



# Efecto de la **fertilización** sobre el crecimiento en diámetro y altura de *Pinus caribaea* en plantaciones del occidente de Cuba

The effect of fertilization on growth, in diameter and height, of *Pinus caribaea* in plantations of western Cuba

María Amparo León-Sánchez<sup>1\*</sup>, Jorge Luís Reyes-Pozo<sup>2</sup>, Grisel Herrero-Echevarría<sup>3</sup> y Víctor Ernesto Pérez-León<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Pinar del Río, Hermanos Saiz Montes de Oca. Departamento de Matemática. Cuba.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones del Tabaco (IIT). Pinar del Río, Cuba.

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones Agro-Forestales (INAF). La Habana, Cuba.

\* Autor de correspondencia. maleon@upr.edu.cu.

## RESUMEN

Existen estudios encaminados a analizar el efecto de la fertilización mineral sobre variables dasométricas en plantaciones productivas. En su mayoría, estos analizan la respuesta de la fertilización a corto plazo. Por ello, la presente investigación estudia la respuesta de la fertilización mineral a largo plazo aplicada de forma fraccionada durante los primeros cinco años de establecida una plantación de *Pinus caribaea*, en el municipio Viñales, Pinar del Río, Cuba. Se investigó la respuesta al crecimiento, en diámetro y altura, a partir de un diseño de bloques al azar. Se establecieron siete tratamientos diferenciados por las dosis de NPK y regímenes de aplicación, más un tratamiento testigo sin fertilización. Se hicieron mediciones en diferentes edades a 288 árboles con seguimiento durante 41 años y se estimaron las funciones de crecimiento mediante regresión multinivel para todo el período, y en dos etapas por separado. Como promedio, en el período de 2 a 41 años, el diámetro en árboles individuales, para las aplicaciones de 600 g árbol<sup>-1</sup> en régimen alterno, 800 g árbol<sup>-1</sup> y 1000 g árbol<sup>-1</sup> de (NPK) fueron superiores con respecto al testigo y la altura para las aplicaciones de 800 g árbol<sup>-1</sup> y 1000 g árbol<sup>-1</sup> de (NPK); el tratamiento de la aplicación de una dosis única de 300 g árbol<sup>-1</sup> de (NPK) provocó valores inferiores en diámetro y altura con respecto al testigo. El estudio en dos etapas demostró que de 33 a 41 años se logra homogeneidad en altura entre tratamientos, excepto en el de 300 g árbol<sup>-1</sup> de (NPK) que mantiene resultados inferiores al testigo.

**PALABRAS CLAVE:** curvas de crecimiento, fertilización mineral, regresión multinivel.

## ABSTRACT

Some studies focus on the analysis of the effect of mineral fertilization on variables associated with tree growth in productive plantations. They mainly analyze the short-term response to fertilization. The aim of this research is therefore to analyze the long-term response to mineral fertilization, applied fractionally over the first five years of the establishment of a *Pinus caribaea* plantation in Viñales, Pinar del Río, Cuba. The effect on growth, in diameter and height, was examined using a randomized block design. Seven treatments were established, according to the doses and application regime of NPK, as well as a control, with no fertilizer. These variables were measured at different ages, in 288 trees over 41 years and the growth functions were estimated using a multilevel regression for the entire period and in two separate stages. The analysis of the coefficients for the obtained growing curves showed that, in the period from 2 to 41 years, the diameter and height for individual trees were, on average, superior to those of the control, in treatments of 600 g, 800 g and 1000 g of Nitrogen, Phosphorus and Potassium (NPK) per tree. Treatment with application of a single dose of 300 g of Nitrogen, Phosphorus and Potassium (NPK) tree<sup>-1</sup> produced lower values of diameter and height than those of the control. The two-stage study demonstrated that, from 33 to 41 years, homogeneity in height was achieved among treatments, except for the treatment with 300 g of (NPK) tree<sup>-1</sup>, which presented lower heights relative to those of the control.

**KEYWORDS:** growing curves, mineral fertilizer, multilevel regression.

## INTRODUCCIÓN

La fertilización busca mejorar la supervivencia y progreso apropiado de la planta, debido a que estimula el desarrollo de sus raíces, optimiza el uso eficiente del agua con la captación de nutrientes de manera eficaz y suficiente para asegurar su supervivencia y crecimiento inicial, lo que garantiza una ocupación óptima del suelo (Albaugh, Rubilar, Alvarez y Allen, 2004; Corporación Nacional Forestal, 2013). Los beneficios que una adecuada fertilización puede generar son diversos, pues además de los ya mencionados, posibilita un rápido crecimiento inicial y cierre de las copas, lo cual disminuye o elimina la competencia al obtenerse un rodal más uniforme y un mayor rendimiento al momento de la cosecha (García, Sotomayor, Sila y Valdebenito, 2000). El empleo de fertilizantes minerales de acción lenta aumenta el crecimiento longitudinal de la planta al menos durante los dos años siguientes a la plantación, por lo que puede ser interesante su uso en terrenos muy pobres o con abundante competencia con la vegetación herbácea (Cañellas, Finat, Vachiller y Montero, 1999).

La sostenibilidad de las plantaciones forestales requiere la consideración de factores económicos y ambientales. Muller, Poggiani, Libardi y Natal, (2013) aseguran que muchos experimentos de campo han demostrado que con el empleo de grandes cantidades de fertilizantes se aumenta el crecimiento de los árboles. La fertilización con nitrógeno tiene la capacidad de alterar significativamente el ambiente del suelo forestal y puede incrementar el almacenamiento de carbono (Smaill, Clinton y Greenfield, 2008).

En experimentos desarrollados por Shryock, Littke, Ciol, Briggs y Harrison, (2014), la fertilización con nitrógeno incrementó significativamente el carbono secuestrado por árbol con respecto a las parcelas que no fueron fertilizadas. Otros autores han estudiado la respuesta a la fertilización a partir del análisis de las propiedades del suelo (Mainwaring, Maguire y Perakis, 2014; Smail *et al.*, 2008) o del contenido de nutrientes en la biomasa (Moreno, López, Estañol y Velázquez, 2002; Will *et al.*, 2006). Kumaraswamy *et al.* (2014) argumentan que los

residuos de cosecha minimizan las pérdidas de nutrientes; los mismos autores refieren que el uso de fertilizantes se considera aun importante para el manejo de plantaciones. La fertilización con fósforo en plantaciones de *Pinus elliottii* Engelm y *Pinus taeda* L. ha sido una práctica operativa en plantaciones productivas sobre la llanura costera de Estados Unidos desde 1960 (Everett y Palm-Leis, 2009). Al menos 81 000 ha/año fueron fertilizadas durante el establecimiento de plantaciones productivas en el sudeste de los Estados Unidos entre 1996 y 2004 (Albaugh, Allen y Fox, 2007; Fox, Jokela y Allen, 2007; Fox, Allen, Albaugh, Rubilar y Carlson, 2007).

Reyes, Herrero, León, Miñoso y Curvelo, (2014) estudiaron la respuesta a la fertilización en altura, diámetro y volumen a los 35 y 41 años de edad de la plantación, con datos obtenidos de este experimento, donde los tratamientos son comparados mediante análisis multivariante de la varianza, partiendo de un diseño de bloques al azar en las edades citadas y se aplicaron las pruebas de comparaciones múltiples para detectar los tratamientos homogéneos en esos dos momentos. Herrero, González, Fuentes, Herrera, García y Coto (2004) estudiaron el comportamiento de estas y otras variables de la plantación a la edad de 33 años con la aplicación del análisis univariado de la varianza. En ambos estudios se hicieron análisis fraccionados con datos de cada año. Otros trabajos en que se mide el efecto de la fertilización han utilizado estas técnicas estadísticas, entre ellos Bonomeli y Suárez (1999); Cañellas *et al.* (1999); Solla-Guyón, Rodríguez y Merino (2004); Will *et al.* (2006); Rubilar, Blevins, Toro, Vita y Muñoz (2008), De Urzedo, Pires, Machado y Braga (2013); Swanston y Preston (2014).

En el presente trabajo se modela el crecimiento en altura y diámetro de todos los tratamientos con la inclusión de la serie completa de datos, se hace un estudio integrado desde 1973 hasta 2012, además de que se investiga la existencia o no de diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, se estima la diferencia promedio a lo largo de todo el período en relación con el tratamiento testigo, se estudia cómo influye la edad en el crecimiento de ambas variables y se comparan los mode-



los en dos etapas. Este trabajo es el único o uno de los muy pocos estudios que existen en el mundo que da seguimiento a la respuesta del crecimiento en altura y diámetro a la fertilización aplicada en los primeros cinco años de una plantación en un período relativamente largo (41 años).

La necesidad del manejo de la interdependencia de las observaciones repetidas sobre cada individuo y la limitación de los métodos clásicos que requieren disponer del mismo número de observaciones (datos completos) para cada individuo, justifican el empleo de modelos jerárquicos en el presente estudio. Una característica particular del análisis estadístico en este trabajo es que se hace un estudio longitudinal retrospectivo, se aprovechan las mediciones realizadas durante la vida del árbol para estimar sus funciones de crecimiento se conforma un modelo jerárquico con dos niveles (Goldstein, 2010) que permite comparar el comportamiento continuo de las variables de respuesta y analizar el efecto de cada tratamiento sobre las mismas a lo largo de todo el período de seguimiento.

*Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari es una conífera autóctona de Cuba. Es un árbol alto que crece rápidamente, alcanza hasta 30 m de altura y 60 cm de diámetro y produce madera de diversos usos incluyendo productos de papel de fibra larga, resina y aceites esenciales. Por su alta plasticidad ecológica, adaptabilidad a condiciones adversas, fácil manejo y rápido crecimiento ha sido utilizado ampliamente en los planes de reforestación en todo el archipiélago cubano (Herrero, Renda y González-Abreu, 1983).

El área donde se estableció el experimento estuvo originalmente cubierta por bosques naturales de *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *Pinus tropicalis* Morelet, que fueron sustituidos por cultivos agrícolas, lo que determinó la erosión de los suelos y la pérdida de sus características forestales; por consiguiente, al establecerse la plantación, los árboles debían superar ese estrés para sobrevivir y desarrollarse (Herrero, 2001).

El balance a favor de la fertilización mineral es positivo y la necesidad de conservar los nutrientes del suelo forestal, así como lograr mayores incrementos en creci-

miento, mantienen el interés de los gestores por continuar estas prácticas acertadas en plantaciones productivas para un desarrollo forestal sostenible.

## OBJETIVOS

Con este trabajo se pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- Estudiar la influencia de la fertilización mineral aplicada de forma fraccionada en los primeros cinco años de establecida una plantación de *Pinus caribaea*, sobre el crecimiento, a largo plazo, en diámetro y altura.
- Comparar el comportamiento de las funciones de crecimiento en dos etapas, de 2 a 15 años y de 33 a 41 años.
- Determinar los tratamientos de mejores resultados para diámetro y altura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

El experimento se estableció en el año 1971 en la Estación Experimental Forestal de Viñales, ubicada entre los 22°37' longitud norte y los 83°41' longitud Oeste, (Fig. 1), a una elevación de 150 m sobre el nivel del mar. El suelo fue clasificado como Alítico de baja actividad arcillosa, con relieve ondulado, derivados de esquistos cuarcíticos y pizarras (Instituto de Suelos, 1999). Es un suelo muy ácido con concentraciones medias de magnesio y bajas de fósforo, potasio, calcio y materia orgánica. Su textura es franco arenosa y el contenido de agua aprovechable para las plantas es bajo (Jiménez y Herrero, 1984). Previo al establecimiento del experimento se hizo un estudio del suelo, (González, 2006) donde se tomaron 36 muestras a las profundidades de 0-20 y de 20-40 de las que se obtuvieron valores medios de 3484,6 kg ha<sup>-1</sup> y 4802,0 kg ha<sup>-1</sup> de N total; 54,8 kg ha<sup>-1</sup> y 102,9 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 4,8 kg ha<sup>-1</sup> y 6,9 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, respectivamente. El comportamiento en toda el área fue homogéneo, lo que se verificó para controlar la heterogeneidad del suelo como posible fuente de variación.

Al inicio de la plantación los valores de temperatura media anual era de 24,7 °C, la máxima diaria de 28,7 °C,

la mínima diaria de 20,4 °C y la mínima absoluta de 16,2 °C (Awan y Frías, 1970).

González (2006) refiere que en la década 1996-2006, la precipitación promedio anual fue de 1765 mm, temperatura promedio anual 25 °C, temperatura máxima promedio anual 28,8 °C, temperatura mínima promedio anual 19,5 °C, temperatura máxima absoluta 34,1 °C, temperatura mínima absoluta 2,9 °C.

El Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2005), registra valores de la temperatura media en el territorio, de 25,5 °C; el mes más frío enero con 17,1 °C y el más cálido es agosto con 32,8 °C, el promedio anual de precipitaciones es 1857,8 mm y el mes más lluvioso junio con 273,9 mm promedio.

### Muestreo de datos

Se partió inicialmente de una muestra de 288 árboles, de los cuales, al final del estudio, quedaban en pie 201 (70%). En cuanto al número de observaciones, de acuerdo con las mediciones realizadas, se pudieron captar 1438 de 1728 posibles para el diámetro; mientras que para la altura, de 2016 se registraron 1719, para 83% y 85%, respectivamente. Se calcularon las princi-

pales medidas descriptivas, media y desviación estándar de las variables diámetro y altura para cada tratamiento en cada edad de la plantación en que se realizaron las mediciones.

### Diseño experimental

El experimento fue diseñado y establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 1970, y se explica con detalle en Herrero *et al.* (2004). En él, se utilizó un diseño de bloques al azar con cuatro réplicas y ocho tratamientos que contemplan la aplicación fraccionada de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) según tabla 1.

Se conoce que el gradiente de fertilidad del suelo puede influir sobre las variables de respuesta, por tal motivo, las unidades experimentales dentro de cada bloque son relativamente homogéneas; el número de unidades coincide con el número de tratamientos y los tratamientos fueron asignados al azar en las unidades experimentales dentro de cada bloque. Cada tratamiento, definido por la combinación dosis de fertilización y régimen de aplicación, se aplicó a 100 árboles. El tamaño de las parcelas fue de 225 m<sup>2</sup> con 25 árboles por parcela y nueve árboles en la parcela útil.

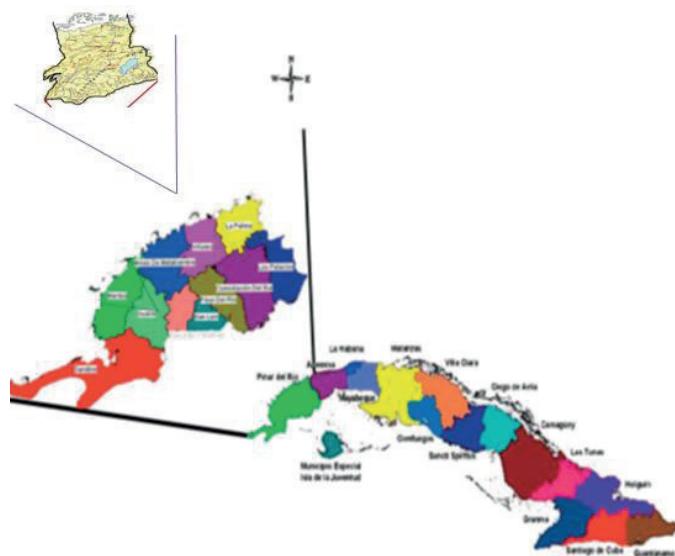


FIGURA 1. Ubicación geográfica de la Estación Experimental Forestal de Viñales.

TABLA 1. Aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK).

Tratamiento	Dosis Total-NPK		Aplicaciones según edad				
	g árbol <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	(g árbol <sup>-1</sup> )				
			Edad (años)				
			1	2	3	4	5
T1(testigo)	0	0	0	0	0	0	0
T2	300	333	300	0	0	0	0
T3	600	667	200	400	0	0	0
T4	600	667	200	0	400	0	0
T5	800	889	200	200	400	0	0
T6	800	889	200	0	200	0	400
T7	1000	1111	200	200	400	200	0
T8	1000	1111	200	0	400	0	400



En este experimento se etiquetaron nueve árboles, parcela útil por cada uno de los cuatro bloques definidos, para un total de 36 árboles por tratamiento y 288 árboles en total (Fig. 2). Estos árboles se midieron desde 1973 hasta 2012.

La plantación se hizo según el método de hoyo de plantación. La procedencia de las semillas fue de la masa semillera Marbajitas, el marco de plantación empleado fue de 3 m x 3 m. Se utilizó la fórmula de fertilizante (NPK: 8-10-10) y se aplicó en surcos en forma de media luna alrededor de las plantas. Durante todo el período estudiado la plantación no fue sometida a ningún tratamiento silvícola.

Para evaluar la respuesta de la especie a la fertilización se midió la altura con hipsómetro marca Blume-Leiss, 1969, y el diámetro de cada uno de los árboles seleccionados para el estudio, a 1,30 m del suelo con forcípula Varsi, 1970. Las mediciones de altura se realizaron en siete ocasiones, a los 2, 6, 8, 15, 33, 35 y 41 años de edad de la plantación. El diámetro se midió en seis ocasiones a partir de los seis años de edad, coincidiendo con los momentos de medición de la altura en el período comprendido entre 1973 y 2012.

### Tratamiento estadístico

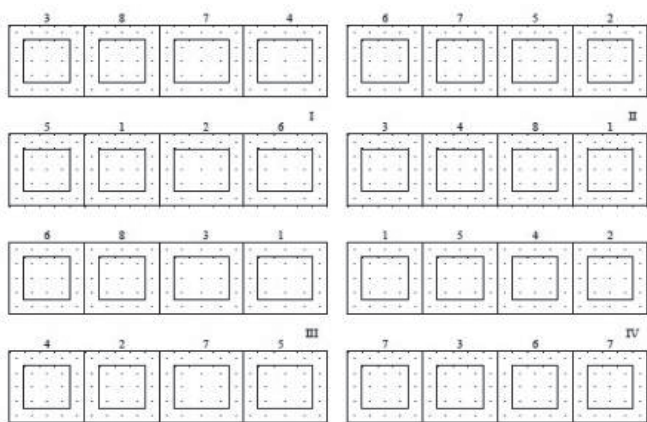


FIGURA 2: Diagrama del diseño experimental empleado. Fuente: Expediente del ensayo. Estación experimental Viñales. Leyenda: . Árbol, □ Parcela útil.

Los modelos multinivel (Goldstein, 2010), jerárquicos (Raudenbush y Bryk, 2002), o de coeficientes aleatorios (Langford, 1993) se utilizaron en este trabajo para describir las trayectorias que siguen el diámetro y la altura de los árboles en sus primeros 41 años de vida y la incidencia que tienen sobre estas variables el tratamiento y la edad. Se trabajaron dos niveles: el nivel 1, las medidas repetidas y el nivel 2, el árbol.

Para ajustar los modelos multinivel se centró la variable edad en el mínimo: dos años para la altura y seis años para el diámetro con el objetivo de facilitar la interpretación de la constante. Se ajustaron modelos de crecimiento jerárquico donde la variable dependiente fue el diámetro o la altura y las variables independientes, la edad y los tratamientos. Los tratamientos se introducen en el modelo como variables *dummies*, siendo el testigo (T1) la categoría de referencia. Para llegar al modelo de mayor poder explicativo se ajustaron desde el más sencillo, sin variables independientes, hasta el más complejo, y se analizó la significación de la diferencia en  $-2 \cdot \log$  verosimilitud para evaluar la calidad del ajuste mediante una prueba Chi cuadrado. Finalmente, se repitió el procedimiento descrito y se ajustaron modelos para cada variable en dos etapas, una primera hasta la edad de 15 años, y la segunda de 33 a 41 años de edad.

Tanto para el diámetro como para la altura se ajustaron tres modelos: el modelo 1, no condicional o vacío que no contiene ningún predictor, solo la constante o intersección en el origen, y que es considerado como referencia para comparar con los modelos más complejos. En el modelo 2 se incluyó, además de la constante, el tratamiento de fertilización como variable independiente (variable del nivel 2). Por último, en el modelo 3 también se incluyó la edad que explica la variación en el tiempo del crecimiento en la variable dependiente y constituye una variable del nivel 1.

Para comparar la homogeneidad de la calidad de sitios de los diferentes tratamientos se seleccionaron los árboles que sobrepasaban en altura el percentil 75 y se comparó la altura media dominante mediante el uso de análisis de varianza en los años 2004, 2006 y 2012.

Para el procesamiento de la información se utilizaron los sistemas estadísticos SPSS v 21.0 y MI Win v 2.0.

## RESULTADOS

Del estudio descriptivo del diámetro (Tabla 2) se obtuvo que en 50% de las edades en que se realizaron mediciones, los valores medios en el tratamiento 2 fueron inferiores al testigo. Los diámetros medios en los tratamientos 3, 4, 5, 6, 7 y 8 resultaron mayores que el testigo en 100% de los casos. En 67% de los casos (28 de 42), la desviación estándar superó los valores correspondientes a los del tratamiento 1.

A la edad de 33 años, la más próxima al turno técnico de la especie definido en la clase de edad de 30 a 35 años, los mejores resultados en cuanto a diámetro medio se lograron en los tratamientos 6 y 7 con un incremento de 6% con relación a la media general para esa edad. El intervalo de los valores medios máximo-mínimo a los 33 años resultó 15,17% del valor medio para esa edad; a los 41 años este valor descendió a 10,70%.

En cuanto a la altura (Tabla 3), 70% de los valores medios resultaron mayores que el testigo en una cuantía que no supera 20% de la media general para cada edad. En 49% de las veces (24 de 49), la desviación

TABLA 2. Medidas descriptivas para la variable diámetro.

Edad (años)		Tratamientos								Totales
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
6	N	33	36	33	35	35	34	35	35	276
	Media(cm)	7,09	6,84	8,61	8,42	8,91	8,04	8,99	8,46	8,17
	S (cm)	1,67	2,38	1,04	1,47	1,25	2,33	1,93	2,17	1,85
8	N	33	36	33	35	33	34	35	35	274
	Media (cm)	8,69	8,87	10,10	10,30	10,80	9,85	11,20	10,10	9,98
	S (cm)	1,87	2,28	1,33	1,96	1,87	3,01	2,01	2,65	2,18
15	N	29	32	33	34	31	30	33	32	254
	Media (cm)	13,8	13,90	15,80	16,30	16,70	17,20	17,30	16,70	16,00
	S (cm)	3,13	3,00	3,02	2,71	2,97	3,26	2,43	2,80	2,92
33	N	26	27	30	31	27	27	28	29	225
	Media (cm)	21,5	20,40	22,00	22,40	22,30	23,80	23,70	23,30	22,40
	S (cm)	4,02	5,44	4,07	3,96	4,81	4,42	4,46	3,75	4,38
35	N	23	25	28	27	26	26	27	26	208
	Media (cm)	23,6	22,40	23,80	25,30	24,30	25,90	25,70	26,50	24,70
	S (cm)	3,12	5,39	4,11	3,10	5,10	4,22	4,49	2,75	4,14
41	N	22	21	28	27	25	25	27	26	201
	Media (cm)	25,6	26,10	25,80	27,80	26,50	28,40	27,50	28,50	27,10
	S (cm)	3,00	3,38	4,02	3,61	5,05	4,35	4,74	3,15	4,00
Totales		166	177	185	189	177	176	182	183	1.438
Media (cm)		15,6	15,10	17,20	17,70	17,40	17,90	18,10	18,00	17,15
S (cm)		2,83	3,71	3,13	2,87	3,66	3,59	3,41	2,88	3,28

S: Desviación estándar. N: Número de árboles en pie





estándar superó los valores correspondientes a los del tratamiento 1.

A los 33 años, los mejores resultados se obtuvieron en los tratamientos 7 y 1, el tratamiento 7 superó en altura media al testigo en tan solo 1,7%. El intervalo de los valores medios máximo-mínimo a los 33 años resultó 28,7% del valor medio para esa edad; a los 41 años este valor descendió a 7%.

Al final del período de estudio la supervivencia más baja la mostró el tratamiento 2 con 21 árboles en pie, seguidos del tratamiento 1 con 22 árboles.

El valor de la constante en el modelo 0 (Tabla 4) representa el diámetro medio de todos los árboles a la edad de 6 años, este es 8,17 cm con un error estándar de 0,119 cm. En el modelo 1 la constante representa el valor medio de todas las observaciones en los diferentes momen-

Tabla 3. Medidas descriptivas para la variable altura.

Edad (años)		Tratamientos								Totales
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
2	N	34	36	33	36	36	35	36	35	281
	Media(m)	0,84	0,94	0,94	0,93	1,01	0,86	1,03	0,83	0,92
	S(m)	0,30	0,33	0,20	0,27	0,30	0,31	0,36	0,33	0,30
6	N	33	36	33	35	35	34	35	35	276
	Media(m)	4,75	4,84	5,54	5,41	5,48	5,28	5,64	5,25	5,27
	S (m)	0,87	1,05	0,58	0,69	0,72	1,31	0,97	1,16	0,95
8	N	33	36	33	35	33	34	35	35	274
	Media(m)	5,65	6,49	6,89	6,62	7,00	6,73	6,95	6,66	6,63
	S (m)	1,28	1,48	0,89	0,96	1,08	1,61	0,93	1,73	1,29
15	N	29	32	33	34	31	30	33	32	254
	Media(m)	10,70	10,50	12,30	12,70	12,70	12,90	13,00	12,80	12,20
	S (m)	2,76	2,23	1,40	1,73	1,15	1,53	0,68	1,65	1,73
33	N	26	27	30	31	27	27	28	29	225
	Media(m)	17,50	13,10	16,10	16,30	16,10	17,10	17,80	16,40	16,30
	S (m)	2,44	3,22	2,56	2,33	2,56	2,45	2,22	1,84	2,47
35	N	23	25	28	27	26	26	27	26	208
	Media(m)	19,60	17,40	18,70	19,00	19,30	19,20	19,80	19,80	19,10
	S (m)	1,81	3,18	1,99	1,73	2,07	2,23	1,57	1,17	2,04
41	N	22	21	28	27	25	25	27	26	201
	Media(m)	21,30	20,40	20,90	21,30	21,90	21,30	21,50	21,60	21,30
	S (m)	1,86	1,75	1,99	1,81	2,17	1,96	1,64	1,40	1,84
	Total	200	213	218	225	213	211	221	218	1.719
	Media(m)	10,30	9,37	11,20	11,00	11,00	11,00	11,40	11,10	10,80
S (m)	1,74	2,03	1,55	1,48	1,54	1,69	1,27	1,40	1,60	

S: Desviación estándar. N: Número de árboles en pie

tos, cuyo valor es de 17,15 cm (Tabla 2), por lo que no tiene un gran significado para el estudio; el aporte más importante de este modelo es el valor de  $-2 \cdot \log$  verosimilitud que constituye la referencia para evaluar la calidad de los modelos restantes.

En el modelo 2 todos los coeficientes, excepto el del tratamiento 2, resultaron significativos, lo que demuestra que existen diferencias importantes en el diámetro promedio de los tratamientos del 3 al 8 con respecto al testigo. La diferencia en  $-2 \cdot \log$  verosimilitud del modelo 2 con respecto al modelo 1 fue de 25,87, que resultó altamente significativa para siete grados de libertad en una prueba Chi Cuadrado con  $P < 0,001$ .

Las variables edad y edad<sup>2</sup> resultaron significativas con  $P < 0,001$  estando en el modelo los tratamientos. La incorporación de la edad para mostrar la evolución en el

tiempo tiene un efecto sustancial en los componentes de la varianza; se observa una disminución del componente de la varianza para la intersección en el origen que ha pasado de 62,43 a 6,19: una reducción de 90%. Esta disminución indica que la edad explica parte importante de la variabilidad en el crecimiento en diámetro.

Por cada año de edad, la velocidad del crecimiento en diámetro es como media 0,77 cm. Este crecimiento es desacelerado pues el coeficiente de la edad al cuadrado es negativo. Los valores de los coeficientes de los tratamientos ya no tienen los mismos valores porque se han incluido otras variables; sin embargo, los signos mantienen la misma dirección con respecto al tratamiento testigo. Resultaron significativos los coeficientes de T4 con  $P = 0,005$ , T5 con  $P = 0,003$ ; T6 y T7 con  $P < 0,001$  y finalmente T8 con  $P = 0,001$ . La diferencia en

TABLA 4. Coeficientes (error estándar) resultantes de los modelos multinivel para el diámetro.

	Coeficientes (error estándar)			
	Modelo 0	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Constante	8,17(0,119)	17,15(0,210)	15,58 (0,613)	7,28 (0,454)
T2			-0,50 (0,853) <i>ns</i>	-0,390 (0,616) <i>ns</i>
T3			1,64 (0,844)**	0,960 (0,623) <i>ns</i>
T4			2,07 (0,840)**	1,600 (0,616)*
T5			1,83 (0,853)*	1,730 (0,621)*
T6			2,33 (0,854)**	1,940 (0,623)**
T7			2,56 (0,848)**	2,440 (0,618)**
T8			2,39 (0,846)**	1,870 (0,618)**
Edad				0,770 (0,024)**
Edad <sup>2</sup>				-0,008(0,001)**
Efectos aleatorios				
	3,88 (0,331)	0,00 (0,000)	0,00 (0,000)	5,152 (0,550)
		63,43(2,37)	62,29 (2,326)	6,195 (0,257)
-2LL		10020,43	9994,56	7 137,18
Con modelo 1			25,87**	2883,25**
Con modelo 2				2857,38**

Período considerado 41 años. -2LL:  $-2 \cdot \log$  verosimilitud \* =  $P < 0,05$ ; \*\* =  $P < 0,01$ ; *ns* = no significativo; = variabilidad entre árboles; = variabilidad entre las medidas.





-2\*log verosimilitud, con los modelos 1 y 2, resultaron significativas para 9 y 7 grados de libertad respectivamente con  $P < 0,001$ . La inclusión de la edad provocó una disminución en la variabilidad entre medidas de 90%, lo que demuestra la importancia de incluir estos términos.

Para la variable altura (Tabla 5), el valor de la constante en el modelo 0 representa la altura media de todos los árboles a la edad de 2 años, este valor es 0,92 m con un error estándar de 0,018 m. En el modelo 1, el valor de la constante representa el valor medio de la altura de todas las observaciones en los diferentes momentos, equivalente a 10,79 m (Tabla 3).

En el modelo 2 ninguno de los coeficientes asociados a los tratamientos resultó significativo, ni la diferencia en -2\*log verosimilitud con respecto al modelo 1, lo que evidencia que no existen diferencias significativas entre las alturas medias para los diferentes tratamientos.

Respecto a los modelos para explicar la altura (Tabla 5) se observa que el tratamiento 2 tiene como promedio un crecimiento que está 0,77 m por debajo del testigo. Con el tratamiento 2 se obtuvieron los menores valores con respecto a este indicador, semejante a lo ocurrido con el diámetro.

En cada tratamiento se seleccionaron los árboles que sobrepasan en altura el percentil 75; con edades de 33, 35 y 41 años, y se comparó la altura media dominante mediante un análisis de varianza en los tres momentos. No hay evidencias para rechazar igualdad en altura media dominante entre tratamientos con  $P = 0,696$ ;  $P = 0,353$  y  $P = 0,163$  respectivamente.

El modelo 3 evidenció la ganancia en calidad al incluir la variable edad en la modelización. La incorporación de la edad para mostrar la evolución en el tiempo tiene un efecto significativo en los componentes de la varianza. Se observa una disminución del componente de

Tabla 5. Coeficientes (error estándar) resultantes de los modelos multinivel para la altura.

	Coeficientes (error estándar)			
	Modelo 0	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Constante	0,92 (0,018)	10,79 (0,174)	10,29 (0,508)	1,44 (0,1990)
T2			-0,92 (0,708) <i>ns</i>	-0,77 (0,2570)*
T3			0,89 (0,704) <i>ns</i>	0,25 (0,2580) <i>ns</i>
T4			0,63 (0,699) <i>ns</i>	0,35 (0,2550) <i>ns</i>
T5			0,69 (0,708) <i>ns</i>	0,54 (0,2580)*
T6			0,70 (0,709) <i>ns</i>	0,48 (0,2590)*
T7			1,12 (0,701) <i>ns</i>	0,88 (0,2560)**
T8			0,77 (0,700) <i>ns</i>	0,47 (0,2570)*
Edad				0,85 (0,0150)**
Edad^2				-0,01 (0,0001)**
Efectos aleatorios				
	0,094 (0,008)	0,00 (0,000)	0,00 (0,000)	0,55 (0,096)
		52,04 (1,775)	51,66 (1,762)	3,44 (0,128)
-2LL		11671,70	11659,34	7188,51
Con modelo 1			12,36	4483,19**
Con modelo 2				4470,83**

la varianza para la intersección en el origen, pues esta pasó de 52,04 a 3,44, lo que implica una reducción de 93%. Las diferencias en  $-2 \cdot \log$  verosimilitud de este modelo en relación con los modelos 1 y 2 resultaron altamente significativas ( $P < 0,001$ ) para 9 y 2 grados de libertad respectivamente. Fueron significativas las diferencias con respecto al testigo de los tratamientos, T5 con  $P = 0,018$ , T6 con  $P = 0,032$ , T7 con  $P < 0,001$ . La edad y la edad<sup>2</sup> también resultaron significativas con  $P < 0,001$ .

Las figuras 3 y 4 muestran la diferencia entre los valores de los coeficientes asociados a los tratamientos en relación con el testigo para las variables diámetro y altura respectivamente. En ambos casos, el tratamiento 2 tiene un comportamiento desfavorable con respecto al testigo.

En las figuras 5 y 6 se representan las curvas estimadas para diámetro y altura de los modelos 3 correspondientes a los tratamientos testigo, T1; el de mínimo crecimiento, T2 y el de máximo crecimiento T7.

Los modelos resultantes de la estimación en dos etapas (Tabla 6) detectaron que para la variable altura, en la etapa comprendida de 2 a 15 años de edad, existen diferencias significativas ( $P < 0,001$ ) entre los efectos de los tratamientos del 3 al 8 con relación al testigo. El tratamiento 2 no presentó diferencias con el testigo, situación

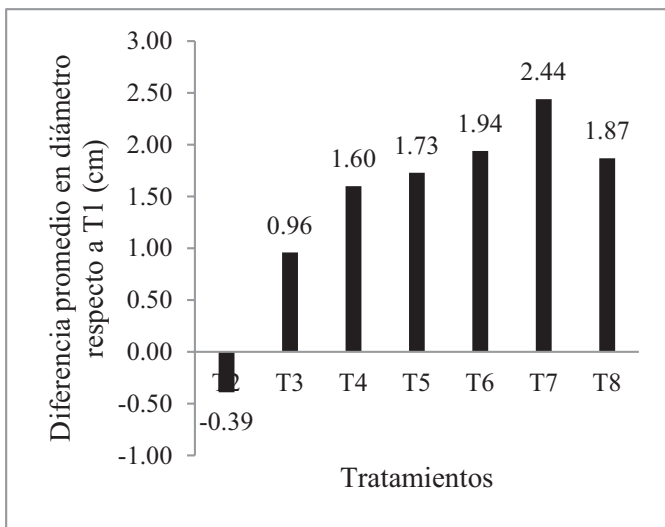


FIGURA 3. Coeficientes de las variables asociadas a los tratamientos, para el diámetro, en el modelo 3.

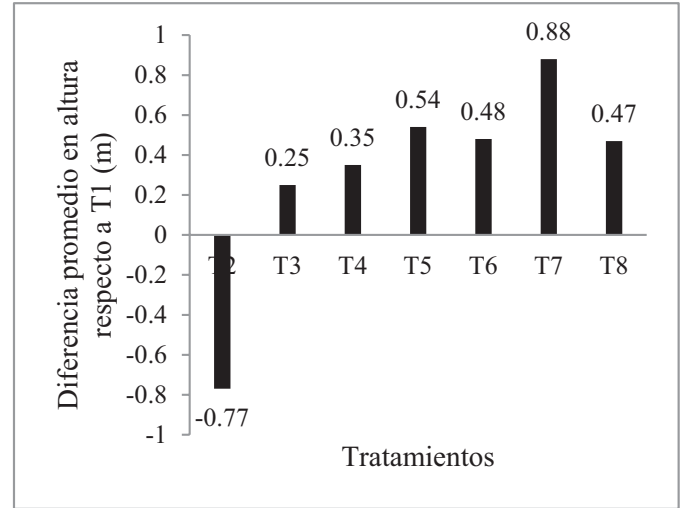


FIGURA 4. Coeficientes de las variables asociadas a los tratamientos, para la altura, en el modelo 3.

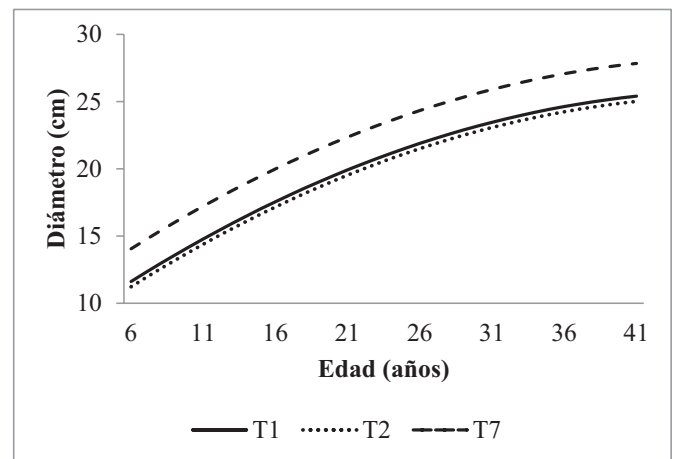


FIGURA 5. Curvas de crecimiento estimadas para el diámetro en los tratamientos 1, 2, 7.

que se revierte en el modelo estimado para las edades de 33 a 41 años, donde solo el tratamiento 2 provocó un crecimiento significativamente menor con respecto al testigo ( $P < 0,001$ ). En ambos escenarios, los coeficientes que estiman la velocidad de crecimiento (edad) y la aceleración (edad<sup>2</sup>) resultaron altamente significativos ( $P < 0,001$ ).

En cuanto al diámetro en la primera etapa, de 6 a 15 años, se detectaron diferencias significativas ( $P < 0,001$ )

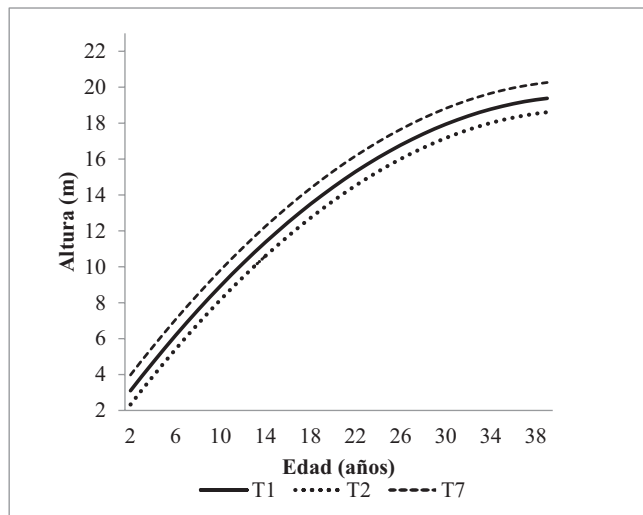


FIGURA 6. Curvas de crecimiento estimadas para la altura en los tratamientos 1, 2, 7.

en los tratamientos 3 al 8 en relación con el testigo; el tratamiento 2 no presentó diferencias. En este modelo, el término  $edad^2$  no resultó significativo; el incremento en diámetro en los árboles más jóvenes tuvo un comportamiento lineal. En la etapa de 33 a 41 años de edad se detectaron diferencias significativas con relación al testigo en los tratamientos 6, correspondiente a  $800 \text{ kg ha}^{-1}$  en régimen alterno, con  $P = 0,014$ ; el tratamiento 7 con  $P = 0,014$  y el 8, con  $P = 0,02$ ; correspondientes y  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$  en régimen continuo y alterno respectivamente.

## DISCUSIÓN

A largo plazo, la respuesta de la fertilización mineral aplicada de forma fraccionada en los primeros cinco años de establecida una plantación de *Pinus caribaea* es positiva siempre que se aplican las dosis adecuadas. En cuanto a valores descriptivos, a la edad de 35 y 41 años se muestran los mayores diámetros medios de árboles individuales en

TABLA 6. Modelos multinivel para el diámetro y la altura en dos etapas de crecimiento.

	Coeficientes (error estándar)			
	Diámetro		Altura	
	6 a 15 años	de 33 a 41 años	2 a 15 años	de 33 a 41 años
Constante	6,749 (0,346) ***	-57,11 (6,34) ***	0,250(0,151)*	-144,476(9,741)***
T2	0,019 (0,473)ns	-1,178 (1,192) ns	0,197(0,196)ns	-2,862(0,582)***
T3	1,595 (0,482)***	0,417 (1,162) ns	0,893(0,200)***	-0,934(0,580)ns
T4	1,744 (0,476)***	1,308 (1,154) ns	0,873(0,197) ***	-0,706(0,563) ns
T5	2,256 (0,478)***	1,256 (1,192) ns	1,016(0,198) ***	-0,316(0,580) ns
T6	1,742 (0,480)***	2,599 (1,192)*	0,883(0,199) ***	-0,181(0,580) ns
T7	2,597 (0,476)***	2,610 (1,192)*	1,127(0,197) ***	0,382(0,575) ns
T8	1,748 (0,476)***	2,291 (1,172)*	0,826(0,196) ***	-0,165(0,572) ns
Edad	0,858 (0,015)***	4,769 (0,407)***	1,078(0,023) ***	8,887(0,558)***
Edad <sup>2</sup>		-0,069(0,007)***	-0,017(0,002) ***	-0,119(0,008)***
Efectos aleatorios				
	2,977 (0,332)	18,510 (1,78)	0,384(0,058)	4,018(0,420)
	2,510 (0,155)	0,780(0,05)	1,102(0,055)	1,156(0,081)
-2LL	3428,550	2570,890	3422,770	2420,870

-2LL:  $-2 \cdot \log$  verosimilitud \* =  $P < 0,05$ ; \*\* =  $P < 0,01$ ; ns = no significativo; = variabilidad entre árboles; = variabilidad entre las medidas.

los tratamientos 6 y 8 a los que les corresponden dosis de 800 kg ha<sup>-1</sup> y 1000 kg ha<sup>-1</sup> aplicadas en régimen alterno respectivamente, mientras que los resultados más pobres se obtienen en el tratamiento testigo y el tratamiento 2, en el que (por única ocasión) se aplica la dosis de 300 g árbol<sup>-1</sup>.

Mediante este análisis se reitera el efecto adicional de la fertilización, pues se obtienen más árboles de mayor diámetro en un espacio determinado (Herrero, 2001; Reyes *et al.*, 2014). Una mayor cantidad de nutrientes provocará un aumento en la producción de biomasa y mayor será su acumulación cuando el suelo presenta un suministro suficiente. En el caso de árboles no fertilizados el potencial de producción de biomasa se reduce al ser insuficiente el suministro de nutrientes en el suelo (Bonomelli y Suárez, 1999).

En cuanto a la altura, a los 41 años de edad los tratamientos 5, 7 y 8 superan en valor medio al testigo, pero la diferencia máxima respecto a la media del testigo es solo 2,8% que a la vista de los resultados no es relevante; y los coeficientes de los tratamientos en el modelo jerárquico no resultaron estadísticamente significativos; este resultado también lo presenta Herrero *et al.* (2004) cuando hace el estudio a los 33 años de edad en que solo detecta diferencias en el tratamiento 2, lo que demuestra que en edades avanzadas se estabiliza la altura media para *Pinus caribaea* independientemente de la dosis de fertilizante empleada, siempre que no esté por debajo de los valores que satisfacen los requerimientos para la especie de acuerdo con las condiciones del suelo.

Por otro lado, la comparación de altura media dominante a los 33, 35 y 41 años de edad mostró igualdad estadística, por lo que se concluye que todos los tratamientos tienen la misma capacidad productiva para la especie y por consiguiente se consideran con igual calidad de sitio, (González, Barrero y Carrasco, 2013; Kimmins, 2004; Herrera y Alvarado, 1998). Este resultado coincide con el obtenido a partir del modelo 3 para la altura en la segunda etapa, 33 a 41 años, lo que indica que la altura media está más asociada al sitio y a las potencialidades de la especie, resultado que coincide con Herrero *et al.* (2004) y Grá (1990) que elaboró las curvas de calidad de sitio

para *Pinus caribaea* en función de la altura media dominante y también en función de la altura media del rodal.

En experimentos a largo plazo, como el que se presenta en este trabajo, generalmente se pierde información y en el caso de la comparación de curvas de crecimiento las observaciones están autocorrelacionadas violando uno de los supuestos de la regresión clásica. En este caso particular se trabaja con 83% de las observaciones posibles para el diámetro y 85% para la altura, lo cual ha podido realizarse gracias a la aplicación de la regresión multinivel, que es prácticamente insensible a estas omisiones.

Además de ser de los más estables, el tratamiento 7 es el que mayor diferencia presenta con respecto al testigo lo que coincide con los resultados obtenidos por Reyes *et al.* (2014) y por Herrero *et al.* (2004) para 33 años de edad.

Es importante resaltar que las diferencias significativas se han detectado a partir de la comparación de las curvas de crecimiento; por ejemplo, en cuanto a la altura media, las diferencias entre tratamientos se detectan en los primeros años, después se estabiliza y al final del período solamente el tratamiento en el que se aplicaron 300 g árbol<sup>-1</sup> de NPK resulta estadísticamente diferente del resto quedando por debajo de su estimación.

La dosis única de 300 g árbol<sup>-1</sup> resulta subóptima, pues no mejora los resultados de la omisión de fertilización. Esto se debe a que cuando se aplican dosis por debajo de las adecuadas se crean desequilibrios nutrimentales y como consecuencia hay un menor crecimiento (Reyes *et al.*, 2014); en coincidencia con Vasquez (2001), quien asegura que las coníferas necesitan nutrientes para crecer y cuando no los consiguen en niveles adecuados presentan problemas con su desarrollo y crecimiento debido a los desequilibrios nutrimentales que provoca la aplicación de dosis por debajo de los niveles requeridos.

Los mejores resultados a partir de las curvas de crecimiento en diámetro y altura para todo el período (Fig. 3 y 4) se obtienen con los tratamientos 7 (1000 g árbol<sup>-1</sup>), 6 (800 g árbol<sup>-1</sup> A) y 8 (1000 g árbol<sup>-1</sup> A) (Tabla 1), con los que se obtuvieron diferencias altamente significativas respecto al tratamiento control o testigo (Tablas 4 y 5), resultados que coinciden con la comparación a los 33 años de



edad, realizadas por Herrero *et al.* (2004), pero son distintos para edades inferiores.

El efecto de la fertilización con las dosis adecuadas ha sido positivo durante el horizonte temporal estudiado en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *Caribaea* sobre suelo Alítico de Baja Actividad Arcillosa. Los tratamientos 4 al 8 han incrementado en altura y diámetro promedio con relación al testigo, coincidiendo con los resultados mostrados por Will *et al.* (2006) y Alvarado y Raigosa (2012). De igual modo, Herrero *et al.* (2004) presentaron respuesta a la fertilización expresada en altura al evaluar a los doce años una plantación de *Pinus caribaea* fertilizada con roca fosfórica al primer año de establecida. Solla-Guyón *et al.* (2004) comunican resultados positivos en altura y diámetro ante la fertilización con cenizas de biomasa en plantaciones forestales jóvenes.

De la interpretación de los modelos en dos etapas se desprende que los ritmos de crecimiento de ambas variables (altura y diámetro) son diferentes: la altura siempre estará determinada por la edad, y su aumento o disminución dependerá de la calidad del sitio que puede manejarse hasta una etapa donde comienza a desacelerarse. De acuerdo con los resultados de la comparación de la altura media dominante entre tratamientos se corrobora lo planteado por Herrera y Alvarado (1998); Kimmins (2004); González *et al.*, (2013); Serrada (2008), quienes aseguran que la altura dominante se utiliza como indicador de la capacidad productiva de un sitio porque los árboles dominantes representan el mayor crecimiento posible dadas las condiciones ambientales particulares en el sitio de evaluación.

El diámetro tiene un aumento lineal y comienza a disminuir su ritmo de crecimiento en una etapa superior (mayor edad). Estos resultados adquieren connotación para determinar el momento adecuado de las intervenciones silvícolas pertinentes en dependencia del uso que se le desee dar a la plantación. En ese sentido, la fertilización juega un papel importante, aspecto que se demuestra con el análisis de los modelos resultantes de esta investigación.

La extensión en el tiempo del ensayo dificulta la comparación con otros resultados que se han obtenido.

Los resultados presentados pueden estar afectados parcialmente porque las plantaciones no han sido manejadas de manera adecuada; esta es su principal limitación y resulta difícil de mitigar pues ha sido un experimento al que se le ha dado seguimiento durante 41 años. Muchos autores, entre ellos Carlyle (1998); Carter, McWilliams y Klinka (1998); Swanston y Preston (2009 y 2014); Aarnio, Rätty y Martikainen (2003); Mainwaring *et al.* (2014); Will *et al.* (2006), Muller *et al.* (2013) han desarrollado ensayos con menor tiempo de seguimiento; la duración del ensayo presentado en este artículo dificulta la comparación de los resultados obtenidos por estos autores que han desarrollado experimentos de fertilización en plazos más cortos.

## CONCLUSIONES

En los modelos multinivel para diámetro y altura, la inclusión de los tratamientos y la edad mejoran significativamente la calidad de los ajustes. Esto se aprecia en la disminución de los componentes de la varianza.

En el caso del diámetro, en relación con el tratamiento testigo la aplicación de 600 g árbol<sup>-1</sup> en régimen alterno o dosis superiores arroja resultados superiores en crecimiento. En altura, se detectan diferencias significativas con el tratamiento testigo con dosis de 800 o 1000 g árbol<sup>-1</sup> cuando se ajustan los modelos para los 41 años de estudio; sin embargo, cuando se separan por etapas, en el segundo período solo aporta diferencias en el tratamiento 2, con un crecimiento inferior al tratamiento testigo.

El estudio fraccionado por edades solo detecta diferencias, por defecto, del tratamiento 2 con el testigo en el segundo escenario y se mantiene homogeneidad entre el testigo y los demás tratamientos. Se corrobora que cuando la dosis aplicada es insuficiente, en este caso 300 g árbol<sup>-1</sup>, es perjudicial para el crecimiento y desarrollo de la plantación.

## REFERENCIAS

Aarnio, T., Rätty, M. y Martikainen, P. (2003). Long-term availability of nutrients in forest soil derived from fast- and slow-release fertilizers T. *Plant and Soil*, 252, 227-239.

- Albaugh, T., Allen, H. y Fox, T. (2007). Historical patterns of forest fertilization in the Southeast United States from 1969 to 2004. *South. J. Appl. For.* 31 (3), 129–137.
- Albaugh, T., Rubilar, F., Alvarez, J. y Allen, H. (2004). Radiata pine response to tillage, fertilization and weed control in Chile. *Bosque*, 25(2), 5-15.
- Alvarado, A. y Raigosa, J. (2012). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. San José, Costa Rica: MA S.A.
- Awan, A. y Frias, G. (1970). Los suelos de la Estación Experimental Forestal de Viñales, Pinar del Río. *Baracoa*, 2 (1), 19-30.
- Bonomeli, C. y Suárez, F. (1999). Fertilización del eucalipto. Acumulación de fósforo nitrógeno y potasio. *Ciencia e Investigación Agraria* 26, 11-19.
- Cañellas, I., Finat, L., Bachiller, A. y Montero, G. (1999). Comportamiento de plantas de *Pinus pinea* en vivero y campo: Ensayos de técnicas de cultivo de planta, fertilización y aplicación de herbicidas. *Investigación agraria. Producción y Protección Vegetal*, 8 (2), 335-359.
- Carlyle, J. (1998). Relationships between nitrogen uptake, leaf area, water status and growth in an 11-year-old *Pinus radiata* plantation in response to thinning, thinning residue, and nitrogen fertilizer. *Forest Ecology and Management*, 108, 41-55.
- Carter, R., McWilliams, E. y Klinka, K. (1998). Predicting response of coastal Douglas-fir to fertilizer treatments. *Forest Ecology and Management*, 107, 275–289.
- Corporación Nacional Forestal, CL. (2013). *Guía básica de buenas prácticas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios*. Chile.
- De Urzedo, D., Pires, M., Machado, L. y Braga, J. (2013). Effects of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gas (GHG) emissions in tropical forestry. *Forest Ecology and Management*, 310, 37-44. doi:10.1016/j.foreco.2013.08.018
- Everett, C. y Palm-Leis, H. (2009). Availability of residual phosphorus fertilizer for loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 258, 2207-2213.
- Fox, T., Allen, H., Albaugh, T., Rubilar, R. y Carlson, C. (2007). Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States South. *Journal of Applied Forestry*, 31 (1), 5-11.
- Fox, T., Jokela, E. y Allen, H. (2007). The development of pine plantation silviculture in the southern United States. *Journal of Forestry*, 105 (7), 337-347.
- García, E., Sotomayor, A., Sila, S. y Valdebenito, G. (2000). Establecimiento de plantaciones. Santiago de Chile: *Instituto Forestal-Fondo de Desarrollo e Innovación*.
- Goldstein, H. (2010). *Multilevel statistical models* (4a ed.). Nueva York: Wiley Series in Probability and Statistics.
- González, E., Barrero, H. y Carrasco, Y. (2013). Evaluación de las clases de calidad de sitio de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la Empresa Forestal Integral Macurije (Pinar del Río, Cuba). *Ecosistemas*, 22 (3), 46-51.
- González, M. (2006). *Influencia de la densidad de plantación en la economía y la ecología de Pinus caribaea var. caribaea en las Alturas de Pizarra de Pinar del Río Cuba*. Disertación doctoral en Ciencias Forestales no publicada, Ministerio de Educación Superior, La Habana, Cuba.
- Grá, H. (1990). *Confección de tablas de volumen, surtido y densidad de Pinus caribaea Morelet Barret y Golfari en plantaciones puras para Cuba*. La Habana, Cuba: Instituto de Investigaciones Forestales.
- Herrera, B. y Alvarado, A. (1998). Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro América. *Agronomía Costarricense*, 22 (1), 99-117.
- Herrero, G. (2001). *Nutrición de plantaciones de Pinus caribaea var. caribaea: Respuesta a la fertilización y método de diagnóstico*. Disertación doctoral en Ciencias Agrícolas, Instituto Nacional de Ciencia Agrícola, La Habana, Cuba.
- Herrero, G., González, M., Fuentes, I., Herrera, P., García, A. y Coto, O. (2004). Fertilización a *Pinus caribaea* en su hábitat natural y diversidad vegetal asociada. *Primer Congreso de Suelos Forestales* (pág. 18). Heredia. Costa Rica: Inisefor.
- Herrero, J., Renda, A. y González-Abreu, A. (1983). Manejo de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en las zonas de Alturas de Pizarra, P. del Río. *Boletín de Reseñas Forestales - Ministerio de la Agricultura (Cuba)*, 1-26.
- Instituto de Suelos. (1999). *Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba*. La Habana: Agrinfor.





- Jiménez, M. y Herrero, G. (1984). Valoración preliminar de la influencia de los fertilizantes minerales en el desarrollo y crecimiento de una plantación de *Pinus caribaea* var. *caribaea*. *Revista Forestal Baracoa*, 14 (2), 7-24.
- Kimmins, J. (2004). *Forest Ecology. A foundation for sustainable management*. Nueva Jersey, EUA: Prentice Hall.
- Kumaraswamy, S., Mendham, D., Grove, T., O'Connell, A., Sankaran, K. y Rance, S. (2014). Harvest residue effects on soil organic matter, nutrients and microbial biomass in eucalypt plantations in Kerala, India. *Forest Ecology and Management*, 328, 140-149.
- Langford, N. (1993). *Random coefficient models*. Nueva York, EUA: Oxford University Press.
- Mainwaring, D., Maguire, D. y Perakis, S. (2014). Three-year growth response of young Douglas-fir to nitrogen, calcium phosphorus, and blended fertilizers in Oregon and Washington. *Forest Ecology and Management*, 327 (1), 178-188.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. (2005). *Estrategia ambiental y Determinación de ecosistemas en paisajes de primer orden del Parque Nacional Viñales*. Pinar del Río, Cuba: Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales. Ecovida.
- Moreno, L., López, M., Estañol, E. y Velázquez, A. (2002). Diagnóstico de necesidades de fertilización de *Abies religiosa* en vivero mediante el DRIS. *Madera y Bosques*, 8 (1), 49-58.
- Muller, P., Poggiani, F., Libardi, P. y Natal, A. (2013). Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management*, 301, 67-78.
- Raudenbush, S. y Bryk, A. (2002). *Hierarchical linear models: Applications and data analysis methods* (2ª ed.). Thousand Oaks, CA, EUA: Sage Publications.
- Reyes, J., Herrero, G., León, M., Miñoso, Y. y Curvelo, S. (2014). Respuesta a la fertilización de plantaciones de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en su hábitat natural en diferentes edades. *Revista Forestal Baracoa*, 33, 587-598.
- Rubilar, R., Blevins, L., Toro, J., Vita, A. y Muñoz, F. (2008). Respuesta temprana de *Pinus radiata* al control de malezas y fertilización en suelos metamórficos de la cordillera de la Costa de la Región del Maule. *Bosque*, 29 (1), 74-84.
- Serrada, R. (2008). *Apuntes de Silvicultura*. Madrid: EUIT Forestal.
- Shryock, B., Littke, K., Ciol, M., Briggs, D. y Harrison, R. (2014). The effects of urea fertilization on carbon sequestration in Douglas-fir plantations of the coastal Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*, 318, 341-348.
- Smaill, S., Clinton, P. y Greenfield, L. (2008). Nitrogen fertiliser effects on litter fall, FH layer and mineral soil characteristics in New Zealand *Pinus radiata* plantations. *Forest Ecology and Management*, 256, 564-569.
- Solla-Guyón, F., Rodríguez, R. y Merino, A. (2004). Respuesta de plantaciones forestales jóvenes sobre suelos ácidos a la fertilización con cenizas de biomasa. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 20, 227-232.
- Swanston, C., & Preston, C. (2009). Availability of residual phosphorus fertilizer for loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 258, 2207-2213.
- Swanston, C. y Preston, C. (2014). Availability of residual fertilizer 15N from forest floor and mineral soil to Douglas-fir seedlings ten years after fertilization. *Plant Soil*, 381, 381-394.
- Vasquez, A. (2001). *Silvicultura de plantaciones forestales en Colombia. Tolima*. Tolima, Colombia: Universidad del Tolima.
- Will, R., Markewitz, D., Hendrick, R., Meason, D., Crocker, T. y Borders, B. (2006). Nitrogen and phosphorus dynamics for 13-year-old loblolly pine stands receiving complete competition control and annual N fertilizer. *Forest Ecology and Management*, 227, 155-168.

Manuscrito recibido el 21 de enero de 2016.  
Aceptado el 24 de agosto de 2016.

Este documento se debe citar como:  
Léon-Sánchez, M. A., Reyes-Pozo, J. L., Herrero-Echevarría, G., Pérez-León, V. E. (2016). Efecto de la fertilización sobre el crecimiento en diámetro y altura de *Pinus caribaea* en plantaciones del occidente de Cuba. *Madera y Bosques*, 22 (3), 87-101.