

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**COMPARACIÓN DE MODELOS DE ANÁLISIS ESPACIAL PARA
MEJORAR EL MANEJO SITIO ESPECÍFICO DE PLANTACIONES DE
EUCALIPTUS**

por

Pablo Martín GONZALEZ BARRIOS

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

Montevideo
URUGUAY
Setiembre 2014

Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing.Agr. (Dra) Mónica Cadenazzi, el Ing. Agr. (PhD) José Terra, la Ing. Agr. (PhD) Mónica Balzarini y el Ing. Agr. (MSc) Jorge Hernández, el día 18 de Setiembre de 2014. Autor: Ing. Agr. Pablo González Barrios. Directora: Ing. Agr. (PhD) Lucía Gutiérrez, Co-director: Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en general a mi familia, amigos y compañeros de trabajo que han sido el pilar fundamental en esta etapa de mi vida.

En particular, dedicar este trabajo a María Noel por ser la persona que aguanta mis locuras, mis viajes, mi cabeza y por ser mi compañera de ruta en todo este tiempo.

A mis viejos, que sin lugar a dudas son los grandes responsables de sentirme una persona libre y comprometida con ayudar siempre al que necesite una mano. A mi padre agradecerle por haberme enseñado a ser honesto y responsable, y a mi madre por transmitirme siempre la positividad y la alegría, que tan útiles me han sido. A Marcela, por ser un ejemplo de cómo salir adelante y un sostén familiar.

A Lucía, la gran responsable de que hoy encuentre en la docencia y en la investigación mi lugar, agradecerle por siempre darme para adelante.

A Mario, por confiar en mí y a Analía, Leticia, Natalia, Luis, Marcela y Nicolás que me dieron tremenda ayuda con el trabajo de campo.

A la barra del DBEC, que se han convertido en una familia más en mi vida y de la cual me siento muy orgulloso de ser parte.

Eternamente agradecido a la Facultad de Agronomía por dejarme ser parte de ella desde el 2004 y a todos los que integran esta casa.

En fin, agradecer a todos los que de alguna manera me han ayudado o han compartido esta linda etapa de mi vida y de mi formación.

TABLA DE CONTENIDO

Página

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. <u>Hipótesis general</u>	2
1.1.2. <u>Objetivo general</u>	3
1.1.3. <u>Hipótesis específicas</u>.....	3
1.1.4. <u>Objetivos específicos</u>.....	3
2. <u>EVALUATION OF DIFFERENT TILLAGE INTENSITIES ON EUCALYPTUS GRANDIS ON A TYPIC HAPLUDULT OF URUGUAY</u>	6
2.1. ABSTRACT.....	6
2.2. INTRODUCTION.....	7
2.3. MATERIALS AND METHODS.....	7
2.4. RESULTS AND DISCUSSION.....	9
2.5. CONCLUSIONS.....	12
2.6. REFERENCES.....	13
3. <u>MODELACIÓN ESPACIO TEMPORAL EN EXPERIMENTOS DE EVALUACIÓN DE INTENSIDAD DE LABOREO EN PLANTACIONES DE EUCALYPTUS</u>.....	14
3.1. RESUMEN.....	14
3.2. SUMMARY.....	15
3.3. INTRODUCCIÓN.....	16
3.4. MATERIALS AND METHODS.....	20
3.4.1. <u>Sitio y diseño experimental</u>.....	20
3.4.2. <u>Análisis estadístico</u>.....	21

3.4.2.1. Análisis espacio-temporal.....	21
3.4.2.2. Sin ajuste espacial.....	21
3.4.2.3. Con ajuste espacial.....	22
3.4.2.4. Mortalidad y competencia entre árboles.....	23
3.5. RESULTADOS.....	25
<u>3.5.1. Comparación de modelos.....</u>	25
<u>3.5.2. Mortalidad y competencia entre árboles.....</u>	28
3.6. DISCUSIÓN.....	31
3.6.1. <u>Correlaciones temporales y espaciales.....</u>	31
3.6.2. <u>Efectos del laboreo sobre crecimiento inicial.....</u>	32
3.6.3. <u>Efecto de laboreos sobre mortalidad de árboles.....</u>	33
3.6.4. <u>Competencia entre árboles.....</u>	34
3.7. CONCLUSIONES.....	35
3.8. BIBLIOGRAFÍA.....	36
4. <u>EFFECTS OF DIFFERENT TILLAGE INTENSITIES ON SPATIAL SOIL VARIABILITY AND SITE-SPECIFIC MANAGEMENT IN EARLY GROWTH OF EUCALYPTUS.....</u>	43
4.1. ABSTRACT.....	43
4.2. INTRODUCTION.....	44
4.3. MATERIALS AND METHODS.....	46
<u>4.3.1. Site description and experimental design.....</u>	46
<u>4.3.2. Soil and plant evaluation.....</u>	47
<u>4.3.3. Statistical Analysis.....</u>	48
4.3.3.1. Summary descriptive analysis of soil properties.....	48
4.3.3.2. Geostatistic analysis.....	48
4.3.3.3. Management zones and site-specific management.....	49
4.4. RESULTS.....	50
<u>4.4.1. Soil characterization.....</u>	50
<u>4.4.2. Geostatistics analysis.....</u>	51
<u>4.4.3. Spatial modeling of soil properties as covariates.....</u>	55
<u>4.4.4. Management zones and site-specific tillage.....</u>	58

4.4.4.1. Managment zone characterization.....	58
4.5. DISCUSSION.....	60
4.6. CONCLUSIONS.....	62
4.7. REFERENCES.....	63
5. <u>DISCUSIÓN</u>	70
5.1. VARIABILIDAD TEMPORAL EN MODELOS DE CRECIMIENTOFORESTAL.....	70
5.2. VARIABILIDAD ESPACIAL Y ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE MANEJO SITIO ESPECÍFICO.....	71
5.3. EFECTO DE INTENSIDAD DE LABOREO SOBRE MORTALIDAD Y COMPETENCIA DE ÁRBOLES.....	73
5.4. EFECTO DE LA INTENSIDAD DE LABOREO SOBRE VARIABLES DE CRECIMIENTO.....	75
6. <u>CONCLUSIONES</u>	78
7. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	79

RESUMEN

El área destinada a la forestación en Uruguay ha tenido un fuerte incremento en los últimos 20 años impulsando el avance de las plantaciones sobre nuevas áreas, que a su vez presentan gran variabilidad edáfica. La preparación del sitio mediante el uso de laboreos resulta de gran importancia en términos productivos. Sin embargo, la fuerte variabilidad de suelos muchas veces no permite distinguir los efectos de laboreos superiores en experimentos. Actualmente, no resulta claro cuál es la mejor estrategia para evaluar este tipo de experimentos y delimitar zonas de manejo. El objetivo de este trabajo fue comparar diferentes modelos de análisis espaciales y temporales para mejorar las comparaciones de laboreos en experimentos forestales parcelarios. Se evaluaron experimentos en crecimiento inicial y a cosecha de Eucaliptus, sobre suelos de alta variabilidad, comparando diferentes intensidades de laboreo: plantación al pozo, excéntrica y subsolador. El seguimiento individual de árboles y el uso de medidas repetidas en el tiempo con estructuras de varianzas heterogéneas como la antedependiente (ANTE1) permitió obtener los mejores ajustes. La variabilidad espacial de suelos caracterizada mediante la electroconductividad permitió delimitar zonas de manejo, siendo también eficiente el uso de herramientas geoestadísticas multivariadas en el estudio de la variabilidad conjunta de las propiedades más relevantes del suelo. Buenas condiciones para el desarrollo radicular de los árboles no requieren de laboreos intensivos como el subsolado, sin embargo bajo condiciones limitantes y de alta pedregosidad, laboreos menos intensivos como excéntrica son tan buenos como el subsolado. Por otro lado, la inclusión de patrones de competencia dentro de la parcela como covariable en los modelos mejora la eficiencia de comparación de tratamientos. La caracterización previa del área destinada a la plantación y el seguimiento individual de árboles en condiciones experimentales permite determinar manejos específicos. Esto permite hacer un uso racional de los recursos, disminuir costos operativos y reducir el riesgo de erosión generado por el uso de prácticas intensivas donde no son necesarias.

Palabras clave: Laboreos, Eucalyptus, variabilidad espacial, manejo sitio-específico.

COMPARISON OF SPATIAL ANALYSIS MODELS FOR IMPROVING THE SITE SPECIFIC MANAGEMENT IN EUCALYPTUS PLANTATIONS

SUMMARY

In the last 20 years the afforestation area in Uruguay increased significantly, occupying new areas that have strong soil variability. Site preparation through different tillage techniques are very important in terms of wood production. However, the high soil variability does not allow to estimate efficiently the tillage effects in field experimentation. Currently, it is unclear which is the best strategy for evaluating tillage forestry experiments and delineate management zones. The aim of this study was to compare different spatial or temporal models to improve the comparisons of tillage effects in forestry trials. Field experiments at initial growth and harvest time of Eucalyptus, on soils with high variability were evaluated to compare the effect of different tillage intensities on wood production: pit planting, disc-harrowing and subsoiler. Individual tree measurements through time and the use of repeated measures analysis using a heterogeneous variance correlation structures as the antedependence (ANTE1) had the best results. The soil spatial variability was characterized using electroconductivity values and allowed to define specific management zones. The use of multivariate geostatistical tools was also positively evaluated to describe the joint variability of the main soil properties. Under appropriate soil conditions for root development, intensive tillage as the subsoiler was not required. However, in the case of soils with poor conditions as high stoniness, less intensive tillage as disc-harrowing was as good as subsoiler. Furthermore, the inclusion of competition patterns within the plot as a covariate in the models, improves the efficiency of treatment effect comparison. The previous characterization of the planting area and the follow up of individual trees under experimental conditions allow us to determine specific site managements. This allows a rational use of resources, reducing operating costs and the erosion risk generated by unnecessary intensive tillage techniques.

Keywords: Tillage, Eucalyptus, spatial variability, site-specific management.

1. INTRODUCCIÓN

El área destinada a la forestación a nivel nacional ha tenido un importante incremento en los últimos 20 años, pasando de ser 6575 ha a 950682 ha en 2007 (MGAP, 2011). Este fuerte desarrollo del sector ha llevado a la utilización de suelos de aptitud forestal en todo el territorio nacional que presentan como característica general una gran variabilidad entre tipos de suelos dependiendo de la zona (Durán et al., 2005; Califra et al., 2007). Los turnos de forestación habituales se ubican entre 15 y 25 años, lo que estaría llevando a que en poco tiempo comience el proceso de cosecha de una gran superficie, llevando a un fuerte impulso en la replantación de dichas áreas. Los ensayos de evaluación forestal tienen como principal característica tamaños de parcela grande, lo que hace que muchas veces se obtengan estimaciones pobres de efectos de tratamientos, debido a que existe una fuerte variabilidad en tipo de suelo y relieve dentro de la parcela (Dutkowski et al., 2002). Esto muchas veces no es contemplado por parte de los investigadores en los experimentos y en consecuencia el manejo comercial es general, teniendo como principal problema la adopción de medidas de laboreo generales para grandes extensiones, afectando áreas que deberían recibir laboreos mínimos previos a la plantación.

Desde el punto de vista de la experimentación agrícola ha sido de interés de los investigadores controlar la variación local existente (Fisher, 1935), asumiendo independencia entre unidades experimentales. Si bien la utilización de bloques permitió grandes avances en ese sentido, existen situaciones en las cuales existe gran heterogeneidad que no puede ser controlada y es por esto que surgieron diseños tales como bloques incompletos (Yates, 1939), látices (Cochran y Cox, 1957), hilera-columna con repeticiones contiguas (Williams y John, 1989) y otros, que mejoraron la eficiencia en comparación a modelos de análisis provenientes de diseños en bloques completos al azar (Patterson y Hunter, 1983; Yau, 1997). El uso de herramientas de forestación de precisión permite mejorar las estimaciones de diferencias entre tratamientos mediante la utilización de tecnologías de información electrónica para modificar el uso del suelo dependiendo de las condiciones locales

que cambian tanto espacial como temporalmente (van Schilfgaarde, 1999). Se conoce que a escala de predio la variabilidad espacial afecta el rendimiento de cultivos como: maíz (Jaynes y Colvin, 1997), soja (Jaynes y Colvin, 1997; Eghball y Varvel, 1997; Kravchenko y Bullock, 2002) y trigo (Miller et al., 1988; Mulla et al., 1990). Estas evaluaciones se basan en estimaciones generales con el objetivo de identificar sitios con diferentes respuestas, pero no han sido incorporados a los análisis de ensayos parcelarios. La medición de conductividad eléctrica a nivel de suelo es una de las medidas más confiables y frecuentemente utilizadas para la caracterización de la variabilidad de suelos (Rhoades et al., 1999; Corwin y Lesch, 2003). Para integrar la información proveniente del suelo de electroconductividad con la respuesta en crecimiento, este trabajo buscará generar mapas de conductividad, características físicas del suelo y crecimiento de árboles de manera de captar la variabilidad existente y generar alternativas de manejo sitio específicas. El proceso actual de plantación de montes bajo condiciones de una gran variabilidad edáfica, hacen necesario el avance de la investigación en el desarrollo de nuevas tecnologías en el uso y manejo de los suelos que permitan llevar adelante un manejo específico del sitio a plantar con el objetivo de mejorar los niveles de producción, racionalizar el uso de laboreos, disminuir el impacto sobre los recursos naturales.

1.1. OBJETIVOS

Las hipótesis de trabajo planteadas para la realización de este trabajo se presentan a continuación, indicando los objetivos planteados en cada una de ellas:

1.1.1. Hipótesis general

Existen herramientas de análisis modernas que permiten hacer mejores estimaciones de efectos de tratamientos en experimentos de evaluación de laboreos forestales en plantaciones de Eucaliptus bajo condiciones de gran variabilidad espacial intraparcelar.

1.1.2. Objetivo general

Evaluar diferentes metodologías de análisis de datos provenientes de experimentos de laboreos forestales con medidas repetidas en el tiempo y gran variabilidad de suelos.

1.1.3. Hipótesis específicas

- a) La utilización de modelos que contemplen las correlaciones de los datos de árboles individuales a través del tiempo permite mejorar la precisión de los experimentos.
- b) Existe una estructura de correlación entre árboles que determina que exista un modelo óptimo para modelar el crecimiento de los árboles tomando en cuenta las medidas repetidas en el tiempo.
- c) La variabilidad espacial de los suelos, puede ser explicada y contemplada en los modelos de crecimiento de árboles a través del uso de herramientas geoestadísticas, facilitando la adopción de medidas de manejo sitio específico.
- d) La intensidad de laboreo en la preparación del sitio forestal afecta la supervivencia de plantas y modifica los patrones de competencia dentro de la parcela.

1.1.4. Objetivos específicos

Los objetivos específicos planteados en función de las hipótesis son:

- a) Comparar modelos clásicos de análisis de datos con modelos que incorporan medidas repetidas en términos de mejora en la eficiencia de estimación de medias de tratamientos y sus comparaciones.

- b) Determinar aquella matriz de varianzas y covarianzas entre medidas de crecimiento de árboles que es óptima para obtener el mejor ajuste del modelo.
- c) Introducir y comparar herramientas de análisis geoestadístico que permitan mejorar las prácticas de uso y manejo de suelos vinculando la variabilidad espacial existente dentro de la parcela.
- d) Estimar el efecto del tipo de laboreo sobre la mortalidad de plantas en las etapas productivas iniciales y evaluar alternativas que permitan determinar si los patrones de distribución de árboles y la competencia entre los mismos dentro de la parcela afectan variables de crecimiento y de producción de madera.

Para ayudar a comprender cuál es la alternativa de análisis más eficiente en experimentos de laboreo sobre plantaciones de eucaliptus, se compararon diferentes estrategias de análisis para experimentos forestales parcelarios con medidas repetidas en el tiempo y se evaluaron diferentes alternativas de análisis que incorporen información de variabilidad espacial, favoreciendo la implementación de medidas de manejo sitio específico. Para ello, el trabajo final de tesis se ha dividido en seis capítulos, los cuales corresponden a una introducción general (Cap.1), tres artículos científicos a publicar en revistas arbitradas (Cap. 2 a 4), discusión general (Cap. 5) y conclusiones (Cap. 6). El primero de los artículos (Cap. 2) se enfocó en la evaluación de diferentes intensidades de laboreos en un experimento de 10 años de duración. En este trabajo se evaluaron medidas repetidas en el tiempo sobre variables de crecimiento de los árboles hasta tiempo de cosecha. En este capítulo se abordaron problemas asociados a los puntos a y b de las hipótesis específicas de la tesis, haciéndose énfasis en la determinación de la mejor alternativa para modelar datos correlacionados en el tiempo en ensayos de larga duración. Este trabajo fue presentado en la XIX Conferencia de la ISTRO (International Soil Tillage Research Organization), realizada en Montevideo en Setiembre de 2012 y publicado en la revista *Agrociencia Uruguay* (González et al., 2012, <http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/article/view/704>). El

capítulo 3 de la tesis se corresponde con el segundo artículo y está previsto sea enviado también a la revista Agrociencia Uruguay. Este trabajo aborda todos los objetivos específicos de la tesis, pero fundamentalmente procuró evaluar la incorporación de correlaciones temporales y espaciales de los datos, así como el efecto de la competencia de árboles sobre el crecimiento inicial de Eucalyptus. El mismo utiliza información proveniente de un experimento instalado en 2011 en la localidad de Mellizos (Rio Negro), sobre dos condiciones contrastantes desde el punto de vista de las condiciones edáficas y con seis momentos de evaluación a lo largo de un periodo de 30 meses post-plantación. El último de los trabajos (Cap. 4), también utilizó información del experimento de Mellizos y evaluó la utilización de diferentes herramientas geoestadísticas y métodos de zonificación que utilizaron información relevada tanto en árboles como a nivel de suelo con el objetivo de mejorar la eficiencia de estimación de medias de tratamiento y en la selección de los mejores laboreos dependiendo de la zona. Este capítulo de la tesis se enfocó principalmente en el objetivo específico (c). Este trabajo se planifica enviarlo a la revista Forest Ecology and Management (<http://www.journals.elsevier.com/forest-ecology-and-management/>), la cuál es referente en esta temática.

2. EVALUATION OF DIFFERENT TILLAGE INTENSITIES ON EUCALYPTUS GRANDIS ON A TYPIC HAPLUDULT OF URUGUAY

González, P.; Pérez Bidegain, M.; Gutiérrez, L, Martinez, L; García Préchac, F.

Trabajo publicado en la revista Agrocienza Uruguay
(<http://www.fagro.edu.uy/~agrocienza/index.php/directorio/article/view/704>).

2.1. ABSTRACT

Planting and harvesting time are the most critical moments in terms of soil erosion risk in commercial forest plantations. Soil tillage systems that reduce soil removal while maintaining wood productivity are necessary. The objective of this research was to evaluate the effect of different site preparation methods on *Eucalyptus grandis* wood productivity 10 years after plantation. The experimental site was located on a Typic Hapludult in the department of Rivera, Uruguay. A randomized complete block design with three replicates was established. Treatments included: furrower on the plantation row, and mechanical weed control (disk-harrow) in the inter-row area (T1); idem to T1 but substituting inter-row mechanical control by herbicide control (glyphosate) (T2); pit-planting (T3); disc harrowing on the plantation row and inter-row weed control idem to T1 (T4); and T5 idem to T4 but herbicide control in the inter-row area. Tree height (Ht) and diameter breast height (DBH) was measured 5 times after thinning in the experimental period (21, 38, 58, 98 and 120 months after plantation) and DBH and wood production(WP) data were analyzed with repeated measures in time, where the subject was the plot and the autocorrelation structure selected was antedependence (ANTE(1)). Significant differences in DBH were not founded between treatments any time. However, WP was higher on T1 than T2, T3 and T4 measured to 120 months, while T3 had the lowest WP comparing with T1 and T5. The utilization of herbicide control increased DBH in initial stages, while mechanical control in the inter-row area increased WP in harvest time. WP was not affected by row preparation (furrower vs disc harrowing)

at any time, while lower production were obtained with T3 associated to a fewer number of trees after thinning. A reduction on tillage intensity did not produce a reduction on DBH, however WP decreased due to a reduction on tree population at harvest time. The causes of a different plant population dynamics by tillage system after thinning remain unclear.

Key words: Site preparation, Eucalyptus, Repeated measures.

2.2. INTRODUCTION

Planting and harvesting time are the most critical moments in terms of soil erosion risk in commercial forest plantations (1). Long term effect of site preparation tillage system on wood production is scarce in our country (2), and most of the published information is focused on early tree wood production (3). Soil tillage systems that reduce soil removal while maintaining long term wood productivity are necessary. The objective of this research was to evaluate the effect of different site preparation methods on *Eucalyptus grandis* wood productivity 10 years after plantation.

2.3. MATERIALS AND METHODS

The experiment was located in a forest farm in the department of Rivera, north of Uruguay. The soil at the experimental site was a Typic Hapludult, and Table 1 shows some soil physical and chemical properties at the experimental site.

Table 1. Soil physical and chemical properties at the experimental site.

Depth (m)	Ph (H ₂ O)	Ph (KCl)	O.M. (%)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
0-0.30	4.6	3.9	1.37	0.04	0.12	0.84
0.30-0.55	4.4	3.9	1.07	0.08	0.10	0.82
0.55-0.73	4.8	4.0	1.08	0.05	0.15	0.80
0.73 +	4.6	3.8	0.69	0.32	0.12	0.57

A randomized complete block design with three replicates was established, and five tillage treatments were applied.

Treatments were: furrower on the plantation row and mechanical weed control (disk-harrow) in the inter-row area (T1); furrower on the plantation row and herbicide control (glyphosate) in the inter-row area (T2); pit planting and herbicide control in the inter-row area (T3); disc harrowing on the plantation row and herbicide control (glyphosate) in the inter-row area (T4); and disc harrowing on the plantation row and mechanical weed control (disk-harrow) in the inter-row area (T5).

Each experimental unit comprised a rectangular plots of 5 rows with 8 plants each row. In row plant spacing was 2 m and 4 m between rows (1250 plants/ha⁻¹). *Eucalyptus grandis* was planted on September 2001. The experiment was thinned 18 months after plantation but this operation did not generate different numbers of trees among treatments. Height (Ht) and diameter breath height (DBH) of all trees in the experimental plots were measured five times in the experimental period (20, 38, 58, 87 y 120 months after plantation).

The other response variable used was wood production (WP) per plot, calculated from the following equation:

$$WP \text{ (m}^3\text{/ha}^{-1}\text{)} = DBH_{ijk} * H_{jk} * 0.45 * N_{jk} * 31.25$$

Where:

DBH_{ijk} = Diameter Breath Height of the i-th tree in the j-th plot in the k-th time

H_{jk} = Average height in the j-th plot in the k-th time

N_{jk} = Number of trees in the j-th plot in the k-th time

DBH and wood production was analyzed by repeated measures analysis of variance with the MIXED procedure of SAS with the plot as the repeated measurement. The statistical model was:

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

Where Y_{ijk} is the dependent variable (DBH or WP), μ is the overall mean, τ_i the tillage effect ($i=1-5$), β_j the block effect ($j=1-3$), δ_{ij} the whole plot random error, γ_k the measurement time effect ($k=1-5$), $\tau\gamma_{(ik)}$ the interaction tillage-measurement time and ε_{ijk} is the experimental error.

The first-order antedependence covariance structure (ANTE(1)) was used for DBH variable according AIC and BIC criterion, being in this structure type the covariance between two time points a function of the product of variances at both points and the product of the correlations at the distances up to the one chosen. While for wood production, autoregressive heterogeneous covariance structure (ARH(1)) was selected assuming different variances by measurement time.

The treatment means were compared through orthogonal contrasts, analyzing only the first measurement time (after thinning) and the last time (harvest). The four contrasts analyzed were: pit planting vs. any tillage on the plantation row, furrower vs. disc harrowing on the plantation row, herbicide weed control vs. mechanical control in the inter-row area with furrower on the plantation row and herbicide weed control vs. mechanical control in the inter-row area with disc harrowing on the plantation row.

2.4. RESULTS AND DISCUSSION

DBH was not affected by tillage treatments at any time ($P>0.05$), however the adjusted means by measurements times were significantly different due to the time elapsed between measurements (Table 2).

Table 2. Diameter breath height by measurement time on *Eucalyptus grandis*

Treatment	Measurement time (months after plantation)				
	21	38	58	98	120
T1	2.42 ^a	4.18 ^a	18.36 ^a	24.48 ^a	28.28 ^a
T2	2.75 ^a	4.63 ^a	19.36 ^a	24.66 ^a	27.91 ^a
T3	2.67 ^a	4.59 ^a	19.52 ^a	25.06 ^a	28.86 ^a
T4	2.76 ^a	4.52 ^a	18.6 ^a	23.53 ^a	26.14 ^a
T5	2.46 ^a	4.14 ^a	18.21 ^a	25.32 ^a	29.13 ^a
	2.61	4.41	18.81	24.61	28.07

DBH was not affected by tillage treatment (Table 3) on the plantation row area after thinning (21 months after plantation) and at harvest time (120 months after plantation). However, DBH was affected by inter-row tillage, being the herbicide control better than mechanical control after thinning independently of the row tillage used. Possibly differences in DBH between chemical and mechanical controls in inter-row area are associated with the remaining trees in each treatment plot, being higher the competition among trees in plots with mechanical control than with chemical control (Fig. 1). At harvest time (120 months after plantation) differences between treatments were not significant.

Table 3. Contrasts for DBH 21 and 120 months after *Eucalyptus grandis* plantation.

Contrast	Estimate	
	Post-thinning	Harvest
Pit planting(+) vs Tillage (-)	0.067	0.998
Furrower(+) vs Disc harrowing(-)	-0.059	0.923
Herbicide(+) vs Mechanical Control(-) in Disc harrowing	0.300 *	-2.982
Mechanical(+) vs Herbicide Control(-) in furrower	-0.327 *	0.367

*Significant differences ($P \leq 0.05$)

The average number of trees by treatment in the experimental period is presented in figure 1. The number of trees in T1 was significantly higher than treatments T2, T3 and T4. T3 had the lowest number of trees comparing with any tillage treatment due to high tree losses, being the reason of this fact an open question.

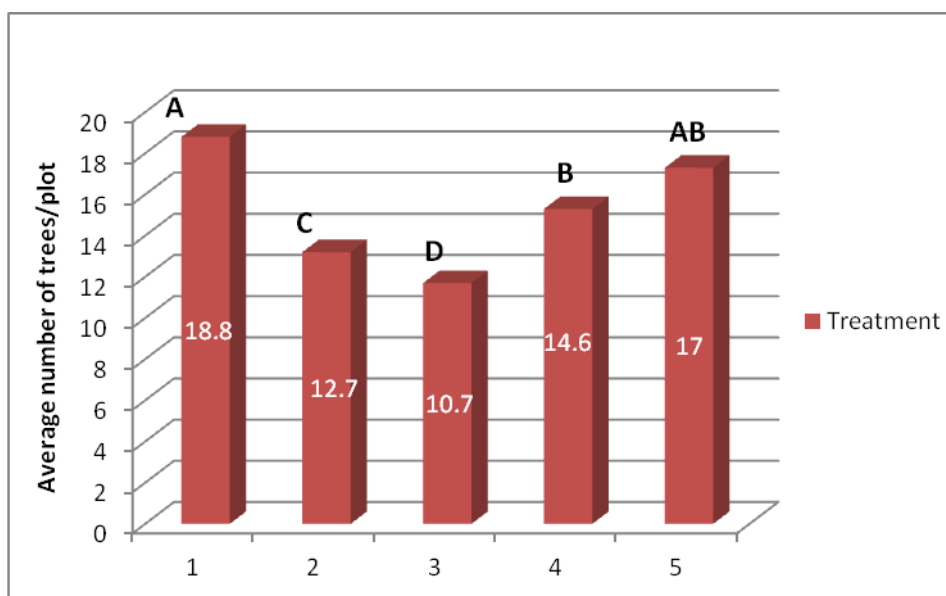


Figure 1. Average number of trees by treatment in the experimental period.

Wood production 21, 38 and 58 months after planting did not reveal any significant differences between treatments (Table 4). However, 98 months after plantation T1, T4 and T5 had higher productions than T2 and T3. In harvest time T1 was significantly higher in wood production comparing with T2, T3 and T4.

Table 4. Wood production by measurement time ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Treatment	Time (months after plantation)				
	21	38	58	98	120
T1	0.94 ^a	5.52 ^a	129.77 ^a	336.48 ^a	583.2 ^a
T2	1.04 ^a	4.53 ^a	92.82 ^a	230.01 ^{bc}	374.08 ^{bc}
T3	0.79 ^a	4.33 ^a	92.77 ^a	218.57 ^c	338.1 ^c
T4	1.12 ^a	6.42 ^a	108.69 ^a	253.12 ^{abc}	391.1 ^{bc}
T5	0.98 ^a	4.09 ^a	103.96 ^a	330.35 ^a	553.49 ^{ab}

Wood production was not different among treatments 21 months after plantation, mainly due to the size of the trees that in initial stages is too small to generate differences in WP (Table 5). However, at harvest time WP in T3 was lower than the mean of the remaining tillage systems, being this explained by the significant lower remaining number of trees that determines directly the levels of production at harvest time.

Neither disc harrowing nor furrower affected WP (Table 5). At harvest time mechanical operation in the inter-row area had higher WP than herbicide control.

Table 5. Contrasts for wood production ($\text{m}^3/\text{ha}^{-1}$) at 21 (post-thinning) and 120 months after plantation (harvest).

Contrast	Estimate	
	Post-thinning	Harvest
Pit planting(+) vs Tillage (-)	-0.227	-137.36 *
Furrower(+) vs Disc harrowing(-)	-0.107	12.67
Herbicide(+) vs Mechanical Control(-) in Disc harrowing	0.142	-162.39 *
Mechanical(+) vs Herbicide Control(-) in furrower	-0.108	209.12 *

*Significant differences ($P \leq 0.05$)

2.5. CONCLUSIONS

Our results indicates that tillage systems did not affected DBH after thinning and at harvest time, however wood production was affected because the number of trees was different among tillage systems. The reason behind a different tree population dynamics among tillage systems remains unclear.

2.6. REFERENCES

Denis Lepiane, V. y Garcia Préchac, F. 1997. Estimación del factor C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la instalación de montes de rendimiento de Eucaliptos. *Agrociencia Uruguay*, 1(1): 30-37.

Resquin, F.; Rachid, C.; Perez Bidegain, M. 2010. Serie Actividades de Difusión Nro 616. Efecto del laboreo y fertilización sobre las propiedades físicas del suelo y la productividad de *E. grandis*. En "Jornada técnica forestal en zona norte". INIA Tacuarembó, pp. 42-55.

Garcia Préchac, F.; Pérez Bidegain, M.; Christie, S. y Santini, P. 2001. Efecto de la Intensidad de Laboreo en el Crecimiento Áereo y Radicular de *Eucalyptus dunnii* y sobre algunas Propiedades Físicas y Químicas del Suelo. *Agrociencia Uruguay*, 5(1): 1-9.

3. MODELACIÓN ESPACIO TEMPORAL EN EXPERIMENTOS DE EVALUACIÓN DE INTENSIDAD DE LABOREO EN PLANTACIONES DE EUCALYPTUS

González Barrios, P.; Pérez Bidegain, M.; Gutiérrez, L.

^a Artículo a ser enviado a la Revista Agrociencia Uruguay

3.1. RESUMEN

El fuerte crecimiento del área forestada en Uruguay y su expansión a zonas de alta variabilidad de suelos pone en cuestionamiento la adopción de manejos uniformes en la preparación del sitio. Los modelos de análisis clásicos no toman en cuenta correlaciones espaciales y temporales entre árboles, llevando en muchos casos a obtener conclusiones erróneas en la estimación de efectos de tratamientos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes intensidades de laboreo sobre crecimiento inicial de Eucaliptus, utilizando modelos que incorporen información de variabilidad temporal y espacial, y patrones de competencia entre árboles. Se realizó un ensayo de laboreos en Mellizos, Rio Negro, Uruguay, bajo dos condiciones contrastantes de suelo, siendo los tratamientos: plantación al pozo (P), excéntrica (E) y subsolador (S). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro y cinco repeticiones y 45 árboles por parcela. Altura y diámetro de planta fueron relevadas en cada planta periódicamente durante los 30 meses iniciales. Los resultados muestran que el seguimiento individual de árboles y el uso de estructuras autoregresivas heterogéneas obtuvieron los mejores ajustes de modelos. El uso de información de variabilidad en los modelos también logró mejorar la eficiencia de estimación de medias. A los 30 meses no se encontraron diferencias significativas entre los laboreos más intensivos (S y E) en crecimiento, lo que sugiere la utilización de excéntrica en la preparación del sitio, a excepción de determinadas condiciones

donde S afecta positivamente las tasas de supervivencia de plantas y volumen de madera producido.

Palabras clave: Laboreos, Eucaliptus, variabilidad espacio-temporal, mortalidad.

3.2. SUMMARY

The strong growth of the area intended to the afforestation in Uruguay and the expansion to areas of high soil variability has questioned the adoption of uniform management in forestry site preparation. The use of classical analysis models that not included spatial and temporal correlations among trees, leads in many cases to obtain erroneous conclusions in estimating treatment effects. The objective of this study was to evaluate the effect of different tillage intensities on early growth of Eucalyptus, using models that incorporate information from temporal and spatial variability and patterns of competition between trees. A field experiment was conducted in Mellizos, Rio Negro (Uruguay), using two contrasting soil conditions. The treatments were: pit planting (P), disk harrowing (D) and subsoiler (S). The experimental design was a randomized complete block design with four and five replications and 45 trees per plot. Plant height and diameter were measured in each plant periodically during the initial 30 months. The results show that follow up individual trees and using covariance autoregressive heterogeneous structures had the best model fits. The use of soil variability information on models also improves the efficiency of estimation of means. At 30 months no significant differences were found between the more intensive tillage (S and D) in growth, suggesting the use of disk harrowing tillage in the forestry site preparation, except for particular conditions where the subsoiler affects positively tree survival levels and wood production.

Keywords: Tillage, Eucalyptus, spatio-temporal variability, mortality.

3.3. INTRODUCCIÓN

La producción de Eucaliptus es actualmente de gran importancia económica dentro del rubro forestal a nivel global, representando la mayor fuente de celulosa que se destina a la industria papelera (Merino et al., 2003). Las principales ventajas de esta especie son los altos rendimientos de madera obtenidos, su fuerte adaptabilidad a diferentes sitios y la gran diversificación de productos finales que brinda (Verhagen et al., 1995). La creciente demanda por este tipo de productos ha generado una fuerte expansión en las áreas destinadas a la forestación en varias regiones del mundo, representando un cambio radical en los sistemas de producción y la planificación del uso del suelo (Kröger, 2012). Esta expansión del área forestada se ubicó principalmente sobre suelos marginales o de baja productividad, los cuales en muchos casos presentan una fuerte variabilidad. Estas condiciones generan desafíos a nivel de investigación y producción al momento de desarrollar metodologías y/o tecnologías de preparación de sitio, ya que la utilización de un manejo homogéneo es una práctica poco sostenible en términos de riesgo de erosión y uso eficiente de los recursos. Actualmente es escasa la información existente a nivel local respecto al impacto que tienen las principales técnicas de preparación de sitio a través del laboreo de suelo sobre el crecimiento de plantas y producción de madera. Es por esto que la generación de nuevas herramientas para evaluar la eficiencia de diferentes técnicas de preparación de sitio forestal adquiere una importante relevancia en el actual contexto productivo.

Uno de los objetivos principales de las prácticas de laboreo en sitios forestales es reducir la densidad del suelo a través del movimiento del mismo, ya que disminuyen la resistencia a la penetración de raíces, aumentan la retención de agua y afectan positivamente procesos químicos y biológicos (Worrell y Hampson, 1997; Horn et al., 1995). En particular, el subsolado ha mostrado reducciones en la densidad aparente y aumento de la porosidad de horizontes profundos, promoviendo el desarrollo de sistemas radiculares más profundos y uniformes, los cuales reducen la posibilidad de sufrir estrés hídrico por parte de las plantas en periodos largos de

sequía (Morris y Lowery, 1988; Wheeler et al., 2002). Esto ha llevado a que en los últimos años laboreos profundos hayan sido más exitosos en los esquemas de plantación forestales, con costos elevados en comparación a prácticas de mínimo laboreo (Gonçalves et al., 2002). Si bien muchos trabajos se han enfocado en estudiar el efecto de la intensidad de laboreo sobre el control de malezas y el aumento de la penetración de raíces (McLaughlin et al., 2000; Wetzel y Burgess, 2001; Burrows et al., 2003), existen pocos antecedentes que evalúen el impacto de diferentes prácticas de preparación de sitio forestal sobre variables de crecimiento y producción de madera (Querejeta et al., 2001; Martins y Pinto, 2004). En particular, las evaluaciones e información acerca del efecto de diferentes tipos de laboreos sobre plantaciones de Eucaliptus son escasas, debido a que las plantaciones de esta especie no son habituales y han sido reportadas en pocos países (Donoso et al., 1999). El interés por disminuir el impacto ambiental de las prácticas de preparación de sitio a través del riesgo de erosión del suelo y reducir costos de plantación, han llevado en los últimos años a la necesidad de evaluar prácticas de laboreos de menor intensidad (Gonçalves et al., 2002), así como la evaluación del crecimiento de árboles y su producción de madera.

Históricamente, los modelos forestales para la evaluación de crecimiento individual y producción de madera se han basado en predicciones determinísticas (Fox et al., 2001). Esto ha llevado a que componentes estocásticos en modelos de crecimiento que asumen variabilidad en las predicciones de medias no hayan sido abordados en profundidad (Gregorie et al., 1995). Sin embargo, en los últimos años, la utilización de modelos mixtos que utilizan componentes estocásticos en su estructura, han sido útiles en la incorporación de información de variabilidad temporal y espacial (Burkhart y Gregoire, 1994). En ensayos de evaluación forestal, el hecho de que sean generalmente permanentes y de larga duración, llevan a tener una mayor probabilidad de generar correlaciones espaciales entre árboles. En particular, los experimentos de laboreos forestales, debido a la gran dimensión de las parcelas utilizadas, puede llevar en muchos casos a la presencia de variabilidad intraparcularia, generando dependencia espacial en los modelos de predicción de

crecimiento (Fox et al., 2007). Esta dependencia espacial entre residuales, limita en muchas situaciones la utilización de modelos clásicos de análisis que asumen independencia entre observaciones (Haining, 1990; Cressie, 1991). La variabilidad espacial de suelos es ampliamente reconocida por la literatura, sin embargo suele ser uno de los factores que más afecta los resultados en experimentos de campo (López y Arrué, 1995). En particular, en experimentos de agricultura y suelos se utilizan en muchos casos parcelas de gran tamaño o con un elevado número de tratamientos, llevando a obtener bloques de grandes dimensiones y raramente homogéneos (Zas, 2006). En estas situaciones, la heterogeneidad de suelos lleva a que diseños como el de bloques completos al azar tengan una baja eficiencia para detectar diferencias entre tratamientos (Mulla, 1993; Brownie et al., 1993). Los modelos utilizados para evaluar crecimiento de árboles, utilizan a los mismos como unidades experimentales independientes (Fox et al., 2001). Sin embargo, la determinación de crecimiento individual de árboles es un proceso complejo y afectado principalmente por la competencia de vecinos cercanos y la microvariabilidad espacial (Matern, 1960). Por otro lado, la evaluación de crecimiento en experimentos forestales requiere mediciones repetidas en el tiempo, pudiendo el efecto de cada árbol acarrear correlaciones temporales. En la actualidad no es claro, cual debería de ser la estrategia óptima para modelar datos provenientes de ensayos de laboreos parcelarios, por lo que resulta necesario un mayor entendimiento del problema y sus respectivos análisis para obtener una mejor estimación de efectos de tratamiento.

Por otro lado, una de las principales limitantes en la producción de madera, está dada por el número de árboles que permanecen durante el turno de plantación y el efecto que genera la competencia entre árboles vecinos sobre las variables de crecimiento. En particular, la distribución espacial de árboles afecta directamente el tamaño del árbol, la forma, la tasa de crecimiento y la mortalidad (Miller y Weiner, 1989; Kenkel et al. 1989; Weiner, 1990; Newton y Jolliffe, 1998; Dovciak et al., 2001). Es por esto que la utilización de atributos de crecimiento (i.e. altura de árbol), competencia (i.e. número o tamaño de vecinos más cercanos) y ubicación de todos los árboles (i.e. coordenadas) adquiere gran importancia al momento de evaluar la

heterogeneidad espacial dentro de experimentos forestales (Liu y Ashton, 1999; Lee y Wong, 2001; Shi et al., 2006). Esta competencia generada entre árboles vecinos, en muchas situaciones determina la correlación entre los mismos (Magnussen, 1994). En experimentos de evaluaciones forestales genéticas, se ha comprobado que la competencia entre vecinos puede confundir covarianzas ambientales con genéticas, llevando a obtener estimaciones sesgadas de los parámetros de interés, lo cual reduce significativamente la precisión de la evaluación (Loo-Dinkins, 1992). Sin embargo, existen pocos antecedentes que evalúen en experimentos parcelarios forestales de evaluación de laboreos el efecto que tienen los diferentes tratamientos sobre parámetros de mortalidad de árboles, resultando poco claro cuál debería ser la mejor alternativa de análisis para incorporar información de patrones de variabilidad dentro de los modelos de análisis. Es por esto que se espera que teniendo en cuenta las correlaciones espaciales y temporales, así como el seguimiento individual de cada árbol durante el periodo experimental, se obtengan modelos más eficientes al momento de determinar las mejores prácticas de laboreo.

Para abordar esta problemática se llevó adelante un experimento de evaluación de laboreos sobre dos condiciones contrastantes de suelo, registrando crecimiento y presencia de plantas periódicamente durante los 30 meses iniciales del ensayo. Los objetivos de este trabajo fueron: (i) evaluar herramientas de análisis que incorporen información espacial y/o temporal para el análisis, (ii) analizar el efecto del tipo de laboreo sobre la mortalidad inicial y el efecto de la competencia entre árboles sobre la producción de madera, y (iii) proponer una metodología de análisis que permita obtener mejores estimación de los efectos de tratamientos de laboreos en ensayos forestales parcelarios.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Sitio y diseño experimental

El experimento fue establecido en la localidad de Mellizos, Departamento de Rio Negro, Uruguay ($32^{\circ}37'49''\text{S}$; $57^{\circ}10'07''\text{W}$). Las condiciones climáticas de la zona se asocian a regiones templadas con cuatro estaciones bien definidas en términos de temperaturas y un régimen de precipitaciones relativamente homogéneo en su distribución a lo largo del año. El promedio anual de temperatura es de $17,9^{\circ}\text{C}$, la temperatura mínima promedio anual $12,2^{\circ}$, la temperatura máxima promedio anual $23,8^{\circ}\text{C}$, las precipitaciones anuales promedio se ubican en los 1200 mm y una humedad relativa promedio anual del 73%. El experimento fue realizado en dos sitios contrastantes en sus condiciones edáficas pero muy próximos geográficamente (Figura 1). El ensayo S_1 se encuentra ubicado sobre una zona con suelos dominantes se corresponde con un litosol, mientras que en S_2 el tipo de suelo dominante es un Brunosol subéutrico. En ambos ensayos se utilizaron plantas del clon X2334 de *Eucalyptus grandis*. Los ensayos fueron instalados en simultáneo en el mes de Abril de 2011, realizándose un manejo idéntico en ambas condiciones de plantación.

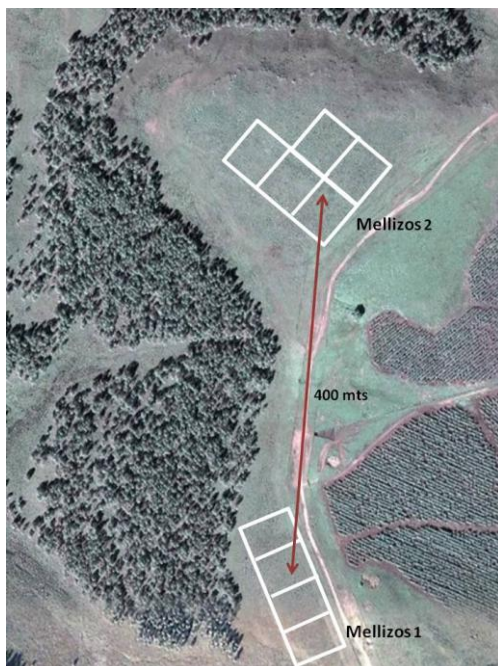


Figura 1. Sitio experimental, Mellizos 1 (S_1) y Mellizos (S_2).

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres tratamientos representativos de diferentes intensidades de laboreo en la fila de plantación. En S_1 se utilizaron cuatro bloques mientras que en S_2 fueron cinco bloques. Los tratamientos fueron diferentes intensidades de laboreo: plantación al pozo (P), laboreo en la fila con excéntrica (E), laboreo en la fila con subsolador (S). Las parcelas fueron conformadas por tres filas de plantación con un número de plantas por fila que osciló entre 12 y 15 plantas. El esquema de plantación utilizado tuvo una densidad de 1150 plantas por hectárea, estando las filas separadas en 3,5 metros y las plantas en 2,5 metros. Se registró durante el periodo experimental altura y diámetro en cada planta a los 7, 12, 16, 20, 25, 30 meses desde plantación.

3.4.2. Análisis estadístico

3.4.2.1. Análisis espacio-temporal

Para evaluar la eficiencia de diferentes alternativas de análisis se utilizó una estructura jerárquica de comparación de modelos que se presenta a continuación.

3.4.2.2. Sin ajuste espacial

Primero se modeló el efecto de los tratamientos de laboreo en el tiempo con el siguiente modelo:

$$[1] \quad Y_{ijk} = \mu + T_i + B_j + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

donde Y_{ijk} es la altura de planta o volumen de madera promedio de la parcela, en el i -ésimo laboreo, en el j -ésimo bloque y en la k -ésima fecha, μ es la media poblacional, T_i es el efecto del i -ésimo laboreo, B_j es el efecto del j -ésimo bloque, F_k es el efecto de la k -ésima fecha, TF_{ik} es la interacción laboreo y fecha, ε_{ijk} es el error experimental asociado al i -ésimo tratamiento, el j -ésimo bloque y la k -ésima fecha y son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas $\sim N(0, \sigma^2_{\text{error}})$.

Luego se utilizó el siguiente modelo de medidas repetidas en el tiempo contemplando las correlaciones temporales de las unidades experimentales:

$$[2] \quad Y_{ijk.} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

donde δ_{ij} es el error experimental asociado a la parcela mayor, $\delta_{ij} \sim N(0, \sigma_M^2)$.

A su vez se utilizó un modelo que contempló las correlaciones temporales por árbol:

$$[3] \quad Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)}$$

donde $\omega_{l(ijk)}$ es el error de submuestreo asociado al i -ésimo tratamiento, el j -ésimo bloque, la k -ésima fecha y el l -ésimo árbol y son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas $\sim N(0, \Sigma)$.

El modelo 3 fue evaluado modelando la matriz Σ a través de las siguientes estructuras: simetría compuesta (CS), autorregresiva (AR1), autorregresivo con heterogeneidad de varianzas (ARH), simetría compuesta con heterogeneidad de varianzas (CHS) y autodependiente (ANTE1).

3.4.2.3. Con ajuste espacial

Con el objetivo de determinar la mejora en el ajuste de modelos de estimación de medias de tratamientos y la eficiencia de la utilización de bloques en este tipo de experimento, se compararon modelos que utilizaron información proveniente del diseño experimental (modelo 4) y modelos que no contemplaron el efecto del bloque (modelo 5).

$$[4] \quad Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)}^*$$

$$[5] \quad Y_{ijkl} = \mu + T_i + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)}^*$$

Los modelos 4 y 5 son similares al modelo 3, teniendo $\omega_{l(ijk)}^* \sim N(0, \Sigma^*)$, con la diferencia de que Σ^* modeló la correlación espacial utilizaron regresiones ponderadas geográficamente (GWR), ajustando los semivariogramas empíricos a través de funciones exponenciales (exp), gaussianos (gau) y power (pwr).

Todos los modelos fueron ajustados para las variables altura de planta y producción de madera en ambos ensayos y la selección del mejor modelo fue a través del criterio de AIC.

3.4.2.4. Mortalidad y competencia entre árboles

Para determinar los niveles de supervivencia de árboles durante el periodo experimental se calcularon para cada parcela, fecha y ensayo, la proporción de árboles que permanecían en la parcela en comparación al número de árboles al momento de la instalación del ensayo. Se ajustaron las medias de supervivencia por tratamiento y fecha según el siguiente modelo:

$$[6] \quad Y_{ijk} = \mu + T_i + B_j + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

donde Y_{ijk} es la proporción de árboles vivos en el i -ésimo laboreo, en el j -ésimo bloque y en la k -ésima fecha, μ es la media general, T_i es el efecto del i -ésimo laboreo, B_j es el efecto del j -ésimo bloque, F_k es el efecto de la k -ésima fecha, TF_{ik} es la interacción laboreo y fecha, ε_{ijk} es el error experimental asociado al i -ésimo laboreo, el j -ésimo bloque y la k -ésima fecha y son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas $\sim N(0, \sigma_{\text{error}}^2)$.

Para evaluar el efecto de los diferentes tipos de laboreo sobre el número de plantas establecidas en las etapas iniciales y analizar el efecto de la competencia de árboles

sobre la eficiencia de estimación de medias de tratamiento se construyeron dos variables auxiliares para determinar el número de vecinos más cercanos a cada árbol (N_4 = cruz y N_8 = estrella) de la siguiente forma:

N_4		N_8			
	x		x	x	x
x	A	x	x	A	x
	x		x	x	x

donde A es el árbol de interés y “x” simbolizan los vecinos más cercanos que fueron tenidos en cuenta para construir la covariable.

Ambas variables fueron utilizadas como covariables para comparar la incorporación de las mismas con respecto al modelo clásico de análisis (modelo 3), que no utiliza información de los vecinos. Los modelos utilizados por lo tanto fueron:

$$[7] \quad Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)} + \alpha X_{ijkl} + \alpha_i X_{ijkl}$$

donde α es el coeficiente de regresión asociado a la covariable de interés (i.e. número de árboles vecinos en cruz o estrella), α_i es el coeficiente de regresión para el i-ésimo laboreo, X_{ijkl} es el valor calculado para la covariable de interés (número de árboles vecinos más cercanos).

Todos los modelos fueron estimados por máxima verosimilitud y la selección del mejor modelo se basó en el criterio de AIC y en la disminución del desvío estándar de la diferencia de dos medias de tratamiento. Todos los análisis fueron realizados para la variable DAP y para ambos sitios de experimentación. Los análisis realizados en todo el trabajo fueron implementados en SAS (SAS Institute, 2005), utilizando la función PROC MIXED.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Comparación de modelos

Para las variables altura y diámetro de planta, los resultados indican que la utilización de modelos que utilicen información de correlaciones espaciales y/o temporales mejora el ajuste de los mismos en comparación del modelo que asume errores independientes entre plantas (Tabla 1). En ambos sitios se observa que el seguimiento individual de plantas a través del tiempo es una alternativa más eficiente, en comparación a la utilización de información promedio de la parcela. La estructura ANTE1 para modelar la correlación entre plantas en el tiempo fue la más eficiente en términos de ajuste de modelo, tanto para el sitio S_1 como S_2 sobre la variable altura de planta. Sin embargo para la variable DAP, en S_1 el mejor ajuste se obtuvo utilizando la estructura ANTE(1) y en S_2 a través de la estructura ARH(1). Los modelos que tuvieron en cuenta la correlación espacial entre árboles, mostraron en todos los casos a excepción de S_1 para la variable DAP, que la inclusión del efecto del bloque dentro de los mismos, mejoró la eficiencia de la estimación de medias de tratamiento de laboreos. En particular, las diferencias generadas en términos de AIC, entre los diferentes modelos de ajuste de los semivariogramas empíricos fueron de escasa magnitud. Para la variable altura de planta, el mejor ajuste fue obtenido con el modelo exponencial y power en ambos sitios. Mientras que para DAP, los modelos con mejor ajuste fueron el gaussiano y power para el sitio S_1 y exponencial para S_2 .

Tabla 1. Comparación de ajuste de modelos que contemplaron correlaciones temporales (sin ajuste espacial) o espaciales de los datos para la variable altura de planta, en ambos ensayos utilizando información de los 30 meses iniciales de crecimiento (6 fechas de evaluación), según el criterio de AIC. Se subraya el mejor modelo por ensayo y tipo de ajuste.

	Modelo	Volumen de madera		Altura de planta	
		S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
Sin ajuste espacial	[1] $Y_{ijk} = \mu + T_i + B_j + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk}$	24229,7	31478,4	8912,7	7622,7
	[2] $Y_{ijk} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk}$	24204,9	31463,0	8912,7	7622,7
	[3] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)} / \Sigma=CS$	23002,2	29966,2	8912,7	6681,7
	[3] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)} / \Sigma=AR(1)$	22527,3	29342,5	8914,4	6741,4
	[3] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)} / \Sigma=ARH(1)$	22045,3	28664,5	7291,0	6712,8
	[3] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)} / \Sigma=CSH$	21926,6	29181,4	7351,9	<u>6645,6</u>
	[3] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ijk)} / \Sigma=ANTE(1)$	<u>21246,1</u>	<u>28304,3</u>	<u>7007,9</u>	6719,7
Con ajuste espacial	[4] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ij)} / \Sigma=sp(gau)(X Y)$	22940,1	29965,1	8914,7	6683,7
	[4] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ij)} / \Sigma=sp(exp)(X Y)$	<u>22938,5</u>	<u>29964,3</u>	8914,9	<u>6681,7</u>
	[4] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + B_j + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ij)} / \Sigma=sp(power)(X Y)$	<u>22938,5</u>	<u>29964,3</u>	8914,7	6683,7
	[5] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ij)} / \Sigma=sp(gau)(X Y)$	22944,8	29973,6	<u>8910,0</u>	6692
	[5] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ij)} / \Sigma=sp(exp)(X Y)$	22942,6	29968,8	8912,0	6691,9
	[5] $Y_{ijkl} = \mu + T_i + \delta_{ij} + F_k + TF_{ik} + \varepsilon_{ijk} + \omega_{l(ij)} / \Sigma=sp(power)(X Y)$	22942,6	29968,8	<u>8910,0</u>	6691,9

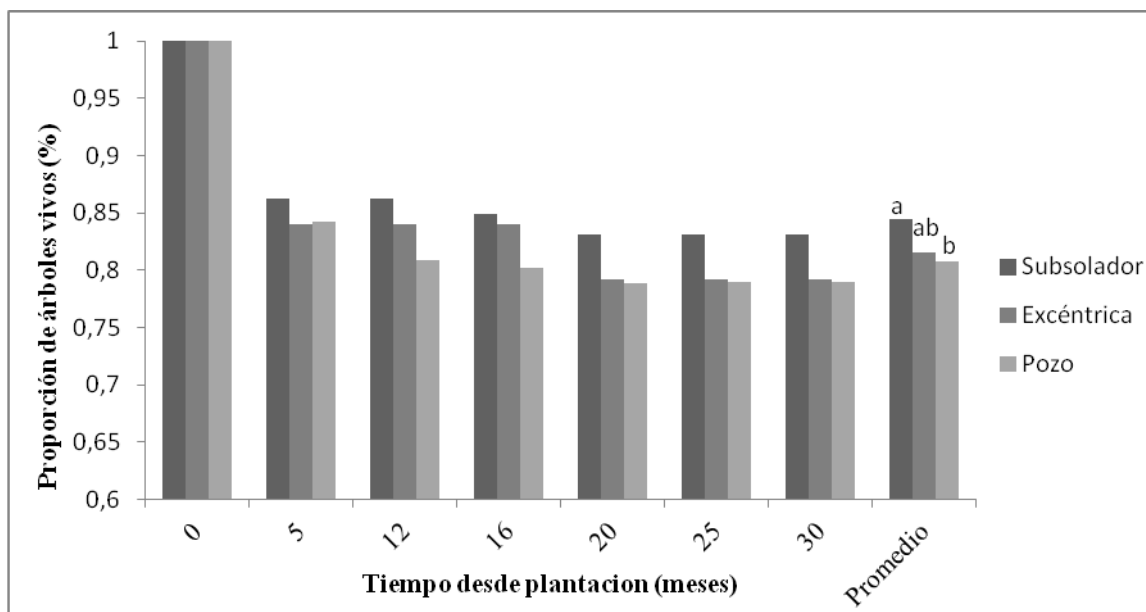
Tabla 2. Medias ajustadas y errores estándar para altura de planta y diámetro a la altura del pecho (DAP) a los 7, 12, 16, 20, 25 y 30 meses post-plantación en los sitios S₁ y S₂. Para cada columna de la misma variable y sitio, diferentes letras indican diferencias significativas entre tratamientos (P < 0.05).

Sitio	Laboreo	Fecha					
		7	12	16	20	25	30
Altura (cm)							
S ₁	Pozo	40,6 ± 2,3 ^b	195,1 ± 6,2 ^c	279,8 ± 7,1 ^c	491,2 ± 7,3 ^b	755,5 ± 7,2 ^b	848,1 ± 7,0 ^b
	Excéntrica	51,8 ± 2,3 ^a	307,7 ± 6,2 ^a	406,9 ± 6,7 ^a	602,7 ± 7,3 ^a	847,5 ± 6,8 ^a	919,5 ± 7,0 ^a
	Subsolador	41,8 ± 2,3 ^b	269,8 ± 5,9 ^b	364,8 ± 6,7 ^b	585,1 ± 7,0 ^a	837,2 ± 7,1 ^a	917,9 ± 6,7 ^a
S ₂	Pozo	48,4 ± 2,0 ^b	224,7 ± 4,9 ^b	312,4 ± 5,4 ^b	534,4 ± 5,3 ^b	803,1 ± 6,2 ^b	899,4 ± 6,3 ^b
	Excéntrica	75,4 ± 2,0 ^a	328,3 ± 4,9 ^a	428,1 ± 5,5 ^a	640,3 ± 5,4 ^a	891,4 ± 6,4 ^a	986,7 ± 6,5 ^a
	Subsolador	81,5 ± 2,0 ^a	347,4 ± 4,8 ^a	448,0 ± 5,4 ^a	652,0 ± 5,3 ^a	903,2 ± 6,2 ^a	985,8 ± 6,4 ^a
DAP (cm)							
S ₁	Pozo	-	-	-	15,6 ± 0,4 ^b	22,4 ± 0,4 ^b	26,1 ± 2,3 ^b
	Excéntrica	-	-	-	21,3 ± 0,4 ^a	27,5 ± 2,3 ^a	29,7 ± 2,3 ^a
	Subsolador	-	-	-	19,6 ± 0,3 ^a	40,6 ± 2,3 ^a	28,8 ± 2,3 ^a
S ₂	Pozo	-	-	-	18,1 ± 0,3 ^b	25,2 ± 0,3 ^b	29,0 ± 0,4 ^b
	Excéntrica	-	-	-	23,4 ± 0,3 ^a	29,6 ± 0,4 ^a	32,1 ± 0,4 ^a
	Subsolador	-	-	-	23,8 ± 0,3 ^a	30,0 ± 0,3 ^a	32,3 ± 0,4 ^a

Diferencias estadísticas entre laboreos fueron encontradas para ambas variables y ambos sitios evaluados (Tabla 2). Para la variable altura de planta en S_1 , se encontraron diferencias significativas a partir de los 12 meses de crecimiento, en donde hasta los 16 meses, el laboreo con excéntrica obtuvo los mayores valores, seguido por el laboreo con subsolador y en último lugar la plantación al pozo con los menores valores promedios de altura de planta. Desde los 20 hasta los 30 meses, los laboreos con excéntrica y subsolador fueron superiores en comparación a plantación al pozo, no existiendo diferencias significativas entre ambos. En S_2 y durante todo el periodo experimental, plantación al pozo obtuvo las menores alturas de planta, siendo el subsolador y excéntrica los laboreos superiores. El mismo análisis pero enfocado en la variable diámetro de plantas indica que para ambos sitios y durante las tres fechas de evaluación de dicha variable, no existieron diferencias significativas entre los laboreos con subsolador y excéntrica, siendo los mismos superiores en comparación a plantación al pozo.

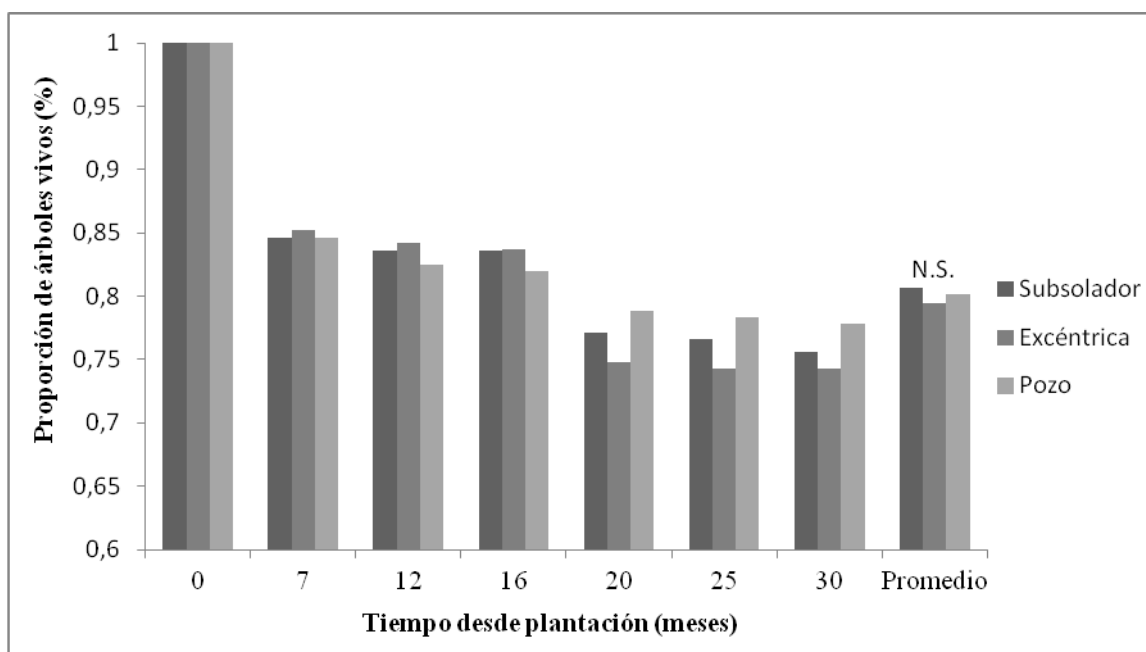
3.5.2. Mortalidad y competencia entre árboles

El análisis de la evolución del número de árboles vivos por tipo de laboreo a través del tiempo, mostró un comportamiento diferenciado dependiendo de las condiciones del sitio. En el sitio con peores condiciones para el desarrollo y crecimiento de plantas (S_1), existieron diferencias significativas entre tipos de laboreo para la variable proporción de árboles vivos desde plantación. Debido a que la interacción entre fecha y tipo de laboreo no fue significativa, los resultados muestran que en promedio y durante todo el periodo experimental, no existieron diferencias significativas entre subsolador y excéntrica para la proporción de árboles vivos (0,8446 vs. 0,8159), ni tampoco entre excéntrica y plantación al pozo (0,8159 vs. 0,8073), mientras que el subsolado obtuvo una mortalidad promedio inferior a la obtenida con plantación al pozo (0,8446 vs. 0,8073). En S_2 , tanto el efecto del tipo de laboreo como la interacción del mismo con fecha de evaluación no fueron significativos, lo cual indica que ninguno de los tratamientos tuvo diferencias con el resto en términos de mortalidad de plantas durante el periodo experimental.



* Letras diferentes en el promedio indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$)

Figura 2. Proporción de árboles vivos en relación al momento de instalación del experimento por tipo de laboreo, para todas las fechas de evaluación en el ensayo S₁.



* Letras diferentes en el promedio indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$)

Figura 3. Proporción de árboles vivos en relación al momento de instalación del experimento por tipo de laboreo, para todas las fechas de evaluación en el ensayo S₂.

La utilización del número de vecinos cercanos como indicador de competencia logró mejorar la estimación de medias para la variable DAP en ambos sitios de evaluación (Tabla 3). En particular, en S_1 la utilización de información del número de vecinos más próximos en estrella como covariable obtuvo las mejores estimaciones de medias. Mientras que en S_2 , el mejor ajuste fue obtenido utilizando el número de vecinos más cercanos en cruz como covariable.

La importancia del uso de información de la competencia de árboles próximos sobre variables de crecimiento como el diámetro de planta, también fue demostrada al analizar la disminución de los errores estándar para la diferencia de medias de tratamiento. En todas las comparaciones posibles entre los tipos de laboreos, el uso de alguna covariable redujo los errores estándar en comparación a aquellos modelos que no utilizaron ninguna covariable. Para ambos sitios, el uso de la covariable N_8 , obtuvo los menores valores de errores estándar para la comparación de medias, a excepción de S_2 en fecha 4 para la comparación entre subsolador contra plantación al pozo y excéntrica contra subsolador.

Tabla 4. Comparación de modelos por AIC sin información de vecinos cercanos (sin), que utilizan el número de árboles vecinos en cruz (N_4) y con número de árboles vecinos en estrella (N_8) como covariable para la variable diámetro de planta en dos ensayos (S_1 y S_2). Se subraya el mejor modelo por sitio y fecha.

Covariable	AIC	S_1			S_2			
		20†	25	30	20	25	30	
Sin	4858,3	0,4960	0,5286	0,5151	8064,7	<u>0,4174</u>	0,4982	0,5072
N_4	4800,1	0,4872	0,5043	0,4805	<u>8019,5</u>	0,4180	0,4968	0,5045
N_8	<u>4799,4</u>	<u>0,4791</u>	<u>0,4949</u>	<u>0,4711</u>	8029,3	0,4194	<u>0,4947</u>	<u>0,5005</u>

†Error estándar de la diferencia entre medias de laboreo para cada fecha.

3.6. DISCUSIÓN

3.6.1. Correlaciones temporales y espaciales

Los resultados de este estudio muestran que la utilización de modelos que contemplen correlaciones tanto espaciales como temporales entre árboles permite mejorar las estimaciones de medias de tratamientos. Es conocido que la variabilidad espacial de variables de crecimiento en árboles (i.e. altura, diámetro) está determinada por un complejo sistema asociado a la competencia entre árboles y la variabilidad ambiental existente (Zhang, 2004). Sin embargo existen pocos antecedentes en donde se evalúen ambos componentes sobre experimentos de laboreos forestales parcelarios, limitando en muchos casos el alcance de las inferencias para este tipo de ensayos. El seguimiento individual de cada árbol a través del tiempo resultó ser una buena herramienta al momento de modelar la evolución de variables de crecimiento; en particular los mejores ajustes fueron obtenidos utilizando una estructura de matriz de covarianzas de tipo antedependiente (ANTE1) en S_1 y simetría compuesta heterogénea (CSH) en S_2 . En ambas situaciones los mejores desempeños obtenidos para contemplar las correlaciones temporales de los datos fueron aquellas que sumieron estructuras de covarianzas heterogéneas (Wolfinger 1996), estando esto posiblemente explicado por la evolución del crecimiento de árboles, donde se genera una mayor variabilidad a medida que avanza el tiempo.

Cuando los residuales del modelo indican la presencia de dependencia espacial, la independencia requerida para los mismos es violada. Esta violación puede resultar en inferencias sesgadas (Martin, 1974) y pobres estimaciones de efectos de tratamientos (Haining, 1990; Cordy y Griffith, 1993). La utilización de GWR como herramienta para contemplar la variabilidad espacial existente, mostró resultados positivos en la mejora del ajuste de modelos, coincidiendo con lo mostrado por Zhang et al. (2004). Si bien la utilización de modelos de análisis que utilicen información de variabilidad es evaluado positivamente, también resulta necesario tener en cuenta los componentes de control local provenientes del diseño experimental como lo son los bloques, ya

que también aportan en dicha mejora de ajuste de los modelos. En resumen, el abordaje de ambos tipos de correlaciones sobre modelos de crecimiento de Eucaliptus permite mejorar las estimaciones de medias de tratamientos y sus respectivas comparaciones. En particular se obtienen mayores ganancias al tomar en cuenta las correlaciones temporales de los árboles, comparativamente a lo que aporta la utilización de información de correlaciones espaciales.

3.6.2. Efectos del laboreo sobre crecimiento inicial

El desempeño productivo de los tratamientos evaluados en términos de altura y diámetro de planta, muestra que laboreos con excéntrica y/o subsolador fueron significativamente superiores a plantaciones al pozo, no encontrándose diferencias entre ambos en las últimas fechas de evaluación. Esto coincide con otros trabajos en Eucaliptus en donde se muestra un fuerte efecto del uso de laboreos en comparación a plantaciones al pozo (Boden, 1984; Mhando et al., 1993). Bajo condiciones con menores aptitudes para el desarrollo radicular (S_1) y durante etapas tempranas de crecimiento, la utilización de excéntrica obtuvo mayores alturas de planta en comparación al uso de subsolado, sin embargo estas diferencias fueron disminuyendo en el tiempo. Cavichiolo et al. (2003) a través de un experimentos de similares condiciones al nuestro, indicaron la presencia de un efecto significativo de la intensidad de laboreo sobre propiedades físicas del suelo que afectan el desarrollo radicular de las plantas, sin embargo dichos experimentos no lograron encontrar diferencias significativas en altura y DAP entre tratamientos, siendo posiblemente el uso de herramientas clásicas de análisis estadístico una de las principales limitantes para detectar diferencias. Analizando comparativamente los tratamientos más intensivos evaluados (E y S), nuestros resultados se condicen con lo mostrado por Holz et al. (1999) y Martins y Pinto (2004), en donde la utilización de laboreos profundos como el subsolado no logró superar en crecimiento a aquellos tratamientos menos intensivos como el uso de excéntrica. Los altos costos operativos de preparaciones de sitios forestales a través de subsolado y sus inciertos beneficios en

términos productivos, han generado un debate acerca de la utilización de este tipo de prácticas (Lacey et al., 2001).

Nuestros resultados permiten concluir que bajo condiciones de sitio contrastantes, el laboreo con excéntrica es un tratamiento superior en ambas situaciones productivas. Por tratarse de un tipo laboreo de menor intensidad, menor costo operativo y asociado a un menor nivel del riesgo de erosión, debería de tenerse en cuenta como la opción más eficiente, a excepción de zonas con características particulares de suelo (pedregosidad, densidad, profundidad del perfil) en donde el uso de laboreos con subsolador resulte rentable en su relación costo beneficio.

3.6.3. Efecto de laboreos sobre mortalidad de árboles

Uno de indicadores más utilizados para determinar niveles de producción forestal es el volumen de madera producido por unidad de superficie (Skovsgaard y Vanclay, 2008), por lo tanto no solo es de interés el impacto de las diferentes intensidades de laboreo sobre variables de crecimiento, sino que resulta importante evaluar el impacto que tienen dichos tratamientos sobre la mortalidad de árboles en la primeras etapas de crecimiento, así como la dinámica de competencia que se produce entre árboles de una misma parcela. Fonseca et al. (2011) encontraron que las mayores tasas de mortalidad se produjeron inmediatamente luego de la plantación y luego de la temporada calurosa en los laboreos de menor intensidad, presentando los laboreos más intensivos las menores tasas. Nuestros resultados son concordantes con esto al obtener una mayor tasa de mortalidad durante la etapa inicial del experimento, sin embargo la presencia de diferencias significativas entre tipos de laboreo fueron dependientes de las condiciones del sitio. Bajo mejores condiciones para el desarrollo radicular, las diferencias en nivel de mortalidad no fueron significativas entre ninguno de los laboreos, mientras que en condiciones de suelo más limitantes para la sobrevivencia de la planta, la utilización de subsolado logro mantener un mayor número de plantas en la parcela en comparación a plantación al pozo. La mayor disminución en el número de plantas durante la temporada estival,

posiblemente se encuentre asociado a la poca capacidad de exploración radicular de las plantas que permitan tolerar periodos de importante estrés hídrico y ha sido reportado como el periodo más crítico por varios autores (Cogliastro et al., 1997; Bocio et al., 2004). Por otro lado, las etapas iniciales de crecimiento, resultan un momento de intensa competencia entre plantas, lo cual incide directamente sobre la mortalidad natural, reduciendo los efectos de la competencia entre árboles e indicando a través de la expresión del crecimiento de árboles individuales la adaptación al micro-sitio. (Fox et al, 2007). Los cambios en la mortalidad de plantas a través del tiempo, fueron evaluados durante los primeros 6 años de crecimiento por Carlson et al (2006), con el objetivo de determinar si la intensidad de laboreo afectada las tasas de mortalidad a través del tiempo y sus resultados muestran que luego del primer año, la supervivencia de plantas no se vio afectada por el tipo de laboreo. Similares resultados fueron presentados por Mhando et al (1993) en Eucalyptus. Estos resultados coinciden con los encontrados en nuestro estudio para las condiciones de S_2 , sin embargo en S_1 si se encontraron diferencias entre tipos de laboreos, sugiriendo que dependiendo de las condiciones del sitio de plantación, la adopción de medidas de manejo sitio específicos de laboreos podría mejorar los niveles de supervivencias de plantas en comparación a esquemas de plantación homogéneos.

3.6.4. Competencia entre árboles

El crecimiento individual de árboles es un proceso complejo, en donde predominan el efecto que ejercen sobre el mismo la competencia y la variabilidad del micro-sitio, generando en la mayoría de las situaciones dependencias positivas entre árboles con mayor proximidad espacial (Matern, 1960; Reed and Burkhart, 1985; Schoonderwoerd and Mohren, 1987; Magnussen, 1990, 1994; Liu and Burkhart, 1994). Dicha competencia, tiende a generar dependencias negativas en términos de crecimiento cuando mayor es la proximidad especial, mientras que la variación del micro-sitio genera una dependencia positiva entre vecinos cercanos, que comparten

similares condiciones ambientales (Forrester et al., 2010). Los conceptos de competencia e influencia del micro-sitio muchas veces son confundidos, siendo la dependencia espacial entre árboles una combinación de ambos efectos (Magnussen, 1994). La utilización del número de árboles vecinos más próximos a cada uno de los árboles evaluados y su utilización como covariable dentro de los modelos de análisis, resultó ser una herramienta sencilla y eficiente al momento de describir los patrones de agrupamiento y competencia dentro de la parcela y obtener mejores estimaciones de medias de tratamiento. En nuestro experimento, los resultados muestran que la competencia entre árboles para los diferentes tipos de laboreos, no afectó en ningún sentido la altura alcanzada por los árboles. Sin embargo la utilización del número de vecinos más cercanos, permitió estimar de manera más eficiente variables como DAP y por consiguiente producción de madera.

3.7. CONCLUSIONES

La utilización de sistemas de plantación al pozo resultó ser en todas las situaciones un tratamiento inferior, mientras que el uso de excéntrica y subsolador no mostraron diferencias significativas entre sí. La mortalidad natural de plantas se vio afectada por las condiciones del sitio, siendo bajo condiciones limitantes para el desarrollo radicular, el subsolado en comparación a plantación al pozo una mejor alternativa en la preparación del sitio forestal. Esto permite inferir que laboreos con excéntrica son preferidos por sus menores costos operativos y menor impacto sobre propiedades físicas del suelo en comparación al subsolado, a excepción de zonas con condiciones limitantes para la exploración radicular, en donde la utilización de subsolador podría afectar positivamente la producción total de madera. Se espera que una estrategia de análisis que tenga en cuenta el seguimiento y ubicación geográfica individual de árboles a través del tiempo, así como el uso de información del número de vecinos más cercanos en modelos de análisis que incorporen toda esta información, permita determinar de manera más eficiente laboreos superiores bajo condiciones de alta variabilidad de suelos.

3.8. BIBLIOGRAFÍA

Bocio I, Navarro FB, Ripoll MA, Jiménez MN, De Simón E. 2004. Holm oak (*Quercus rotundifolia* Lam.) and Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) response to different soil preparation techniques applied to forestation in abandoned farmland. *Annals of Forest Science*, 61: 171–178.

Boden DI. 1984. Early responses to different methods of site preparation for three commercial tree species. In: IUFRO Symposium on Site Productivity of Fast Growing Plantations, Pretoria and Pietermaritzburg, South Africa, 30 April-11 May 1984, South Africa Forestry Research Institute, Pretoria, pp. 565- 578.

Brownie C, Bowman DT, Burton JW. 1993. Estimating spatial variation in analysis of data from yield trials, a comparison of methods. *Agronomy Journal*, 85: 1244-1253.

Burkhardt HE, Gregoire TG. 1994. Forest Biometrics. In: Patil, G.P., Rao, C.R. (Eds.), *Handbook of statistics, Vol. 12, Environmental Statistics*. Elsevier, Amsterdam, pp. 377-407.

Burrows SN, Gower ST, Norman JN, Diak G, Mackay DS, Ahl DE, Clayton MK. 2003. Spatial variability of aboveground net primary production for a forested landscape in northern Wisconsin. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 2007-2018.

Carlson CA, Fox TR, Colbert SR, Kelting DL, Allen HL, Albaugh TJ. 2006. Growth and survival of *Pinus taeda* in response to surface and subsurface tillage in the southeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 234: 209–217.

Cavichiolo SR, Dedecek RA, Gava JL. 2003. Avaliação do efeito do sistema de preparo em solos de diferentes texturas, na sua resistência mecânica e na

produtividade da rebrota de eucalyptus saligna. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 47: 83-98.

Cogliastro A, Gagnon D, Bouchard A. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. *Forest Ecology and Management*, 96: 49–63.

Cordy C, Griffith D. 1993. Efficiency of least squares estimators in the presence of spatial autocorrelation. *Communications in Statistics*, 22: 1161-1179.

Cressie N. 1991. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York.

Donoso S. 1999. Efecto del laboreo sobre la biomasa de *Eucalyptus globulus* en el sureste de España. *Investigación Agrícola: Sistemas y Recursos Forestales*, 8(2): 377-386.

Dovciak M, Frelich LE, Reich PB. 2001. Discordance in spatial patterns of white pine (*Pinus strobus*) size-classes in a patchy near-boreal forest. *J. Ecol.*, 89: 280-291.

Fonseca F, de Figueiredo T, Martins A. 2011. Survival and early growth of mixed forest stands installed in a Mediterranean Region: Effects of site preparation intensity. *Forest Ecology and Management*, 262: 1905-912.

Forrester DI, Medhurst JL, Wooda M, Beadle CL, Valencia JC. 2010. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: An Australian perspective. *Forest Ecology and Management*, 259: 1819–1835.

Fox JC, Ades PK, Bi H. 2001. Stochastic structure and individual-tree growth models. *Forest Ecology and Management*, 154: 261-276.

Fox JC, Bi H, Ades PK. 2007. Spatial dependence and individual-tree growth models I. Characterising spatial dependence. *Forest Ecology and Management*, 245: 10-19.

Gonçalves JLM, Stape JL, Wichert MCP, Gava JL. 2002. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. In: Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L. (Eds.), *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba, IPEF, pp. 131–204.

Gregorie T, Schabenberger O, Barrett J. 1995. Linear modeling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent plot measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 25: 137-156.

Haining RP. 1990. *Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences*. Cambridge university press, Cambridge.

Holz GK, Smethurst PJ, Pongracic S. 1999. Responses to cultivation in eucalypt tree-farms in south-eastern Australia. In: Ellis R.C., Smethurst, P.J. (Eds.), *Practising Forestry Today*. Proceedings of the 18th Biennial Conference of the Institute of Foresters of Australia, pp. 161–164.

Horn R, Domzal H, Slowinska-Jurkiewicz A, Ouwerkerk C. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable ansoils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35: 23-36.

Kenkel NC, Hoskins JA, Hoskins WD. 1989. Local competition in a naturally established jack pine stand. *Canadian Journal of Botany*, 67: 2630–2635.

Kröger M. 2012. Global tree plantation expansion: a review. ICAS Review Paper Series No. 3. The Hague: Initiatives in Critical Agrarian Studies/International Institute of Social Studies.

- Lacey ST, Brennan PD, Parekh J. 2001. Deep may not be meaningful: cost and effectiveness of various ripping tine configurations in a plantation cultivation train in eastern Australia. *New Forests*, 21: 231–248.
- Lee J, Wong, DWS. 2001. *Statistical analysis with Arcview Gis*. John Willey and Sons, Inc., New York.
- Liu J, Burkhart HE, 1994. Spatial characteristics of diameter and total height in juvenile loblolly pine (*Pinus taeda* L) plantations. *Forestry Science*, 40: 774–786.
- Liu J, Ashton PS. 1999. Simulating effects of landscape contexts and timber harvest on tree species diversity. *Ecology Applied*, 9: 186:201.
- Loo-Dinkins JA. 1992. Field test design. In: Fins, L., Friedman, S., Brotschol, J. (Eds.), *Handbook of Quantitative Forest Genetics*. Kluwer Academic Publication, Dordrecht, The Netherlands, pp. 96–139.
- López MV, Arrué JL. 1995. Efficiency of an incomplete block design based on geostatistics for tillage experiments. *Soil Science Society American Journal*, 59:1104-1111.
- Magnussen S. 1994. A method to adjust simultaneously for spatial micro-site and competition effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 985–995.
- Magnussen S. 1990. Application and comparison of spatial models in analyzing tree-genetics field trials. *Canadian Journal of Forestry Research*, 20: 536–546.
- Martin RL. 1974. On autocorrelation, bias and the use of first spatial differences in regression analysis. *Area*, 6: 185–194.

Martins A, Pinto MG. 2004. Efeitos da Ripagem Localizada Versus Ripagem Contínua nas Propriedades do Solo e na Resposta das Plantas em Novos Povoamentos Florestais. *Silva Lusitana*, 12 (2): 191–202.

Matern B. 1960. Spatial variation. *Meddelanden fran statens skogsforskning-sinstitut* 49 (5) [Second edition (1986), *Lecture Notes in Statistics*, No 36, Springer New York].

McLaughlin JW, Gale MR, Jurgensen MF, Trettin C. 2000. Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate. *Forest Ecology and Management*, 129: 7-23.

Merino A, Rodríguez López A, Brañas J, Rodríguez-Soalleiro R. 2003. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in northwestern Spain. *Annals of Forestry Science*, 60:509–517.

Mhando ML, Maliondo SM, Mugasha AG. 1993. Early response of *Eucalyptus saligna* to site preparation and fertilization at Sao Hill, Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 62: 303–311.

Miller TE, Weiner J. 1989. Local density variation may mimic effects of asymmetric competition on plant size variability. *Ecology*, 70: 1188–1191.

Morris LA, Lowery, RF. 1988. Influence of site preparation on soil conditions affecting stand establishment and tree growth. *Southern Journal of Applied Forestry*, 12: 170-178.

Mulla DJ. 1993. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. p. 15-26. In: P.C. Robert et al. (ed.) *Soil specific management*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

Newton PF, Jolliffe PA. 1998. Assessing processes of intra-specific competition with spatially heterogeneous black spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 259–275.

Querejeta JI, Roldán A, Albadalejo J, Castillo V. 2001. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest Ecology and Management*, 149: 115–128.

Reed DD, Burkhart HE. 1985. Spatial autocorrelation of individual tree characteristics in loblolly pine stands. *Forestry Science*, 31: 575–587.

SAS Institute Inc. 2005. Cary, NC, USA.

Schoonderwoerd H, Mohren GMJ. 1987. Autocorrelation and competition in even-aged stands of douglas-fir in the Netherlands. In: Ek, A.R., Shifley, S.R., Burk, T.E. (Eds.), *Forest Growth Modelling and Prediction*. U.S.D.A. For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-120, pp. 619–626.

Shi H, Laurent EJ, LeBouton J, Racevskis, L, Hall KR, Donovan M, Doepker RV, Walters MB, Lupi F, Liu J. 2006. Local spatial modeling of white tailed deer distribution. *Ecological Modeling*, 190: 171-189.

Skovsgaard JP, Vanclay JK. 2008. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81: 13-31.

Verhagen A, Booltink HWG, Bouma J. 1995. Site-specific management: balancing production and environmental requirements at farm level. *Agricultural Systems*, 49: 369-384.

Weiner J. 1990. Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology and Evolution*, 5: 360-364.

Wetzel S, Burgess D. 2001. Understorey environment and vegetation response after partial cutting and site preparation in *Pinus strabus L.* stands. *Forest Ecology and Management*, 151: 43-59.

Wheeler MJ, Will RE, Markewitz D, Jacobson MA, Shirley AM. 2002. I. Early loblolly pine stand response to tillage on the Piedmont and Upper Coastal Plain of Georgia: mortality, stand uniformity, and second and third year growth. *Southern Journal of Applied Forestry*, 26 (4): 181–189.

Wolfinger RD. 1996. Heterogeneous variance. Covariance structures for repeated measures. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 2:205-230.

Worrell R, Hampson A. 1997. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review. *Forestry*, 70 (1): 61– 85.

Zas R. 2006. Consecuencias de la estructura espacial de los datos en el diseño y análisis de experimentos en campo. *Ecosistemas*, 15(3): 107-114.

Zhang L, Bi H, Cheng P, Davis CJ. 2004. Modeling spatial variation in tree diameter height relationships. *Forest Ecology and Management*, 189: 317-329.

4. EFFECTS OF DIFFERENT TILLAGE INTENSITIES ON SPATIAL SOIL VARIABILITY AND SITE-SPECIFIC MANAGEMENT IN EARLY GROWTH OF EUCALYPTUS

González Barrios, P.; Pérez Bidegain, M.; Gutiérrez, L.

^a Este artículo será enviado a la revista Forest Ecology and Management.

4.1. ABSTRACT

Soil tillage is one of the most common and important site preparation managements in forestry. However, in highly variable soils, uniform management practices might not be the best alternative. Site-specific management on the other hand, allows an optimal resource management as well as decreased environmental impact from soil tillage. However, what strategy to follow to delineate management zones in highly heterogeneous soils is not entirely clear. Our goal was to compare strategies to use soil characteristics to improve the comparison of tillage managements. Specifically, we aimed to: compare strategies to incorporate soil characteristics into the models to compare tillage treatments; to determine the most useful soil characteristics for zone management delineation; and to compare tillage methods in different management zones to determine site-specific management. We compared tillage intensities in contrasting soil types in a randomized complete block design with four and five replications. Tillage treatments included pit-planting (P), disc harrowing (S), and subsoiler (R). Experimental units consisted of three rows of fifteen trees each. Soil characteristics as well as plant height and diameter were evaluated periodically during the first 30 month after implantation. Intra-plot variability was described with multivariate geostatistical models. Using soil properties as covariates in the model to compare tillage treatments improved model fit. When root development is limited by

soil conditions and electroconductivity is high, tillage intensity makes a difference in plant growth; subsoiler is the best treatment when electroconductivity is high, while disc harrowing is the best when electroconductivity is low. However, when root development is not limited by soil conditions, no differences were found between subsoiler and disc harrowing. We show how the use of soil characterization is a tool that provides better comparisons among treatments when high intra-plot variability is present. Additionally, the use of soil characterization either directly into the model or to determine zones provides useful information for site-specific management. Site-specific management could therefore easily be implemented to decrease the environmental impact of soil tillage as well as to increase wood production in forestry.

Keywords: Tillage, Eucalyptus, spatial variability, zone delimitation.

4.2. INTRODUCTION

The *Eucalyptus* genus has more than 500 species used for afforestation and is the single most important genus in terms of rapid-growth species (Flynn, 2005). Specifically, *Eucalyptus grandis* is one of the species with the largest area of afforestation having a sustained area expansion since the 90s (Gonçalves et al., 2004). Afforestation is generally established in low fertility or degraded soils requiring different intensities of soil tillage to make the land suitable for forestry (Smith, 1998). Soil tillage could increase soil depth, improve water and nutrient availability, as well as improve plant growth conditions in general (Worrell and Hampson, 1997; Querejeta et al., 2001). On the other hand, more intense tillage could have severe environmental impact (Worrell and Hampson, 1997), and therefore finding the optimal tillage intensity is crucial. The effect of tillage intensity on weed control and root growth depth have thoroughly studied (McLaughlin et al., 2000; Wetzel and Burgess, 2001; Villalba et al., 2010), but few tillage intensity for site-specific management studies exist (Fisher and Binkley, 2000; Querejeta et al.,

2001; Martins and Pinto, 2004). Furthermore, experimental designs for studying tillage intensity are generally underpowered due to the requirement of large experimental units to capture treatment effects with the consequence of having experimental units with large heterogeneity within (Joyce et al., 2002; Zas, 2006).

Appropriately capturing local heterogeneity in experimental design is challenging. The most widely used experimental design for studying tillage effect are randomized complete blocks. With this design, local heterogeneity might not be properly captured (Grondona et al., 1996) due to non-linear patterns found in soil heterogeneity (Cressie, 1991). Furthermore, large experimental units are required in tillage experiments of forest species in order to properly evaluate the treatment effects with the unintended consequence of increasing within experimental unit variability. Additionally, when abrupt changes in soil type and unevenness of terrain are present, poor estimation of treatment effects are obtained (Dutkowski et al., 2002). One alternative to characterize soil heterogeneity is the use of electroconductivity (Rhoades et al., 1999; Corwin and Lesch, 2003). Electroconductivity and other soil properties have been used in classic geostatistics models for variogram construction and kriging prediction (Matern, 1960; Ripley, 1981; Diggle, 1988), to model the residuals error variance-covariance structure in mixed models (Gleeson y Cullis 1987; Cullis y McGilchrist, 1990; Cullis et al., 1991; Smith et al., 2005), and for curve smoothing (Hutchinson y Gessler, 1994). Another alternative is to use soil properties to delineate management zones through cluster analysis (Yan et al., 2007) and to evaluate treatments in each zone. Soil properties such as fertility, electroconductivity, organic matter, and texture, satellite images, topographic factors, as well as yield monitor maps have successfully been used for zone delimitation and management in agriculture (Franzen et al., 2002; Schepers et al., 2000, 2004). Therefore, spatial information from soil characteristics could be used in experiments to model within experimental unit heterogeneity. However, the best way to incorporate spatial variability into the models is not clear.

Precision forestry is therefore one of the tools that could be successfully used to determine optimal site-specific management (van Schilfgaarde, 1999). However, it is not entirely clear which of the tools would better capture this. The goal of this study was to compare statistical tools that incorporate soil properties into the analysis of forest experiments with large intra-plot variability to control heterogeneity. Specifically, we compared different strategies to incorporate soil characteristics to improve treatment estimation efficiency in forest experiments with large experimental units; we proposed a methodology to identify the most useful variables for zone delimitation to be used in site-specific management; and we evaluated the use of zone management for tillage intensities in forest experiments.

4. 3. MATERIALS AND METHODS

4.3.1. Site description and experimental design

The experiment was established in “Mellizos” in the Rio Negro Departmental Zone of Uruguay (32°37'49''S; 57°10'07''W). Uruguay has a temperate climate with four seasons clearly distinguished and an isohydric precipitation regime. Yearly temperature average is 17.9°C with a minimum average temperature of 12.2°C and a maximum average temperature of 23.8°C. Average annual precipitation is 1200 mm and relative humidity is 73%. The experiment was established in two contrasting soil types separated approximately 500 m (Figure 1). Predominant soils are Litosol in the first experiment (E₁) and Brunosol Subéutrico in the second experiment (E₂). The *Eucalyptus grandis* commercial clone X2334 was used. Both experiments were established at the same time in April of 2011 and had standard commercial management.

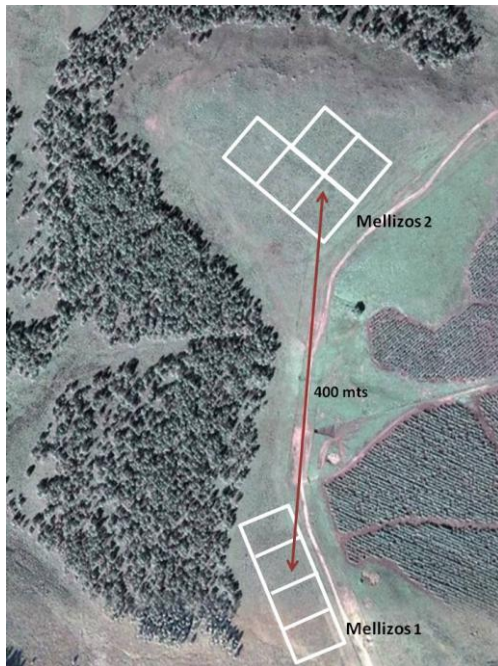


Figure 1. Experimental site, Mellizos 1 (E_1) and Mellizos (E_2).

A randomized complete block experimental design with three tillage intensity treatments was used. Treatments consisted of the tillage: pit-planting (P), subsoiler on the planting row (F), and disc harrowing on the planting row (R). Four blocks were used in E_1 and five blocks in E_2 . Experimental units consisted of three rows with 12 to 15 trees per row. Planting density was 1150 plants per hectare, having 3.5 m between rows and 2.5 m between trees.

4.3.2. Soil and plant evaluation

The experiment was evaluated every four month from November 2011 (seven month-old trees) until October 2013 (2.5 year-old trees). Plant height (PH) and diameter at breast height (DBH) was recorded for each tree in every evaluation time (Table 1). Soil properties were evaluated on a systematic grid in the inter-row. However, due to environmental limitations, not all of the soil properties were recorded for all evaluation times (Table 1). Electroconductivity was evaluated with a horizontal (EC_h) and vertical (EC_v) dipole using an EM38 electroconductive (Geonics limited, 1998). Penetration resistance was evaluated at depths of 10 (Res_{10})

and 20 (Res₂₀) cm with a digital penetrometer (Topp and Ferré, 2002). Gravimetric humidity (Hum) was evaluated in percentage.

Table 1. Evaluation points (in month after planting) for all plant and soil properties variables in experiments E₁ and E₂.

Measurement†	E ₁						E ₂					
	7	12	16	20	25	30	7	12	16	20	25	30
PH	■						■					
DBH	■						■					
EC		■		■	■	■		■		■	■	■
Res								■				■
Hum												■

† PH, plant height; DBH, diameter at breast height; EC, electroconductivity; Res, penetration resistance; Hum, gravimetric humidity.

4.3.3. Statistical Analysis

4.3.3.1. Summary descriptive analysis of soil properties

Descriptive statistics as well as correlation among soil properties were studied.

4.3.3.2. Geostatistic analysis

Spatial characterization of all individual soil variables was conducted with semivariograms and regression models. Additionally, soil and plant characteristics were evaluated combined in a multivariate analysis using a spatially weighted principal component analysis (MULTISPA-PCA). An empiric semivariogram for each soil variable and for the first principal component axis (PC₁) was fitted. Spheric, exponential, and gaussian models were fitted and the best model was selected based on the root mean squared error. Best model in each situation was used with ordinary kriging to construct maps and predict values for each tree. All of the analyses and map construction were conducted on R statistical software.

Predicted values from kriging were then used as covariates in a linear model to compare tillage treatments as follow:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} + \alpha X_{ijk} + \alpha_i X_{ijk} + \delta_{ijk}$$

where Y_{ijk} is the response variable (i.e. PH, DBH, Volume) of the k-th tree in the i-th tillage treatment and the j-th block, μ is the overall mean, τ_i is the effect of the i-th tillage treatment, β_j is the effect of the j-th block, ε_{ij} is the experimental error of the i-th tillage treatment and the j-th block, α is the global regression coefficient associated to the soil covariate of interest (i.e. EC, Res, Hum, and PC), α_i is regression coefficient of the i-th tillage treatment, X_{ijk} is the value of the soil covariate of interest (i.e. EC, Res, Hum, PC₁) in the k-th tree, and δ_{ijk} is the sub-sampling error associated to the i-th tillage treatment, the j-th block, and the k-th tree. Where ε_{ij} and δ_{ijk} are random variables with $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_e^2)$ and $\delta_{ijk} \sim N(0, \sigma_s^2)$. The covariates used for E1 were EC_h and EC_v, while the covariates used in E2 were EC_h, EC_v, Res₁₀, Res₂₀, Hum and CP₁. We first fitted the model with the response variable and the covariate from the same evaluation time. Later, the model was fitted for each response variable using the covariate evaluated at date 30 month. The models with different soil covariates were compared based on AIC and the best model was selected. The analyses were conducted on SAS Statistical Software (SAS Institute, 2005) with the PROC MIXED procedure.

4.3.3.3. Management zones and site-specific management

A non-supervised clustering algorithm that account for spatial patterns was used to delineate management zones. First, the fuzzy c-means partitioning algorithm was used to partition individuals into groups. Then, the optimal number of zones was determined based on the Fuzziness Performance Index (FPI) and the Normalized Classification Entropy (NCE) (Fridgen et al. 2004). The FPI indicates the degree of distance between individuals while the NCE is a measurmeent of the level of

aggregation between groups. The analyses were performed with the Management Zone Analyst (MZA) Software (Fridgen et al. 2004).

A linear model with the management zone to which each individual tree belonged was used to evaluate the interaction between management zone and tillage treatment as follows:

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

where Y_{ijkl} is the response variable (PH, DBH, or Volume) of the l -th tree in the i -th tillage treatment of the j -th block belonging to the k -th management zone, μ is the overall mean, τ_i is the i -th tillage treatment effect, β_j is the j -th block effect, γ_k is the k -th management zone effect, $\tau\gamma_{ik}$ is the tillage by zone interaction, ε_{ijk} is the residual error associated to the i -th tillage treatment, the j -th block, and the k -th management zone, and δ_{ijkl} is the sub-sampling error associated to the i -th tillage treatment, j -th block, k -th management zone, and l -th tree. Where ε_{ijk} and δ_{ijkl} are random variables with $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_e^2)$ and $\delta_{ijkl} \sim N(0, \sigma_s^2)$. The management zone is considered here as a post-blocking, existing for all of the experimental units but having a restriction in the randomization. All the statistical analyses were performed in SAS Statistical Software (SAS Institute, 2005) with the PROC MIXED procedure.

4.4. RESULTS

4.4.1. Soil characterization

The EC_h values were larger than EC_v in all the experiment, having a similar variance (Table 2). The Res_{10} values were larger than the Res_{20} values having both similar variances. The Hum values were 8.8% on average with a minimum of 2.0% and a maximum of 24.8%. There is a significant correlation ($P < 0.05$) between EC_h and EC_v , Res_{10} and Res_{20} , and EC_h and Hum (Table 3).

Table 2. Descriptive statistics of soil characteristics for experiments E₁ and E₂ evaluated 30 month after planting.

Experiment	Soil property [†]	Media	Mediana	SD	CV(%)	Mínimo	Máximo	Skewness	Kurtosis
E ₁	EC _h (mS m ⁻¹)	34.5	33.0	8.5	24.6	21.0	66.0	0.97	0.76
	EC _v (mS m ⁻¹)	23.8	22.0	6.3	27.4	13.0	53.0	1.21	1.66
	EC _h (mS m ⁻¹)	31.5	31.0	8.4	26.6	15.0	58.0	0.50	0.45
	EC _v (mS m ⁻¹)	24.9	24.0	6.9	27.7	11.0	50.0	1.00	1.80
E ₂	Res ₁₀ (kPa)	2284.1	2176.0	936.8	41.0	561.0	5264.0	0.65	0.24
	Res ₂₀ (kPa)	1993.7	1842.5	749.9	37.6	877.0	4106.0	1.07	0.86
	Hum (%)	8.8	8.8	3.4	38.3	2.0	24.8	1.17	3.72

[†]EC_h: bipole horizontal electroconductivity; EC_v: bipole vertical electroconductivity; Res₁₀: penetration resistance at 10 cm; Res₂₀: penetration resistance at 20 cm; Hum: gravimetric humidity.

Table 3. Pearson's correlation matrix between soil properties for experiment E₂ evaluated 30 month after planting.

Soil property [†]	ECH	ECV	Res ₁₀	Res ₂₀	Hum
EC _h	1.00	<0.01	0.35	0.26	0.04
EC _v	0.98	1.00	0.29	0.19	0.05
Res ₁₀	-0.08	-0.09	1.00	<0.01	0.07
Res ₂₀	-0.13	-0.15	0.58	1.00	0.09
Hum	-0.20	-0.18	0.17	0.21	1.00

[†]EC_h: bipole horizontal electroconductivity; EC_v: bipole vertical electroconductivity; Res₁₀: penetration resistance at 10 cm; Res₂₀: penetration resistance at 20 cm; Hum: gravimetric humidity.

4.4.2. Geostatistics analysis

There is not a single best variogram model for the soil characteristics (Table 4). Best model for EC_h was Spheric while for EC_v was Gaussian in E₁ and Exponential in E₂. In E₂, the best model for Res₁₀ was Exponential, for Res₂₀ was Gaussian, and for Hum was Spheric.

Table 4. Model fit (Root Mean Squared Error) for the semivariograms for each soil property evaluated 30 month after planting in experiments E₁ and E₂. Best model for each variable in each experiment is underlined.

Soil property [†]	E ₁			E ₂		
	Spheric	<u>Exponential</u>	Gaussian	Spheric	<u>Exponential</u>	Gaussian
EC _h	<u>44.08</u>	49.23	45.12	<u>225.14</u>	235.72	274.26
EC _v	35.78	40.17	<u>33.80</u>	106.03	<u>97.82</u>	145.61
Res ₁₀	-	-	-	340.03	<u>322.72</u>	5282.85
Res ₂₀	-	-	-	46.09	46.61	<u>42.54</u>
Hum	-	-	-	<u>37.47</u>	42.49	38.94

[†]EC_h: bipole horizontal electroconductivity; EC_v: bipole vertical electroconductivity; Res₁₀: penetration resistance at 10 cm; Res₂₀: penetration resistance at 20 cm; Hum: gravimetric humidity.

Spatial variability was properly modeled with the variograms, having adequate standard error of the prediction throughout the field (data not shown). Spatial variability in E₁ represented by EC indicated four areas in the field: two low EC areas, an intermediate EC area, and a large EC area (Figure 2). Spatial variability in E₂ showed similar patterns for EC_h and EC_v (Figure 3 A and B). Similar patterns were also found for Res₁₀ and Res₂₀ but showing stronger differentiations (Figure 3 C and D). The variable Hum showed a homogeneous pattern in the field with some differences between blocks (Figure 3 E). The PC1 was able to describe the patterns found for all the variables (Figure 3 F).

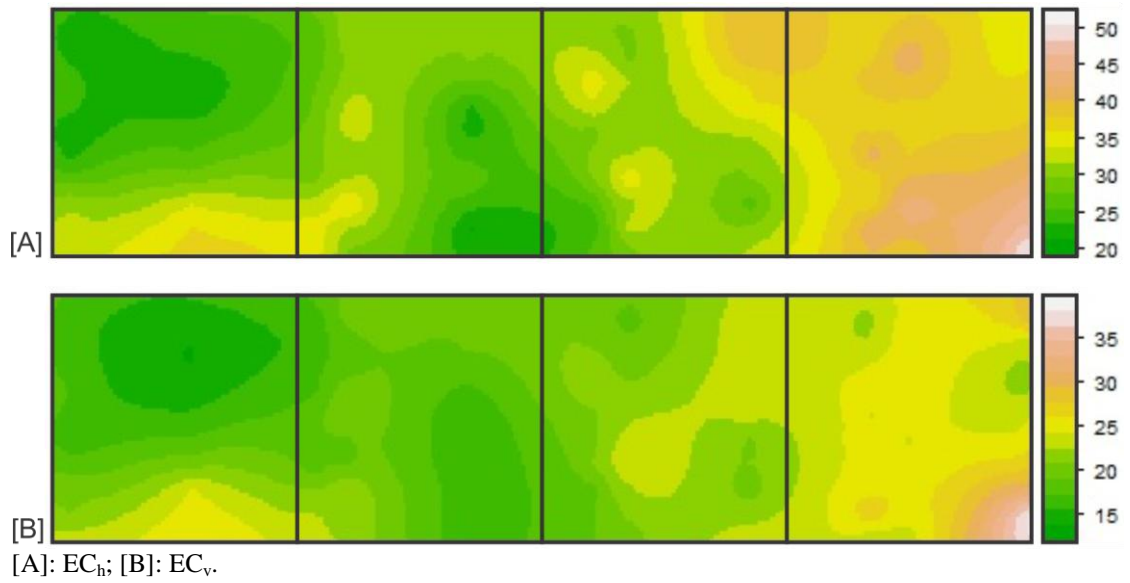
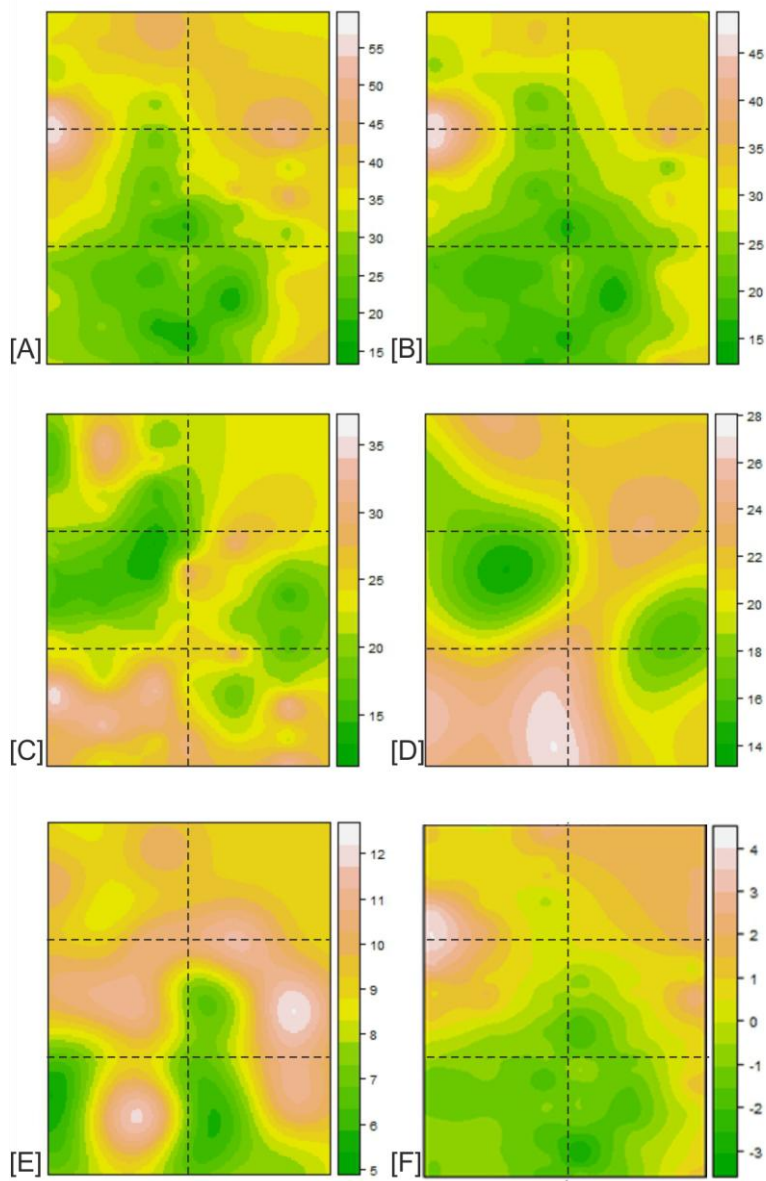


Figure 2. Map of interpolated values for electroconductivity in experiment E_1 evaluated at 30 months after planting.



[A]: EC_h ; [B]: EC_v ; [C]: Res_{10} ; [D]: Res_{20} ; [E]: Hum; [F]: CP_1 .

Figure 3. Map of interpolated values for soil properties in experiment E_2 evaluated at 30 months after planting.

4.3.3. Spatial modeling of soil properties as covariates

For both the E₁ and the E₂ experiment, using soil properties as covariates improved the model fit in comparison to modeling just the experimental design (Table 4). For the E₁ experiment using *per se* (i.e. soil properties from the same date as the response variable) EC_h as covariate improved the model fit. Except for date2, where the no-soil-covariate model was best, using EC_h or EC_v from the final evaluation date (30 month after planting) improved the model fit. For the E₂ experiment using Res₁₀, EC_v or PC₁ as *per se* covariates and Hum, Res₂₀, EC_v and PC₁ as covariates from 30 months after planting showed the best fit.

Table 4. Model fit (AIC) for models using soil covariates either evaluated at the same date as the response variable or at 30 month after planting for experiments E₁ and E₂. Best model for each date is underlined.

Experiment	Date R [‡]	Date C	Soil covariate [†]						
			Without	EC _h	EC _v	Res ₁₀	Res ₂₀	Hum	PC ₁
E ₁	25	25	4037.3	<u>4027.7</u>	4041.4	-	-	-	-
	30	30	4078.2	<u>4058.5</u>	4059.2	-	-	-	-
	5	30	3078.2	<u>3067.3</u>	3067.8	-	-	-	-
	12	30	<u>4122.9</u>	4126.4	4127.3	-	-	-	-
	16	30	4141.5	<u>4140.6</u>	4144.0	-	-	-	-
	20	30	4034.2	4019.1	<u>4019.0</u>	-	-	-	-
	25	30	4037.3	4016.3	<u>4014.5</u>	-	-	-	-
	30	30	4078.2	<u>4058.5</u>	4059.2	-	-	-	-
E ₂	12	12	5445.6	5444.7	5446.3	<u>5428.4</u>	5449.4	-	-
	25	25	5198.2	5191.4	<u>5190.6</u>	-	-	-	-
	30	30	5185.2	5187.1	5187.3	5187.1	5187.0	5191.0	<u>5185.1</u>
	5	30	4555.6	4549.9	4548.9	4545.5	4550.0	<u>4541.7</u>	4555.1
	12	30	5445.6	5448.4	5445.5	5442.0	<u>5441.1</u>	5446.8	5449.2
	16	30	5516.2	5512.6	<u>5509.5</u>	5509.7	5512.5	5518.3	5515.1
	20	30	4915.0	4906.0	<u>4905.5</u>	4910.7	4917.8	4917.1	4912.1
	25	30	5198.2	5198.2	<u>5196.9</u>	5201.2	5202.3	5202.4	5197.7
30	30	5185.2	5187.1	5187.3	5187.1	5187.0	5191.0	<u>5185.1</u>	

[†]EC_h: bipole horizontal electroconductivity; EC_v: bipole vertical electroconductivity; Res₁₀: penetration resistance at 10 cm; Res₂₀: penetration resistance at 20 cm; Hum: gravimetric humidity; PC1: first axis of the principal component including all soil properties.

[‡]Date R: evaluation date of the response variable; Date C: evaluation date of the covariate.

Experiment E₁ showed a significant tillage treatment by soil covariate interaction for all the evaluation dates, except for date2 indicating that the best treatment depends on the level of the soil property in the area. We did not find a significant interaction between tillage treatment and soil covariate for none of the dates and none of the covariates except Hum in date1. In general, the best tillage treatment is consistent across the field in E₂.

Table 5. Estimated slopes for plant height for the interaction between tillage treatment and soil covariate for experiments E₁ and E₂.

Exp.	Covariate [†]	Tillage	Date					
			5	12	16	20	25	30
E ₁	EC _h	Pit-planting	-0.15 ^c	-2.60	-3.02 ^b	-2.28 ^b	-1.99 ^b	-0.44 ^b
		Disc harrowing	0.17 ^b	-1.87	-3.55 ^c	-5.80 ^c	-5.35 ^c	-4.30 ^c
		Subsoiler	0.81 ^a	-1.03	-0.82 ^a	-1.17 ^a	0.66 ^a	2.73 ^a
	EC _v	Pit-planting	-0.05 ^b	-3.38	-5.09 ^b	-3.56 ^a	-5.18 ^b	-2.01 ^b
		Disc harrowing	0.38 ^b	-1.77	-3.71 ^b	-6.99 ^b	-7.58 ^c	-6.08 ^c
		Subsoiler	1.35 ^a	-1.55	-2.10 ^a	-2.66 ^a	-0.88 ^a	2.73 ^a
E ₂	EC _h	Pit-planting	-0.55	-0.24	-0.95	-1.67	-0.19	-0.53
		Disc harrowing	-0.95	-0.97	-1.93	-2.02	-1.63	-1.30
		Subsoiler	-0.37	-1.26	-1.81	-2.62	-2.27	-2.05
	EC _v	Pit-planting	-0.45	0.21	-0.64 ^a	-1.50	-0.29	-0.58
		Disc harrowing	-1.62	-1.94	-3.30 ^a	-3.02	-2.70	-2.21
		Subsoiler	-0.65	-2.05	-2.89 ^a	-3.65	-3.10	-2.30
	Res ₁₀	Pit-planting	-1.12	-3.74	-4.33	-1.67	-1.76	-1.37
		Disc harrowing	-1.50	-1.87	-1.32	-2.02	0.29	2.15
		Subsoiler	-1.70	-1.07	-1.56	-1.85	1.51	1.57
	Res ₂₀	Pit-planting	-1.08	-4.91	-4.86	-3.23	-1.52	0.70
		Disc harrowing	-0.21	-2.44	-2.22	-1.53	2.03	4.91
		Subsoiler	-2.40	-2.75	-3.32	-1.46	1.24	3.15
	Hum	Pit-planting	2.05 ^a	2.24	2.34	2.82	4.10	-0.54
		Disc harrowing	2.91 ^a	-0.71	-1.09	-2.05	1.74	1.78
		Subsoiler	-4.07 ^b	-6.19	-6.27	-5.40	-4.07	0.69
	PC ₁	Pit-planting	2.04	-1.99	2.36	6.51	2.30	4.59
		Disc harrowing	5.13	4.42	10.25	10.09	11.52	12.54
		Subsoiler	0.94	5.89	9.02	13.04	13.44	13.08

[†]EC_h: bipole horizontal electroconductivity; EC_v: bipole vertical electroconductivity; Res₁₀: penetration resistance at 10 cm; Res₂₀: penetration resistance at 20 cm; Hum: gravimetric humidity; PC₁: first axis of the principal component including all soil properties.

[‡] Different letters indicate significant differences (P<0.05)

4.4.4. Management zones and site-specific tillage

4.4.4.1. Management zone characterization

The optimal number of zones was two for E₁. The optimal number of zones ranged from two (EC_h y CP₁), to four (EC_v) in E₂. We decided to use two management zones for both experiments. In E₁, most of the trees belonged to Zone 2 (85%), but all the treatments were represented in both zones (Table 6). Zone 1 had larger values of EC_h and EC_v than Zone 2 in E₁. In E₂, both zones were equally represented and contained all treatments (Table 6). Zone 1 had lower values of EC_h and EC_v, and larger Res and Hum values than zone 2 in E₂.

Table 6. Management zones description: number of trees included in each zone and average values of the soil properties in each zone for experiments E₁ and E₂.

		N	EC _h [†]	EC _v	Res ₁₀	Res ₂₀	Hum	PC ₁
E ₁	Zone 1	68	47.7 (5.1)	33.7 (4.1)	-	-	-	-
	Zone 2	472	30.8 (5.2)	20.4 (3.2)	-	-	-	-
E ₂	Zone 1	309	25.9 (3.6)	20.4 (1.8)	25.1 (3.6)	22.7 (2.7)	91.8 (1.4)	1.1 (0.5)
	Zone 2	366	36.7 (4.7)	28.8 (4.1)	20.4 (4.1)	18.9 (2.3)	90.1 (0.9)	-1.0 (0.7)

[†]EC_h: bipole horizontal electroconductivity; EC_v: bipole vertical electroconductivity; Res₁₀: penetration resistance at 10 cm; Res₂₀: penetration resistance at 20 cm; Hum: gravimetric humidity; PC₁: first axis of the principal component including all soil properties.

Table 7. Adjusted means of plant height and volume for each treatment in each management zone for all evaluation dates. Best treatment is underlined for each date in each trait and experiment.

Trait	Site	Soil Covariate	Tillage	5			12			16			20			25			30		
				Z1	Z2	Mean [‡]	Z1	Z2	Mean	Z1	Z2	Mean	Z1	Z2	Mean	Z1	Z2	Mean	Z1	Z2	Mean
Plant Height	E ₁	EC _v	Disc harrowing	56.6	50.6	<u>53.6</u>	301.4	<u>305.8</u>	303.6	<u>390.3</u>	<u>411.1</u>	400.7	554.4	<u>611.7</u>	583.1	788.7	<u>858.1</u>	823.4	874.1	<u>931.1</u>	902.9
			Pit-planting	36.4	41.1	38.8	152.7	199.7	199.7	225.7	287.3	265.5	436.7	500.1	468.4	703.3	762.3	733.1	789.8	854.3	822.1
			Subsoiler	48.0	41.3	44.7	<u>373.7</u>	268.5	271.1	374.7	366.7	370.7	<u>582.1</u>	586.7	584.4	<u>845.6</u>	837.9	841.9	<u>931.7</u>	917.7	924.7
	E ₂	PC ₁	Disc harrowing	80.4	70.6	75.6	334.9	320.3	327.6	440.4	417.4	428.9	658.5	636.2	647.4	905.6	881.5	893.6	1001	977.5	989.2
			Pit-planting	52.2	46.7	46.8	238.6	238.5	228.3	328.1	305.8	316.4	556.0	531.8	543.8	813.9	799.8	806.9	911.2	985.2	903.2
			Subsoiler	80.2	83.6	<u>83.6</u>	351.7	339.1	<u>345.4</u>	451.9	439.9	<u>445.9</u>	658.7	640.9	<u>649.8</u>	914.2	885.8	<u>900</u>	998.4	970.2	<u>994.3</u>
Volume	E ₁	EC _v	Disc harrowing	-	-	-	-	-	-	-	-	50.7	<u>60.2</u>	55.4	94	<u>107.6</u>	100.8	111.9	<u>126.2</u>	119.2	
			Pit-planting	-	-	-	-	-	-	-	-	30.9	36.8	33.9	67.9	79.1	73.5	91.4	102.5	96.9	
			Subsoiler	-	-	-	-	-	-	-	-	<u>55.1</u>	53.1	54.1	<u>109.5</u>	100.2	104.9	<u>130.6</u>	120.1	125.2	
	E ₂	PC ₁	Disc harrowing	-	-	-	-	-	-	-	-	72.4	67.3	69.8	123.4	117.5	120.5	146.2	142.6	144.6	
			Pit-planting	-	-	-	-	-	-	-	-	48.7	43.7	46.2	95.6	90.2	92.9	124.1	115.5	119.8	
			Subsoiler	-	-	-	-	-	-	-	-	72.5	67.9	<u>70.2</u>	124.1	120.1	<u>122.1</u>	146.1	142.7	<u>146.4</u>	

[†]The covariate used in the model is indicated: EC_v: bipole vertical electroconductivity; PC₁: first axis of the principal component including all soil properties.

[‡] If the tillage treatment by management zone is significantly different from zero, the best treatment in each zone is indicated. Otherwise, the overall best treatment is indicated.

A significant interaction between management zone and tillage treatment was found for E_1 for all dates except date1 (Table 7). In general, in zone 1 of E_1 with larger values of EC, the subsoiler tillage treatment was the best treatment for both plant height and volume. In zone 2 in E_1 the best treatment was the disc harrowing. We did not find a significant interaction between tillage treatment and management zone for plant height and volume in E_2 (Table 7). The single best treatment was subsoiler. However, no significant differences were found between subsoiler and disc harrowing in E_2 .

4.5. DISCUSSION

This study evaluated the effect of tillage intensity on plant growth in afforestation with Eucalyptus. We compared alternatives to improve mean comparison among treatments and tools to delineate site-specific management in soils with large spatial variability. Spatial variability was characterized with several soil properties. Soil electroconductivity showed high values in general. Higher values of electroconductivity are expected with larger values of soil humidity and further away from the parent rock. Coefficients of variation were small in comparison with other studies (Cetin and Kirda, 2003; Yan et al., 2007). This could be explained by the size of the studied area, we used a relatively small area (0.9 hectares). The EC_h and EC_v showed a strong spatial structure with a high correlation. This pattern is not unexpected due to them being the same variable evaluated across different sections of the soil (Corwin and Lesch, 2005).

Incorporating spatial information from soil properties improved the model fit. The gain achieved by incorporating spatial information has been addressed in agricultural experiments with small plots (Brownie et al., 1993; Casler, 1999; Qiao et al., 2000; Smith y Casler, 2004) as well as in forest experiments with experimental units consisting of single trees (Anekonda y Libby, 1996; Mummery et al., 1999; Costa e Silva et al., 2001). However, most of these studies model between-plots spatial

variation while our main effort was to account for within-plot spatial variation. Strong spatial patterns occurring in short distances within large plots are usually not considered in classic analysis (Dutkowski et al., 2002). Electroconductivity was the best covariate for E_1 . This indicates that there is a gain by using soil covariates. However, since we did not study other soil covariates, it is not possible for us to generalize this pattern. On the other hand, in E_2 where a thorough soil characterization was conducted, a multivariate approach was optimal. This is similar to what other authors found for the multivariate approach (Officer et al., 2004; Moral et al. 2010; Córdoba et al. 2012).

The date in which the soil properties is evaluated do not have a significant impact on the ability to improve the model fit. This indicates a stable pattern of these soil properties in time. Spatial stability of electroconductivity was evaluated in other studies finding similar results (Hartsock et al., 2000; Farahani y Buchleiter, 2004).

We found a significant tillage treatment by either soil covariate or management zone in E_1 . Both, our covariate model as well as our zone-management model indicate that subsoiler was the best tillage treatment when EC was high. On the other hand, in E_2 , no interaction was found. In summary, site characterization should focus in evaluating thoroughly the most relevant variables in a single date and use them to improve model fit. Multivariate analysis seems to perform better than using variables one at a time.

Management zone delimitation by the fuzzy-c criterion has been successful in other studies with agricultural species (Fridgen et al., 2004; Reyniers et al., 2006; Kyaw et al., 2008), but no studies were found forestry studies. Specifically, multivariate clustering algorithms have been used in other studies (Morari et al., 2009; Xin-Zhong et al., 2009). We found a significant tillage treatment by management zone in E_1 for both plant height and volume indicating that the superior tillage treatment was different for the two zones; subsoiler was the superior tillage treatment in zone 1 while disc harrowing was the superior tillage treatment in zone 2. The experiment E_1

was located on a rocky and shallow soil. Additionally, zone 1 was associated to larger values of electroconductivity. This is probably the reason why the subsoiler tillage treatment was optimal in this zone. In Experiment E₂ where soil conditions are more appropriate for forest plantation and root development, no significant tillage treatment by management zone interaction was found. Even though the subsoiler treatment was superior in this experiment, non-significant differences were found between subsoiler and disc harrowing tillage treatments. Most of the tillage experiments are conducted on specific soil types (Gonçalves et al., 2004) and therefore, drawing general recommendations for site-specific management is hard. Holz et al. (1999) proposed that in general, any type of tillage produces benefit except where soils are well drained and structured. Our results indicate that pit-planting seems to be the worst treatment regardless of the soil characteristics. Soils with low aptitude for tree growth and establishment require a soil characterization and site description to determine zone-specific management. On the other hand, with better soils, less intensive treatments could be implemented to reduce costs and soil erosion (Gonçalves et al., 2002).

4.6. CONCLUSIONS

Having an appropriate site preparation is crucial for a proper plant establishment and growth. Tillage practices have an important incidence in the outcome of forest production affecting both plant height as well as total wood volume production. Site characterization using a multivariate approach is a useful tool to characterize within plot spatial variability, improve treatment comparison, and delineate management zones to conduct site-specific management. Zones with better conditions did not show differences between subsoiler and disc harrowing treatments. Disc harrowing is recommended for these areas because in addition to being equally good in terms of plant height and wood production, lower costs, erosion risks, and environmental impacts are expected from less intensive tillage systems. In zones with growth limitations, site-specific management could be used to improve results.

4. 7. REFERENCES

Anekonda, T.S., Libby, W.J., 1996. Effectiveness of nearest-neighbor data adjustment in a clonal test of redwood. *Silvae Genetics*. 45, 46–51.

Brownie, C., Bowman, D.T., Burton, J.W., 1993. Estimating spatial variation in analysis of data from yield trials, a comparison of methods. *Agronomy Journal*. 85, 1244-1253.

Casler, M., 1999. Spatial variation affects precision of perennial cool-season forage grass trials. *Agronomy Journal*. 91(1), 75-81.

Cetin, M., Kirda, C., 2003. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Journal of Hydrology*. 272, 238–249.

Córdoba, M., Balzarini, M., Bruno, C., Costa, J.L., 2012. Análisis de componentes principales con datos georreferenciados. *Revista FCA UNCUYO*. 44(1), 27-39.

Corwin, D.L., Lesch, S.M., 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*. 95, 455-471.

Corwin, D.L., Lesch, S.M., 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.* 46, 11–43.

Costa e Silva, J., Dutkowski, G.W., Gilmour, A.R., 2001. Analysis of early tree height in forest genetic trials is enhanced by including a spatially correlated residual. *Canadian Journal of Forest Research*. 31, 1887–1893.

Cressie, N., 1991. *Statistics for spatial data*. New York, John Wiley, 900 p.

Cullis, B.R., McGilchrist, C.A., 1990. A model for the analysis of growth data from designed experiments. *Biometrics*. 46, 131-142.

Cullis, B.R., McGilchrist, C.A., Gleeson, A.C., 1991. Error model diagnostics in the general linear model relevant to the analysis of repeated measurements and field experiments. *Journal of the Royal Statistical Society*. 53 (2), 409-416.

Diggle, P., 1988. An approach to the analysis of repeated measurements. *Biometrics*. 44, 959-971.

Dutkowski, G.W., Costa e Silva, J., Gilmour, A.R., Lopez, G.A., 2002. Spatial analysis methods for forest genetic trials. *Can. J. For. Res.* 32(12), 2201-2214.

Farahani, H.J., Buchleiter, G.W., 2004. Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado. *Transactions of the ASAE*. 47(1), 79-90.

Fisher, R., Binkley, D., 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons, Inc., NY, pp. 489.

Flynn, R., 2005. *Eucalyptus: Having An Impact on the Global Solidwood Industry*. Wood Resources International, p. 4.

Franzen, D.W., Hopkins, D.H., Sweeney, M.D., Ulmer, M.K., Halvorson, A.D., 2002. Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. *Agron. J.* 94, 381–389.

Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, J. W., Fraisse, C. W., 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*. 96, 100- 108.

Geonics Limited, 1998. EM38 Ground Conductivity Meter Operating Manual, May 1998. Mississauga, Ont., Canada.

Gleeson, A.C.; Cullis, B.R., 1987. Residual maximum likelihood estimation (REML) of a neighbour model for field experiments. *Biometrics*. 43, 277-288.

Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L., Wichert, M.C.P., Gava, J.L., 2002. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. In: Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L. (Eds.), *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba, IPEF, pp. 131–204.

Gonçalves, J.L.M, Stape, J.L., Laclau, J.P., Smethurst, P., Gava, J.L., 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*. 193, 45-61.

Grondona, M.R., Crossa, J, Fox, P.N., Pfeiffer, W.H. 1996. Analysis of variety yield trials using two-dimensional separable ARIMA processes. *Biometrics* 52:763–770.

Hartsock, N. J., Mueller, T. G., Thomas, G. T., Barnhisel, R. I., Wells, K. L., & Shearer, S. A, 2000. Soil electrical conductivity variability. In P. C. Robert, R. H. Rust & W. E. Larson (Eds.) *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*. Madison, WI: American Society of Agronomy Miscellaneous Publication.

Holz, G.K., Smethurst, P.J., Pongracic, S., 1999. Responses to cultivation in eucalypt tree-farms in south-eastern Australia. In: Ellis R.C., Smethurst, P.J. (Eds.), *Practising Forestry Today*. Proceedings of the 18th Biennial Conference of the Institute of Foresters of Australia, pp. 161–164.

Hutchinson, M.F., Gessler, P.E., 1994. Splines more than just a smooth interpolator. *Geoderma*. 62, 45-67.

Joyce, D., Ford, R., Fu, Y.B., 2002. Spatial patterns of tree height variations in a black spruce farm-field progeny test and neighbors-adjusted estimations of genetic parameters. *Silvae genetica*. 51, 13-18.

Kyaw, T., Ferguson, R.B., Adamchuk, V.I., Marx, D.B., Tarkalson, D.D., McCallister, D.L., 2008. Delineating site-specific management zones for pH-induced iron chlorosis. *Precision Agriculture*. 9(1-2), 71-84.

Martins, A., Pinto, M.G., 2004. Efeitos da Ripagem Localizada Versus Ripagem Contínua nas Propriedades do Solo e na Resposta das Plantas em Novos Povoamentos Florestais. *Silva Lusitana*. 12 (2), 191–202.

Matern, B., 1960. *Spatial Variation*. Technical report, Statens Skogsforsningsinstitut, Stockholm.

McLaughlin, J.M., Gale, M.R., Jurgensen, M.F., Trettin, C., 2000. Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate. *Forest Ecology and Management*. 129, 7-23.

Moral, F. J., Terrón, J. M., Marques da Silva, J. R., 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Till. Res*. 106, 335-343.

Morari, F., Castrignano, A., Pagliarin, C., 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. *Comp. Electron. Agric*. 68, 97–107.

Mummery, D., Battaglia, M., Beadle, C.L., Turnbull, C.R.A., McLeod, R., 1999. An application of terrain and environmental modelling in a large-scale forestry experiment. *Forest Ecology and Management*. 118, 149-159.

Officer, S.J., Kravchenko, A., Bollero, G.A., Sudduth, K.A., Kitchen, N.R. Wiebold, W.J., Palm, H.L., Bullock, D.G., 2004. Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values. *Plant and soil*. 258, 269-280.

Qiao, C.G., Basford, K.E., DeLacy, I.H., Cooper, M., 2000. Evaluation of experimental designs and spatial analyses in wheat breeding trials. *Theor. Appl. Genet.* 100, 9–16.

Querejeta, J.I., Roldán, A., Albadalejo, J., Castillo, V., 2001. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest Ecology and Management*. 149, 115–128.

Reyniers, M., Maertens, K., Vrindts, E., De Baerdemaeker, J., 2006. Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. *Soil and Tillage Research*. 88, 262-273.

Rhoades, J.D., Corwin, D.L., Lesch, S.M., 1999. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: D.L. Corwin, K. Loague, and T.R. Ellsworth (ed.) *Assessment of non-point source pollution in the vadose zone*. *Geophysical Monogr.* 108. AGU, Washington, DC. p. 197-215.

Ripley BD. 1981. *Spatial Statistics*. John Wiley & Sons, Inc., NY, USA. pp. 252.

SAS Institute Inc., 2005. Cary, NC, USA.

Schepers, A.R., Shanahan, J.F., Liebig, M.K., Schepers, J.S., Johnson, S.H., Luchiari Jr., A., 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agron. J.* 96, 195–203.

Schepers, J.S., Schlemmer, M.R., Fergunson, R.B., 2000. Site-specific considerations for managing phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29, 125–130.

Smith CW. 1998. Three decades of site preparation research: lessons for the future. In: Maclennan, L. (Ed.), *ICFR Jubilee Seminar*. Institute for Commercial Forestry Research, Pietermaritzburg. *ICFR Bulletin* 1/98: 28-31.

Smith, K.F., Casler, M.D., 2004. The use of spatially adjusted herbage yields during the analysis of perennial forage grass trials across locations. *Crop Science.* 44, 56–62.

Smith, A.B., Cullis, B.R., Thompson, R., 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. *Journal of Agricultural Science.* 143, 449-462.

Topp G.C., Ferré P.A., 2002. Thermogravimetric determinations using convective oven-drying, pp. 422-424. In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds). *Methods of soil analysis. part 4, physical methods.* Soil Science Society of America, Inc. Madison.

van Schilfgaarde, J., 1999. Is precision agriculture sustainable? *Am. J. Altern. Agric.* 14(1), 43-46.

Villalba, J., Montouto, C., Cazaban, J., Carballo, P., Bentancur, O., 2010. Efecto de laboreo sobre la eficacia de herbicidas y el crecimiento de *Eucalyptus* sp. *Agrociencia Uruguay.* 14, 45-54.

Wetzel, S., Burgess, D., 2001. Understory environment and vegetation response after partial cutting and site preparation in *Pinus strobus* L. stands. *Forest Ecology and Management* 151, 43–59.

Worrell, R., Hampson, A., 1997. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review. *Forestry*. 70 (1), 61– 85.

Xin-Zhong, W., Guo-Shun, L., Hong-Chao, H., Zhen-Hai, W., Qing-Hua, L., Xu-Feng, L., Wei-Hong, H., Yan-Tao, L., 2009. Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. *Comp. Electron. Agric.* 65, 168–175.

Yan, L., Zhou, S., Feng, L., Hong-Yi, L., 2007. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Computers and Electronics in Agriculture*. 56, 174–186.

Zas, R., 2006. Iterative kriging for removing spatial autocorrelation in analysis of forest genetic trials. *Tree Genetics and Genomes*. 2, 177-185.

5. DISCUSIÓN

5.1. VARIABILIDAD TEMPORAL EN MODELOS DE CRECIMIENTO FORESTAL

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que el seguimiento individual de árboles a través del tiempo en este tipo de experimentos resulta de gran relevancia, ya que permite tener en cuenta las correlaciones temporales de las observaciones, las cuales al ser incorporadas dentro de los modelos de crecimiento mostraron un efecto positivo sobre la mejora de la eficiencia de estimación de medias de tratamiento. La generación de metodologías que abordan el análisis de correlaciones temporales ha sido bien desarrollada en comparación a aquellas que han sido desarrolladas para el análisis de correlaciones espaciales (Diggle, 1996), siendo las mismas ampliamente utilizadas en estudios de crecimiento forestal, con buenos desempeños en comparación a modelos que no asumen ningún tipo de correlación temporal (Monserud, 1986; Woollons y Norton, 1990). En general, las principales variables que explican las variaciones temporales en el crecimiento de árboles se asocian al régimen de precipitaciones y temperaturas, los ciclos estacionales y a las fluctuaciones climáticas de largo plazo (Kung y Yang, 1983).

Diferentes estrategias para modelar datos correlacionados en el tiempo fueron evaluadas a través del uso de diferentes estructuras de varianzas y covarianzas tanto para condiciones contrastantes de suelo como para variables de crecimiento inicial y a tiempo de cosecha en *Eucalyptus*. En la mayoría de las situaciones se encontró que la utilización de estructuras de varianzas y covarianzas que permitan varianzas heterogéneas en los diferentes momentos y un peso mayor a la correlación con la medida de tiempo más cercana ANTE(1) y ARH(1) fueron las óptimas. En general, la mayoría de los trabajos que evaluaron diferentes alternativas para el análisis de datos correlacionados en el tiempo concluyen que el uso de modelos autorregresivos fueron los que obtuvieron un mejor desempeño (Monserud, 1986; Woollons y Norton 1990; Tasissa y Burkhart, 1998), coincidiendo con los

resultados de nuestro trabajo, con la diferencia de que además evaluamos modelos que asumen heterogeneidad de varianzas en el tiempo.

Tanto ARH como ANTE(1) son estructuras con varianzas y covarianzas heterogéneas que asumen diferentes varianzas y correlaciones entre pares de datos a través del tiempo, asumiendo la estructura ARH(1) un espaciamiento regular en el tiempo, siendo ANTE(1) más flexible a diferentes distancias entre medidas (Wolfinger, 1996). Es conocido que las etapas tempranas de crecimiento en Eucalyptus a medida que avanzan las mediciones se genera una mayor variabilidad entre observaciones (Davidian y Giltinan, 2003). Esto podría estar explicando el mejor desempeño de este tipo de estructuras para modelar datos provenientes de experimentos de evaluación de crecimiento forestal con medidas repetidas en el tiempo.

5.2. VARIABILIDAD ESPACIAL Y ADOPCIÓN DE MEDIDAS DE MANEJO SITIO ESPECÍFICO.

La alta variabilidad espacial presente en suelos es debida a procesos físicos, biológicos y químicos que actúan simultáneamente, con diferentes intensidades. En consecuencia, la adopción de medidas de manejo uniforme que no tomen en cuenta dicha variabilidad no resulta ser una estrategia de manejo eficiente (Moral et al. 2010). Los experimentos de laboreos forestales parcelarios utilizan unidades experimentales de grandes dimensiones, las cuales se ubican generalmente sobre sitios con condiciones de alta variabilidad de suelos (Fu et al., 1999; Dutkowski et al., 2002; Hamann et al., 2002; Zas, 2006a, 2007), generando una fuerte variabilidad intraparcilaria y por ende datos autocorrelacionados, haciendo necesaria la incorporación de esta información en los modelos de crecimiento para evitar obtener resultados y conclusiones erróneas (Dutilleul, 1993).

Si bien la utilización de diseños experimentales mejoran la eficiencia estadística al momento de estimar medias de tratamientos, en muchas situaciones no tienen la capacidad de contemplar los patrones de variabilidad espacial que presentan las variables de interés a nivel intraparcelarario (Zas, 2006b). En los últimos años han aparecido diferentes técnicas que evaluaron diferentes alternativas para la incorporación de información de variabilidad espacial, encontrando resultados positivos en ensayos de campo tanto en experimentación agrícola como forestal (Qiao et al., 2000; Hong et al., 2005; Dutkoski et al., 2006; Zas, 2006a). Nuestros resultados indican que todas las estrategias evaluadas para incorporar información de variabilidad dentro de los modelos de análisis (errores correlacionados, regresiones ponderadas geográficamente, generación de mapas de variabilidad y uso de predicciones como covariable) han sido positivas tanto en términos de ajuste de modelos como en la eficiencia al momento de detectar diferencias significativas entre laboreos.

El relevamiento georeferenciado de la electroconductividad a nivel de suelo es una herramienta eficiente al momento de caracterizar la variabilidad espacial y ha sido valorada como fundamental al momento de delimitar manejos sitio específico en diversos rubros de producción (Corwin y Lesch, 2003). Es una medición que puede ser relevada de manera intensiva, con una fácil implementación, económica y que está generalmente relacionada con varias propiedades fisico-químicas del suelo a través de un amplio rango de tipos de suelos (Sudduth et al., 2005). La evaluación del uso de electroconductividad en los ensayos de la localidad de Mellizos fue consistente al concluir que el uso de esta información resultó de gran utilidad al momento de caracterizar los patrones de variabilidad existentes tanto a nivel del ensayo como dentro de las unidades experimentales. Por otro lado, el uso de herramientas geoestadísticas multivariadas, lograron resumir de manera adecuada la variabilidad conjunta de las variables más relevantes del suelo, al igual que lo mostrado en trabajos similares (Morari et al., 2009; Xin-Zhong et al., 2009; Córdoba et al., 2012). Si bien el uso del primer componente principal fue la mejor alternativa cuando se analizaron todas las covariables dentro de los modelos de análisis, las

mejoras de mayor magnitud fueron obtenidas a través del uso las diferentes covariables por separado en todas las situaciones evaluadas. Teniendo en cuenta que la EC por si misma es una medida que resume la variabilidad conjunta de variables relevantes del suelo, podríamos concluir que el simple relevamiento del sitio a forestar a través del uso de electroconductímetro permitirá no solo la delimitación de zonas de manejo previas a la plantación, sino que también aportará en la mejora de las estimaciones de medias de tratamientos.

Por otro lado, el uso de esta información de variabilidad espacial fue útil para predecir variables de suelo en zonas no relevadas y en la delimitación de zonas de manejo homogéneas y contrastantes dentro del experimento. Los algoritmos de clasificación de puntos mediante técnicas de cluster análisis y los indicadores de agrupamiento evaluados, permitieron no sólo delimitar zonas sino que también fueron de utilidad para determinar el número óptimo de zonas de manejo (Fridgen et al., 2004; Schepers et al., 2004; Moral et al., 2010). La clasificación de todos los puntos de plantación en diferentes zonas de manejo, permite concluir que la utilización de manejos uniformes a lo largo de toda el área de plantación no son óptimos cuando las condiciones son limitantes para el desarrollo de las plantas, debiéndose en estos casos aplicar laboreos diferenciados por las condiciones del sitio para obtener mejores resultados productivos y un uso más racional de los recursos.

5.3. EFECTO DE INTENSIDAD DE LABOREO SOBRE MORTALIDAD Y COMPETENCIA DE ÁRBOLES.

Los pocos trabajos que se han enfocado en el impacto de diferentes intensidades de laboreos sobre la mortalidad de árboles coinciden en que la utilización de alguna técnica de preparación de sitio presenta efectos positivos que fueron moderadas por sitio y algunas diferencias entre técnicas (Graham et al., 2009). En nuestro experimento, la mayor reducción del número de plantas a nivel de todo el ensayo se dió durante la primera temporada estival post plantación, independientemente del

tipo de laboreo utilizado. Esto coincide con varios trabajos que han reportado el mismo resultado y asocian esta disminución a la poca capacidad que tiene la planta de implantación durante un periodo crítico de estrés hídrico y la baja capacidad de exploración radicular (Cogliastro et al., 1997; Wheeler, 2002; Bocio et al., 2004; Fonseca et al., 2011).

Bajo condiciones favorables para el desarrollo radicular, los diferentes tratamientos no mostraron diferencias en el número de plantas que permanecieron vivas dentro de la parcela, mientras que en condiciones de suelo desfavorables y la capacidad de exploración radicular es limitada, los laboreos más intensivos mostraron un mejor desempeño en comparación a plantaciones al pozo. Esto es coincidente con los resultados encontrados por Wheeler et al. (2002), quienes afirman que los niveles de mortalidad de plantas se encuentran afectados mayoritariamente por las condiciones del sitio y no tanto por el efecto directo que generan las diferentes alternativas de preparación del sitio. El estudio de la supervivencia de plantas bajo tratamientos de laboreos ha sido abordado por otros autores, los cuales han encontrado que la mayor permanencias de plantas dentro de la parcela se encuentra directamente asociado a los efectos de la competencia con los vecinos más cercanos y la adaptación que tiene la planta al microambiente (Magnussen, 1994; Huhn and Langner, 1995; Kenkel et al., 1997). Teniendo en cuenta que bajo ambos escenarios de evaluación los patrones de competencia no mostraron diferencias de magnitud, podríamos estar asumiendo que la principal causa que limitó la supervivencia de plantas fueron las condiciones del sitio, sobre las cuales el tipo de laboreo utilizado solo aportó positivamente cuando las condiciones del suelo fueron limitantes. Es por esto que el uso de manejos uniformes que no tomen en cuenta las condiciones del sitio se presentan como una alternativa poco eficiente al momento de obtener un mayor número de árboles por parcela y volumen de madera al final del turno.

El objetivo de evaluar y cuantificar el efecto de la competencia entre árboles como información a incluir dentro de los modelos de análisis se debe a que en muchas situaciones pueden generarse diferentes patrones de competencia dentro una misma unidad experimental o entre las mismas, lo cual puede en muchos casos llevar a favorer o desfavorecer el crecimiento individual de árboles, pudiendo afectar de manera significativa las estimaciones de efectos de tratamientos (Dutkowski et al., 2002; Hamann et al., 2002; Joyce et al., 2002). La competencia entre árboles es una particularidad de los ensayos de larga duración, afectando las correlaciones entre vecinos más cercanos (Magnussen, 1994). El uso de información del número de vecinos más cercanos como covariable bajo las dos formas evaluadas, permitió mejorar la eficiencia de estimación de medias de tratamientos y sus respectivas comparaciones. Esto permite determinar a través de una herramienta sencilla y práctica, la importancia que tiene el tener en cuenta algún indicador de competencia dentro de los modelos de crecimiento individual de árboles, como lo han indicado diversos autores (Magnussen, 1993; Joyce et al., 2002). En resumen, la utilización de diferentes intensidades de laboreos no afectó de manera significativa la mortalidad de plantas en ninguna de las situaciones por lo que podría asumirse un patron aleatorio, lo cual estaría indicando que las condiciones del sitio son las que limitan en mayor medida la permanencia de la planta en la parcela, siendo de menor magnitud el impacto del tipo de laboreo sobre esta variable.

5.4. EFECTO DE LA INTENSIDAD DE LABOREO SOBRE VARIABLES DE CRECIMIENTO.

La adopción de las diferentes técnicas de laboreo en la preparación del sitio forestal para la instalación de nuevas plantaciones se encuentra fuertemente asociado a las condiciones del sitio, las propiedades del suelo y el régimen de precipitaciones de la zona (Graham et al 2009). La utilización de plantaciones al pozo en la preparación del sitio ha sido evaluada como la peor alternativa en las diferentes condiciones de suelo evaluadas y tanto para crecimiento inicial de *Eucalyptus* como en producción

de madera a tiempo de cosecha. Si bien este tipo de prácticas generan un impacto comparativamente menor sobre propiedades físicas del suelo como: porosidad, densidad, resistencia a la prentación, etc. (Schonau et al.,1981). Si bien son características deseadas en términos de riesgo de erosión, no permiten en la mayoría de las situaciones que las plantas expresen su potencial de crecimiento, convirtiéndose en un laboreo marginal en comparación a prácticas más intensivas.

El ensayo de 10 años de duración mostró que no se encontraron diferencias significativas entre las diferentes intensidades de laboreo en términos de altura, diámetro de planta, sin embargo existieron diferencias significativas en volumen de madera, asociado a las diferencias de supervivencia de plantas (González et al., 2012). Mientras que en la evaluación de crecimiento inicial de árboles, se encontró que en condiciones apropiadas del sitio para el desarrollo de los árboles, laboreos con excéntrica o subsolador no lograron diferenciarse significativamente, asumiendo que cualquiera de las dos alternativas son similares tanto en altura como en diámetro de planta y superiores a plantación al pozo. Sin embargo, cuando las condiciones del sitio fueron peores para el desarrollo de las plantas, se encontró que laboreos con subsolador fueron significativamente superiores en altura y volumen de madera producido a laboreos con excéntrica, en las áreas con mayores niveles de EC dentro del sitio. No es claro en la actualidad cual es la estrategia óptima al momento de preparar el área a forestar, esto es debido a que algunos trabajos lograron encontrar laboreos superiores (Schonau et al. 1981; Ellis 1990) mientras que otros trabajos no se encontraron diferencias entre técnicas (Chamshama y Hall 1987; Lacey et al. 2001; Ritson and Pettit 1992; Measki et al. 1998). En este sentido, nuestros resultados concuerdan con lo expresado por Graham et al (2009) en su revisión, quienes aseguran que las técnicas de preparación de sitio están muy afectadas por las condiciones del mismo, siendo esto una posible explicación de la inconsistencia de los resultados.

En los ensayos de crecimiento inicial se pudo apreciar que las diferencias iniciales en altura de planta fueron disminuyendo significativamente a medida que avanzaron las

mediciones en el tiempo. Ritson y Pettit (1992) encontraron la presencia de efectos positivos sobre el crecimiento en algunos de los laboreos evaluados, sin embargo los mismos también indican que esos efectos se fueron diluyendo en el tiempo, mientras que por otro lado McKimm and Flinn (1979) concluyen en su trabajo que los efectos positivos de las técnicas de laboreo fueron persistentes a lo largo de los 5 años iniciales de crecimiento. Nuestra evaluación a turno final también indica que no fueron encontradas diferencias significativas a tiempo de cosecha entre los diferentes laboreos, sin embargo existieron diferencias en términos de volumen de madera producido. Esto sugiere que si bien resulta importante evaluar el impacto de las diferentes técnicas de preparación de sitio sobre variables de crecimiento de la planta, las mayores diferencias en términos productivos se asocian a la capacidad que tiene el laboreo de darles las condiciones apropiadas para que la planta permanezca dentro de la parcela y genere un mayor volumen de madera en la misma, ya que las diferencias en crecimiento tienden a diluirse en el tiempo.

Por lo tanto, esto pone en cuestionamiento el uso masivo de herramientas como el subsolador en la estrategia a desarrollar en la preparación de los sitios forestales, ya que solo en condiciones particulares de sitio es un tratamiento que logra superar a laboreos más superficiales. Se espera entonces que la implementación de una estrategia al momento de preparación de los sitios forestales que tenga en cuenta las condiciones del sitio, una buena caracterización de la variabilidad existente a nivel de suelo, el seguimiento individual de árboles (en ensayos de evaluación), el uso apropiado de herramientas geostadísticas y la incorporación de dicha información a los modelos de análisis clásicos, permitan mejorar de manera significativa la eficiencia en la determinación de laboreos superiores y por otro lado adoptar medidas de manejo sitio específicas como la delimitación de zonas, que incidan positivamente sobre indicadores de sustentabilidad y niveles de producción de madera.

6. CONCLUSIONES

La caracterización espacial del área de trabajo previo a la instalación del monte forestal resulta de gran utilidad al momento de definir las estrategias de preparación del sitio. En particular, esta caracterización espacial ha sido bien definida a través del relevamiento de las variables de suelo más relevantes, las cuales al ser analizadas de manera conjunta mediante el uso de herramientas geostadísticas multivariadas, permitieron delimitar zonas de manejos diferenciadas. La identificación y seguimiento individual de árboles a través del tiempo permiten a través de modelos que contemplen correlaciones temporales de los datos y que asumen una adecuada matriz de varianzas y covarianzas, mejorar la eficiencia de estimación de medias de laboreos y sus respectivas comparaciones. Por otro lado, la inclusión de información de variabilidad espacial dentro de los modelos como covariables también fue valorado positivamente, no sólo en la eficiencia de selección de laboreos superiores, sino que también permite delimitar zonas de manejo sitio específico de manera eficiente. La utilización de laboreos diferentes a plantación al pozo fueron los que mostraron los mejores desempeños en términos de crecimiento, sin embargo laboreos más intensivos como el subsolador solo serían necesarios cuando las condiciones del sitio son limitantes para el desarrollo de plantas. Esto se fundamenta en que bajo condiciones poco limitantes, no se encontraron diferencias significativas tanto en mortalidad, competencia, altura de plantas como en volumen de madera producido entre subsolador y excéntrica, por lo que se recomienda la utilización de prácticas menos intensivas, por tratarse de un tipo de laboreo menos costoso, con menor impacto sobre propiedades del suelo y riesgo de erosión y más sostenible en relación al uso de los recursos naturales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Anekonda TS, Libby WJ. 1996. Effectiveness of nearest-neighbor data adjustment in a clonal test of redwood. *Silvae Genetics*, 45: 46–51.
- Bocio I, Navarro FB, Ripoll MA, Jiménez MN, De Simón E. 2004. Holm oak (*Quercus rotundifolia* Lam.) and Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) response to different soil preparation techniques applied to forestation in abandoned farmland. *Annals of Forest Science*, 61: 171-178.
- Boden DI. 1984. Early responses to different methods of site preparation for three commercial tree species. In: IUFRO Symposium on Site Productivity of Fast Growing Plantations, Pretoria and Pietermaritzburg, South Africa, 30 April-11 May 1984, South Africa Forestry Research Institute, Pretoria. 565- 578.
- Brownie C, Bowman DT, Burton JW. 1993. Estimating spatial variation in analysis of data from yield trials, a comparison of methods. *Agronomy Journal*, 85: 1244-1253.
- Burkhardt HE, Gregoire TG. 1994. Forest Biometrics. In: Patil, G.P., Rao, C.R. (Eds.), *Handbook of statistics, Vol. 12, Environmental Statistics*. Elsevier, Amsterdam. 377-407.
- Burrows SN, Gower ST, Norman JN, Diak G, Mackay DS, Ahl DE, Clayton MK. 2003. Spatial variability of aboveground net primary production for a forested landscape in northern Wisconsin. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 2007-2018.
- Califra A, Ruiz A, Alliaume F, Durán A. 2007. Contribución al estudio de los suelos “Algorta”. *Agrociencia Uruguay*, 11: 35-46.

- Carlson CA, Fox TR, Colbert SR, Kelting DL, Allen HL, Albaugh TJ. 2006. Growth and survival of *Pinus taeda* in response to surface and subsurface tillage in the southeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 234: 209–217.
- Casler M. 1999. Spatial variation affects precision of perennial cool-season forage grass trials. *Agronomy Journal*, 91(1): 75-81.
- Cavichiolo SR, Dedecek RA, Gava JL. 2003. Avaliação do Efeito do Sistema de Preparo em Solos de Diferentes Texturas, na sua Resistência Mecânica e na Produtividade da Rebrotas de *Eucalyptus saligna*. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 47: 83-98.
- Cetin M, Kirda C. 2003. Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. *Journal of Hydrology*, 272: 238–249.
- Chamshama SAO, Hall JB. 1987. Effects of site preparation and fertilizer application at planting of *Eucalyptus tereticornis* at Morogoro, Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 18: 103- 112.
- Cochran WG, Cox GM. 1957. *Experimental designs*, 2nd edn. John Wiley & Sons, New York. 611 pp.
- Cogliastro A, Gagnon D, Bouchard A. 1997. Experimental determination of soil characteristics optimal for the growth of ten hardwoods planted on abandoned farmland. *Forest Ecology and Management*, 96: 49–63.
- Córdoba M, Balzarini M, Bruno C, Costa JL. 2012. Análisis de componentes principales con datos georreferenciados. *Revista FCA UNCUYO*, 44(1): 27-39.

- Cordy C, Griffith D. 1993. Efficiency of least squares estimators in the presence of spatial autocorrelation. *Communications in Statistics*, 22: 1161-1179.
- Corwin DL, Lesch SM. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46: 11–43.
- Corwin DL, Lesch SM. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*, 95: 455-471.
- Costa e Silva J, Dutkowski GW, Gilmour AR. 2001. Analysis of early tree height in forest genetic trials is enhanced by including a spatially correlated residual. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 1887–1893.
- Cressie N. 1991. *Statistics for spatial data*. New York, John Wiley, 900 p.
- Cullis BR, McGilchrist CA, Gleeson AC. 1991. Error model diagnostics in the general linear model relevant to the analysis of repeated measurements and field experiments. *Journal of the Royal Statistical Society*, 53(2): 409-416.
- Cullis BR, McGilchrist CA. 1990. A model for the analysis of growth data from designed experiments. *Biometrics*, 46: 131-142.
- Davidian M, Giltinan DM. 2003. Nonlinear models for repeated measurements data: An overview and update. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 8: 387-419.
- Denis Lepiane V, Garcia Préchac F. 1997. Estimación del factor C de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos en la instalación de montes de rendimiento de Eucaliptos. *Agrociencia Uruguay* 1(1): 30-37.

- Diggle PJ. 1996. Spatial analysis in biometry. In: Armitage, P., David H.A. (Eds.). Advances in biometry: 50 years of the International Biometric Society. Wiley, New York, pp. 363-384.
- Diggle PJ. 1988. An approach to the analysis of repeated measurements. *Biometrics*, 44: 959-971.
- Donoso S. 1999. Efecto del laboreo sobre la biomasa de *Eucalyptus globulus* en el sureste de España. *Investigación agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 8(2): 377-386.
- Dovciak M, Frelich LE, Reich PB. 2001. Discordance in spatial patterns of white pine (*Pinus strobus*) size-classes in a patchy near-boreal forest. *Journal of Ecology*, 89: 280-291.
- Durán A, Califra A, Molfino JH. 2005. Aplicación de la Taxonomía de Suelos en Clasificación y Cartografía edafológica en Uruguay. En CD Primera Reunión Uruguaya de la Ciencia del Suelo. 6 y 7 de octubre de 2005, Colonia, Uruguay.
- Dutilleul P. 1993. Spatial heterogeneity and the design of ecological field experiments. *Ecology*, 74: 1646-1658.
- Dutkowski GW, Costa e Silva J, Gilmour AR, López GA. 2002. Spatial analysis methods for forest genetic trials. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(12): 2201-2214.
- Eghball B, Varvel GE. 1997. Fractal analysis of temporal yield variability of crop sequences: Implications for site-specific management. *Agronomy Journal*, 89: 851-855.

- Farahani HJ, Buchleiter GW. 2004. Temporal stability of soil electrical conductivity in irrigated sandy fields in Colorado. *Transactions of the ASAE*, 47(1): 79-90.
- Fisher R, Binkley D. 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons, Inc., NY, pp. 489.
- Fisher RA. 1935. *The Design of Experiments*. Oliver and Boyd, Edinburg. 252 pp.
- Flynn R. 2005. *Eucalyptus: Having An Impact on the Global Solidwood Industry*. Wood Resources International, p. 4.
- Fonseca F, De Figueiredo T, Martins A. 2011. Survival and early growth of mixed forest stands installed in a Mediterranean Region: Effects of site preparation intensity. *Forest Ecology and Management*, 262(10): 1905-1912.
- Forrester DI, Medhursta JL, Wooda M, Beadle CL, Valencia JC. 2010. Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from Eucalyptus plantations: An Australian perspective. *Forest Ecology and Management*, 259: 1819–1835.
- Fox JC, Bi H, Ades PK. 2007. Spatial dependence and individual-tree growth models I. Characterizing spatial dependence. *Forest Ecology and Management*, 245: 10-19.
- Fox JC, Ades PK, Bi H. 2001. Stochastic structure and individual-tree growth models. *Forest Ecology and Management*, 154; 261-276.
- Franzen DW, Hopkins DH, Sweeney MD, Ulmer MK, Halvorson AD. 2002. Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. *Agronomy Journal*, 94: 381–389.

- Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold JW, Fraisse CW. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96: 100-108.
- Fu YB, Yanchuk AD, Namkoong G. 1999. Spatial patterns of tree height variations in a series of Douglas-fir progeny trials: implications for genetic testing. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 714–723.
- García Préchac F, Pérez Bidegain M, Christie S, Santini P. 2001. Efecto de la Intensidad de Laboreo en el Crecimiento Áereo y Radicular de *Eucalyptus dunnii* y sobre algunas Propiedades Físicas y Químicas del Suelo. *Agrociencia Uruguay*, 5(1): 1-9.
- Geonics Limited, 1998. EM38 Ground Conductivity Meter Operating Manual, May 1998. Mississauga, Ont., Canada.
- Gleeson AC, Cullis BR. 1987. Residual maximum likelihood estimation (REML) of a neighbour model for field experiments. *Biometrics*, 43: 277-288.
- Gonçalves JLM, Stape JL, Laclau JP, Smethrust P, Gava JL. 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 193: 45-61.
- Gonçalves JLM, Stape JL, Wichert MCP, Gava JL. 2002. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. In: Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L. (Eds.), *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba, IPEF, pp. 131–204.
- Graham S, McGinness HM, O’Connell DA. 2009. Effects of management techniques on the establishment of eucalypt seedlings on farmland: a review. *Agroforestry systems*, 77: 59-81.

- Gregorie T, Schabenberger O, Barrett J. 1995. Linear modeling of irregularly spaced, unbalanced, longitudinal data from permanent plot measurements. *Canadian Journal of Forest Research*, 25: 137-156.
- Grondona MR, Crossa J, Fox PN, Pfeiffer WH. 1996. Analysis of variety yield trials using two-dimensional separable ARIMA processes. *Biometrics*, 52:763–770.
- Haining RP. 1990. *Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Sciences*. Cambridge university press, Cambridge.
- Hamann A, Namkoong G, Koshy MP. 2002. Improving precision of breeding values by removing spatially autocorrelated variation in forestry field experiments. *Silvae Genetica*, 51: 210-215.
- Hartsock NJ, Mueller TG, Thomas GT, Barnhisel RI, Wells, KL, Shearer SA. 2000. Soil electrical conductivity variability. In P. C. Robert, R. H. Rust & W. E. Larson (Eds.) *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*. Madison, WI: American Society of Agronomy Miscellaneous Publication.
- Hong N, White JG, Gumpertz ML, Weisz R. 2005. Spatial Analysis of Precision Agriculture Treatments in Randomized Complete Blocks: Guidelines for Covariance Model Selection. *Agronomy Journal*, 97: 1086-1093.
- Horn R, Domzal H, Slowinska-Jurkiewicz A, Ouwerkerk C. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable ansoils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35: 23-36.
- Holz GK, Smethurst PJ, Pongracic S. 1999. Responses to cultivation in eucalypt tree-farms in south-eastern Australia. In: Ellis R.C., Smethurst, P.J. (Eds.),

- Practicing Forestry Today. Proceedings of the 18th Biennial Conference of the Institute of Foresters of Australia, pp. 161–164.
- Huhn M, Langner W. 1995. Investigations on the correlation pattern in even aged stands of larch. II. Dynamic description of phenotypic correlations between neighbouring observations. *Silvae Genetica*, 44: 325-334.
- Hutchinson MF, Gessler PE. 1994. Splines more than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 62: 45-67.
- Jaynes DB, TS Colvin. 1997. Spatiotemporal variability of corn and soybean yield. *Agronomy Journal*, 89: 30-37.
- Joyce DG, Ford R, Fu YB. 2002. Spatial patterns of tree height variations in a black spruce farm-field progeny test and neighbors-adjusted estimations of genetic parameters. *Silvae Genetica*, 51:13-18.
- Kenkel NC, Hendrie ML, Bella IE. 1997. A long term study of *Pinus banksiana* population dynamics. *Journal of Vegetation Science*, 8: 241-254.
- Kenkel NC, Hoskins JA, Hoskins WD. 1989. Local competition in a naturally established jack pine stand. *Canadian Journal of Botany*, 67: 2630–2635.
- Kravchenko AN, Bullock DG. 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography: I. Spatial data analysis. *Crop Science*, 42: 804-815.
- Kröger M. 2012. Global tree plantation expansion: a review. ICAS Review Paper Series No. 3. The Hague: Initiatives in Critical Agrarian Studies/International Institute of Social Studies.

- Kung FH, Yang YC. 1983. Autoregression analysis of diameter growth in black walnut trees. In: Bell J.F., Atterbury T. (Eds.). Proceedings of the International Conference on Renewable Resource Inventories for Monitoring Changes and Trends, Corvallis. OR, pp. 235-239.
- Kyaw T, Ferguson RB, Adamchuk VI, Marx DB, Tarkalson DD, McCallister DL. 2008. Delineating site-specific management zones for pH-induced iron chlorosis. *Precision Agriculture*, 9(1-2): 71-84.
- Lacey ST, Brennan PD, Parekh J. 2001. Deep may not be meaningful: cost and effectiveness of various ripping tine configurations in a plantation cultivation train in eastern Australia. *New Forests*, 21: 231–248.
- Lee J, Wong, DWS. 2001. *Statistical analysis with Arcview Gis*. John Willey and Sons, Inc., New York.
- Liu J, Ashton PS. 1999. Simulating effects of landscape contexts and timber harvest on tree species diversity. *Ecology Applied*, 9: 186:201.
- Liu J, Burkhart HE, 1994. Spatial characteristics of diameter and total height in juvenile loblolly pine (*Pinus taeda* L) plantations. *Forestry Science*, 40: 774–786.
- Loo-Dinkins JA. 1992. Field test design. In: Fins, L., Friedman, S., Brotschol, J. (Eds.), *Handbook of Quantitative Forest Genetics*. Kluwer Academic Publication, Dordrecht, The Netherlands, pp. 96–139.
- López MV, Arrué JL. 1995. Efficiency of an incomplete block design based on geostatistics for tillage experiments. *Soil Science Society American Journal*, 59:1104-1111.

- Magnussen S. 1994. A method to adjust simultaneously for spatial micro-site and competition effects. *Canadian Journal of Forest Research*, 24: 985–995.
- Magnussen S. 1993. Bias in genetic variance estimates due to spatial autocorrelation. *Theoretical Applied Genetics*, 86: 349-355.
- Magnussen S. 1990. Application and comparison of spatial models in analyzing tree-genetics field trials. *Canadian Journal of Forestry Research*, 20: 536–546.
- Martin RL. 1974. On autocorrelation, bias and the use of first spatial differences in regression analysis. *Area*, 6: 185–194.
- Martins A, Pinto MG. 2004. Efeitos da Ripagem Localizada Versus Ripagem Contínua nas Propriedades do Solo e na Resposta das Plantas em Novos Povoamentos Florestais. *Silva Lusitana*, 12 (2): 191–202.
- Matern B. 1960. Spatial variation. *Meddelanden fran statens skogsforskning-institut* 49 (5) [Second edition (1986), *Lecture Notes in Statistics*, No 36, Springer New York].
- McKimm RJ, Flinn DW. 1979. Eucalypt species, site preparation and fertilizer requirements for reforestation of Toorong plateau in Central Victoria. *Australian Forestry*, 42: 117-124.
- McLaughlin JW, Gale MR, Jurgensen MF, Trettin C. 2000. Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate. *Forest Ecology and Management*, 129: 7-23.
- Measki B, Waters MJ, Bird R. 1998. Results from spotted gum provenance and ripping trials in south west Victoria. *Agroforestry News*, 7:18–19.

- Merino A, Rodríguez López A, Brañas J, Rodríguez-Soalleiro R. 2003. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in northwestern Spain. *Annals of Forestry Science*, 60:509–517.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2011. Anuario OPYPA 2011. Montevideo, Uruguay. Dirección de Estadísticas Agropecuarias. 412 pp.
- Mhando ML, Maliondo SM, Mugasha AG. 1993. Early response of *Eucalyptus saligna* to site preparation and fertilization at Sao Hill, Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 62: 303–311.
- Miller TE, Weiner J. 1989. Local density variation may mimic effects of asymmetric competition on plant size variability. *Ecology*, 70: 1188–1191.
- Miller MP, Singer MJ, Nielsen DR. 1988. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society American Journal*, 52:1133-1141.
- Monserud RA. 1986. Time series analysis of tree ring chronologies. *Forest Science*, 32: 349-372.
- Moral FJ, Terrón JM, Marques da Silva JF. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106: 335-343.
- Morari F, Castrignano A, Pagliarin C. 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geoelectrical sensors. *Computation and Electronic Agriculture*. 68: 97-107.

- Morris LA, Lowery, RF. 1988. Influence of site preparation on soil conditions affecting stand establishment and tree growth. *Southern Journal of Applied Forestry*, 12: 170-178.
- Mulla DJ. 1993. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: P.C. Robert et al. (ed.) *Soil specific management*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 15–26.
- Mulla DJ, Bhatti AU, Kunkel R. 1990. Methods for Removing Spatial Variability from Field Research Trials. *Advances in Soil Sciences*, 13: 201-213.
- Mummery D, Battaglia M, Beadle CL, Turnbull CRA, McLeod R. 1999. An application of terrain and environmental modelling in a large-scale forestry experiment. *Forest Ecology and Management*, 118: 149-159.
- Newton PF, Jolliffe PA. 1998. Assessing processes of intra- specific competition with spatially heterogeneous black spruce stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 259–275.
- Officer SJ, Kravchenko A, Bollero GA, Sudduth KA, Kitchen NR, Wiebold WJ, Palm HL, Bullock DG. 2004. Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values. *Plant and Soil*, 258: 269-280.
- Patterson HD, Hunter EA. 1983. The efficiency of incomplete block designs in National List and Recommended List cereal variety trials. *Journal of Agricultural Science*, 101: 427–433.
- Qiao CG, Basford KE, DeLacy IH, Cooper M. 2000. Evaluation of experimental designs and spatial analyses in wheat breeding trials. *Theoretical and Applied Genetics*, 100: 9–16.

- Querejeta JI, Roldán A, Albadalejo J, Castillo V. 2001. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest Ecology and Management*, 149: 115–128.
- Reed DD, Burkhart HE. 1985. Spatial autocorrelation of individual tree characteristics in loblolly pine stands. *Forestry Science*, 31: 575–587.
- Resquin F.; Rachid, C.; Perez Bidegain, M. 2010. Serie Actividades de Difusión Nro 616. Efecto del laboreo y fertilización sobre las propiedades físicas del suelo y la productividad de *E. grandis*. En "Jornada técnica forestal en zona norte". INIA Tacuarembó. 42-55.
- Reyniers M, Maertens K, Vrindts E, De Baerdemaeker J. 2006. Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. *Soil and Tillage Research*, 88: 262-273.
- Rhoades, J.D., Corwin, D.L., Lesch, S.M., 1999. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: D.L. Corwin, K. Loague, and T.R. Ellsworth (ed.) *Assessment of non-point source pollution in the vadose zone*. Geophysical Monogr. 108. AGU, Washington, DC. p. 197-215.
- Ripley BD. 1981. *Spatial Statistics*. John Wiley & Sons, Inc., NY, USA. pp. 252.
- Ritson P, Pettit NE. Double ridge mounds improve tree establishment in saline seeps. *Forest Ecology and Management*, 48: 89-98.
- Smith AB, Cullis BR, Thompson R. 2005. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials: an overview of current mixed model approaches. *Journal of Agricultural Science*, 143: 449-462.

- Smith KF, Casler MD. 2004. The use of spatially adjusted herbage yields during the analysis of perennial forage grass trials across locations. *Crop Science*, 44: 56–62.
- Smith CW. 1998. Three decades of site preparation research: lessons for the future. In: Maclennan, L. (Ed.), *ICFR Jubilee Seminar*. Institute for Commercial Forestry Research, Pietermaritzburg. *ICFR Bulletin* 1/98: 28-31.
- SAS Institute Inc. 2005. Cary, NC, USA.
- Schepers AR, Shanahan JF, Liebig MK, Schepers JS, Johnson SH, Luchiari Jr. A. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal*, 96: 195-203.
- Schepers JS, Schlemmer MR, Ferguson RB. 2000. Site-specific considerations for managing phosphorus. *Journal of environmental quality*, 29: 125–130.
- Schonau APG, Verloren van Thermaat R, Boden PI. 1981. The importance of complete site preparation and fertilizing in the establishment of *Eucalyptus grandis*. *South African Forestry Journal*, 6: 1-10.
- Schoonderwoerd H, Mohren GMJ. 1987. Autocorrelation and competition in even-aged stands of douglas-fir in the Netherlands. In: Ek, A.R., Shifley, S.R., Burk, T.E. (Eds.), *Forest Growth Modelling and Prediction*. U.S.D.A. For. Serv. Gen. Tech. Rep. NC-120, pp. 619–626.
- Shi H, Laurent EJ, LeBouton J, Racevskis, L, Hall KR, Donovan M, Doepker RV, Walters MB, Lupi F, Liu J. 2006. Local spatial modeling of white tailed deer distribution. *Ecological Modeling*, 190: 171-189.

- Skovsgaard JP, Vanclay JK. 2008. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81: 13-31.
- Sudduth KA, Kitchen NR, Wiebold WJ, Batchelor WD, Bollero GA, Bullock DG, Clay DE, Palm HL, Pierce FJ, Schuler RT, Thelen KD. 2005. Relating apparent electrical conductivity top soil properties across the North-Central USA. *Computation and Electronic Agriculture*, 46: 263-283.
- Tasissa G, Burkhart H. 1998. An application of mixed effects analysis to modeling thinning effects on stem profile of loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 103: 87-101.
- Topp GC, Ferré PA. 2002. Thermogravimetric determinations using convective oven-drying, pp. 422-424. In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds). *Methods of soil analysis. part 4, physical methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison.
- van Schilfgaarde J. 1999. Is precision agriculture sustainable? *American Journal of Alternative Agriculture*, 14(1): 43-46.
- Verhagen A, Booltink HWG, Bouma J. 1995. Site-specific management: balancing production and environmental requirements at farm level. *Agricultural Systems*, 49: 369-384.
- Villalba J, Montouto C, Cazaban J, Carballo P, Bentancur O. 2010. Efecto de laboreo sobre la eficacia de herbicidas y el crecimiento de *Eucalyptus* sp. *Agrociencia Uruguay*, 14: 45-54.
- Weiner J. 1990. Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology and Evolution*, 5: 360-364.

- Wetzel S, Burgess D. 2001. Understorey environment and vegetation response after partial cutting and site preparation in *Pinus strabus* L. stands. *Forest Ecology and Management*, 151: 43-59.
- Wheeler MJ, Will RE, Markewitz D, Jacobson MA, Shirley AM. 2002. I. Early loblolly pine stand response to tillage on the Piedmont and Upper Coastal Plain of Georgia: mortality, stand uniformity, and second and third year growth. *South African Journal of Applied Forestry*, 26(4): 181-189.
- Williams ER, John JA. 1989. Construction of row and column designs with contiguous replicates. *Applied Statistics*, 58: 149-154.
- Wolfinger RD. 1996. Heterogeneous variance. Covariance structures for repeated measures. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 2: 205-230.
- Woollons RC, Norton DA. 1990. Time series analysis applied to sequences of *Nothofagus* growth-ring measurements. *New Zealand Journal Ecology*, 13: 9-15.
- Worrell R, Hampson A. 1997. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review. *Forestry*, 70 (1): 61– 85.
- Xin-Zhong W, Guo-Shun L, Hong-Chao H, Zhen-Hai W, Qing-Hua L, Xu-Feng L, Wei-Hong H, Yan-Tao L. 2009. Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. *Computation and Electronic Agriculture*, 65: 168-175.
- Yan L, Zhou S, Feng L, Hong-Yi L. 2007. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Computers and Electronics in Agriculture*, 56: 174–186.

- Yates F. 1939. The recovery of inter-block information in variety trials arranged in three dimensional lattices. *Annals of Eugenics*, 9:135–156.
- Yau SK. 1997. Efficiency of alpha-lattice designs in international variety yield trials of barley and wheat. *Journal of Agricultural Science*, 128: 5-9.
- Zas R. 2007. Autocorrelación espacial y el diseño y análisis de experimentos. En: F. Maestre, A. Escudero y A. Bonet (eds.), *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones*. U. Rey Juan Carlos, AEET y CAM. Madrid.
- Zas R. 2006a. Consecuencias de la estructura espacial de los datos en el diseño y análisis de experimentos en campo. *Ecosistemas*, 15(3): 107-114.
- Zas R. 2006b. Iterative kriging for removing spatial autocorrelation in analysis of forest genetic trials. *Tree Genetics*, 2: 177-185.
- Zhang L, Bi H, Cheng P, Davis CJ. 2004. Modeling spatial variation in tree diameter height relationships. *Forest Ecology and Management*, 189: 317-329.