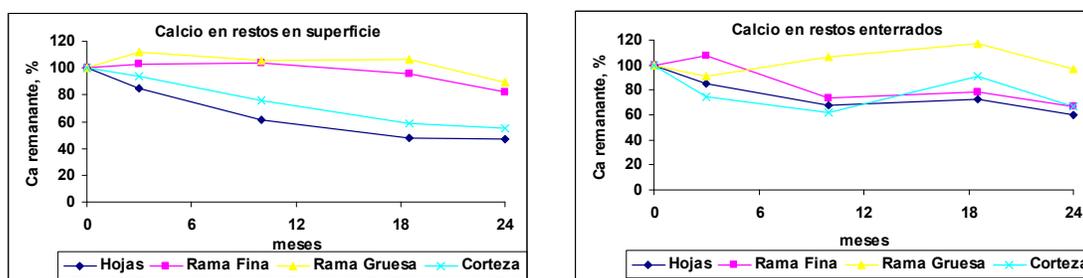


Figura 35. Evolución del Ca en los restos de cosecha de *E. maidenii* en el Experimento El Recado, según dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados.

Finalmente, con respecto al Mg se observó algo similar que con Ca, siendo las hojas y la corteza quienes perdieron en mayor proporción al nutriente en el transcurso de la descomposición (Figura 36). Las ramas gruesas mostraron mayores contenidos de Mg durante todo el proceso,

mientras que las ramas finas no mostraron cambios importantes durante el período evaluado, excepto a los 24 meses, donde se observó una disminución en el contenido de Mg de todos los restos cuando estos fueron enterrados.

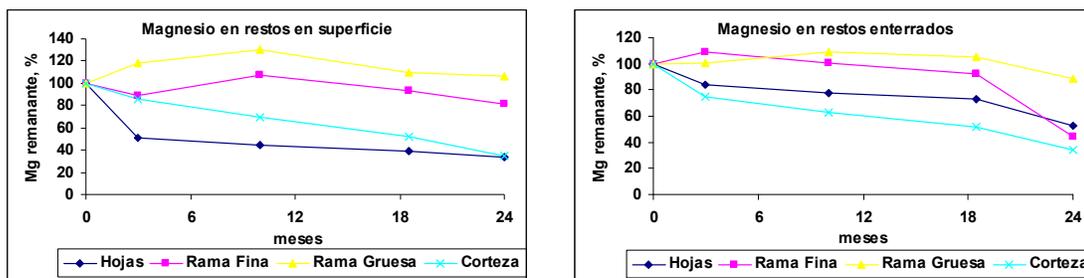


Figura 36. Evolución del Mg en los restos de cosecha de *E. maidenii* en el Experimento El Recado, según dos modalidades de descomposición: restos dejados en superficie sobre el suelo, y restos enterrados.

*b) Concentración de nutrientes en el suelo*

Los resultados del muestreo de suelos a los 18 meses de instalado el experimento se indican en las Figuras 37 y 38.

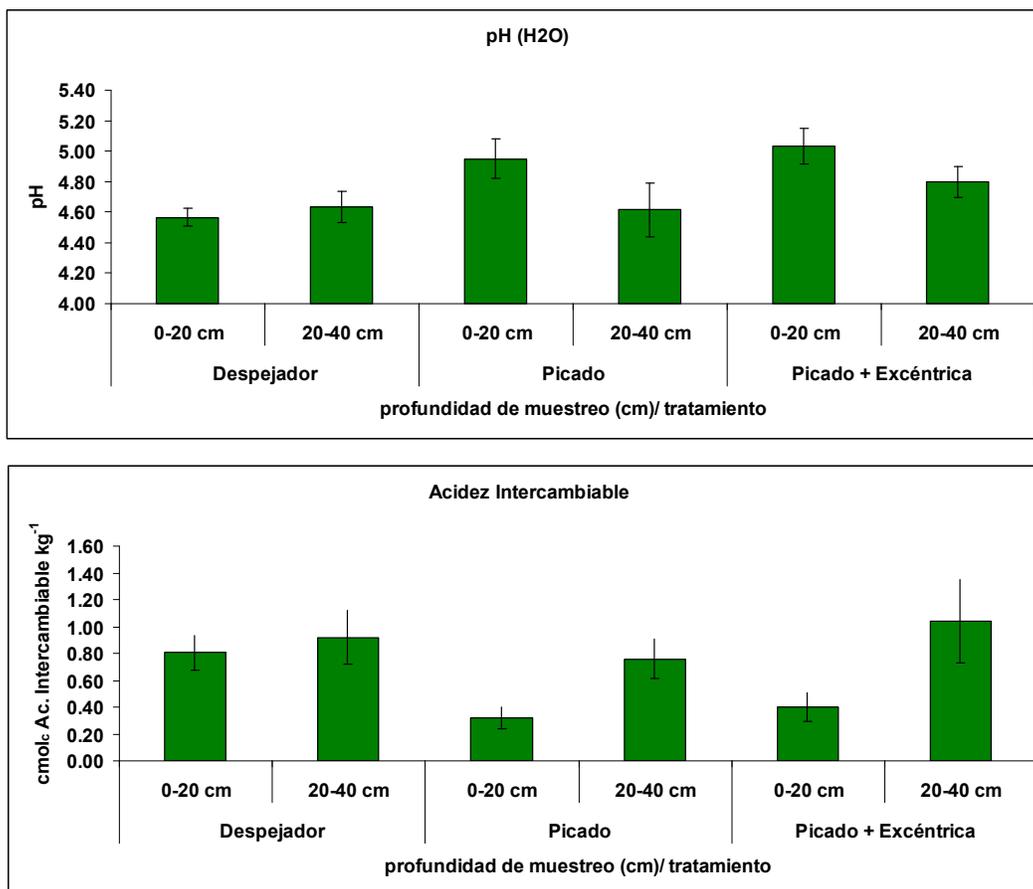


Figura 37. Parámetros de acidez a dos profundidades de suelo en los tratamientos de manejo de restos en el Experimento El Recado a los 18 meses de su instalación.

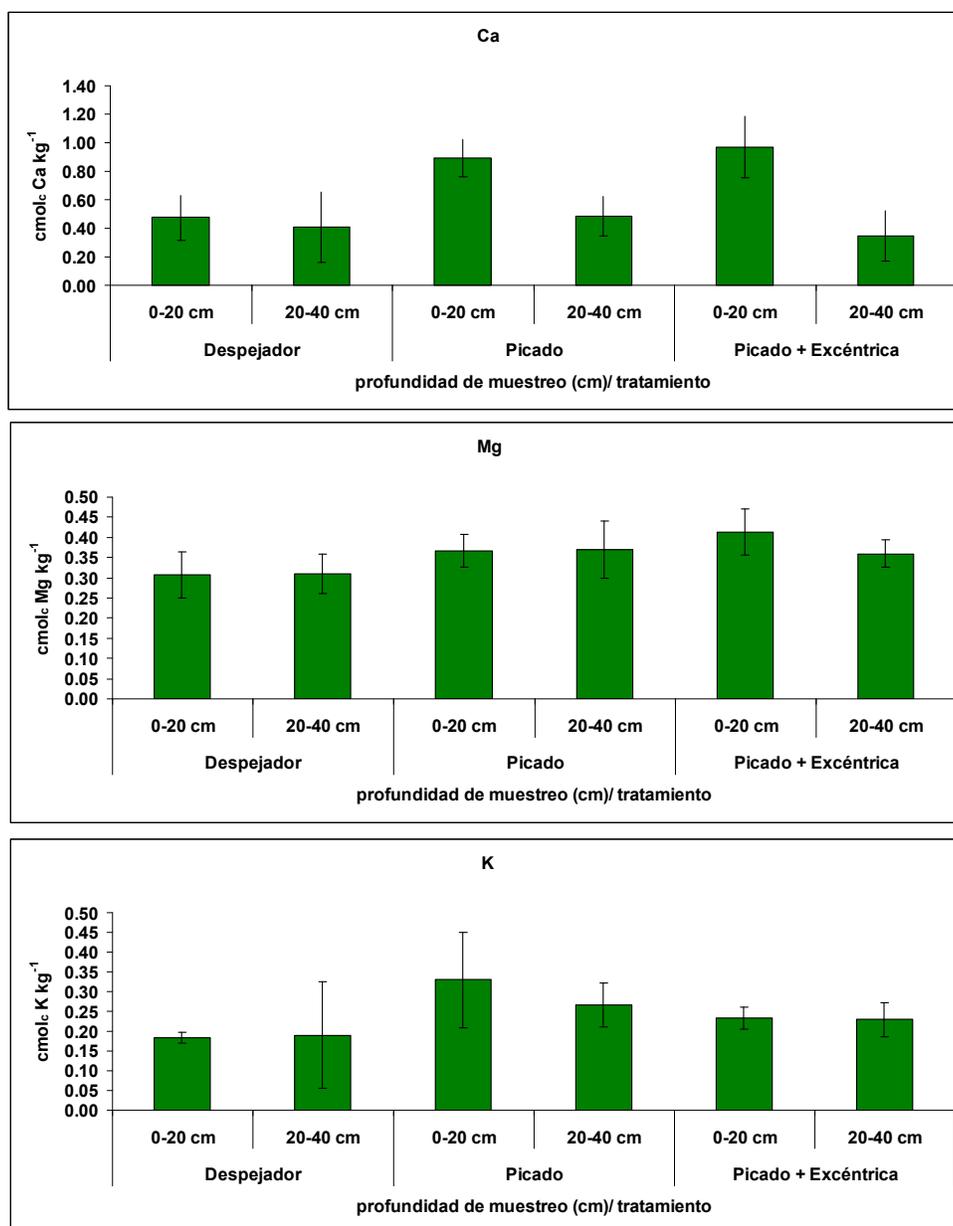


Figura 38. Concentración de Ca, Mg y K a dos profundidades de suelo en los tratamientos de manejo de restos en el Experimento El Recado a los 18 meses de su instalación.

Los resultados muestran un efecto positivo de la incorporación de restos de cosecha en el suelo, disminuyendo la acidez y aumentando el contenido de bases del mismo. Dichas diferencias resultaron significativas en los primeros 20 cm de suelo, lo cual está asociado a la descomposición de restos incorporados en la fila de plantación, mientras que en el tratamiento con despejador no sólo no hubo incorporación de restos sino que estos fueron despejados a la entrefila de plantación, donde no fueron incorporados, siendo su descomposición más lenta.

#### Experimento La Corona

La evolución de la biomasa de los diferentes restos de cosecha de la poda y el raleo de la plantación de *Pinus taeda* del Experimento La Corona se indica en la Figura 39. En la misma se observa una rápida descomposición de las acículas, seguida por las ramas finas. El colocar ambas fracciones juntas (acículas + ramas finas) no aceleró la descomposición de estas últimas, sino que mas bien se enlentenció la descomposición de ambas. Las ramas gruesas mostraron la menor

tasa de descomposición a lo largo del período, aun menor a la de los troncos no comerciales. A los cuatro años todas las fracciones han disminuido su biomasa inicial en más de un 64%, quedando como biomasa remanente un 18, 26 y 36% para acículas, ramas finas y ramas gruesas, respectivamente.

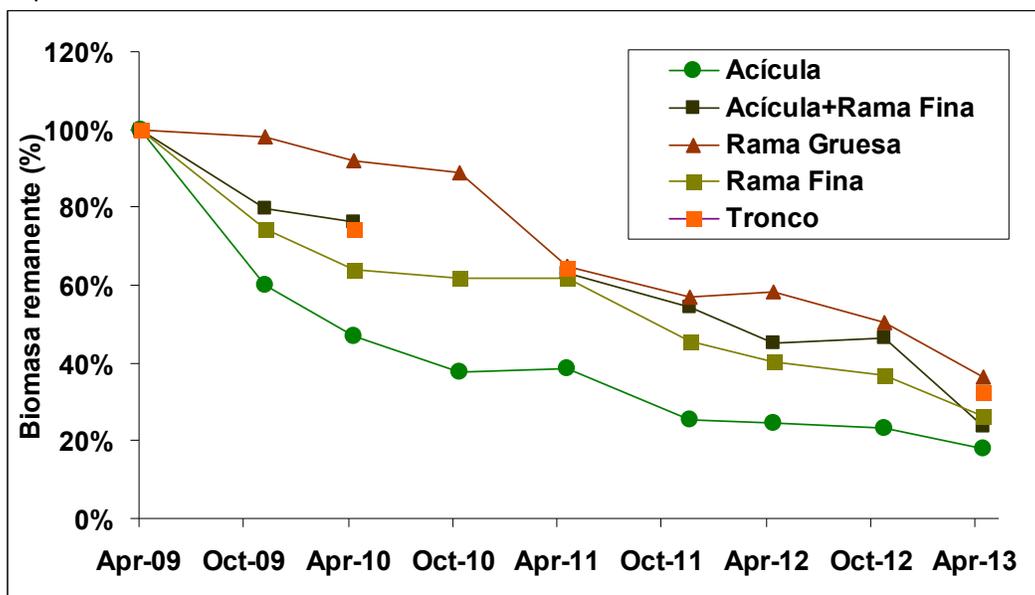


Figura 39. Biomasa remanente de restos en diferentes fechas posteriores a una poda y raleo de una plantación de *Pinus taeda*.

En la Figura 40 se indica la evolución del N presente en los restos en el transcurso de la descomposición. En concordancia con las tasas de descomposición de la biomasa, las acículas fue la fracción que liberó más rápidamente el N, donde en el primer año se liberó más de la mitad del nutriente. Las restantes fracciones, de más lenta descomposición, liberaron el N más lentamente. Algunas de ellas (ramas gruesas) llegaron a mostrar inmovilización de N como consecuencia de relaciones C/N altas.

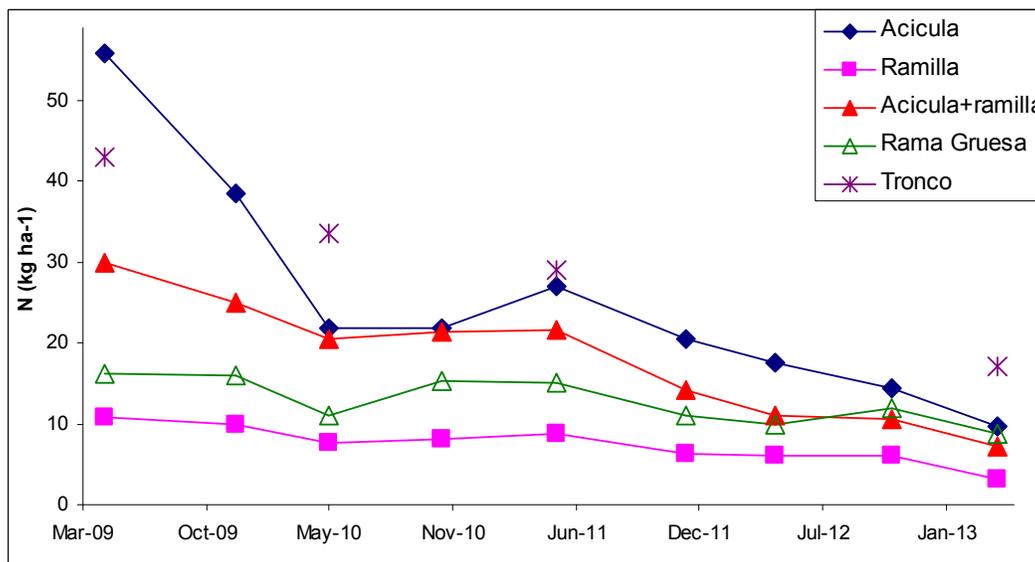


Figura 40. Nitrógeno presente en diferentes restos en fechas posteriores a una poda y raleo de una plantación de *Pinus taeda*.

El comportamiento del P fue similar al del N (Figura 41), mostrando la mayor tasa de liberación del nutriente para acículas y durante el primer año de descomposición. Los restantes materiales tuvieron una lenta y gradual descomposición, por lo que la liberación del nutriente por

parte de ellos fue muy lenta, observándose en algunos períodos cierta inmovilización en las fracciones más groseras (ramas gruesas, y en menor medida ramas finas).

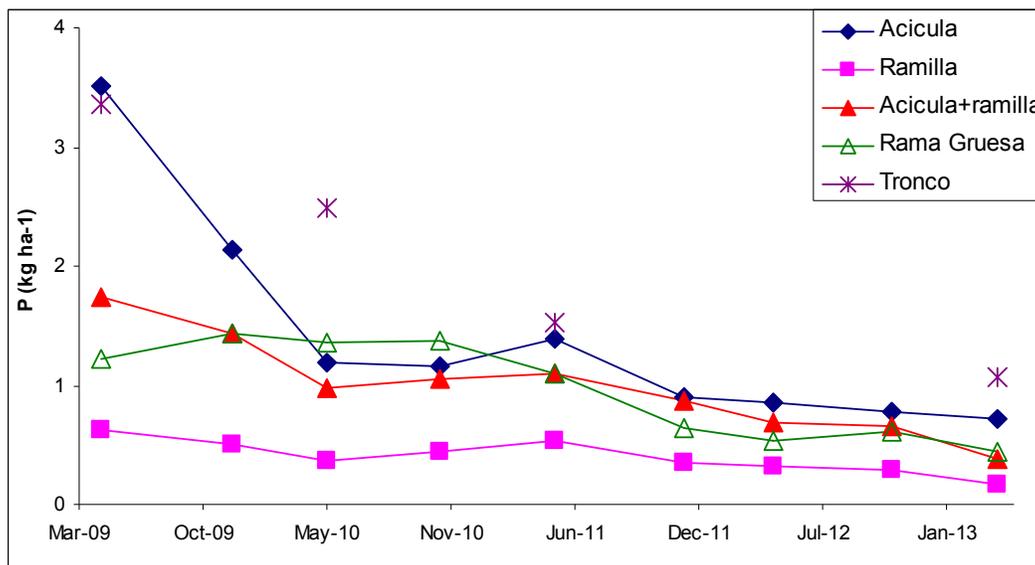


Figura 41. Fósforo presente en diferentes restos en fechas posteriores a una poda y raleo de una plantación de *Pinus taeda*.

La liberación de K a partir de los restos se dio rápidamente, de tal forma que a los 6 meses de la poda y raleo, la mayoría del K de todos los restos ya había sido liberada y retornado al suelo (Figura 42). El único componente que mantuvo una alta proporción del K inicial durante todo el período de descomposición fue madera no comercial (tronco), probablemente debido a que la estructura leñosa constituyó una barrera para la lixiviación de este elemento de los restos.

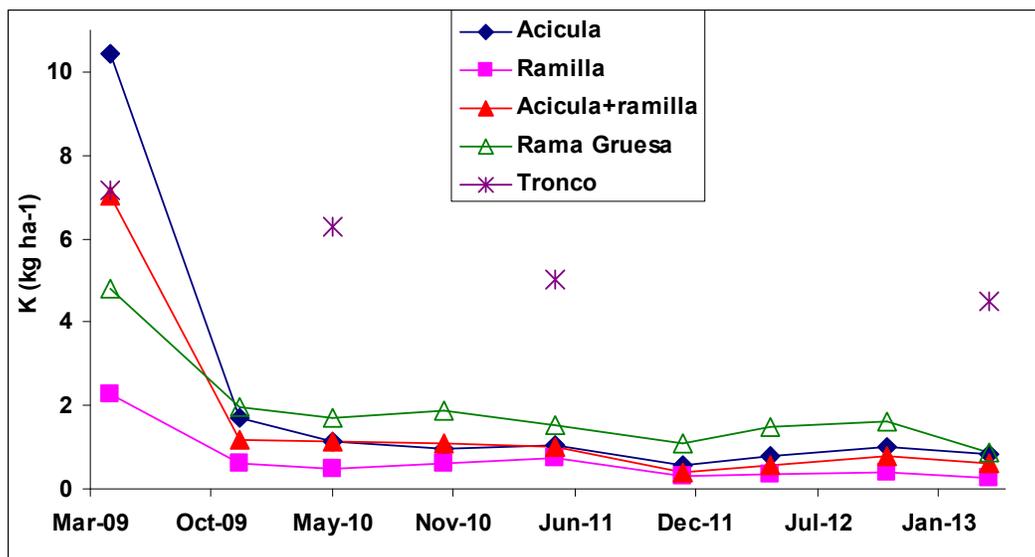


Figura 42. Potasio presente en diferentes restos en fechas posteriores a una poda y raleo de una plantación de *Pinus taeda*.

La Figura 43 muestra la evolución del contenido de Ca en los restos de poda y raleo para las diferentes componentes. La liberación de Ca de los restos fue más lenta y mostró diferencias según la componente de cosecha. Las acículas mostraron una disminución paulatina del Ca de su biomasa, siendo la componente que más rápido liberó al nutriente de todas las fracciones

evaluadas. Las ramas finas y gruesas fueron más lentas en su descomposición y liberar el Ca de sus estructuras. La mezcla de acículas y ramas finas (ramillas) mostraron una tasa de liberación de Ca similar a la de ramas finas hasta el mes de junio de 2011, donde se incrementó la tasa de descomposición.

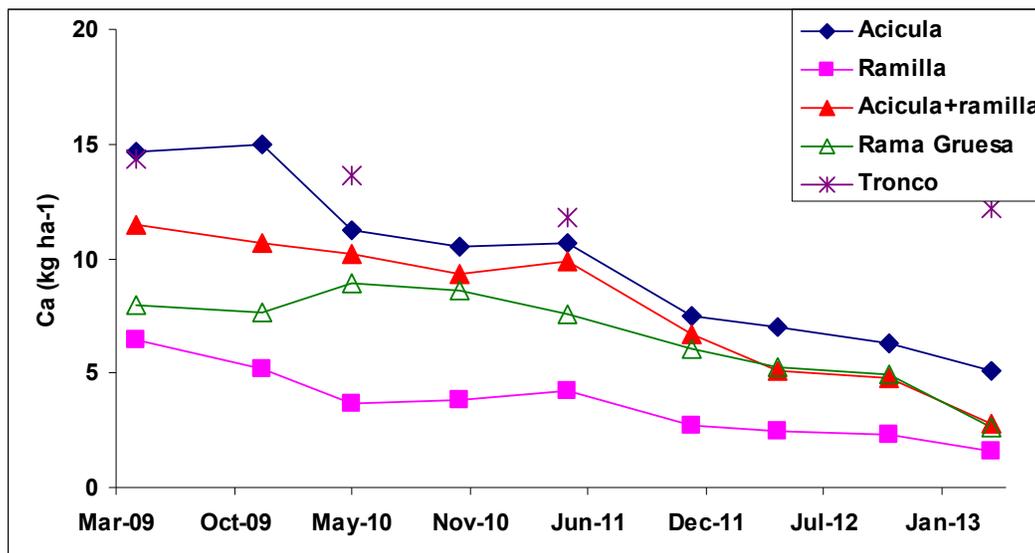


Figura 43. Calcio presente en diferentes restos en fechas posteriores a una poda y raleo de una plantación de *Pinus taeda*.

La tasa de liberación de Mg fue rápida en las acículas durante el primer año de descomposición, endenteciéndose luego su descomposición. Los restantes componentes liberaron más lentamente el Mg de sus estructuras. Para Mg, igual que en el caso de K y Ca la madera no comercial mostró la mayor proporción del nutriente inicial al final del estudio.

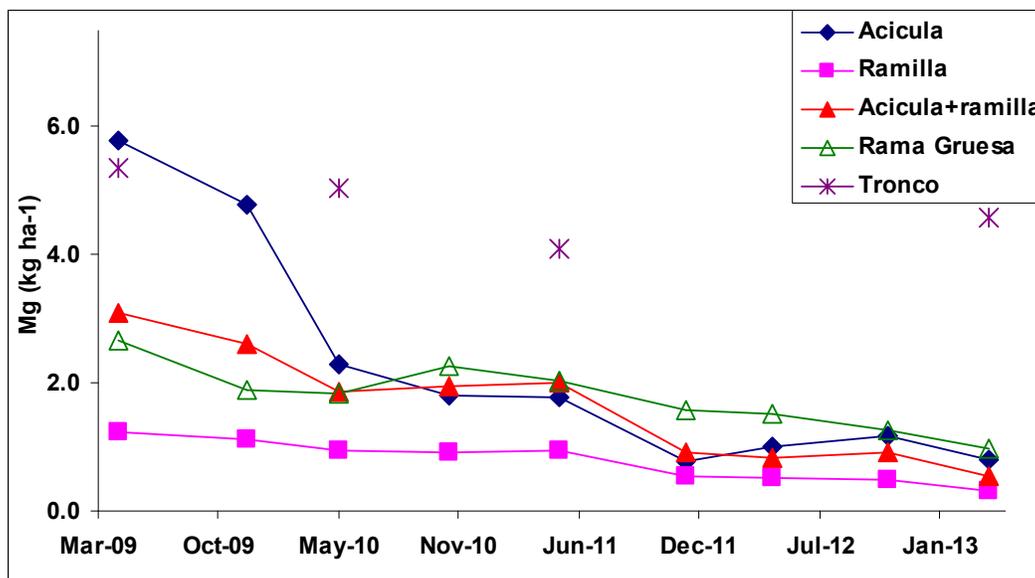


Figura 44. Magnesio presente en diferentes restos en fechas posteriores a una poda y raleo de una plantación de *Pinus taeda*.

### Conclusiones

En las dos especies cosechadas (*E. grandis* y *E. maidenii*), del total de biomasa producida, entre un 72 y un 77% correspondió a las trozas comerciales, las cuales exportaron

cantidades de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) que no superaron individualmente entre un 35 a 38% del total absorbido por los árboles.

Se observó la mayor concentración de N, P, K y Mg en las hojas de eucalipto y acículas de pino, mientras que en la corteza de eucalipto reside la mayoría del Ca del árbol (en términos absolutos y relativos). Esto confirma la necesidad de un manejo de cosecha que no permita su exportación fuera del sitio, como forma de lograr el retorno del nutriente al suelo.

El enterrado de los restos de cosecha aceleró su descomposición, lo cual es particularmente importante en los restos groseros (ramas gruesas y corteza), lo cual permitió un mayor retorno al suelo de los nutrientes presentes en ellos, que cuando su descomposición de dio sobre la superficie del suelo.

Para algunos nutrientes como N (y en ciertos casos P y Ca) se observó una inmovilización, principalmente en restos groseros (ramas gruesas y corteza). Dicho comportamiento fue observado en ambas modalidades de gestión de los restos, aunque con el enterrado se podría lograr una disponibilidad más inmediata de dichos nutrientes.

El retorno de K al suelo es rápido, y es el menos afectado por el manejo de los restos de cosecha, de manera que en el correr de 12 meses la mayoría del nutriente ha retornado al suelo.

La mayor liberación de Ca se opera a partir de las hojas, en tanto que para restos como la corteza y las ramas es necesario mejorar su liberación a partir de su incorporación al suelo y en períodos más prolongados de tiempo, los cuales mejoran la descomposición de estos restos.

La liberación de Mg de los restos tuvo un comportamiento intermedio, lográndose cierta mejoría con el enterrado de los restos particularmente groseros.

El efecto de incorporación de los restos al suelo tuvo un efecto positivo no solo en el incremento de la concentración de cationes como Ca, Mg y K, sino en lograr cierta reducción en la acidez del suelo, probablemente a partir de una quelatación del Al intercambiable por parte de los compuestos orgánicos producto de la descomposición de restos.

No fue observado un efecto positivo inmediato de la incorporación de restos en los parámetros de rendimiento (DAP y Altura), lo cual se interpretó como limitantes en la preparación del suelo para las situaciones de incorporación de restos. La mejora en dicha tecnología podría compensar las diferencias encontradas. No obstante, se encontraron pocas diferencias a los 30 meses de implantación del monte entre los diferentes tratamientos.

### **Formación de Recursos Humanos**

Parte de los experimentos realizados constituyeron una tesis de grado de los estudiantes Marcelo Hitta y Marcos Lorenzo. Por otra parte, la información emergente de los estudios realizados constituye el banco de datos a ser trabajado en una tesis de doctorado del Ing. Agr. (M.Sc.) Alejandro González.

## **1b) Encalado de suelos**

### **Introducción**

Luego de un turno de plantación se han operado una serie de cambios en el suelo bajo el monte. Entre ellos, se ha observado una acidificación del suelo, la cual viene generalmente acompañada de la pérdida de cationes o bases de intercambio. A los efectos de revertir dichos procesos y compensarlos parcialmente se plantea el uso de enmiendas como la aplicación de caliza dolomítica, la cual permite la incorporación de calcio y magnesio al suelo, los dos cationes que fundamentalmente han mostrado verse mayormente afectados luego de un turno de plantación.

### **Materiales y Métodos**

Se instalaron dos experimentos de campo de encalado de suelos con diferentes dosis de dolomita en dos replantaciones de eucalipto. En uno de ellos se está evaluando también la forma de aplicación del material calcáreo (cobertura e incorporada). En estos experimentos se está midiendo la evolución de la acidez y el contenido de cationes de los suelos, así como su efecto en los patrones de crecimiento de los árboles instalados.

### Sitios experimentales

Los experimentos fueron instalados en dos localidades: uno en un suelo arenoso del norte del país (Establecimiento Cerro Agudo), y otro en un suelo arenoso del litoral oeste (Establecimiento Santo Tomás).

### Experimento Cerro Agudo

Se instaló un experimento de campo luego de la cosecha de una plantación de *Eucalyptus grandis* en un Luvisol Ócrico perteneciente al grupo CONEAT 7.32 (Ruta 5, km 405, Dpto. de Tacuarembó, Coordenadas S31° 38' 24" W55° 51' 01"). La descripción del perfil de suelo se indica en el Cuadro 12, mientras que los datos analíticos de los estratos de 0-20 y 20-40 cm se indican en el Cuadro 13. En la Figura 45 se muestra el perfil de suelo del experimento.



Figura 45. Perfil de suelo del sitio del experimento de Cerro Agudo.

Cuadro 12. Descripción morfológica del perfil de suelo del Luvisol Ócrico del Experimento de Cerro Agudo.

Horizonte	Profundidad	Textura	Color y Características
Ap	0 - 24	ArF	7.5YR 4/4 (h); bloques subangulares medios débiles; transición clara
A1	24 - 53	ArF	7.5YR 3/4 (h); bloques subangulares medios débiles; transición clara
AB	53 - 105	FACAr	7.5YR 3/4 (h); bloques subangulares medios débiles; transición clara
Bt1	105 +	FACAr - AcAr;	7.5YR 3/4 (h); películas de arcilla; moteado 7,5YR 5/8 y algo más rojo, común, borde tenue y difuso.

Observaciones: en algunos sitios del ensayo en lugar de un horizonte transicional AB se observó un horizonte E a mayor profundidad (72 cm), y que ocurre hasta los 105 cm, donde aparece el horizonte B.

Cuadro 13. Parámetros analíticos de suelo del Experimento de Cerro Agudo.

Tratamiento	Prof.	pH	pH	Ac. Int.	Ca	Mg	K	Na	B.T.	C.I.C.
	(cm)	(H <sub>2</sub> O)	(KCl)				cmolc kg <sup>-1</sup>			
<b>Cobertura</b>	0-20	5.2	4.2	0.36	0.63	0.21	0.19	0.38	1.40	1.76
	20-40	5.0	4.0	0.72	0.31	0.15	0.19	0.44	1.09	1.81
<b>Laboreo</b>	0-20	5.1	4.2	0.38	0.53	0.22	0.20	0.31	1.25	1.63
	20-40	5.1	4.1	0.81	0.33	0.16	0.21	0.43	1.13	1.94

El diseño experimental fue en parcelas divididas, donde la parcela grande correspondió al método de aplicación de dolomita (cobertura e incorporado), y las parcelas chicas fueron las dosis de dolomita: 0, 2 y 4 Mg dolomita ha<sup>-1</sup> (Figura 46). En cada parcela se evaluaron 2 filas centrales de 10 plantas cada una. Se realizaron 4 repeticiones de los tratamientos. La aplicación de la caliza se realizó el 09/08/2010, y la plantación se realizó el 10/09/2010 con *E. grandis*, fertilizando con 140 g/planta de 14% N-30% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-12% K<sub>2</sub>O + 3% S + 0,15% B + 0,2-0,3% Zn.



Figura 46. Aplicación de dolomita en el experimento de Cerro Agudo.

#### Experimento Santo Tomás

Se instaló un experimento de campo luego de la cosecha de una plantación de *Eucalyptus globulus* en un Luvisol Ócrico del Grupo CONEAT 9.3 (Ruta 25, km 68, Dpto. de Río Negro, Coordenadas S32° 28' 55" W57° 21' 19"). El diseño fue de parcelas en bloques al azar con cuatro repeticiones. La aplicación de la dolomita se realizó el 16/02/2011, y la plantación se realizó el 23/02/2011 con *E. Urograndis* 361, fertilizando con 80 g de Fosfato Monoamónico/planta.

El Cuadro 14 muestra la descripción del perfil del sitio, mientras que en el Cuadro 15 se indican los parámetros analíticos de los estratos 0-20 y 20-34 cm del mismo (horizonte A).

Cuadro 14. Descripción del perfil de suelo bajo monte del sitio experimental Santo Tomás.

Monte				
Horiz.	Prof.	Textura	Color	
Ap	0 - 20	ArF	10 YR 4/3(h)	
A	20 - 34	ArF	10 YR 3/3(h)	
BA	34 - 45	ArF	10 YR 4/4(h)	Concreciones Fe Mn, pocas
Bt1	45 - 57	AcAr-Ac	10 YR 4/3	Moteados 10R 6/8, 30%, borde neto, 1mm
Bt2	57 - 85	Ac	10 YR 4/1	Moteados 2.5YR 4/8, ab,bn, 10mm
BC	85 - 110	AcAr	5 YR 5/6	Concreciones Fe Mn irregulares, blandas, 5 mm
C	110 - +	FACAr	5YR 6/6	

Cuadro 15. Datos promedio y desvío standard de algunos parámetros analíticos de suelo al inicio del experimento de Santo Tomás.

Prof	pH	std	pH	std	COS	std	Ac.	std	Ca	std	Mg	std	K	std	Na	std
(cm)	(H <sub>2</sub> O)		(KCl)		(g kg <sup>-1</sup> )		Int.				(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )					
0-20	5.0	0.2	4.1	0.1	8.6	1.9	0.48	0.20	1.72	0.31	0.53	0.04	0.26	0.02	0.34	0.03
20-40	4.9	0.1	3.9	0.0	4.3	0.7	0.79	0.11	1.67	0.34	0.58	0.06	0.19	0.02	0.34	0.04

#### Muestreos y Análisis de suelos

En el experimento de Cerro Agudo se realizó un primer muestreo de suelos a los 3 meses, a los efectos de ver el efecto del encalado bajo las dos modalidades de aplicación (en cobertura e incorporada). Luego, 12 meses más tarde, se realizó un nuevo muestreo estratificado a diferentes profundidades (0 a 5, 5 a 10, 10 a 15, 15 a 20 y 20 a 40 cm). Finalmente, a los 30 meses se reiteró un muestreo de suelos por parcela a las profundidades de 0 a 20 y 20 a 40 cm). En el experimento de Santo Tomás se realizó un primer muestreo de los suelos a los 6 meses de

aplicación de la dolomita a las profundidades de 0 a 20 y 20 a 40 cm. Posteriormente se realizaron dos muestreos más a los 12 y 24 meses de aplicación de la dolomita, a las mismas profundidades de suelo. En dichas muestras se determinó el pH por el método potenciométrico (en agua y KCl, con una relación suelo:solución de 1:2.5). La acidez intercambiable se extrajo con KCl 1M y determinación posterior por titulación con NaOH. Las bases de intercambio (Ca, Mg, K y Na) fueron extraídas mediante acetato de amonio 1M y posterior determinación de Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica, y K y Na mediante espectrofotometría de emisión).

## Resultados y Discusión

### Experimento Cerro Agudo

Luego de tres meses de aplicados los tratamientos se observó un efecto de la aplicación de caliza (dolomita) sobre el pH del suelo (Figura 47).

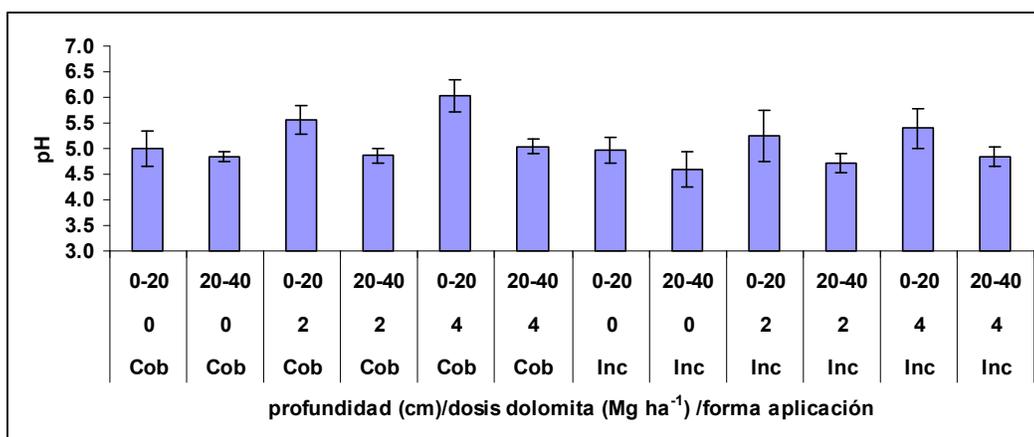


Figura 47. pH del suelo (medido en H<sub>2</sub>O) para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación (Experimento Cerro Agudo) a los 3 meses de aplicación del material.

La aplicación de caliza promovió un aumento en el pH del suelo, el cual estuvo básicamente restringido a la capa superficial (0-20 cm) y resultó más evidente en los tratamientos de cobertura en comparación con los tratamientos de incorporación. También se notó un efecto de la aplicación de caliza sobre la acidez intercambiable del suelo (Figura 48).

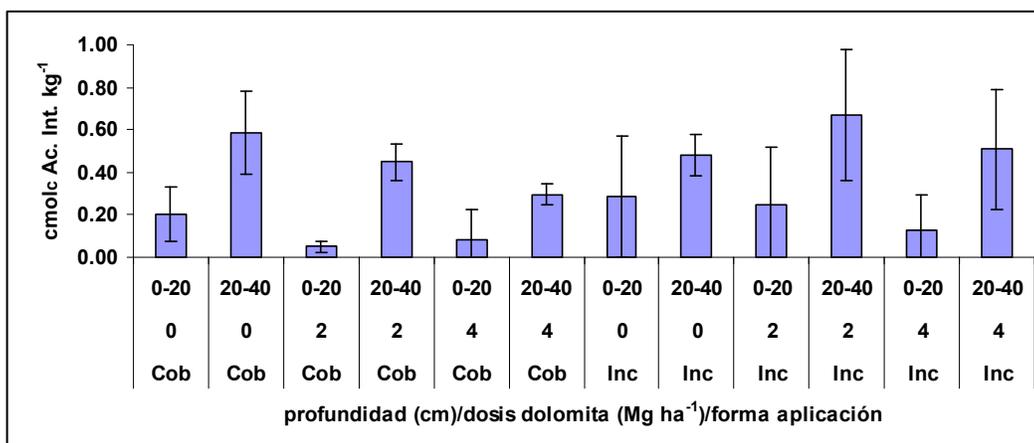


Figura 48. Concentraciones de Acidez intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación (Experimento Cerro Agudo) a los 3 meses de aplicación del material.

El encalado produjo un efecto de reducción de la acidez intercambiable, notándose su efecto incluso en la capa más profunda (20-40 cm).

Se constató una relación negativa entre el pH del suelo a los tres meses de aplicados los tratamientos y el contenido de acidez intercambiable (Figura 49).

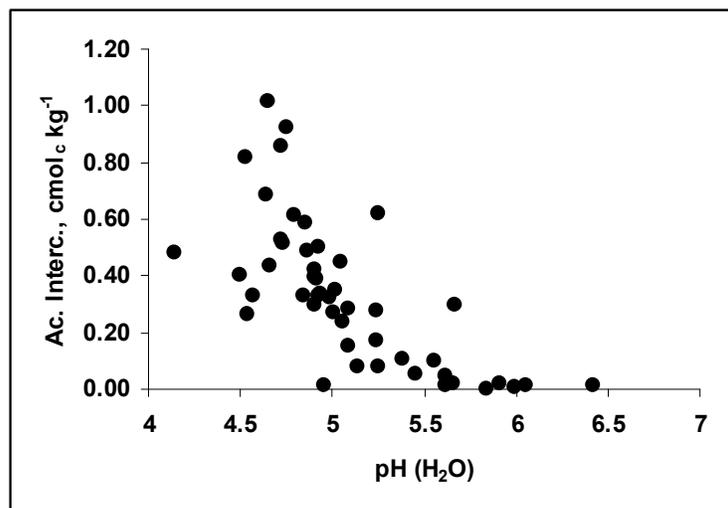


Figura 49. Relación entre el contenido de acidez intercambiable y el pH del suelo a los tres meses del encalado.

En relación con las bases de intercambio (en particular Ca, Mg y K), se observaron cambios en sus contenidos en el suelo a los tres meses de realizado el encalado. En la Figura 50 se indican las concentraciones de Ca intercambiable en el suelo para los diferentes tratamientos de dolomita.

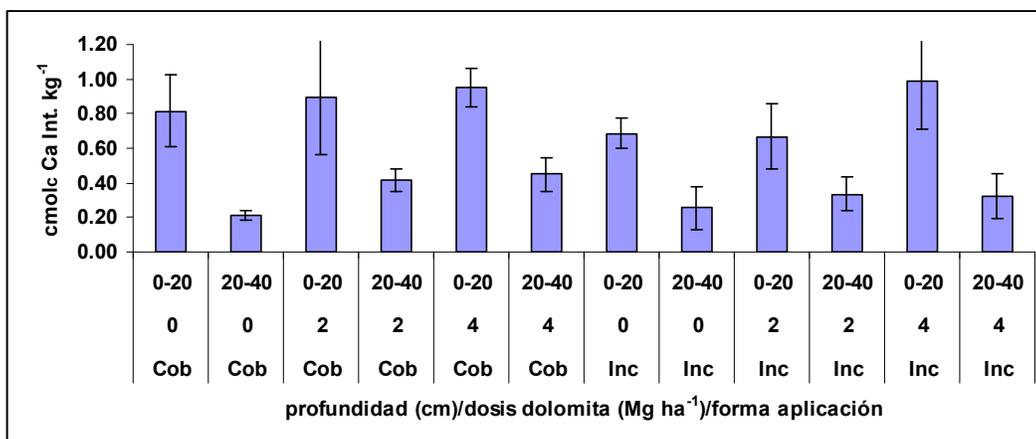


Figura 50. Concentraciones de Ca intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación (Experimento Cerro Agudo) a los 3 meses de aplicación del material.

Se observó un aumento en la concentración de Ca intercambiable del suelo en función de la dosis de dolomita. Dicho comportamiento no sólo se evidenció en el primer estrato de muestreo (0-20 cm), sino que también fue constatado en la profundidad de 20 a 40 cm. Para este último estrato de muestreo, el comportamiento de la aplicación en cobertura mostró un aumento más claro que el tratamiento con la incorporación de la dolomita.

En la Figura 51 se indican las concentraciones de Mg intercambiable en el suelo para los diferentes tratamientos de dolomita.

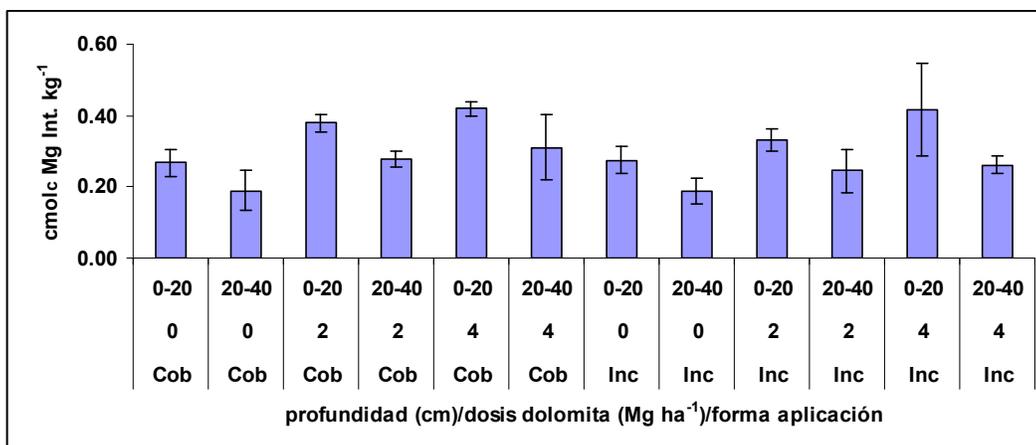


Figura 51. Concentraciones de Mg intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación (Establecimiento Cerro Agudo) a los 3 meses de aplicación del material.

Este nutriente mostró las mismas tendencias que Ca, en cuanto a aumentar su concentración en función de la dosis de dolomita, independientemente de la forma de aplicación. De igual forma, estos incrementos en la concentración de Mg intercambiable del suelo fueron evidentes no sólo en los primeros 20 cm de suelo, sino también en la profundidad de 20 a 40 cm. En este caso, bajo ambas formas de aplicación se lograron incrementos claros en la concentración de Mg en la profundidad de 20 a 40 cm, mostrando cierta tendencia a ser más claros para la aplicación en cobertura.

Se evaluó si la aplicación de Ca y Mg con la dolomita pudo haber afectado la disponibilidad de K del suelo. En la Figura 52 se indican estos datos.

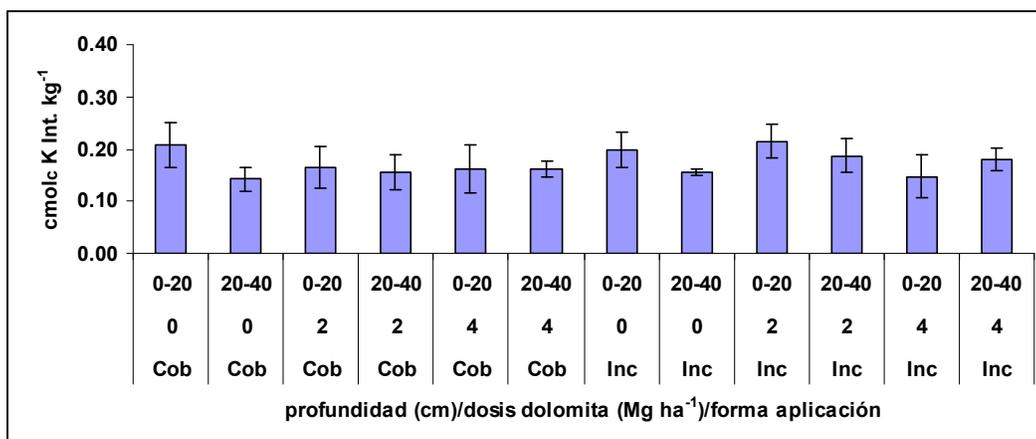


Figura 52. Concentraciones de K intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación (Establecimiento Cerro Agudo) a los 3 meses de aplicación del material.

Teniendo en cuenta los primeros 20 cm de suelo, la aplicación de dolomita en cobertura deprimió levemente los niveles de K intercambiable del suelo. Sin embargo, dicho comportamiento no resultó claro con la incorporación de la dolomita. Para la profundidad de 20 a 40 cm, el tratamiento con la incorporación de dolomita muestra cierta tendencia hacia un ligero aumento en los niveles de K intercambiable del suelo.

A los 12 meses de aplicación de la dolomita, el tratamiento en cobertura mostró cambios en los diferentes parámetros de suelo evaluados, los cuales fueron de diferente intensidad en función de la profundidad del suelo (Figura 53). Las tendencias generales fueron hacia un aumento del pH en función de la dosis de dolomita, acompañado con una disminución de la acidez intercambiable. Dichas diferencias resultaron significativas cuando se comparó el tratamiento testigo vs los tratamientos con encalado para los valores de pH y acidez intercambiable en los primeros 5 cm de suelo (Figura 53). A mayores profundidades, el efecto de los tratamientos con dolomita resultó menor, siendo significativas sólo algunas diferencias entre la aplicación de

dolomita respecto al testigo. Esto podría estar indicando que la dolomita llegó a neutralizar la acidez fundamentalmente en los primeros estratos de suelo, pero no alcanzó a hacerlo totalmente a mayores profundidades (20 a 40 cm). Considerando todos los tratamientos y profundidades, se observó una tendencia exponencial de disminución de la acidez intercambiable del suelo a medida que aumentó el pH (Figura 53).

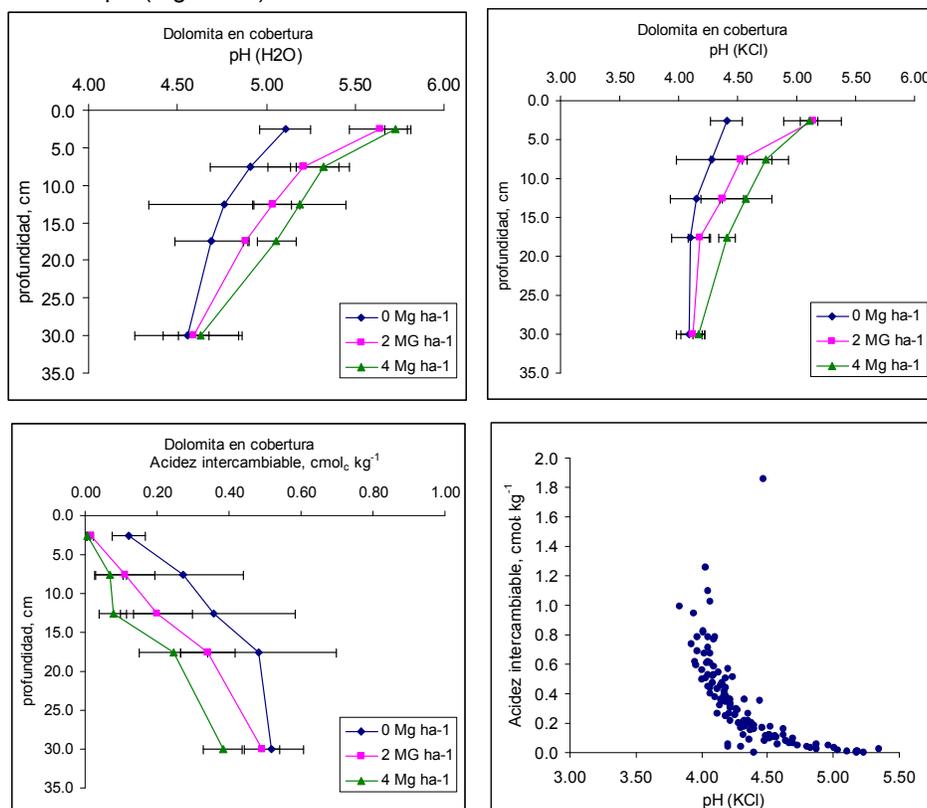


Figura 53. Evolución del pH (H<sub>2</sub>O y KCl) y la acidez intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita aplicados en cobertura, y relaciones entre el pH (KCl) y la acidez intercambiable en el Experimento de Cerro Agudo a los 12 meses de aplicación del material.

Paralelamente, se observó también una tendencia al aumento en los niveles de Ca y Mg intercambiables en el suelo, a medida que aumentó la dosis de dolomita (Figura 54). Dicha tendencia fue más notoria para los primeros 20 cm de suelo. La alta variabilidad encontrada en los parámetros determinó que las diferencias entre los tratamientos no resultaran por lo general significativas.

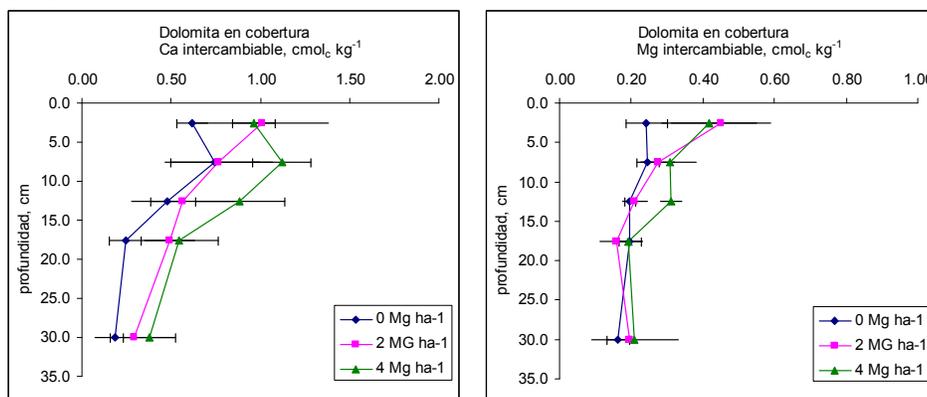


Figura 54. Evolución del Ca y Mg intercambiables con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita aplicados en cobertura, en el Experimento de Cerro Agudo a los 12 meses de aplicación del material.

La aplicación incorporada de dolomita mostró un efecto significativo de la dosis de 4 Mg dolomita  $\text{ha}^{-1}$  en el aumento del pH para los dos primeros estratos de muestreo, reduciéndose su efecto con la profundidad (Figura 55). En cuanto a la disminución de la acidez intercambiable, los resultados no fueron significativos, aunque surge una tendencia a su disminución con la dosis más elevada de dolomita. La dosis de 2 Mg dolomita  $\text{ha}^{-1}$  no mostró diferencias muy claras con el testigo del experimento para los valores de pH y la acidez intercambiable, de lo cual surge que no sería una dosis suficiente para modificar el valor de dichos parámetros en el suelo.

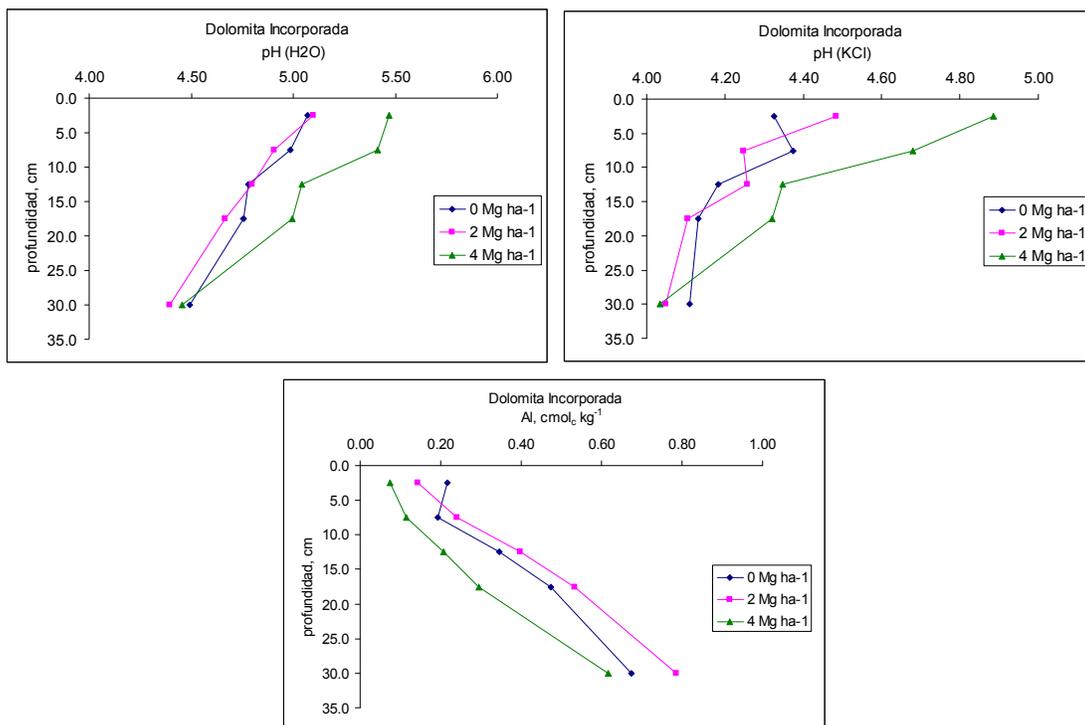


Figura 55. Evolución del pH ( $\text{H}_2\text{O}$  y KCl) y la acidez intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el Experimento de Cerro Agudo) a los 12 meses de aplicación del material.

La concentración de Ca y Mg en el suelo no mostró comportamientos claros frente a la incorporación de dolomita, siendo sólo significativas las diferencias entre el testigo y el promedio de las dosis de dolomita para Mg en el primer estrato de muestreo (Figura 56).

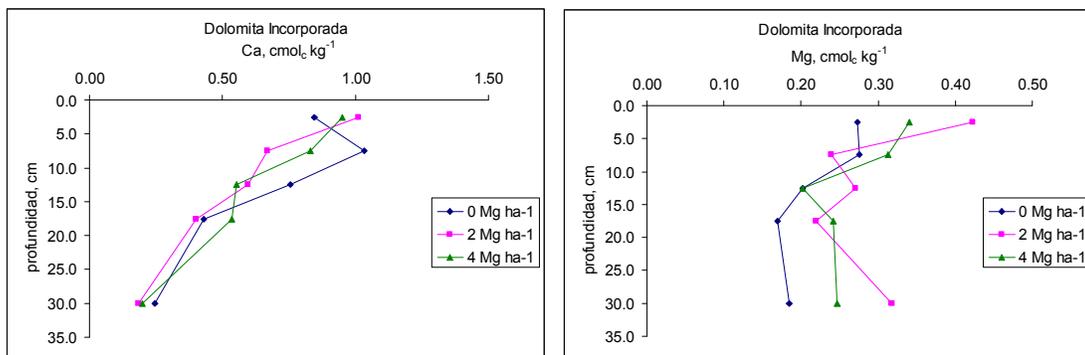


Figura 56. Evolución del contenido de Ca y Mg intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados a un suelo del Grupo CONEAT 7.32 del Dpto. de Tacuarembó (Establecimiento Cerro Agudo) a los 12 meses de aplicación del material.

La evaluación de parámetros de crecimiento de los árboles instalados en el experimento, no obstante lo anterior, no mostró diferencias significativas entre los tratamientos de aplicación de dolomita, independiente de su forma de aplicación (Figuras 57 y 58).

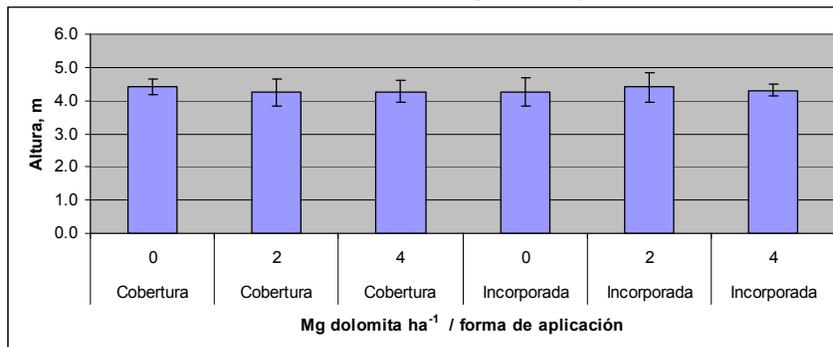


Figura 57. Altura al año de la plantación de *E. dunnii* en los diferentes tratamientos de aplicación de dolomita en el Experimento de Cerro Agudo.

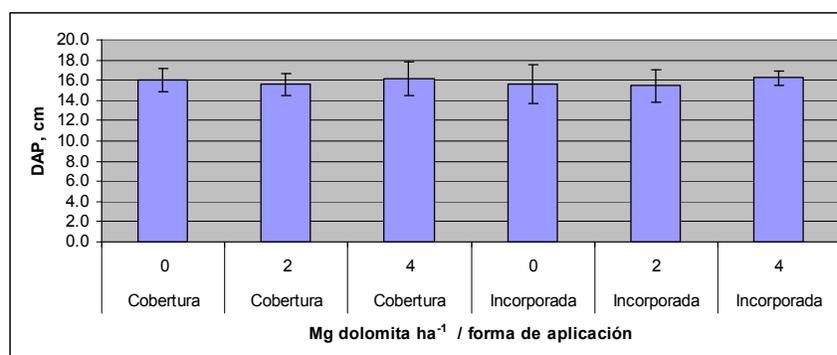


Figura 58. Diámetro a la altura del pecho al año de la plantación de *E. dunnii* en los diferentes tratamientos de aplicación de dolomita en el Experimento de Cerro Agudo.

En el Cuadro 16 se indican las concentraciones de Ca, Mg, K y N en hoja muestreada al año de aplicados los tratamientos de encalado. No fueron encontradas diferencias significativas entre los tratamientos, aunque se observa cierta tendencia hacia valores más elevados de Ca, Mg y N cuando se aplicó dolomita.

Cuadro 16. Concentración de nutrientes en hoja de *E. dunnii* al año de aplicación de las diferentes dosis de dolomita y forma de aplicación en el Experimento de Cerro Agudo.

Aplicación de dolomita	Dosis dolomita Mg ha <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	N
				g kg <sup>-1</sup>	
Cobertura	0	8.03	1.85	10.28	19.88
Cobertura	2	8.73	1.90	10.23	20.41
Cobertura	4	8.23	1.98	10.35	20.94
Incorporada	0	7.55	1.83	9.93	20.56
Incorporada	2	8.28	1.88	9.83	21.24
Incorporada	4	8.40	1.85	10.28	22.08

A los 30 meses de aplicada la dolomita se observó un efecto residual en algunos parámetros de suelo. Los valores de pH mostraron menores diferencias entre tratamientos que respecto a muestreos anteriores. Dichas diferencias fueron más claras para los primeros 20 cm en la aplicación de dolomita en cobertura, y entre el testigo sin dolomita y los dos tratamientos con el material, donde la reacción del mismo con el suelo pudo haber sido más gradual con el tiempo. En los tratamientos de incorporación de dolomita no fueron observadas diferencias significativas entre los tratamientos.

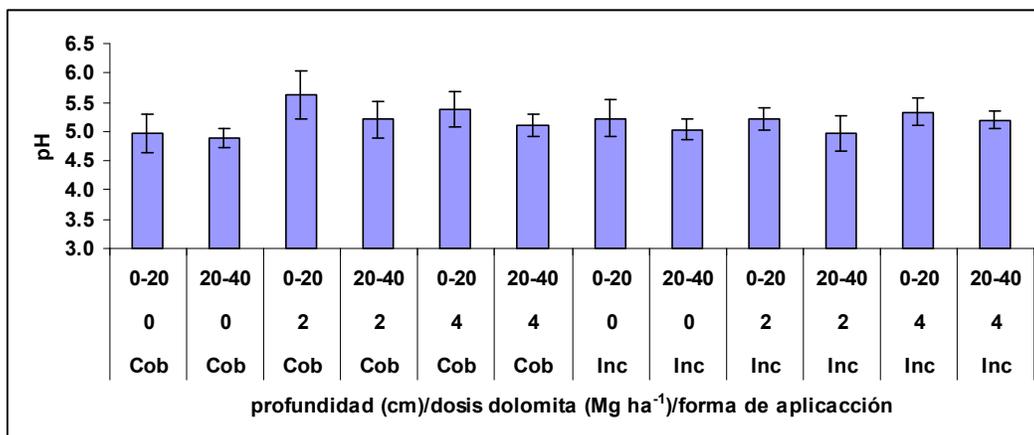


Figura 59. Valores de pH en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación en el Experimento de Cerro Agudo a los 30 meses de aplicación del material.

El parámetro Acidez Intercambiable fue más sensible que el pH en manifestar la residualidad de la aplicación de dolomita, aunque la variabilidad del parámetro fue mayor. Cuando la dolomita fue aplicada en cobertura se observó una disminución en la acidez intercambiable en función de la dosis, no sólo en los primeros 20 cm de suelo, sino también de 20 a 40 cm. Cuando la dolomita fue incorporada, se observó una similar tendencia, siendo que con las dosis más altas de dolomita (4 Mg kg<sup>-1</sup>) la tendencia fue hacia la eliminación de la acidez intercambiable del suelo en la capa de 0-20 cm.

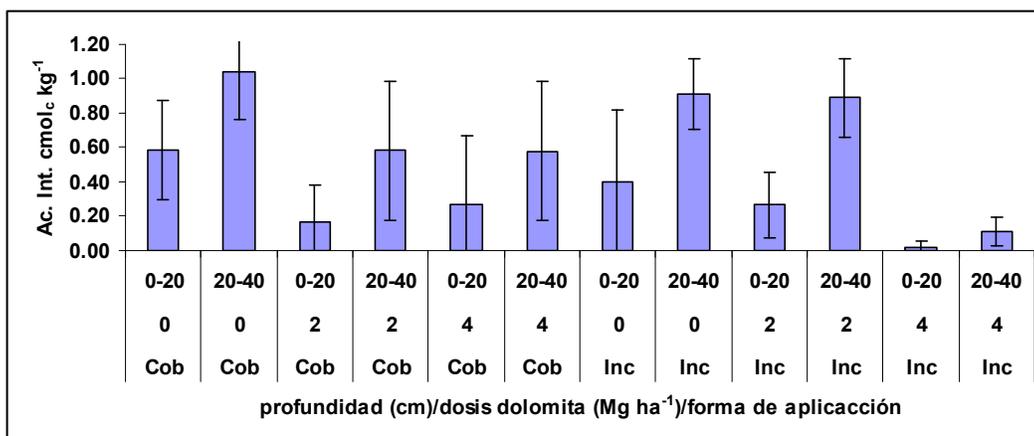


Figura 60. Valores de Acidez Intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación en el Experimento de Cerro Agudo a los 30 meses de aplicación del material.

En cuanto al efecto residual de la aplicación de dolomita en las concentraciones de Ca y Mg en el suelo (Figuras 61 y 62), fueron observadas tendencias positivas para el Ca para ambas formas de aplicación, particularmente en los primeros 20 cm. En el caso del Mg las tendencias fueron más claras cuando la dolomita fue incorporada que cuando fue aplicada en cobertura.

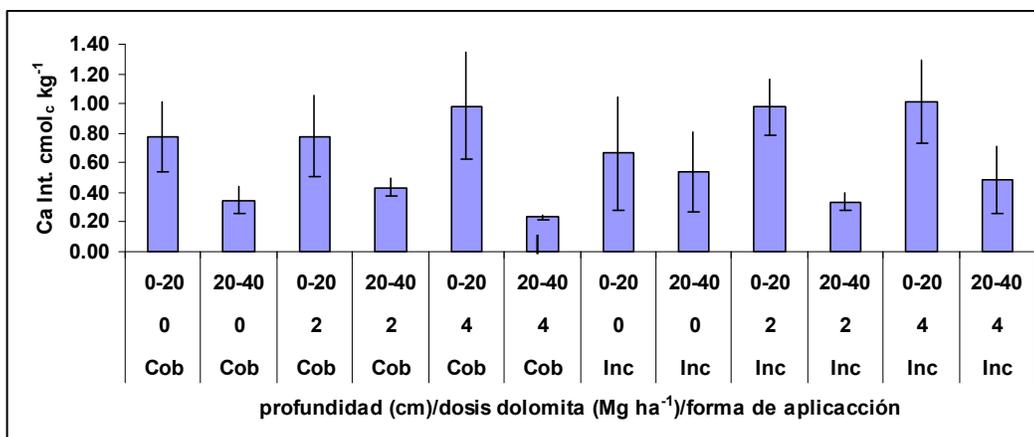


Figura 61. Valores de Ca Intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación en el Experimento de Cerro Agudo a los 30 meses de aplicación del material.

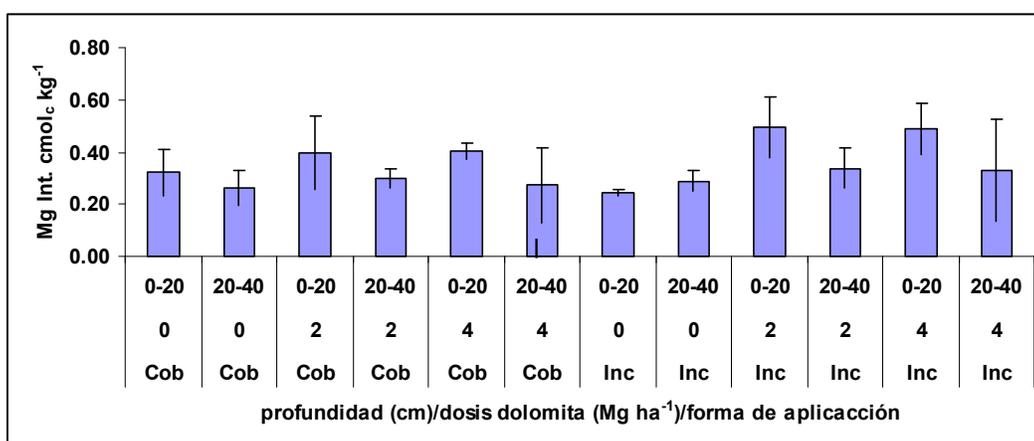


Figura 62. Valores de Mg Intercambiable en el suelo para diferentes dosis de dolomita y formas de aplicación en el Experimento de Cerro Agudo a los 30 meses de aplicación del material.

### Experimento Santo Tomás

En el sitio experimental de Santo Tomás (Dpto. de Río Negro), a los seis meses de incorporada la dolomita se observó un aumento significativo del pH (en H<sub>2</sub>O y KCl) en los primeros 20 cm al aumentar la dosis de dolomita (Figura 63). No obstante, no se observaron diferencias más allá de los primeros 20 cm de suelo. Sin embargo, cuando se evaluó el cambio en la acidez intercambiable, se observó una disminución significativa de la misma al aumentar la dosis de dolomita no sólo de 0-20 cm, sino también de 20-40 cm de suelo. Esto mostraría que este parámetro resultó ser más sensible que el pH en acusar los cambios en la acidez del suelo. Para este suelo, el aumento en el pH en los primeros 20 cm fue de 0.12 unidades por Mg dolomita ha<sup>-1</sup>.

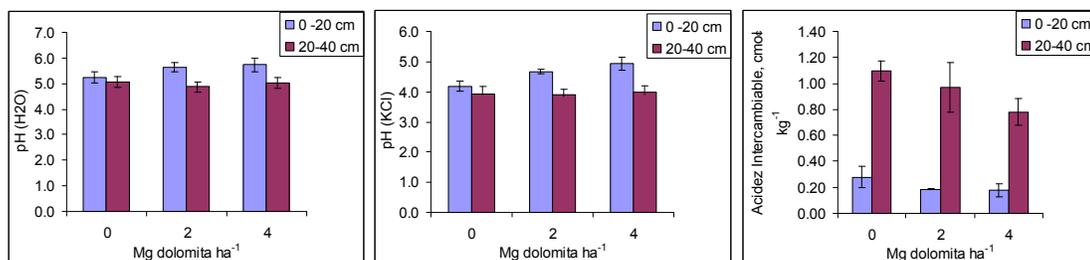


Figura 63. Evolución del pH (H<sub>2</sub>O y KCl) y la acidez intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el Experimento de Santo Tomás.

Los niveles de Ca y Mg intercambiables aumentaron con la dosis de 4 Mg dolomita ha<sup>-1</sup> (Figura 64), en el orden de 0.74 y 0.37 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> para los primeros 20 cm, y 0.25 y 0.07 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> para el estrato de 20-40 cm, respectivamente. El agregado de Ca y Mg con la dolomita no afectó las concentraciones de K intercambiable.

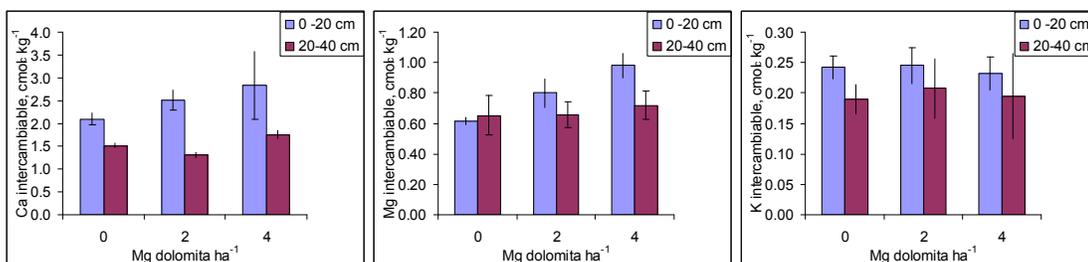


Figura 64. Evolución del Ca, Mg y K intercambiables con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de incorporados en el Experimento de Santo Tomás.

En el Cuadro 17 se indica la concentración de nutrientes en hoja de *E. Urograndis 361* para las diferentes dosis de dolomita aplicadas. Los resultados no mostraron cambios significativos en las concentraciones de Ca, Mg y K en la hoja de las plantas del año entre el testigo y los tratamientos de aplicación de dolomita.

Cuadro 17. Concentración de nutrientes en hoja de *E. Urograndis 361* para las diferentes dosis de dolomita en el sitio experimental de Santo Tomás.

Dosis dolomita Mg ha <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	N
0	5.15	2.18	9.30	19.28
2	5.58	2.15	9.55	18.82
4	5.20	2.15	9.30	19.05

Al año de aplicación de la dolomita se encontró un efecto positivo (aunque no significativo) en el aumento del pH, así como en la disminución de la acidez intercambiable (Figura 65) y aumento en los niveles de Ca y Mg de los suelos (Figura 66). Dada la alta variabilidad de los datos dichas tendencias no resultaron significativas. Para la acidez intercambiable dicha tendencia fue constatable a las dos profundidades, en tanto que para Ca y Mg dicho comportamiento fue constatable en los primeros 20 cm de suelo.

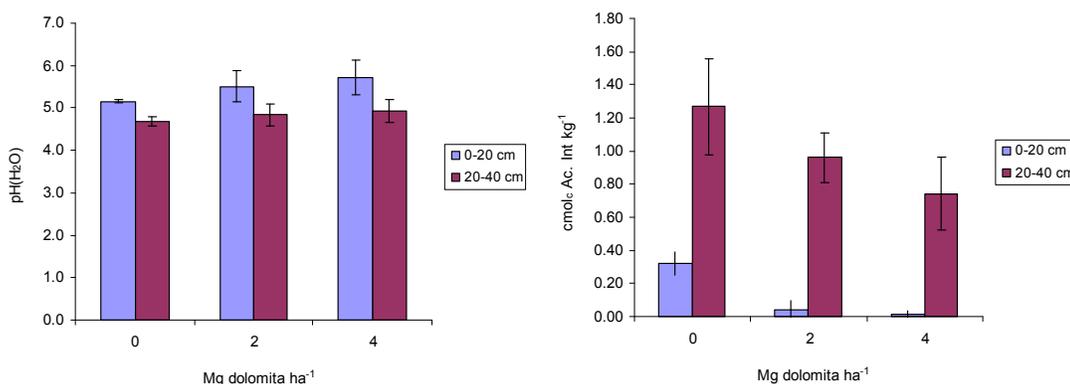


Figura 65. Evolución del pH (H<sub>2</sub>O) y la acidez intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el sitio experimental de Santo Tomás al año de la aplicación de la dolomita.

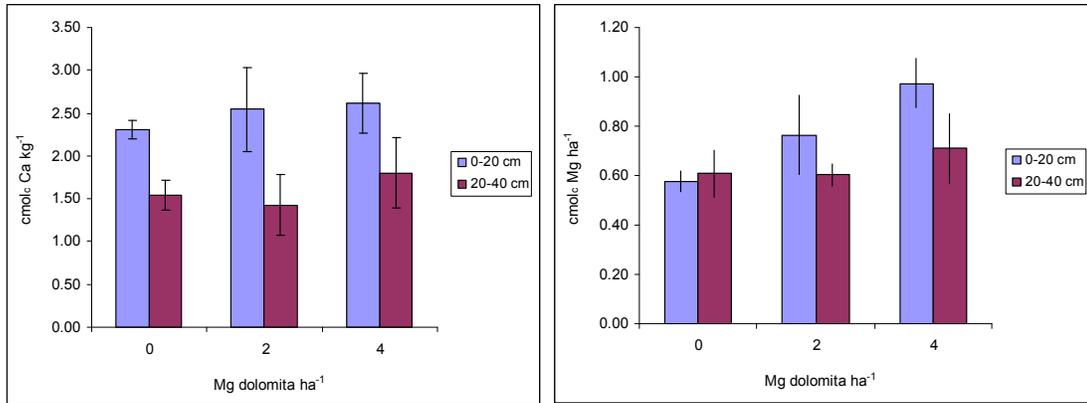


Figura 66. Evolución del Ca y Mg intercambiables con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el sitio experimental de Santo Tomás al año de aplicación de la dolomita.

Finalmente, en el muestreo a los 24 meses se observó muy escasa residualidad de la aplicación de dolomita al suelo en el pH del mismo (Figura 67). Sin embargo, el parámetro Acidez Intercambiable fue más sensible, observándose una disminución de la misma con la dosis de dolomita agregada (Figura 68). Dicho efecto no sólo fue evidente en el primer estrato de muestreo (0 a 20 cm), sino también a mayor profundidad (20 a 40 cm).

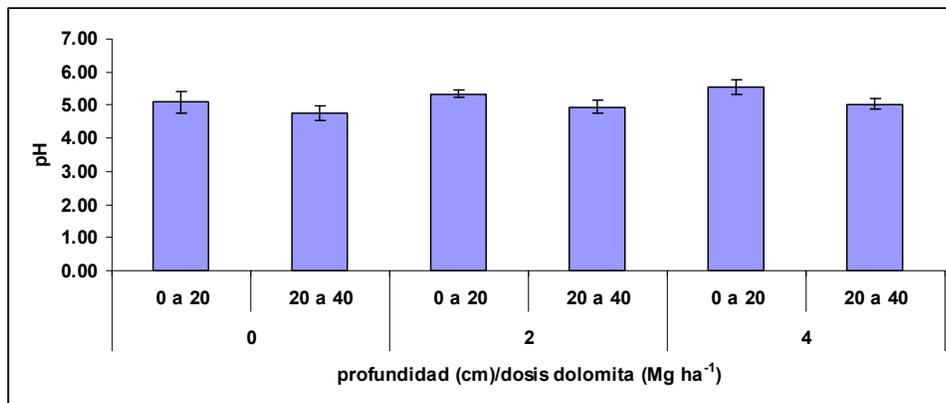


Figura 67. Evolución del pH (H<sub>2</sub>O) con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el sitio experimental de Santo Tomás a los 24 meses de aplicación de la dolomita.

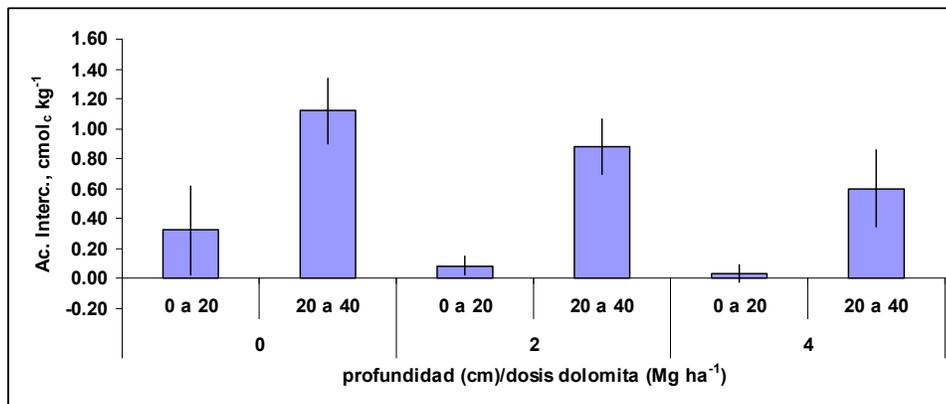


Figura 68. Evolución de la acidez intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el sitio experimental de Santo Tomás a los 24 meses de aplicación de la dolomita.

Con respecto a la concentración de Ca en el suelo, hubo un efecto residual del agregado de dolomita, aunque este no resultó significativo (Figura 69). Dicho efecto fue más claro en los primeros 20 cm de suelo.

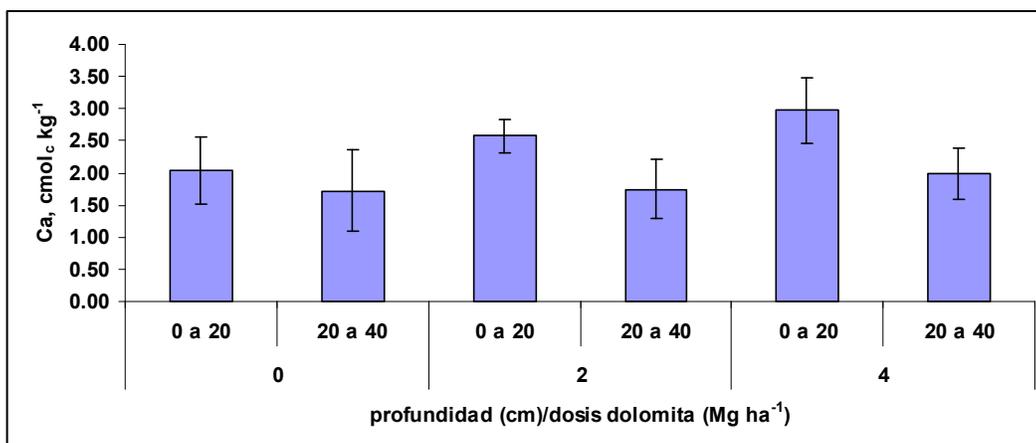


Figura 69. Evolución del Ca intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el sitio experimental de Santo Tomás a los 24 meses de aplicación de la dolomita.

Finalmente, con respecto al Mg fue observada la misma tendencia que con respecto al Ca, en cuanto a un aumento en las concentraciones del nutriente en el suelo con el aumento de la dosis de dolomita (Figura 70).

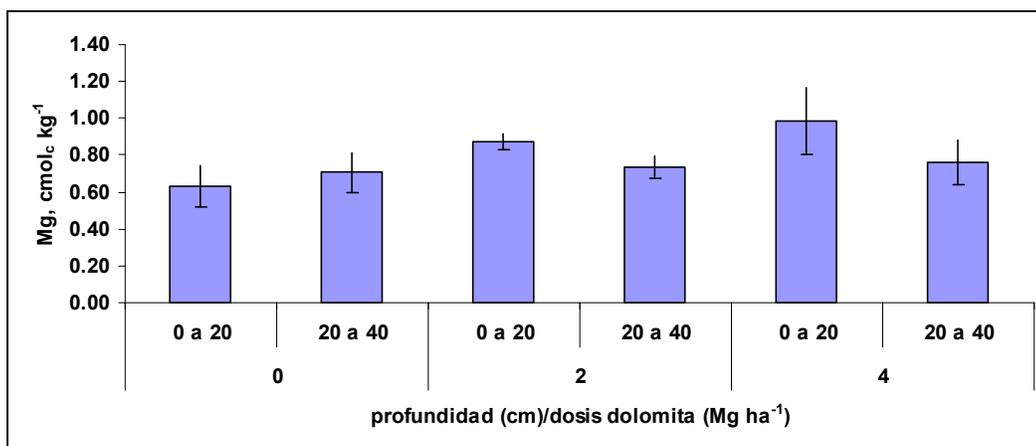


Figura 70. Evolución del Mg intercambiable con la profundidad del suelo para el testigo y los dos niveles de dolomita incorporados en el sitio experimental de Santo Tomás a los 24 meses de aplicación de la dolomita.

### Conclusiones

Se encontró un efecto positivo del agregado de dolomita en la reducción de la acidez de los suelos, y aumento de los niveles de Ca y Mg. Dicho efecto fue dependiente del tiempo y la forma de aplicación de la dolomita.

La aplicación en cobertura determinó mayores diferencias en los primeros estratos de suelo, aunque con el transcurso del tiempo se encontró un efecto a mayores profundidades de suelo, lo cual indica una migración del material hacia mayores profundidades, asociado probablemente a la textura arenosa de estos suelos. Dicho efecto fue observado también en las aplicaciones incorporadas, donde para profundidades mayores a los primeros 20 cm se noto un efecto positivo del agregado de dolomita.

Desde el punto de vista de la residualidad del agregado de dolomita más allá de los 24 meses, el efecto constatable fue particularmente para la dosis de 4 Mg de dolomita por hectárea, la cual aseguró una disminución de la acidez a niveles de poca significancia.

El parámetro más sensible en detectar los cambios en la acidez del suelo –aunque con alta variabilidad- fue la acidez intercambiable, en tanto que con respecto al pH las diferencias observadas entre tratamientos fueron menores.

El agregado de dolomita tuvo un efecto positivo en la restitución de cationes Ca y Mg al suelo, particularmente en los primeros 20 cm de suelo. No se observó un efecto antagonico con la disponibilidad de K.

Los parámetros de rendimiento (DAP y Altura) no mostraron diferencias significativas por efecto del agregado de dolomita, aunque desde el punto de vista de la concentración de Ca y Mg foliar se encontraron tendencias hacia valores mayores con el agregado del material.

## **OBJETIVO ESPECÍFICO 2. Estudiar el efecto de distintos sistemas de laboreo en suelos recientemente incorporados a la forestación y en replantaciones de sitios cosechados.**

### **Introducción**

La presencia de impedimentos para el desarrollo radicular de las especies forestales, como lo constituyen materiales geológicos semi-consolidados, afecta las posibilidades de absorción de agua y nutrientes, además de un correcto anclaje al suelo. El uso de tecnologías como el subsolado del suelo permitiría mejorar estas condiciones. Sin embargo, aun no se dispone de suficiente información experimental que permita confirmar dichas ventajas. Por otra parte no está bien determinado en qué tipo de suelos/materiales parentales dicha tecnología es promisoría en términos de mejorar la implantación de especies forestales comerciales (eucalipto y pino). La experimentación propuesta consistió en diferentes tratamientos de laboreo que involucraronn tanto implementos de laboreo como áreas de suelo afectadas por ellos, combinados con el uso de herbicidas.

### **Materiales y Métodos**

#### Ensayo Establecimiento Santa Elena

Se instalaron en el año 2011 dos ensayos en el Establecimiento Santa Elena, propiedad de la empresa UPM, en la zona de Mellizos, departamento de Río Negro. Los ensayos se encuentran localizados en suelos correspondientes al grupo de suelos CONEAT 9.1. Los suelos son contrastantes, en uno de los ensayos el suelo dominante es Litosol (Figura 71), en tanto en el otro ensayo el suelo dominante es un Brunosol (Figura 72).



Figura 71. Vista del perfil de suelo en uno de los ensayos ubicados en el establecimiento Santa Elena (Litosol).



Figura 72. Vista del perfil de suelos en uno de los ensayos ubicados en el establecimiento Santa Elena (Brunosol).

En ambos ensayos el diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres (Ensayo sobre suelo Litosol, en adelante Ensayo 1) y cinco (Ensayo sobre suelo Brunosol, en adelante Ensayo 2) repeticiones, respectivamente. Los tratamientos aplicados fueron los siguientes:

- Excéntrica + acamellonado
- Subsolador + excéntrica liviana + acamellonado

- Plantación al pozo

El Cuadro 18 muestra las fechas de laboreo y aplicación de agroquímicos en ambos ensayos.

Cuadro 18. Secuencia de actividades realizadas en los ensayos localizados en el establecimiento Santa Elena.

Fecha	Actividad
14/01/2011	Laboreo de primera con Excéntrica.
10/02/2011	Laboreo subsolado y segunda con excéntrica liviana
01/03/2011	Acamellonado.
28/03/2011	Realización de casillas
29/03/2011	Aplicación de Lampo
29/03/2011	Aplicación de 100 * 100
31/03/2011	Plantación con clon X2334, fertilización y agregado de 1lt agua/planta.
04/04/2011	Plantación con clon X2334, fertilización y agregado de 1lt agua/planta.
15/04/2011	Replantación por seca y daño de hormigas.
16/05/2011	Aplicación de Actara por ataque de gomipterus, y aplicación de herbicida preemergente en fila

Se evaluó la altura de los árboles en noviembre de 2011 (fecha 1), marzo de 2012 (fecha 2), julio de 2012 (fecha 3), y diciembre de 2012 (fecha 4), y finalmente en abril de 2013 (fecha 5). Adicionalmente se tomaron medidas de conductividad eléctrica del suelo. En julio de 2012 (fecha 3) se realizó una evaluación de resistencia a la penetración (RP) en el ensayo 2. Las medidas de conductividad eléctrica del suelo se realizaron con un electro conductímetro EM38 en forma adyacente a cada planta, así como en el área de la entrefilas en el ensayo 2 en la fecha 1 y 2.

#### Ensayo establecimiento Tarumán

En la primavera de 2011 se instaló un ensayo de laboreo en el establecimiento Tarumán, propiedad de la empresa Cambium, en el departamento de Lavalleja. El ensayo se encuentra en un suelo sobre Basamento Cristalino representativo de grupo CONEAT 2. El diseño experimental del mismo es de bloques al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos son los siguientes:

- Excéntrica: 1 pasada, profundidad 10-15 cm
- Subsulado agrícola: profundidad 40 cm
- Subsulado D8: profundidad >60 cm

#### **Resultados y discusión**

##### Ensayo Establecimiento Santa Elena

Las figuras 73 y 74 muestran el perfil de resistencia a la penetración en el ensayo 2 en julio de 2012 (fecha 3) en la entrefila y fila de plantación, respectivamente. En la entrefila de plantación no existe diferencia en RP debido a que no están afectadas por el implemento. Sin embargo a los 35 cm de profundidad en los tratamientos excéntrica y pozo se detectó resistencia a la penetración mayor a 2000kPa, valor umbral por encima del cual se puede ver afectado el crecimiento radicular.

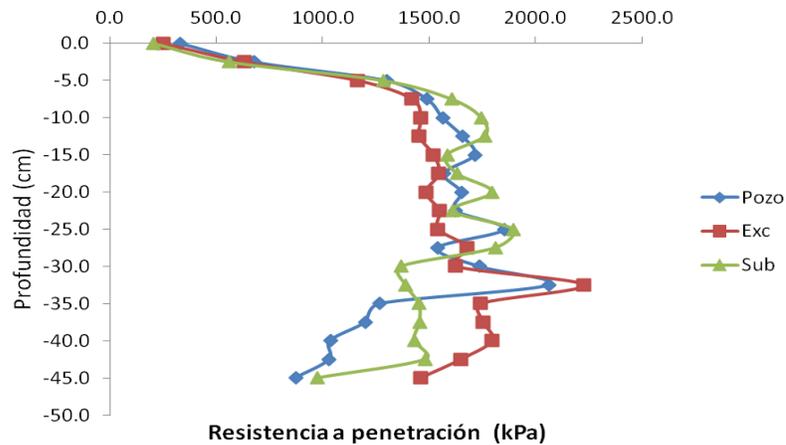


Figura 73. Resistencia a la penetración en la entrefila de plantación en julio de 2012 en el ensayo 2 del Establecimiento Santa Elena.

La RP disminuye en la fila de plantación con los dos laboreos ensayados hasta los 20 cm de profundidad (Figura 74) respecto al tratamiento al pozo. Entre 27.5 y 37.5 cm de profundidad el tratamiento subsolado tiene la menor RP.

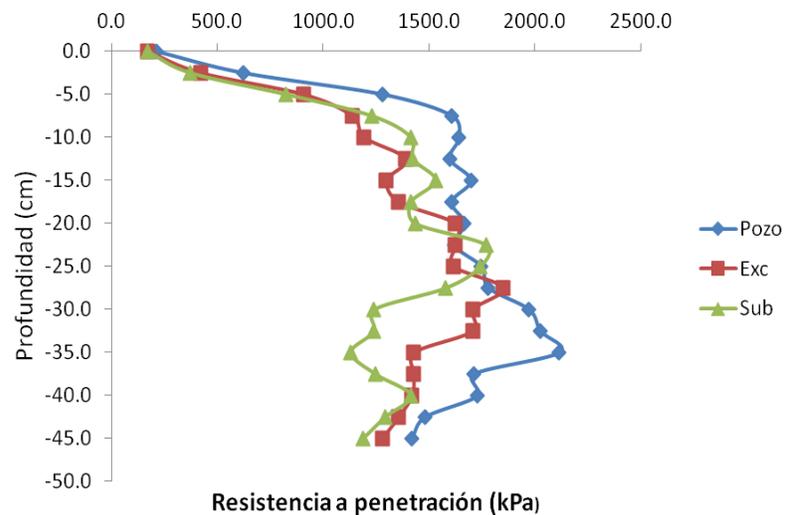


Figura 74. Resistencia a la penetración en la fila de plantación en julio de 2012 en el ensayo 2 del Establecimiento Santa Elena.

Los Cuadros 19 y 20 muestran la altura de los árboles por ensayo y tratamiento en las cinco fechas evaluadas.

Cuadro 19. Altura de plantas (cm) por tratamiento y fecha de evaluación en el ensayo 1 del Establecimiento Santa Elena.

Tratamiento	Fecha				
	1	2	3	4	5
Pozo	40,8 <sup>b</sup>	196,8 <sup>c</sup>	283,5 <sup>b</sup>	496,2 <sup>b</sup>	759,1 <sup>b</sup>
Excéntrica	51,7 <sup>a</sup>	304,9 <sup>a</sup>	407,2 <sup>a</sup>	609,4 <sup>a</sup>	845,8 <sup>a</sup>
Subsolador	41,9 <sup>b</sup>	268,9 <sup>b</sup>	367,4 <sup>a</sup>	586,5 <sup>a</sup>	838,3 <sup>a</sup>

Cuadro 20. Altura de plantas (cm) por tratamiento y fecha de evaluación en el ensayo 2 del Establecimiento Santa Elena.

Tratamiento	Fecha				
	1	2	3	4	5
Pozo	48,6 <sup>b</sup>	225,2 <sup>b</sup>	313,5 <sup>b</sup>	540,1 <sup>b</sup>	804,8 <sup>b</sup>
Excéntrica	75,3 <sup>a</sup>	327,2 <sup>a</sup>	428,3 <sup>a</sup>	646,6 <sup>a</sup>	892,6 <sup>a</sup>
Subsolador	81,4 <sup>a</sup>	346,9 <sup>a</sup>	447,3 <sup>a</sup>	652,3 <sup>a</sup>	903,9 <sup>a</sup>

El efecto del laboreo fue distinto en ambos ensayos hasta el año de plantación (fecha 2). En el ensayo 1, en el Litosol, el tratamiento con excéntrica logró las mayores alturas de plantas, mientras que el tratamiento al pozo y subsolador no difirieron a los seis meses de instalado en ensayo (fecha 1). En el ensayo 2 la mayor altura de plantas se obtuvo con el tratamiento de subsolado y excéntrica. A nuestro juicio, y en términos hipotéticos, el pasaje de subsolador en condiciones de alta pedregosidad y poco profundidad del perfil del suelo generaría condiciones poco favorables (reducción en la capacidad de retener agua del suelo en términos volumétricos) para el crecimiento de las plantas como es el detectado en el ensayo 1, al menos en etapas iniciales del crecimiento del monte.

Por otra parte la menor RP detectada (27.5-37.5 cm de profundidad) en el tratamiento subsolado del ensayo 2 no se manifestó en una mayor altura de plantas. El efecto de laboreo profundo (subsolado) podría ser detectado en futuras evaluaciones.

#### Ensayo establecimiento Tarumán

La Figura 75 muestra la resistencia a la penetración en la fila de plantación para los tres laboreos un año después de aplicado los tratamientos. En la misma se observa el claro efecto del subsolado profundo con D8 a los 25 cm de profundidad.

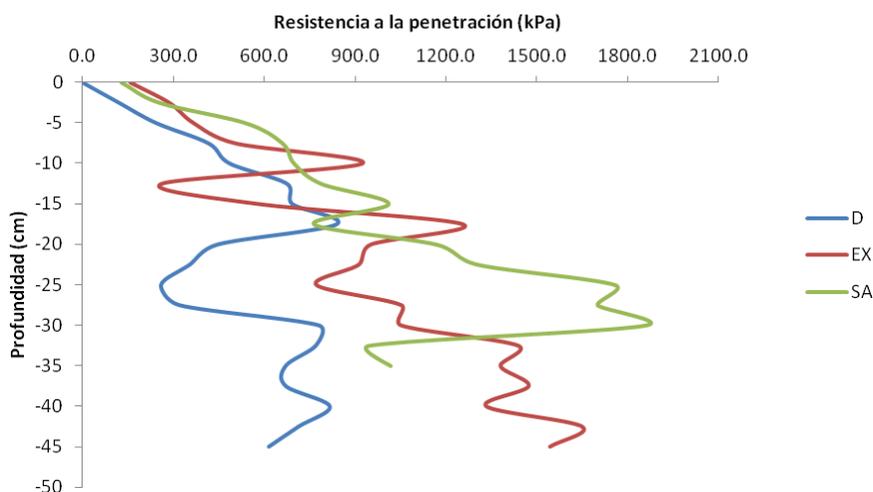


Figura 75. Resistencia a la penetración en la fila de plantación a un año de realizado el laboreo en el Experimento El Tarumán. (Tratamientos: D: subsolado profundo; EX: laboreo con excéntrica; SA: laboreo con subsolador agrícola)

Este ensayo fue evaluado al año de instalado- La altura de los árboles por tratamientos fue el siguiente: excéntrica (1.94 m), subsolador agrícola (1.71 m) y subsolado D8 (1.68 m). La altura de los árboles con el tratamiento subsolador agrícola fue mayor que empleando el subsolador D8 ( $P < 0.05$ ). Este efecto es claramente opuesto a la menor resistencia a la penetración encontrada en el tratamiento subsolado profundo. Al momento de su evaluación el ensayo tenía un

enmalezamiento importante por lo que dicho aspecto puede haber interaccionado con los resultados obtenidos.

### Conclusiones

El análisis de los tres ensayos permite concluir que en etapas tempranas del crecimiento de los árboles no hay un efecto del laboreo en profundidad en la altura de los mismos, no obstante sí se detecta un efecto en la resistencia a la penetración del suelo. Surge de estos ensayos la necesidad de continuar su evaluación a los efectos de detectar posibles efectos del tipo de laboreo en etapas más avanzadas del desarrollo del monte.

### Formación de Recursos Humanos

Estos ensayos forman parte del trabajo de tesis de Maestría en Ciencias Agrarias opción Bioestadística del Ing. Agr. Pablo González Barrios. El Ing. Agr. González realiza su trabajo de tesis bajo la tutoría de la Ing. Agr. Lucía Gutiérrez (Departamento de Estadística de Facultad de Agronomía) y el Ing. Agr. Pérez Bidegain (Departamento de Suelos y Aguas de Facultad de Agronomía). El Ing. Agr. González presentó el Seminario I, requisito necesario para obtener el título de Magister y obtuvo una beca ANII en el llamado posgrados Nacionales 2012.

### OBJETIVO ESPECÍFICO 3. Monitoreo del contenido de agua en el suelo y ajuste y validación del modelo de escurrimiento y erosión WEPP en sistemas forestales.

#### 3a) Evolución del contenido de agua en el suelo

##### Introducción

En lo relativo a las estimaciones de la demanda de agua de estos sistemas, desde el año 2000 se viene desarrollando el monitoreo del contenido de agua del suelo en plantaciones de eucalipto y pino de diferentes edades, en comparación con el mismo suelo bajo uso pastoril. Dicha información se ha ampliado en los últimos años, estudiando el proceso en plantaciones a término, durante el período post-cosecha, y a partir de la re-plantación del sitio.

##### Materiales y Métodos

Los trabajos realizados son una continuación de las mediciones que fueron iniciadas en el año 2007 en dos plantaciones de eucalipto ubicadas en suelos pertenecientes al grupo CONEAT 0 9.3 de la Unidad Tres Bocas (Localidad Tres Bocas, Dpto. Río Negro. S32.80195 W57.92520): una forestación de *E. grandis*, cosechada en julio del 2008, y replantado con *E. dunnii* en el 2009 (Experimento El Minero); y una forestación de *E. dunnii* de 12 años aun en pie, pronta para cosechar (Experimento Rosario Este). El informe presenta la evolución del contenido de agua estacional en los suelos bajo dos usos diferentes: pastoril (pastura natural o regenerada) y forestal. Los registros comenzaron en setiembre de 2007 continuándose hasta el presente, con una frecuencia estacional. La información presentada corresponde al período setiembre 2007 – febrero 2013.

Cuadro 19. Datos analíticos del Experimento El Rosario Este.

Hor.	Prof.	pH		Corg g kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na	Al	BT	CIC	SB %
		H <sub>2</sub> O	KCl									
Ap	0-20	5.58	4.83	7.65	3.14	0.54	0.23	0.50	0.03	4.41	4.44	99.37
A	20-35	5.22	4.11	5.16	2.51	0.66	0.21	0.38	0.39	3.76	4.15	90.69
BA	35-44	5.16	3.95	6.93	4.63	1.36	0.35	0.36	1.39	6.70	8.09	82.77
Bt1	44-60	5.38	4.00	9.02	11.40	3.30	0.73	0.41	1.25	15.84	17.09	92.71
Bt2	60-75	5.48	4.16	2.10	8.19	2.42	0.41	0.36	0.94	11.38	12.32	92.34

El contenido de agua en el suelo ha sido determinado por termalización de neutrones hasta una profundidad de 1,1m, registrándose medidas cada 0,2 m de profundidad. Las medidas son realizadas mediante tubos de acceso instalados en forma permanente. Se cuenta con tres

repeticiones por suelo para cada uno de los tratamientos: pastura y *Eucalyptus sp.* La calibración entre los valores de termalización de neutrones y el contenido de agua medido gravimétricamente fue realizada a partir de muestreos realizados en setiembre de 2007 y abril 2009, lográndose una buena correlación para cada una de las profundidades de medida en cada uno de los suelos ( $R^2 > 0.7$ ).

## Resultados y Discusión

### Experimento El Minero

En el Cuadro 20 se presenta el contenido de agua en mm para cada una de las fechas de medida desde setiembre de 2007 hasta febrero de 2013.

En la Figura 76 se muestra en forma gráfica la evolución del contenido de agua para ambos manejos, observándose la tendencia a un menor contenido de agua bajo manejo forestal que bajo pastura. En el 73% de las veces la pastura presentó mayor contenido de agua que los eucaliptos. Los valores de precipitación presentados en la figura corresponden al acumulado entre dos momentos consecutivos de medida de agua en el suelo. Cuando los montos de precipitación son importantes las diferencias entre los manejos tienden a ser mínimas.

Cuadro 20. Contenido de agua en el suelo hasta 120 cm de profundidad (mm) en el Experimento El Minero.

	set-07	oct-07	ene-08	abr-08	jul-08	jul-08	oct-08	feb-09	abr-09	set-09	dic-09	mar-10	jun-10	set-10	feb-11	jul-11	set-11	dic-11	mar-12	jul-12	oct-12	feb-13
CN	342,6	398,6	255,6	217,1	234,6	232,9	182,2	232,0	275,0	353,4	371,0	387,0	373,2	377,0	354,9	359,7	379,4	281,4	370,0	332,2	375,8	268,5
Euc.	252,1	345,0	185,6	172,5	182,9	183,0	169,7	216,6	254,5	288,0	378,2	411,4	366,4	392,0	342,8	318,8	392,0	168,2	376,9	345,4	367,3	205,9

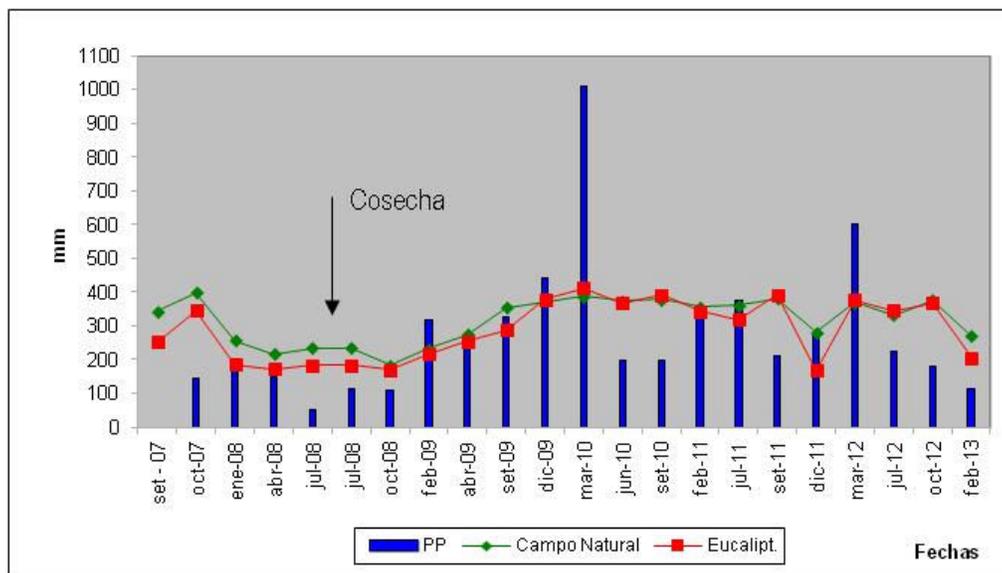


Figura 76. Evolución del contenido de agua en el suelo, bajo manejo forestal (eucalipto) y bajo campo natural regenerado en el Experimento El Minero.

En el Cuadro 21 se presentan los valores en mm de precipitación total, interceptación, precipitación efectiva y diferencia en el contenido de agua en el suelo entre ambos manejos. El valor de precipitación total corresponde a la precipitación acumulada entre dos medidas sucesivas, la interceptación por parte de la vegetación fue estimada a partir de una ecuación obtenida a partir de medidas de interceptación en eucalipto realizadas por Silveira et al. (2008), y la precipitación efectiva se determinó como la diferencia entre la precipitación total y la interceptación. Teniendo en cuenta que los valores corresponden a períodos estacionales en los cuales se pierde información (por ejemplo, en cuanto a la distribución de las precipitaciones), igualmente se puede observar una tendencia a que cuando las precipitaciones son abundantes las diferencias entre ambos manejos tienden a ser mínimas, a pesar de que los valores estimados de interceptación son altos. Sin

embargo cuando ocurren períodos de menores precipitaciones las diferencias entre manejos son mayores, lo cual sería consecuencia de la extracción de agua por los árboles desde un volumen de suelo mayor, disminuyendo el contenido de agua hasta una mayor profundidad en el perfil, así como también a un mayor porcentaje de la misma que se pierde por la intercepción realizada por el follaje forestal, alcanzando el suelo una menor cantidad de lluvia. (Figura 26)

Cuadro 21. Valores de Precipitación Total, Intercepción, Precipitación efectiva y diferencia en el contenido de agua en el suelo entre manejos en el Experimento El Minero.

Fecha	PP total	Interc.	PP efectiva	$\Delta H$ (CN-Eucalip.)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
set-07				90.6
oct-07	142	43.2	98.8	53.6
ene-08	192	65.8	126.2	70.0
abr-08	147	50.3	96.7	44.6
jul-08	50	21.8	28.2	51.6
jul-08	114	25.8	88.2	49.9
oct-08	107	33.3	73.7	12.5
feb-09	315	77	238.0	15.4
abr-09	270	51.9	218.1	20.5
sep-09	328	107.7	220.3	65.4
dic-09	440	101.7	338.3	-7.2
mar-10	1008	172.2	835.8	-24.5
jun-10	196	48.8	147.2	6.8
set-10	199	47.9	151.1	-15.0
feb-11	351	112.5	238.5	12.0
jul-11	374,0	107,8	266,2	40,9
set-11	211,0	46,8	164,2	-12,6
dic-11	276,0	69,9	206,1	113,2
mar-12	599,0	110,9	488,1	-6,9
jul-12	224,0	57,0	167,0	-13,2
oct-12	180,0	45,2	134,8	8,5
feb-13	114,0	11,8	102,2	62,6

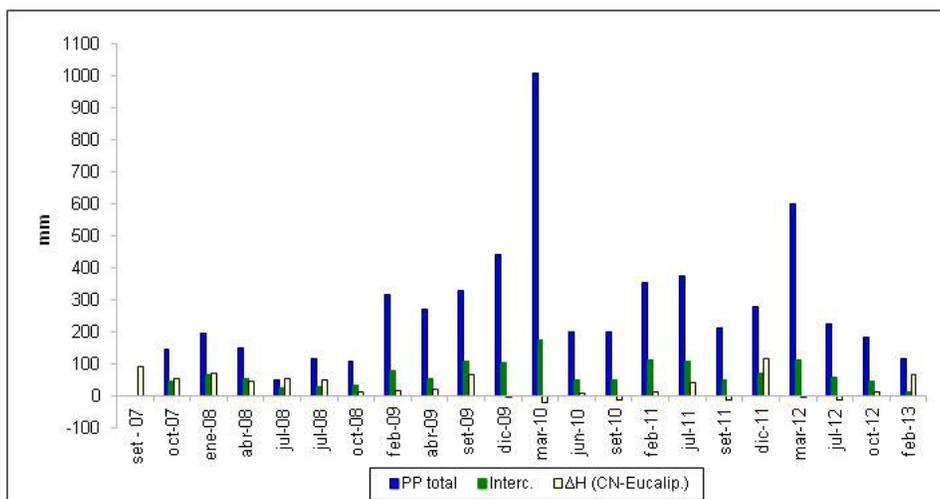


Figura 77. Precipitación total, intercepción y diferencia en el contenido de agua en el suelo entre manejos (mm) en el Experimento El Minero.

En la Figura 78 se puede observar la distribución en el perfil del contenido de agua, expresada en volumen (%HV) comparando ambos manejos en cada una de las fechas de monitoreo.

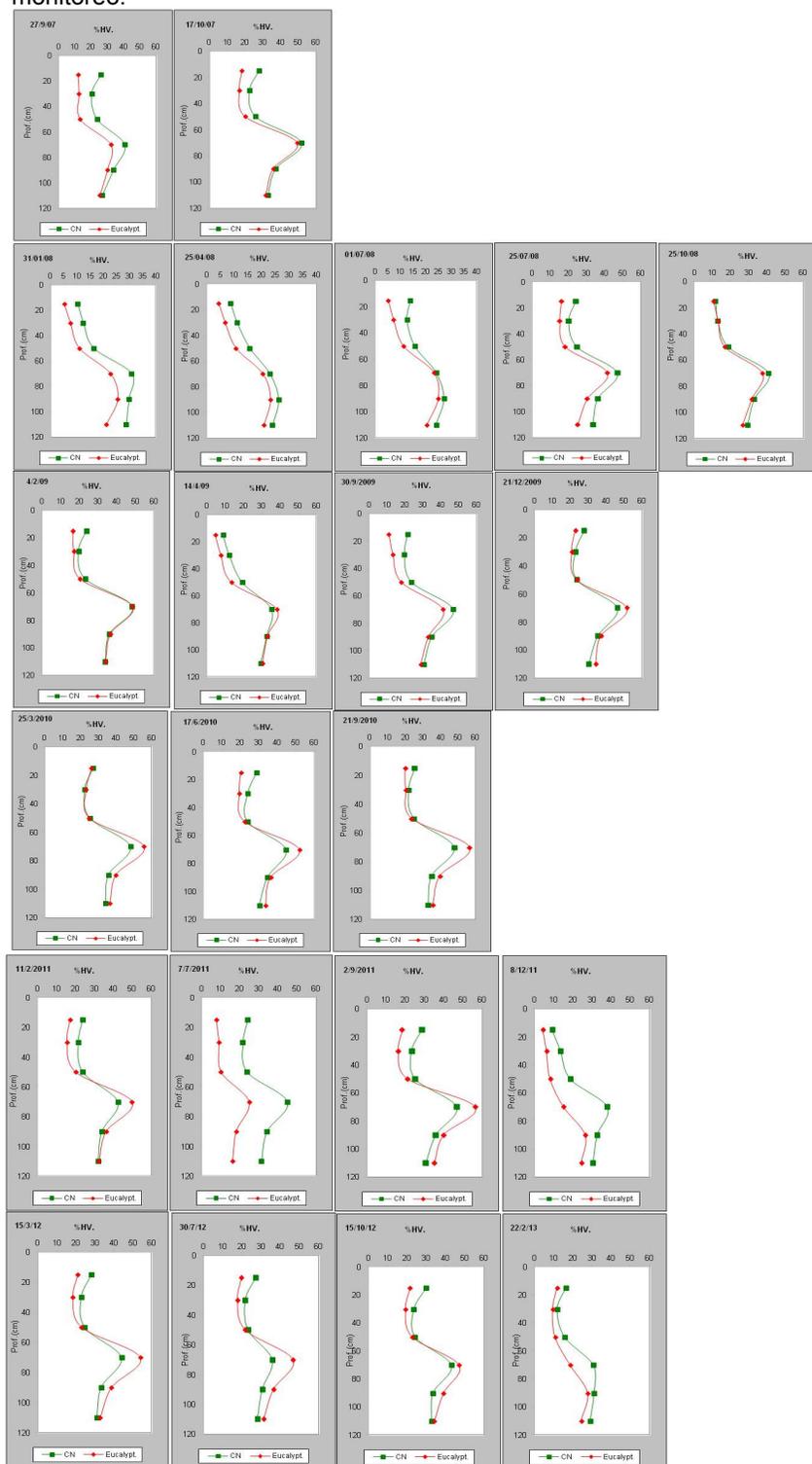


Figura 78. Distribución en profundidad del contenido de agua en el suelo, como %HV, para cada una de las fechas de monitoreo en el Experimento El Minero.

En las medidas realizadas durante 2007 y 2008 pueden observarse diferencias en el contenido de agua en el suelo entre los manejos, siendo más notorias en los primeros 50-60 cm.

Las medidas realizadas el 1/7/08 y el 25/7/08 corresponden a momentos de pre y poscosecha respectivamente, la replantación se efectuó en el otoño 2009, continuándose con la tendencia a un menor contenido de agua en el suelo bajo forestación en los primeros 50-60 cm pero a mayor profundidad se revirtió dicha tendencia pasando a tener menor contenido el suelo bajo pastura. Esto nos estaría indicando que la absorción de agua por parte de los árboles se está dando en los horizontes superficiales y/o la rugosidad del terreno favorece una mayor infiltración de agua al suelo. Hay que considerar también que la precipitación en el año 2008 fue de 569 mm; en el 2009 y 2010 el monto de precipitación anual estuvo por encima de la media, 1453 y 1392 mm respectivamente y en 2011 fue de 1084 mm, permitiendo mantener los niveles de agua en el suelo, haciendo mínimas las diferencias entre manejos.

Los valores correspondientes a la fecha 8/12/11 muestran una diferencia importante en profundidad entre los manejos, con una importante reducción en el contenido de agua en el suelo bajo manejo forestal, seguramente hubo un efecto importante provocado por la intercepción realizada por el follaje, de un total de lluvia de 77mm en el mes de noviembre unos 53 mm fueron los que efectivamente alcanzaron la superficie suelo.

### Experimento El Rosario

En el Cuadro 20 se presenta el contenido de agua en mm para cada una de las fechas de medida desde noviembre de 2007 hasta febrero de 2013. En el año 2008 sólo se realizaron dos medidas debido a problemas que se presentaron en el lugar donde se encontraban instalados los tubos de acceso a la sonda de neutrones y en 2010 la medida correspondiente a diciembre no pudo realizarse por averías en el instrumento de medición.

En la Figura 79 se muestra en forma gráfica la evolución del contenido de agua para ambos manejos, observándose la tendencia a un menor contenido de agua bajo manejo forestal que bajo pastura en todas las fechas analizadas. Al igual que para el establecimiento "El Minero" los valores de precipitación presentados en la figura corresponden al acumulado entre dos momentos consecutivos de medida el contenido de agua en el suelo.

Cuadro 20. Contenido de agua en el suelo hasta 120 cm de profundidad (mm) en el Experimento El Rosario.

	nov-07	ene-08	oct-08	feb-09	abr-09	set-09	dic-09	mar-10	jun-10	set-10	feb-11	jul-11	set-11	dic-11	mar-12	jul-12	oct-12	feb-13
CN	218,1	144,0	228,3	286,2	194,2	243,8	248,8	252,3	251,2	262,1	253,1	279,5	288,9	197,4	271,3	258,9	259,2	202,8
Euc.	142,7	125,8	129,1	253,9	128,6	126,7	218,7	218,7	162,1	187,2	216,5	179,7	209,5	125,8	210,3	190,4	199,3	142,4

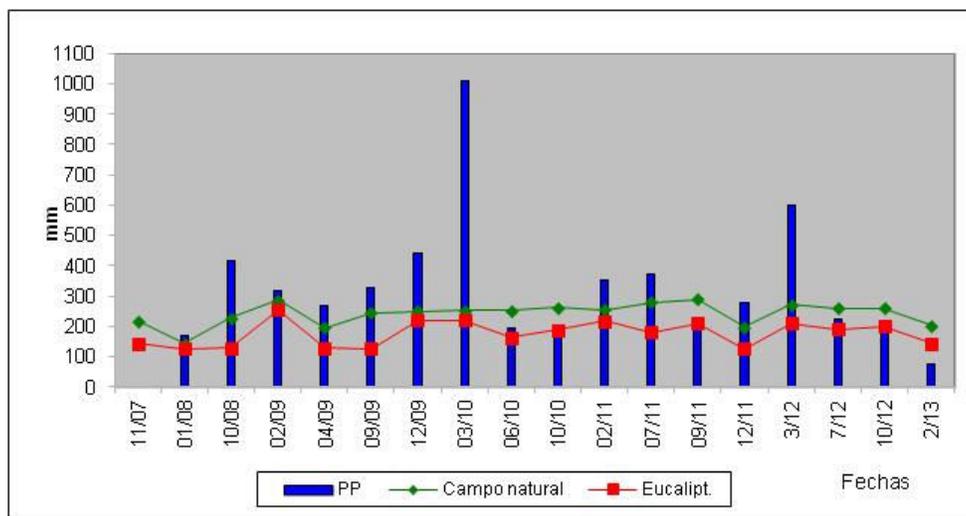


Figura 79. Evolución del contenido de agua en el suelo, bajo manejo forestal (Eucalyptus) y bajo pastura natural en el Experimento El Rosario.

En el Cuadro 21 y la Figura 80 se presentan los valores en mm de precipitación total, intercepción, precipitación efectiva y diferencia en el contenido de agua en el suelo entre ambos manejos, determinados de igual forma que para el caso anterior. Al considerar el total del período

analizado, noviembre 2007-febrero 2013, la precipitación total fue de 5672 mm y la intercepción correspondió a un 24% de la misma, valor que coincide con algunas investigaciones internacionales que refieren a la intercepción provocada por plantaciones de *Eucalyptus*. Huber et al (2000) consideran entre un 25 a 30% de intercepción anual. Aunque valores preliminares, es una variable a considerar cuando se comparan diferentes coberturas dado que puede llegar reducir significativamente el monto de precipitación que alcanza realmente el suelo. No existen datos nacionales con respecto a la intercepción generada por el mantillo pero dada la composición y espesor que alcanza algunas veces, es esperable que acumule una importante cantidad de agua, antes de que ésta pueda alcanzar el suelo.

En éste caso no se observa una relación entre la precipitación acumulada y las diferencias entre manejo o entre éstas y los valores estimados de intercepción.

Las diferencias, a favor de la pastura, entre manejos son mayores que en el suelo correspondiente al establecimiento El Minero.

Cuadro 21. Valores de Precipitación Total, Intercepción, Precipitación efectiva y diferencia en el contenido de agua en el suelo entre manejos en el Experimento El Rosario.

	PP total (mm)	Interc. (mm)	PP efectiva (mm)	$\Delta H$ (CN- Eucalip.) (mm)
nov-07				75,4
ene-08	169	55,6	113,4	18,2
oct-08	418	131	287	99,3
feb-09	315	77	238	32,3
abr-09	270	51,9	218,1	65,5
set-09	328	107,7	220,3	117,0
dic-09	440	101,7	338,3	30,1
mar-10	1008	172,2	835,8	33,6
jun-10	196	48,8	147,2	89,1
set-10	199	47,9	151,1	74,9
feb-11	351	112,5	238,5	36,6
jul-11	374,0	107,8	266,2	99,7
set-11	211,0	46,8	164,2	79,4
dic-11	276,0	69,9	206,1	71,6
mar-12	599,0	110,9	488,1	61,0
jul-12	224,0	57,0	167,0	68,5
oct-12	180,0	45,2	134,8	60,0
feb-13	114,0	11,8	102,2	60,4

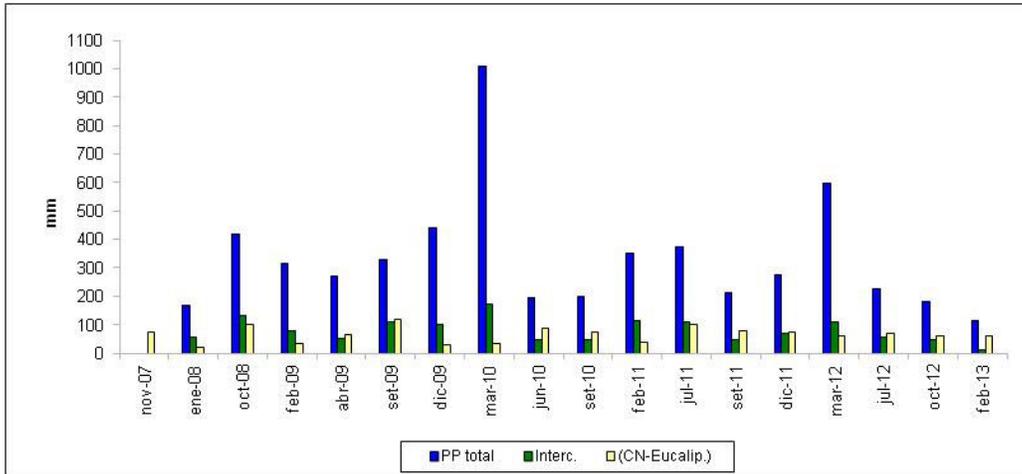
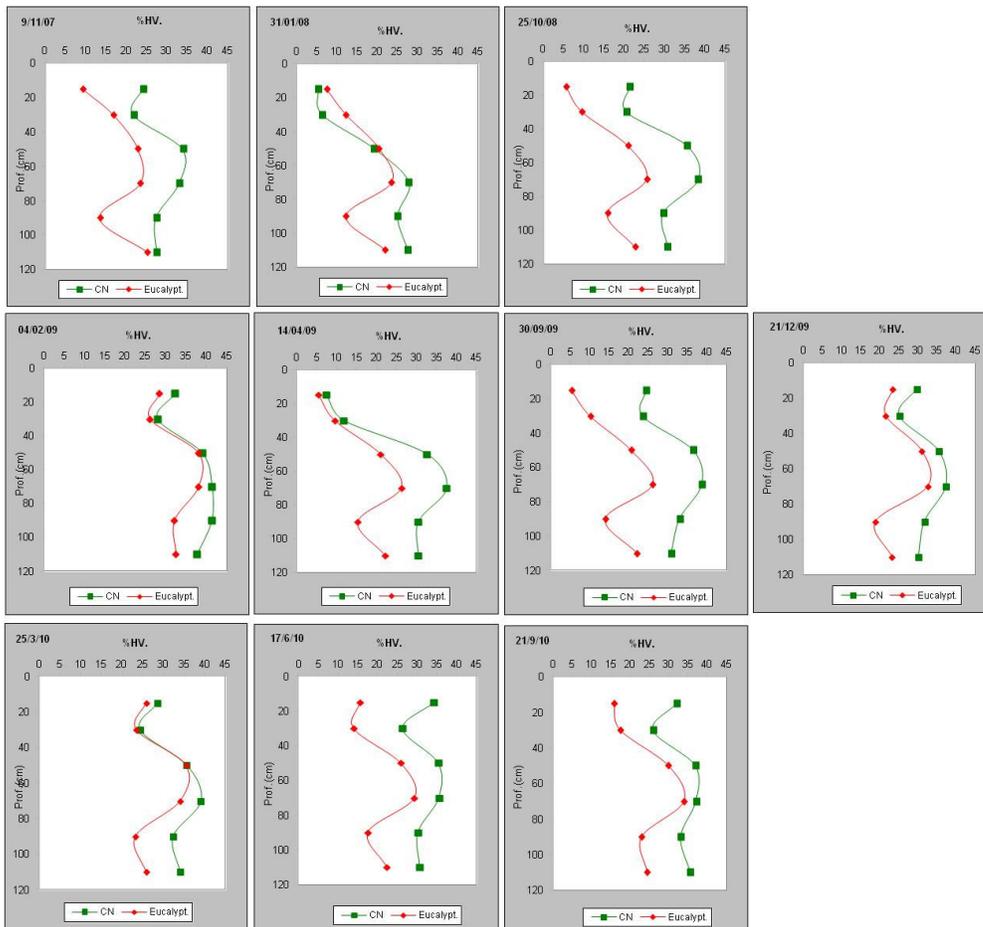


Figura 80. Precipitación total, interceptación y diferencia en el contenido de agua en el suelo entre manejos (mm) en el Experimento El Rosario.

Al igual que para el suelo correspondiente al El Minero la Figura 81 contiene en forma gráfica la distribución en el perfil del contenido de agua, medida en volumen (%HV) comparando ambos manejos en cada una de las fechas de monitoreo. Las diferencias entre manejos son más evidentes, en todas las fechas la pastura presentó mayor contenido de humedad en todo el perfil y en algunas de las fechas de muestreo las diferencias se mantienen en casi toda la profundidad del perfil considerado (25/10/2008, 30/9/2009, 7/7/2011).



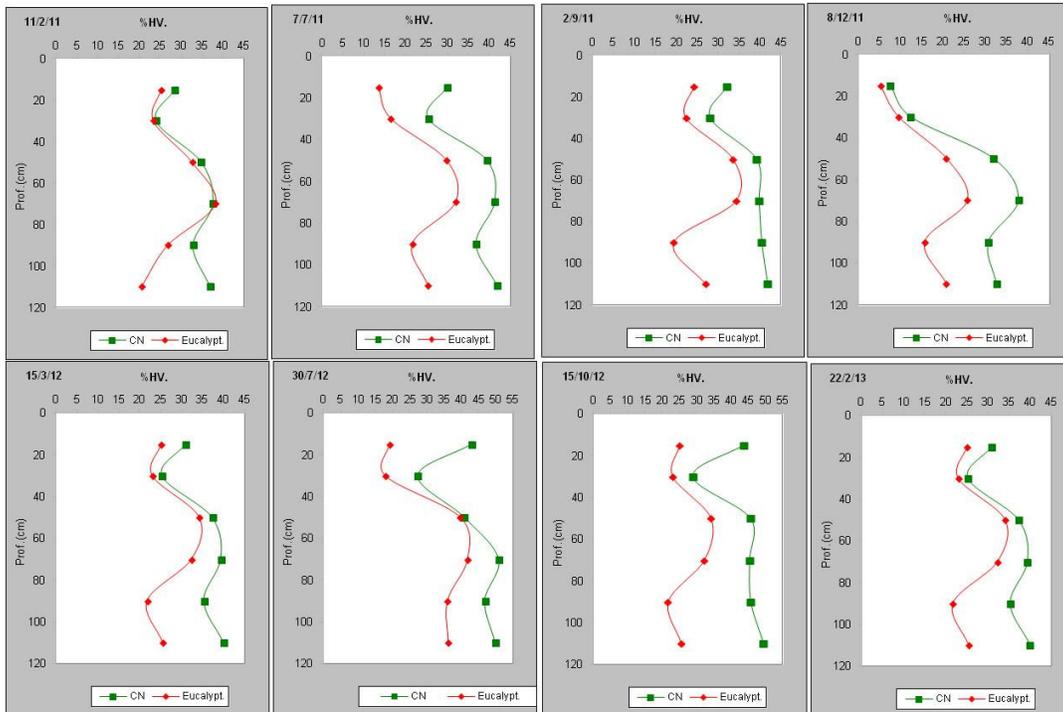


Figura 81. Distribución en profundidad del contenido de agua en el suelo, como %HV, para cada una de las fechas de monitoreo en el Experimento El Rosario.

## Conclusiones

Durante el período de evaluación, noviembre de 2007 – febrero 2013, se observó que en ambos ensayos (El Minero y El Rosario) el contenido de agua en el suelo fue menor en la cobertura bajo forestación que en la pastura. Parte de esa diferencia sería atribuible a la interceptación ocasionada por la cobertura forestal, la cual para estos ensayos fue estimada en un 24% de la precipitación total. Aunque variable, dependiendo principalmente de las características de la lluvia, la interceptación tanto de la biomasa aérea como del mantillo juega un rol importante en cuanto al monto de precipitación que efectivamente alcanza el suelo bajo una cubierta forestal, efecto considerado mínimo para una cubierta de pasturas.

En el ensayo “El Rosario” el suelo bajo cubierta forestal presentó en promedio un 27% menos en el contenido de agua que el correspondiente a la pastura, hasta la profundidad evaluada de 120 cm. Si se analizan los contenidos de agua por estación del año se observa que las mayores diferencias se dieron en el período invernal (36%) y la menor diferencia en los meses de verano (19%). Dichos resultados son esperados dado que en verano, consecuencia de la alta demanda de evapotranspiración, ambas coberturas realizan un mayor consumo de agua disminuyendo el contenido de agua disponible en el suelo, lo cual genera que en algunos períodos el consumo de agua por la vegetación se vea restringido y lleve a una disminución en las diferencias entre coberturas.

En el ensayo “El Minero” las diferencias encontradas fueron de menor magnitud y en un 27% de las medidas realizadas el contenido de agua en el suelo bajo pastura fue mayor. La menor diferencia encontrada puede deberse al efecto de que en éste ensayo no existió un manejo de la pastura alcanzando valores importantes de biomasa aérea determinando un mayor consumo, diferencia notoria con respecto a la pastura evaluada en el ensayo “El Rosario” en el cual la misma se encontraba afectada a la ganadería, por lo cual se mantuvo durante todo el período a escasa altura.

En promedio la cobertura forestal presentó un 10,5% menos agua que la cobertura de pasturas. A nivel estacional las mayores diferencias se obtuvieron para los meses de verano (16,5%) y las menores en otoño (5%), resultado contrario al obtenido para el ensayo en el “El Rosario”, consecuencia quizás de estar incluido en el período de evaluación la cosecha y replantación del monte, generando algunas diferencias en cuanto al comportamiento hidrológico del sitio con respecto a el ensayo instalado en “El Rosario”.

#### Referencia bibliográfica

Huber, A.; Trecamán, R. (2000). Efecto de la forestación de suelos rojos arcillosos sobre el recurso hídrico en la zona de Collipulli, IX Región Chile. Rev. Geográfica de Chile Terra Australis, 45:49-60.

### **3b) Monitoreo del contenido de agua en el suelo para el ajuste y validación del modelo de escurrimiento y erosión WEPP en sistemas forestales.**

#### **Introducción**

Se han sido realizado algunos trabajos de monitoreo de erosión empleando la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos. Este modelo estima pérdidas medias de suelo por erosión no encauzada por unidad de superficie y año para períodos largos de tiempo. Si bien el mismo ha sido extensamente validado en Uruguay (Durán y García Préchac, 2007), posee algunas limitantes. Entre ellas se destacan la incapacidad de estimar pérdidas de suelos en eventos individuales de lluvia, de estimar erosión encauzada en pequeños canalículos, y estimar tasas de erosión en pequeñas cuencas hidrográficas. En este sentido cabe destacar que el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) inició un programa de investigación y desarrollo en el año 1985 a los efectos de levantar las limitantes que presentaba el modelo USLE. Esto dio origen al desarrollo del modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), para el cual se plantea realizar su ajuste y validación con los datos disponibles de monitoreos de agua en el suelo bajo forestación.

#### **Materiales y Métodos**

Se prepararon las cuatro bases de datos (datos climáticos, suelos, topografía y manejo del suelo) a los efectos de correr el modelo WEPP. La base de datos climáticos se prepara a partir de la información de la estación meteorológica ubicada en las microcuencas experimentales de la empresa Weyerhaeuser en el departamento de Tacuarembó, para el período 2003-2009. La información de suelos, topografía y manejo del uso del suelo corresponde a la cuenca experimental bajo uso de pastura natural.

Dado que se cuenta con información de evolución del contenido de agua en el suelo en la microcuencas anteriormente mencionadas desde el año 2004 y con un frecuencia estacional (4 medidas anuales), en tres suelos y tres repeticiones, la misma será empleada a los efectos de validar el componente balance hídrico del modelo WEPP.

En este sentido se han hecho simulaciones con el modelo WEPP en forma continua en un Acrisol Ócrico Típico ubicado en tres posiciones topográficas (ladera alta, media, y baja) para el período 2003-2009 y bajo uso de pastura natural.

#### **Resultados y discusión**

El Cuadro 22 presenta el promedio del contenido de agua medido, y simulado con WEPP en un Acrisol Ócrico de Tacuarembó ubicado en tres posiciones topográficas. El modelo WEPP estima un 28 y 30% menos de agua que la medida en las posiciones topográficas de ladera alta y media, respectivamente. En el caso de la ladera baja, la estimación de WEPP es un 56 % de lo medido. Por otra parte, los coeficientes de variación del contenido de agua medido y simulado son similares. También es de destacar que el contenido de agua promedio medido en la ladera alta es el 62 % del contenido de agua medido en la ladera media, en tanto WEPP simula una proporción del 64 %. Al comparar la ladera baja respecto a la ladera media, la primera en promedio presenta un contenido de agua similar, pero el modelo WEPP estima una disminución en el contenido de agua promedio en la ladera baja.

Cuadro 22. Contenido de agua (mm/130 cm de suelo) promedio medido y simulado en un Acrisol ubicado en tres posiciones topográficas bajo campo natural para el período 2004-2009.

	<b>Medido</b>		<b>Simulado</b>	
	Media	CV	Media	CV
<b>Ladera alta</b>	223.17	0.25	161.68	0.23
<b>Ladera media</b>	359.10	0.13	251.64	0.18
<b>Ladera baja</b>	359.89	0.21	204.81	0.21

Las figuras 81 a 83 muestran la evolución del contenido de agua promedio medido, y simulado por WEPP en tres posiciones topográficas durante el período 2004-2009. A pesar de que el comportamiento general de la evolución del contenido de agua en el suelo es copiado por el modelo WEPP, la magnitud del contenido de agua simulado es claramente inferior a lo medido. Al momento de la realización de este informe se está trabajando sobre dos aspectos a los efectos de conocer las razones de la marcada diferencia entre lo simulado por WEPP y medido con sonda de neutrones. El primero de ellos hace referencia al análisis detallado de la base de datos del contenido de agua medido. La segunda línea de trabajo está analizando las ecuaciones de pedotransferencia empleadas por WEPP, así como la dinámica de agua simulada en distintos horizontes del suelo. Conocer las razones de estas diferencias permitirán realizar los ajustes necesarios al modelo WEPP a los efectos de su validación a las condiciones experimentales y/o modificar la metodología de monitoreo de agua en el suelo.

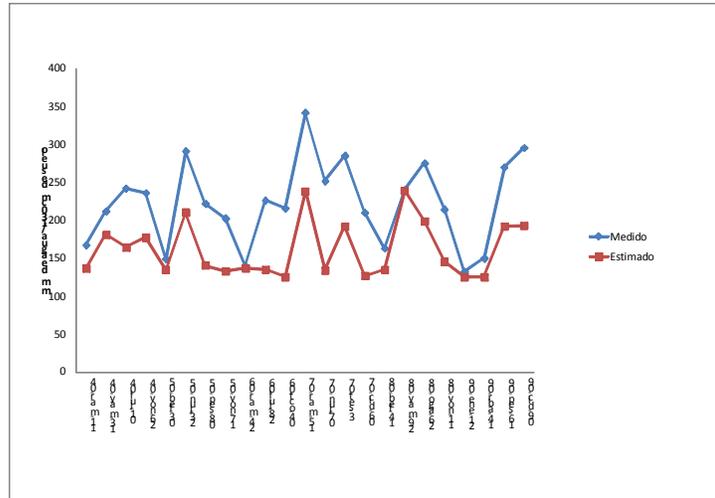


Figura 81. Contenido de agua medido, y simulado por WEPP en un Acrisol Órico bajo campo natural ubicado en la ladera alta.

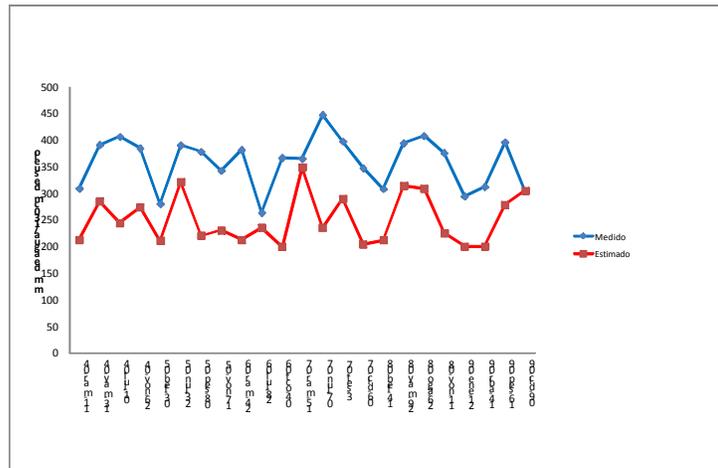


Figura 82. Contenido de agua medido, y simulado por WEPP en un Acrisol Órico bajo campo natural ubicado en la ladera media.

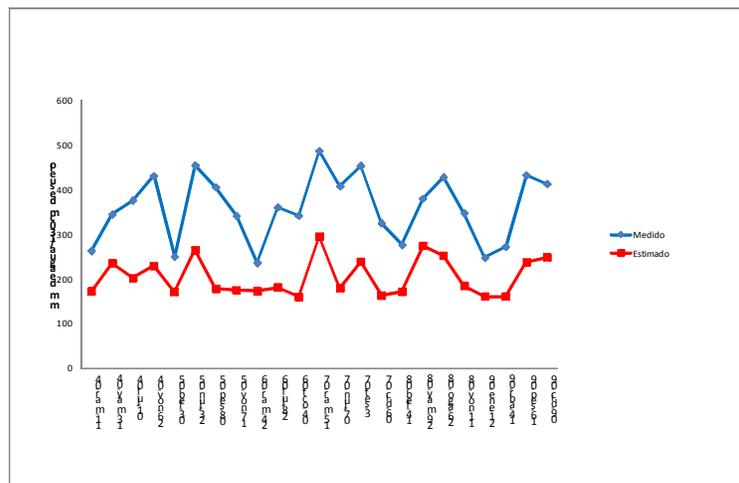


Figura 83. Contenido de agua medido, y simulado por WEPP en un Acrisol Órico bajo campo natural ubicado en la ladera baja.

## Conclusiones

El modelo WEPP reproduce los cambios relativos de agua en el suelo bajo manejo de campo natural. Las diferencias existentes entre la magnitud de lo simulado y lo medido son motivo de estudios actuales. Conocer las razones de estas diferencias permitirá realizar los ajustes necesarios en el modelo y/o metodología de monitoreo de agua en el suelo.

## Formación de Recursos Humanos

Este componente del proyecto forma parte del trabajo de tesis de Maestría en Ciencias Agrarias opción Ciencias del Suelo del Ing. Agr. Nicolás Blanco, docente del Departamento de Suelos y Aguas en la Regional Norte de la UdelaR. El Ing. Agr. Blanco ha presentado el Seminario I, requerimiento este de la Maestría en Ciencias Agrarias.

## OBJETIVO ESPECÍFICO 4. Cuantificar los cambios en los contenidos de carbono orgánico del suelo por efecto del cambio de uso de pastoril/agrícola a forestal.

### Objetivo 4a) Estudio de variabilidad espacial del contenido de carbono orgánico y otras propiedades de suelo bajo manejo pastoril y forestal: pH, bases y acidez intercambiable

## Introducción

La experimentación que se propuso suponía delinear una metodología de muestreo para cuantificar los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) bajo plantaciones forestales y campo natural, y otros parámetros de suelo como pH, bases y acidez intercambiable.

## Materiales y Métodos

### Experimentación de campo

El estudio de variabilidad se realizó en una plantación de *E. dunnii* de 10 años de edad (marco de plantación de 3 m x 3 m), aledaña a un campo natural bajo manejo pastoril. El suelo pertenece a la Unidad Tres Bocas (CONEAT 09.3), cuya descripción del perfil y datos analíticos se indican en los Cuadros 23 y 24.

Cuadro 23. Descripción del perfil tipo del Luvisol Ócrico bajo monte y campo del sitio experimental Tres Bocas.

Monte				
Horiz.	Prof.	Textura	Color	
Ap	0 - 20	FAr-ArF	7,5 YR 4/2	
A	20 - 35	FAr	7,5 YR 3/2	
BA	35 - 44	FACAr	7,5 YR 2.5/2	
Bt1	44 - 60	Ac	7,5 YR 5/2	Moteados 10R 4/8, 30%, borde neto, 5mm
Bt2	60 - 75	Ac	7,5 YR 5/4	Moteados 10R 4/8 y 10YR 6/8, 50%, borde difuso
BC	75+	F	7,5 YR 5/4	Moteados 10R 4/8, 80%, borde neto, concreciones de Fe y Mn, abundantes, friables

Campo				
Horiz.	Prof.	Textura	Color	
A	0 - 43	FAr	10 YR 4/3	
E	43 - 68	ArF	10 YR 5/5	
Bt1	68 - 88	Ac - AcAr	10 YR 3/1	Moteados 10R 3/6, abundantes, borde difuso, 2mm
Bt2	88 - 100	Ac - AcAr	10 YR 3/1	Moteados 10YR 6/6 y 10R 4/8, 30%, borde difuso, 1 cm
BC	100 +	AcAr	7,5 YR 5/4	Moteados 10R 4/8, 80%, borde neto,

Cuadro 24. Datos analíticos de los perfiles de suelo bajo monte y campo del sitio experimental Tres Bocas.

Posición monte	Hor.	pH		Corg g kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na	Al	BT	*ClCe	SB %
		H <sub>2</sub> O	KCl									
Punto 1	Ap	5.58	4.83	7.65	3.14	0.54	0.23	0.50	0.03	4.41	4.44	99.37
	A	5.22	4.11	5.16	2.51	0.66	0.21	0.38	0.39	3.76	4.15	90.69
	BA	5.16	3.95	6.93	4.63	1.36	0.35	0.36	1.39	6.70	8.09	82.77
	Bt1	5.38	4.00	9.02	11.40	3.30	0.73	0.41	1.25	15.84	17.09	92.71
	Bt2	5.48	4.16	2.10	8.19	2.42	0.41	0.36	0.94	11.38	12.32	92.34

Posición campo	Horiz.	pH		Corg g kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	K	Na	Al	BT	*ClCe	SB %
		H <sub>2</sub> O	KCl									
Punto 1	A	5.27	4.15	3.06	0.85	0.32	0.14	0.30	0.19	1.61	1.80	89.48
	E	5.31	4.04	0.48	0.98	0.26	0.12	0.34	0.33	1.70	2.03	83.93
	Bt1	5.31	3.75	4.51	8.23	3.36	0.50	0.36	1.70	12.45	14.15	88.02
	Bt2	5.35	3.75	2.26	7.10	3.03	0.40	0.35	1.65	10.88	12.53	86.80
	BC	5.27	4.15	3.06	0.85	0.32	0.14	0.30	0.19	1.61	1.80	89.48

\*ClCe: CIC efectiva a pH del suelo

Se marcó una grilla de muestreo de 24 x 24 m, con puntos de muestreo determinados por las intersecciones de líneas paralelas y perpendiculares a las filas de plantación, y espaciadas 6 m. Se tomaron muestras compuestas de 8 tomas (cores) de suelo en cada punto (total: 25 puntos de muestreo), individualmente para cuatro profundidades (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 cm). En cinco puntos de una de las diagonales a la grilla se tomaron además muestras compuestas de cinco tomas (cores) del horizonte transicional y del horizonte B del suelo. En dichos puntos se sacaron 8 tomas en el entorno del punto, las cuales fueron embolsadas por separado, para ser analizadas individualmente, de manera de tener una estimación de la variabilidad dentro de cada punto.

Se determinó el número mínimo de muestras necesario para estimar el valor de cada variable para futuros estudios con objetivos similares en sitios con iguales características. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$n = [(t_{(\alpha/2;gle)})^2 * S^2] / D^2$$

Siendo:

n = número mínimo de muestras

$t_{(\alpha/2)}$ : valor de tabla T de Student (con 24 grados de libertad para las primeras cuatro profundidades de suelo muestreadas, o 4 grados de libertad para el horizonte transicional y el horizonte B)

$S^2$  = varianza de las variables

D = error permitido (0.05, 0.1, 0.15, 0.20 y 0.25%)

## Resultados y Discusión

En la Figura 84 se indica la distribución en el contenido de carbono orgánico del suelo bajo los dos usos.

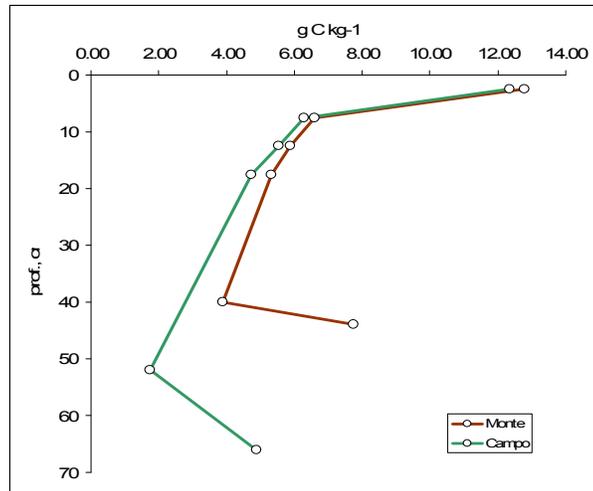


Figura 84. Distribución del contenido de carbono orgánico del suelo en función de la profundidad para los dos usos del suelo del sitio experimental Tres Bocas.

Los resultados preliminares indican una similitud en la concentración de carbono en los primeros 10 cm de suelo, por debajo de los cuales muestran una tendencia a diferenciarse. El último horizonte muestreado corresponde a la parte superior del horizonte Bt, donde se observa un aumento en el contenido de carbono en ambas situaciones de manejo. Sin embargo, fueron constatadas diferencias en el perfil de suelo, ya que mientras en el monte el horizonte Bt se encontraba a un promedio de 44 cm, bajo campo natural el suelo resultó más profundo, encontrándose el Bt a un promedio de 66 cm de profundidad.

En las Figuras 85 y 86 se indica la variación en sentido horizontal y vertical de los parámetros de acidez del suelo. Se constató un pH más ácido en el manejo bajo monte, lo cual fue acompañado por un mayor contenido de acidez intercambiable.

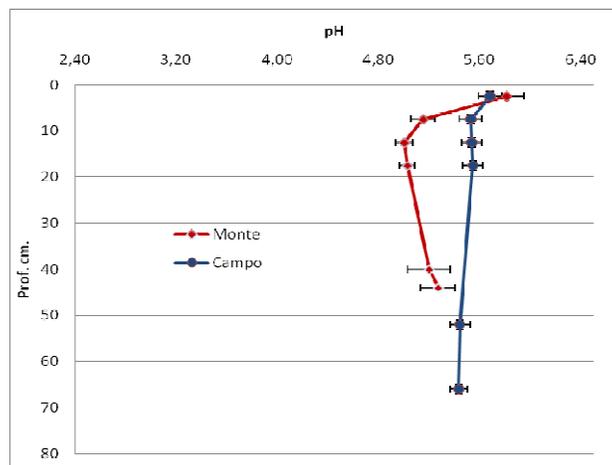


Figura 85. Distribución del pH (H<sub>2</sub>O) del suelo en profundidad, bajo vegetación de campo y monte del sitio experimental Tres Bocas.

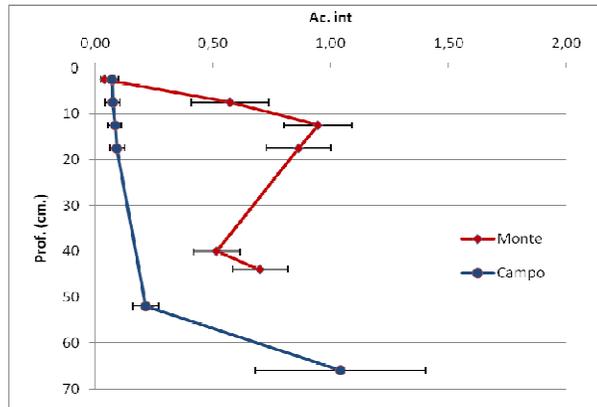


Figura 86. Distribución del Acidez intercambiable del suelo en profundidad, bajo vegetación de campo y monte del sitio experimental Tres Bocas.

En cuanto al contenido de bases de intercambio, se observó una mayor concentración en el primer estrato de muestreo, principalmente debida a mayores contenidos de Ca (datos no presentados) (Figura 87). Esto sería explicado por el aporte de bases realizado por el mantillo como consecuencia de su proceso de descomposición. Luego en los siguientes estratos de muestreo no surgen diferencias significativas entre ambos manejos. A nivel del horizonte transicional aumenta el contenido de bases, posiblemente debido a percolación de horizontes superiores. En el horizonte Bt el contenido es similar en ambos manejos.

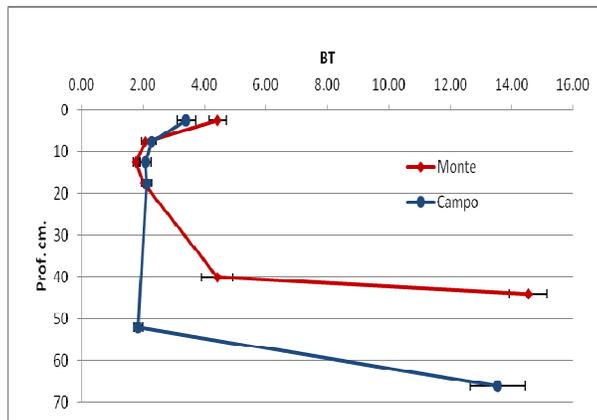


Figura 87. Distribución de las Bases Totales intercambiables del suelo en profundidad, bajo vegetación de campo y monte del sitio experimental Tres Bocas.

Se realizó un análisis mediante técnicas de geo- estadística, el cual confirmó que la variación en ambas áreas de muestreo no siguió un padrón definido. De tal manera que la variabilidad encontrada en ambas áreas se debe al azar. De allí fue posible realizar el estudio tendiente a calcular el número de tomas individuales necesario a incluir en una muestra compuesta que permita caracterizar los parámetros bajo estudio. Dichos resultados se indican en los Cuadros 25, 26, 27 y 28.

Cuadro 25. Número tomas para integrar la muestra compuesta para la estimación del COS, con una Confianza (Probabilidad) del 90% y Nivel de Precisión del 95% del sitio experimental Tres Bocas.

Profundidad	Manejo	N° tomas
1	M	14
	C	12
2	M	28
	C	14
3	M	28
	C	34
4	M	33
	C	22
5	M	230
	C	156
6	M	22
	C	101

Cuadro 26. Número tomas para integrar la muestra compuesta para la estimación del pH en agua, con una Confianza (Probabilidad) del 90% y Nivel de Precisión del 95% del sitio experimental Tres Bocas.

Profundidad	Manejo	N° tomas
1	M	2
	C	1
2	M	2
	C	2
3	M	1
	C	1
4	M	1
	C	1
5	M	5
	C	1
6	M	3
	C	1

Cuadro 27. Número tomas para integrar la muestra compuesta para la estimación de la acidez intercambiable, con una Confianza (Probabilidad) del 90% y Niveles de Precisión del 75, 85 y 95% del sitio experimental Tres Bocas.

Profundidad	Manejo	N° tomas		
		75%	85%	95%
1	M	17	47	418
	C	18	48	431
2	M	10	26	230
	C	20	55	494
3	M	3	8	65
	C	13	35	314
4	M	3	8	71
	C	13	36	320
5	M	6	16	136
	C	10	27	242
6	M	5	12	105
	C	19	51	452

Cuadro 28. Número tomas para integrar la muestra compuesta para la estimación de las bases de intercambio, con una Confianza (Probabilidad) del 90% y Nivel de Precisión del 95% del sitio experimental Tres Bocas.

Profundidad	Manejo	N° tomas
1	M	12
	C	22
2	M	11
	C	16
3	M	8
	C	20
4	M	8
	C	16
5	M	48
	C	26
6	M	7
	C	17

Los resultados encontrados indican que, para realizar un muestreo con un nivel de estratificación como el realizado en este estudio, y para una precisión del 95% y un nivel de confianza del 90%, son variables según el parámetro a estimar. Cuando se consideran carbono orgánico y contenido de bases de intercambio, se deberían tomar no menos de 35 tomas individuales para conformar la muestra compuesta en el suelo bajo monte, y 62 en el suelo bajo campo. Cabe destacar que este valor de tomas tan elevado para el campo natural, se debe a la mayor variabilidad que presentan los contenidos de K intercambiable (probablemente por una mayor heterogeneidad del parámetro determinada por la distribución de orina de los animales bajo pastoreo). Sin embargo, si se excluyera éste parámetro del análisis, 35 tomas serían suficientes para alcanzar los niveles de confianza y precisión establecidos, al igual que para el manejo bajo monte.

En cuanto a los parámetros de acidez se encontraron resultados contrapuestos: mientras para la estimación del pH apenas serían necesarias dos tomas, para acidez intercambiable el número de tomas para integrar la muestra de suelo pasa a ser impracticable. Con respecto al pH, la escasa variabilidad del parámetro es la que proporciona estos resultados. Si bien estadísticamente dos tomas serían suficientes para un nivel de confianza y precisión adecuados, desde el punto de vista agronómico no sería recomendable, sino que podría establecerse un número mínimo de cinco tomas para este tipo de muestreo. En lo que respecta a la acidez intercambiable, el parámetro mostró una elevada variabilidad, sobre todo cuando sus niveles son bajos, además de aspectos relativos a la técnica de análisis, la cual presenta baja repetibilidad. En tal situación, dado que el número de tomas para cumplir con los mismos criterios de confiabilidad y precisión de los otros parámetros es impracticable, se recomienda igualmente utilizar un número de tomas de 35, pero teniendo en cuenta que en esas condiciones estaríamos en niveles de precisión en el entorno de 80%, lo cual resulta aceptable.

En lo que respecta a horizontes sub-superficiales, dadas las características del suelo en estudio, el cual presenta un horizonte transicional discontinuo, no sería recomendable el muestreo de este horizonte, dado que puede tratarse de un horizonte E, AB o BA, lo que llevaría a considerar como iguales horizontes que son diferentes. Dicha conclusión es extrapolable a otras situaciones con suelos que presenten horizontes transicionales. Asimismo, para el muestreo del horizonte Bt, es recomendable el muestreo de un sub-horizonte del mismo donde se expresen mejor sus características, y donde sea mínima la variabilidad horizontal, y no la primera porción del mismo, la cual puede estar influida en la toma de muestra por parte del horizonte transicional.

### Conclusiones

El número de tomas para integrar una muestra compuesta en diferentes estratos del horizonte A de un suelo varía según el parámetro a estimar. Para la mayoría de los parámetros, un muestreo de los primeros 20 cm de suelo con fines de su caracterización en estratos de 5 cm, para una precisión del 95% y un nivel de confianza del 90%, supone un número de tomas no menor a 35. Se debe tener precaución en cuanto al muestreo para caracterizar los parámetros químicos en horizontes sub-superficiales (horizontes B del suelo), de manera de realizar las tomas

en la porción más representativa de este. No resulta recomendable el muestreo de horizontes transicionales, dada la alta variabilidad en los diferentes puntos del sitio de muestreo.

#### **Objetivo 4b) Evaluación de cambios en contenidos y distribución de carbono en el suelo bajo forestación por efecto del cambio de uso de pastoril a forestal**

##### **Introducción**

En la investigación que se llevó a cabo se realizó el muestreo de plantaciones en la zona litoral oeste del país, y en plantaciones en la zona norte, con el objetivo de comparar los contenidos de carbono orgánico en suelos afectados a la forestación respecto al manejo tradicional bajo pasturas. Se realizó un muestreo estratificado por profundidades y/o horizontes, a los efectos de cuantificar contenidos y distribución del carbono orgánico en el suelo.

##### **Materiales y Métodos**

Se seleccionaron plantaciones de turnos largos para aserrío, con el objetivo de testear y cuantificar diferencias en el contenido total de carbono orgánico del suelo (COS) entre este manejo, y la referencia (pastura previa o agricultura). Se seleccionaron sitios de conocida historia anterior a la forestación. Como especies se seleccionaron plantaciones de *Eucalyptus grandis*, en Argisoles y Luvisoles del litoral oeste (CONEAT 9.3). Por otra parte, se compararon dichos resultados con los provenientes de un experimento de densidad de plantación de eucalipto, realizado en un Acrisol de la Unidad Tacuarembó, en el norte del país.

##### *Evaluaciones en el suelo*

En cada sitio se realizó una descripción morfológica del suelo, y un muestreo estratificado de 0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm (corresponden al horizonte A de los suelos), y luego en el horizonte transicional y el horizonte B del suelo. En el Acrisol de Tacuarembó se tomaron muestras correspondientes al horizonte A del suelo, a las mismas profundidades, y de 20 a 30 cm.

En todos los sitios se realizó la determinación del COS y las relaciones isotópicas  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) del COS total, mediante autoanalizador acoplado a un espectrómetro de masa para relaciones isotópicas (IRMS). Este último análisis permite discriminar dentro del total de COS qué proporción proviene de la vegetación incorporada (*Eucalyptus grandis*), en la medida que ocurra un cambio de vegetación de pasturas mezcla de especies C3 y C4 (típica de los suelos de Uruguay), hacia especies típicamente C3 como eucalipto y pino. Se calcula la proporción de  $^{13}\text{C}$  del suelo en base a la siguiente relación:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} \right] \times 1000$$

donde  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  es la relación isotópica del material de estudio y  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{PDB}}$  del material standard de referencia (PDB). Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  son negativos por el tipo de cálculo, siendo que los valores promedio de  $\delta^{13}\text{C}$  para una vegetación tipo C3 están en el entorno de -27 (empobrecidos en  $^{13}\text{C}$ ), mientras que los correspondientes a una vegetación tipo C4 están en un promedio de -12. Luego, a partir de los valores obtenidos es posible calcular qué porcentaje del carbono del suelo proviene de la nueva vegetación (eucalipto, pino), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\alpha(\%) = 100 \times \frac{(\delta - \delta_0)}{(\delta_1 - \delta_0)}$$

Donde  $\alpha$  es la proporción del C de la nueva vegetación dentro del COS total del suelo, expresada como porcentaje,  $\delta$  es el valor de  $\delta^{13}\text{C}$  de COS de suelo al tiempo de estudio ( $t=1$ ),  $\delta_0$  es el  $\delta^{13}\text{C}$  del COS al tiempo cero (antes de implantar el monte; se considera el valor correspondiente al campo natural  $t=0$ ), y  $\delta_1$  es el valor de  $\delta^{13}\text{C}$  de los residuos de la nueva vegetación (eucalipto o pino).

En la Figura 88 se indica la ubicación de los cinco puntos de muestreo en plantaciones de *Eucalyptus grandis* de más de 15 años de la Caja Bancaria (Localidad de Piedras Coloradas, Dpto. de Río Negro).



Figura 88. Ubicación de los cinco puntos de muestreo para la determinación de los contenidos de carbono orgánico del suelo bajo campo natural y plantaciones de *Eucalyptus grandis* de más de 15 años de edad (Localidad de Piedras Coloradas, Dpto. de Río Negro).

### Resultados y discusión

En la Figura 89 se indica la concentración de carbono orgánico del suelo en función de la profundidad del perfil.

Los resultados no muestran diferencias significativas en el contenido de carbono orgánico en el promedio de los cinco sitios, aunque en cuatro de ellos se observó una tendencia hacia una mayor concentración de carbono en los primeros 5 cm de suelo bajo monte, respecto al suelo bajo pastura natural. A mayores profundidades de los suelos, las diferencias tampoco resultaron significativas, siendo las tendencias menos claras que en superficie.

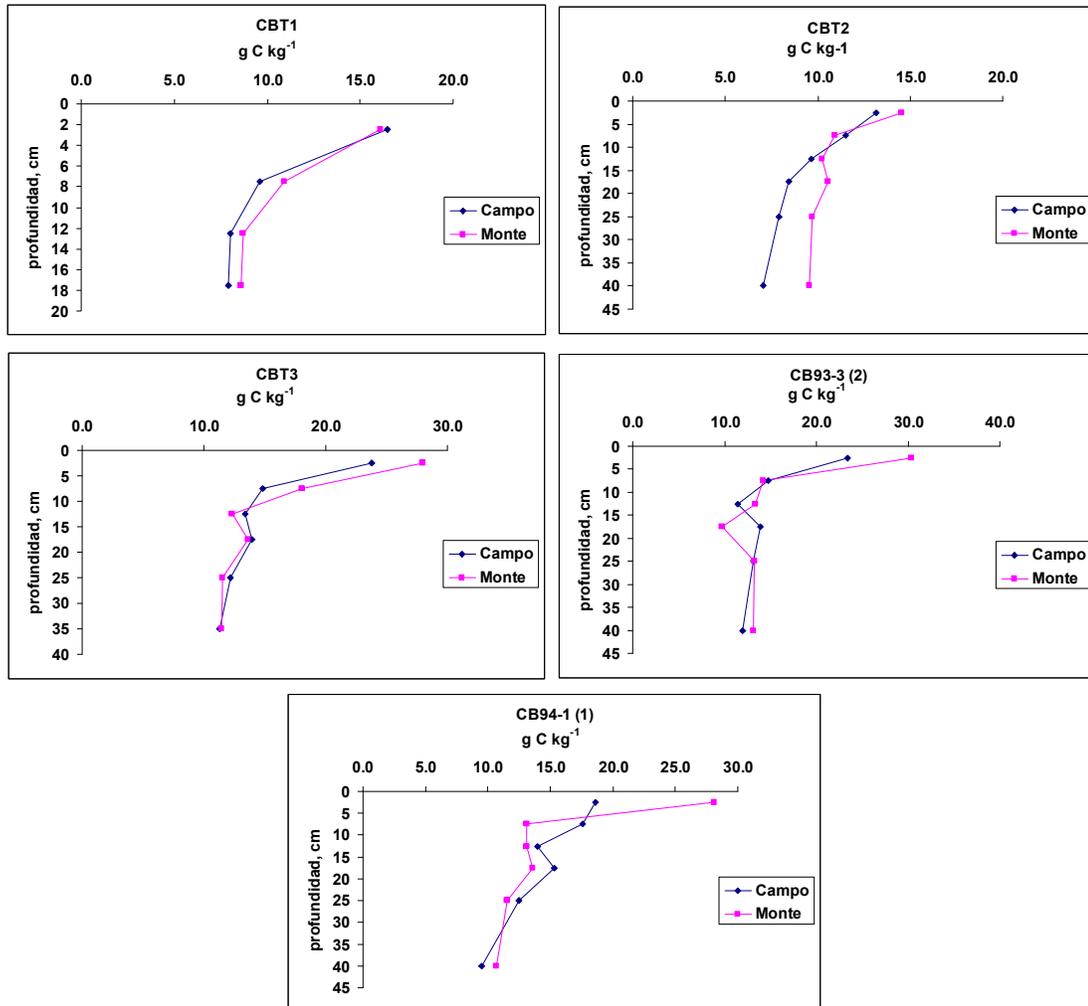


Figura 89. Concentración de COS en función de la profundidad del perfil bajo campo natural y plantaciones de *Eucalyptus grandis* de más de 15 años de edad (Localidad de Piedras Coloradas, Dpto. de Río Negro).

El uso de la metodología isotópica (abundancia natural de <sup>13</sup>C del suelo) permite discriminar dentro de la materia orgánica del suelo qué parte ha sido aportada por la vegetación de eucalipto. En la Figura 90 se indican los valores de δ<sup>13</sup>C de los suelos de los sitios experimentales del Dpto. de Río Negro.

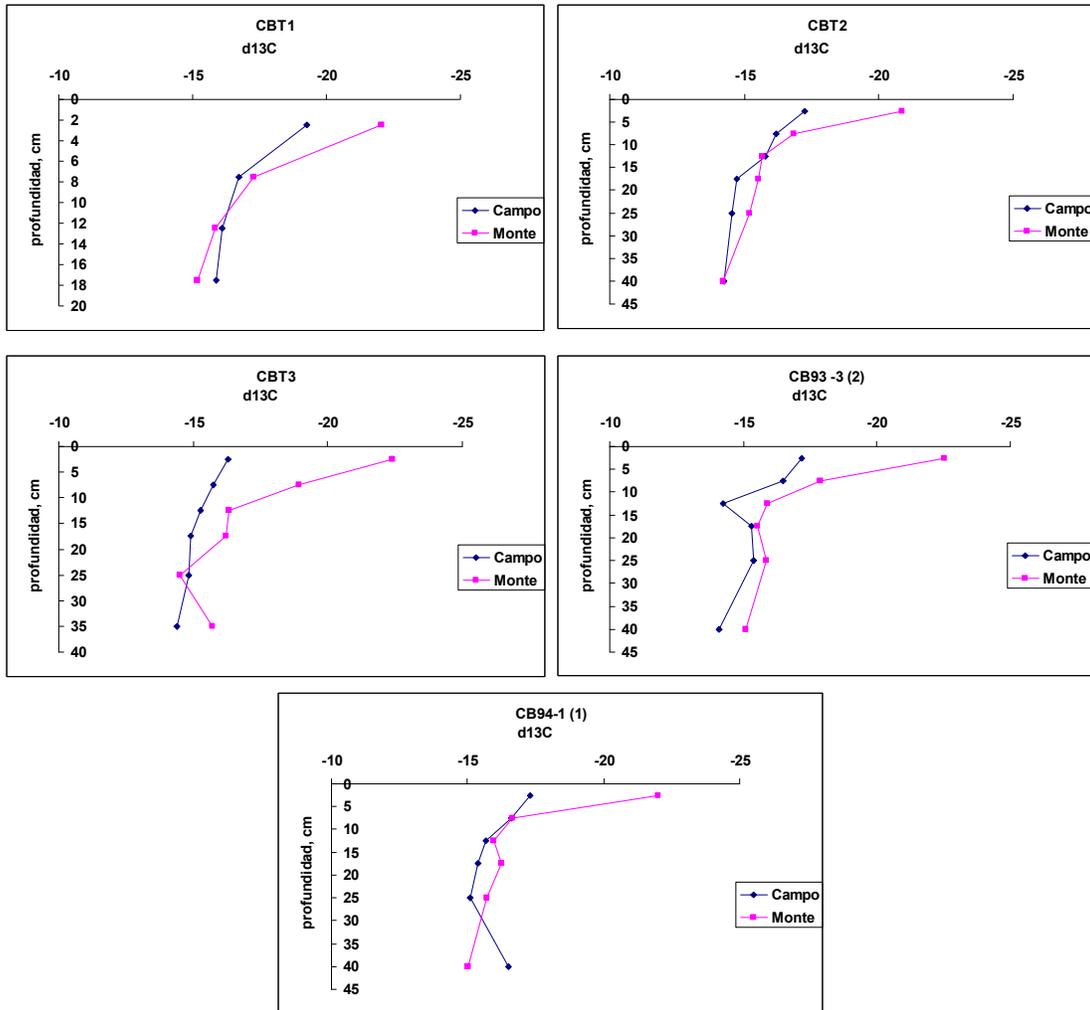


Figura 90. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  del suelo bajo vegetación de campo natural y bosque de *Eucalyptus grandis* de más de 15 años de edad, para diferentes profundidades de muestreo, en diferentes sitios experimentales del Dpto. de Río Negro (Localidad de Piedras Coloradas)

Los valores indican valores más negativos para el suelo bajo vegetación de *E. grandis*, particularmente en los primeros centímetros de suelo, cerca de los productos de descomposición del mantillo de bosque. Sin embargo, mientras en algunos sitios donde no aparecían diferencias en el COS a estratos más profundos, a través de esta técnica surge que ha habido un aporte de la nueva vegetación (eucalipto) a la materia orgánica del suelo. En el Cuadro 29 se indican los porcentajes correspondientes a cada estrato de muestreo.

Cuadro 29. Porcentaje del carbono orgánico del suelo que fue aportado por la vegetación de eucalipto para cada profundidad en rodales de *Eucalyptus grandis* de más de 15 años de edad.

Profundidad cm	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3 %	Sitio 4	Sitio 5
0 - 5	28	30	47	44	39
5 - 10	4	5	23	11	0
10 - 15	-2	-1	7	11	2
15 - 20	14	6	9	2	6
20 - 30	-	5	-2	3	4
30 - 50	-	0	9	6	-11

Los valores del Cuadro 29 indican que para el primer estrato de muestreo (0 a 5 cm) entre el 28 y el 47% del COS ha sido incorporado por la nueva vegetación. Sin embargo, en la medida que no han sido constatados cambios significativos en los contenidos de COS en los cinco sitios evaluados para ambas vegetaciones (campo natural y eucalipto), dichos valores estarían indicando que se operó una pérdida de COS proveniente de la vegetación nativa, que fue compensado por la ganancia de la nueva vegetación (eucalipto). Esta tendencia se mantuvo en forma relativamente importante a mayores profundidades en algunos sitios (sitios 3 y 4), mientras que en otros no fue relevante, o –inclusive- no se constatan ganancias (valores negativos).

Los resultados del experimento de densidad de plantación de eucalipto evaluado en un Acrisol de la Unidad Tacuarembó mostraron valores algo menores de incorporación de COS para el primer estrato de muestreo, pero en los siguientes estratos los valores fueron superiores a los suelos del litoral (Cuadro 30). Esto puede deberse al hecho de tratarse de suelos más pobres desde el punto de vista de sus contenidos de COS, donde la ganancia resulta más destacable.

Cuadro 30. Porcentaje del carbono orgánico del suelo que fue aportado por la vegetación de eucalipto para cada profundidad en rodales de *Eucalyptus grandis* de 9 años de edad en un Acrisol de la Unidad Tacuarembó, para diferentes densidades de plantación.

Densidad de plantación	Profundidad cm	% de C proveniente del Eucalyptus
816	0 - 5	23.7
	5 - 10	4.5
	10 - 15	7.2
	15 - 20	7.0
	20 - 30	8.4
1111	0 - 5	15.6
	5 - 10	6.6
	10 - 15	5.1
	15 - 20	4.1
	20 - 30	8.0
2066	0 - 5	21.2
	5 - 10	6.5
	10 - 15	4.4
	15 - 20	4.1
	20 - 30	10.5

### Conclusiones

En plantaciones de eucalipto de edades avanzadas (mayores a los 15 años) fueron observadas tendencias hacia mayores contenidos de COS en el primer estrato de muestreo (0 a 5 cm), producto del aporte de materiales orgánicos de descomposición del mantillo. Similar comportamiento fue observado en plantaciones de menor edad.

En las situaciones bajo estudio, la nueva vegetación de eucalipto llegaría a compensar las pérdidas operadas en el COS de la vegetación de origen del sitio (campo natural).

### Formación de recursos humanos

En el marco de este objetivo han realizado su tesis de grado las Ing. Agr. Ana Inés Aguerre y Luciana Demarco. Actualmente está culminando su tesis de grado en el tema Fabián Del Giorgio.