

RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN CON P EN PLANTACIONES DE JAÚL (*Alnus acuminata*) EN ANDISOLES DE LA CUENCA DEL RÍO VIRILLA, COSTA RICA¹

Manuel Segura*, Néstor Etxaleku**, Álvaro Castillo***, Marlon Salazar*, Alfredo Alvarado ^{2/*}

Palabras clave: Andisoles, fósforo, nutrimentos, variables dasométricas, jaúl, *Alnus acuminata*.

Keywords: Andisoles, phosphorus, nutrients, growth parameters, alder, *Alnus acuminata*.

Recibido: 24/05/05

Aceptado: 11/08/05

RESUMEN

En este estudio se evaluó el efecto de fertilizar con 0, 61, 122, 183 y 244 g P₂O₅ árbol⁻¹ sobre el crecimiento de árboles de jaúl en suelos Typic Udivitrands (Landelina y Vista de Mar) y Entic Udivitrands (Matinilla). Se determinó que los contenidos disponibles de P aumentaron y los contenidos de Al y Fe amorfo y del pH en NaF disminuyeron con la adición de P. La adición de niveles crecientes de P al suelo no produjo variaciones en la concentración foliar de ningún elemento en forma significativa. Sin embargo, con la adición de 61 g P₂O₅ árbol⁻¹ se observaron aumentos leves en la concentración foliar de K en la plantación de Matinilla y en el contenido de B foliar en la plantación de Landelina. La adición de P no causó diferencia alguna en el diámetro, la altura o el volumen de los árboles en ninguno de los sitios durante el transcurso del ensayo. Al calcular el incremento relativo de las variables de crecimiento, el tratamiento de 61 g de P₂O₅ árbol⁻¹ es el que mostró la mayor tasa en altura en las 3 plantaciones. Las diferencias en diámetro, altura y volumen entre edades fueron evidentes desde el inicio del experimento y se mantuvieron constantes a lo largo del mismo. En la plantación de 3,6 años el ICA para las variables analizadas

ABSTRACT

Effect of P fertilization on the growth of *Alnus acuminata* plantations at Andisols of the Virilla river watershed, Costa Rica. This study evaluated the effect of applying 0, 61, 122, 183 and 244 g P₂O₅ tree⁻¹ to alder trees growing in Typic Udivitrands (Landelina y Vista de Mar) and Entic Udivitrands (Matinilla). It was found that available contents of P increase and content of amorphous Al and Fe and of the pH in NaF decreased in the soils of the 3 plantations. The addition of increasing levels of P to the soil did not alter the foliar concentration of any element significantly. However, with the addition of 61 g P₂O₅ tree⁻¹ a slight increase was found in the foliar concentration of K in the plantation of Matinilla, and in the content of foliar B in the plantation of Landelina. The addition of P did not cause any difference in the trees' diameter, height or volume in any of the places during the course of the trial (2 years). Nevertheless, when calculating the relative increase of growth parameters, the treatment of 61 g of P₂O₅ tree⁻¹ showed the highest growth rate (tree height) in the 3 plantations. The differences in diameter, height and volume between ages were evident from the beginning of the experiment and remained

1/ Este trabajo forma parte de la tesis de M.Sc. del primer autor. Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agroalimentarias. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

2/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: alfredoa@cariari.ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

** Universidad Pública de Navarra, Navarra, España.

*** Compañía Nacional de Fuerza y Luz. San José, Costa Rica.

es mayor que el encontrado en las plantaciones de mayor edad, en las cuales disminuye. El IMA alcanza un punto máximo a la edad de 7,5 años y luego tiende a disminuir.

constant during the experiment. In the 3.6 year-old plantation the Current Annual Increment for the analyzed variables is higher than the one found in older plantations, in which it diminishes. The Mean Annual Increment reaches a maximum at 7.5 year of age and then tends to decrease.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito del manejo de cuencas, las plantaciones forestales de altura tienen un papel muy importante, ya que ayudan a mejorar el paisaje y a disminuir la cantidad de sedimentos que llegan a los cauces de agua y a colmatar represas y otras obras de ingeniería. En este contexto desde 1990, la dirección ambiental de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), se planteó el objetivo de mejorar el ambiente de la cuenca alta del río Virilla. Con este propósito se decidió reforestar unas 1000 ha de esta cuenca utilizando, principalmente, el jaúl; aunque se desconocen algunos aspectos importantes relacionados con las necesidades nutricionales de la especie.

Alnus acuminata (H.B.K.) O. Kuntze es una especie de crecimiento rápido y su rendimiento en madera puede alcanzar un promedio anual de 10-15 m³ ha⁻¹ año⁻¹ hasta los 20 años, en los mejores sitios. Para esto es importante el manejo silvícola de la plantación mediante raleos, podas y fertilizaciones (CATIE 1995). Las zonas de crecimiento de *A. acuminata* en Costa Rica se ubican en suelos Andisoles, los cuales se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas, tales como los de la cuenca del río Virilla, en la Cordillera Volcánica Central. Estos suelos tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico que los de otras regiones del país y su sumatoria de bases es baja, por lo que poseen una fertilidad natural de baja a moderada y se debe recurrir a la adición de fertilizantes para lograr mayores rendimientos (Alvarado *et al.* 2001). Esta fertilidad limitada se compensa con las buenas propiedades físicas que los caracteriza y que favorecen el establecimiento de las plantaciones como las de jaúl.

Cuando las condiciones climáticas favorecen el crecimiento de los árboles durante todo el año, a diferencia de lo que ocurre en regiones templadas, los requerimientos nutricionales de los árboles son más acentuados. Por ello, en los trópicos el tiempo transcurrido desde el establecimiento hasta el aprovechamiento de una plantación es relativamente corto y puede ser rentable una fertilización que mejore su rendimiento.

Aunque el N es uno de los nutrimentos que en mayor proporción limita el crecimiento de los árboles en regiones tropicales, no es un elemento deficiente para los árboles de jaúl, porque estos son capaces de fijar N atmosférico; no obstante su actividad fijadora puede verse limitada por la baja disponibilidad de otros elementos como P y Ca, o estar reprimida por una alta disponibilidad de N que hace innecesaria la fijación (Vitousek y Sanford 1986). Sin deficiencia de N, el P es el segundo elemento que comúnmente es deficiente en suelos tropicales y en particular en Andisoles.

El aumento en crecimiento que se espera de los árboles como respuesta a la aplicación de P, se sustenta en el hecho de que este elemento es limitante en el 75% de los suelos de Costa Rica (Bertsch 1995). La alta capacidad de fijación de P en Andisoles y el complejo orgánico estable que puede formar en este tipo de suelos, provoca una disminución de la disponibilidad de P para las plantas, por lo que en el caso del presente estudio, la posibilidad de respuesta a su aplicación es alta. En Costa Rica, Fassbender *et al.* (1968) encontraron que los Andisoles retuvieron el 86,4% del P adicionado, pero la retención de P en Andisoles puede oscilar entre el 5,5% y el 99,9% del P adicionado (Alvarado y Buol 1985) y la forma en que se fija depende de factores como su textura,

contenido de materia orgánica, el contenido de Al y Fe amorfo, los años de uso de la tierra en agricultura y su grado de meteorización (Soto 1998, Alvarado *et al.* 2001).

Conocer los requerimientos nutricionales de los árboles es fundamental para lograr el desarrollo de sistemas sostenibles en la producción de plantaciones forestales. En el caso del jaúl en plantación y en suelos altamente fijadores de P, es conveniente realizar aplicaciones de P para mejorar la interacción N-P, y generar información sobre la absorción y la respuesta a su aplicación en la especie. En Costa Rica, se acostumbra adicionar P en fórmulas completas al trasplante de *A. acuminata*, ya que se promueve el crecimiento inicial de la parte aérea y del sistema radical de las plántulas. En regiones no tropicales, se han realizado algunos estudios referentes al tema en el género *Alnus* spp. (Sharma y Ambasht 1987, Zou *et al.* 1995, Sharma *et al.* 2002).

El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la adición de niveles crecientes de P sobre las variables de crecimiento y las características de absorción de nutrimentos del jaúl, además de estimar el efecto de este tratamiento sobre la nodulación y las propiedades químicas de los suelos de los sitios estudiados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Variables ambientales

Los sitios de estudio se ubican en Andisoles de los cantones Vásquez de Coronado y Goicoechea, en relieves planos con ondulaciones de moderadas a fuertes, en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB),

a una elevación entre 1542 y 2062 msnm. La precipitación promedio anual es de 2500 mm y la temperatura media oscila de 12-22,5°C. La humedad relativa de la zona es alta y la neblina es frecuente, con vientos leves (Montoya 1999). El estudio se realizó en plantaciones de *A. acuminata* de 2 (Landelina, suelo Typic Udivitrands), 4 (Vista de Mar, suelo Typic Udivitrands), y 7 años de edad inicial (Matinilla, suelo Entic Udivitrands) consideradas como de crecimiento excelente, según los criterios desarrollados por Camacho y Murillo (1986).

La plantación de Landelina fue plantada en el año 2001, en un terreno con una pendiente promedio de 40%. La plantación de Vista de Mar se plantó en 1999 y el terreno presenta una topografía plano-cóncava; mientras que la plantación de Matinilla, fue plantada en el año 1996 y en una pendiente promedio del 40%. Todas las plantaciones fueron establecidas a una distancia de 3,5x3,5 m, para una densidad de 816 árboles ha⁻¹ y han estado bajo el cuidado del departamento de Recursos Naturales, Dirección Ambiental de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz.

La razón de trabajar con plantaciones de diferentes edades, obedece a que se quiere establecer una “serie falsa de tiempo”, con el objeto de medir en un tiempo corto, la variación del contenido de nutrimentos en árboles plantados en fechas diferentes. Las coordenadas exactas de las plantaciones se tomaron con un GPS (Punto de Posicionamiento Global) y se indican en el cuadro 1.

Diseño experimental de los tratamientos

En las plantaciones de 2 y 4 años de edad la parcela experimental estaba constituida por

Cuadro 1. Ubicación geográfica de las 3 plantaciones de *A. acuminata* en la Cuenca alta del Río Virilla, Costa Rica.

Edad (años)	Finca	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m)
2	Landelina	09° 59' 37"	83° 57' 08"	1925
4	Vista de Mar	09° 58' 05"	83° 59' 46"	1542
7	Matinilla	09° 57' 58"	83° 56' 56"	2062

un tamaño total de 36 árboles (6x6) en un área de 441 m² y la parcela útil constó de 16 árboles (4x4) y 196 m². En la plantación de 7 años, debido a las condiciones de siembra, no se realizó el mismo modelo de parcela y se procedió a marcar parcelas de 20x25 (500 m²).

El diseño experimental consistió en una distribución de 3 bloques escogidos al azar en los que se distribuyeron al azar los 5 tratamientos (niveles de P), para un total de 15 parcelas plantación⁻¹ de jaíl de 2, 4 y 7 años de edad inicial. Los bloques fueron ubicados en las áreas con condiciones edáficas similares y árboles que representaban la altura y diámetro de los árboles dominantes y codominantes, de modo que la respuesta al tratamiento fuera lo más representativa posible.

En las 3 plantaciones se aplicaron dosis crecientes de P empleando como fuente superfosfato triple (0-46-0) en cantidades de: 0, 50, 100, 150 y 200 kg P₂O₅ ha⁻¹, que equivalen a 0, 61, 122, 183 y 244 g P₂O₅ árbol⁻¹ para una densidad de 816 árboles ha⁻¹. La forma en que se aplicó la fertilización fue al boleó, tratando de dirigir la dosis a la rodaja de los árboles hasta una distancia aproximada del tronco de 1 m. La primera fertilización se realizó durante los meses de febrero y marzo del año 2003 (época seca), tratamiento que se repitió al cabo de un año, en febrero de 2004.

Muestreo y análisis de suelos

Se tomó muestras compuestas de suelos al inicio del experimento cuyos resultados se incluyen en el trabajo de Segura *et al.* (2005), en este mismo número de la Revista y durante el mes de enero del 2004 en cada una de las 3 plantaciones. Las muestras se tomaron con barreno siguiendo el método de muestreo propuesto por Henríquez *et al.* (1995), el cual consiste en realizar un muestreo en zig-zag en 6 sitios por tratamiento (submuestras) a una profundidad de 0 a 20 cm y en la zona donde se encuentran la mayoría de las raíces de los árboles. Las submuestras representaban las 3 repeticiones de cada tratamiento en

cada localidad y se empacaron y guardaron en bolsas plásticas.

Las muestras recolectadas se enviaron al Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, donde fueron analizadas las variables: pH en agua, Ca, Mg, K, acidez intercambiable, P, Fe, Cu, Zn, Mn, Al intercambiable y N total empleando la metodología de Díaz-Romeu y Hunter (1978). También se determinaron el pH en NaF por el método de Fieldes y Perrott (1966) y los contenidos de Al y Fe amorfo por el método de Blakemore *et al.* (1981). La materia orgánica se determinó por el método de combustión húmeda de Walkey y Black, descrito por Briceño y Pacheco (1984).

Para determinar el tipo de textura se utilizó el método de Bouyoucos modificado tal y como viene descrito en la metodología descrita por Forsythe (1975) y se empleó la hoja de cálculo Anapart desarrollada por el Dr. W. Forsythe, para obtener los porcentajes de partículas de diferente tamaño.

Muestreo y análisis de tejido foliar

Se procedió a recolectar una muestra compuesta de tejido foliar en árboles dominantes y representativos de cada uno de los tratamientos y en cada una de las repeticiones de las 3 plantaciones un año después de haber aplicado el fertilizante al suelo. Las muestras consistían de hojas jóvenes de la parte apical de ramas situadas en la parte media de la copa del árbol. En la plantación de 2 años, las muestras se recogieron utilizando una podadora manual equipada con una vara telescópica; en las otras plantaciones, fue necesario escalar los árboles hasta la parte alta para asegurarse la toma de una muestra representativa de toda la parcela.

Las muestras fueron enviadas al CIA, donde se analizó el N total, P, Ca, Mg, K, Mn, Zn, Cu, S, B y Fe, según la metodología descrita por Henríquez *et al.* (1995).

Variables de crecimiento de los árboles

Como variables dasométricas, se midieron el diámetro a la altura del pecho (1,3 m), la altura de los árboles empleando un método indirecto según la metodología descrita por Jumkov (1994) y el volumen de los árboles, empleando la fórmula de Schumacher modificada para las parcelas permanentes de jaúl en la cuenca alta del río Virilla (Castillo 2005, Comunicación personal), a saber:

$$V(m^3) = 2,71828^{-10,0557 + \ln(d)*2,0369 + 0,927718*\ln(h)}$$

Las mediciones se realizaron cada 6 meses y por un período de 22 meses; sin embargo, debido a que el crecimiento de las especies arbóreas es lento, se decidió eliminar la tercera medición con el objeto de tener intervalos de tiempo más largos entre una medición y otra. La primera medición se realizó en mayo del 2003, la segunda en noviembre del 2003, la tercera en mayo del 2004 y la cuarta en diciembre de 2004. En el caso de la plantación de Matinilla, la segunda medición se realizó durante el mes de enero de 2004. Con los valores obtenidos en el campo, se calcularon el incremento medio anual y el incremento corriente anual, en adelante reconocidos como IMA e ICA, respectivamente.

Para favorecer la comparación entre tratamientos, se procedió a eliminar el factor de sitio correspondiente a cada uno de los tratamientos

(incremento relativo) utilizando el método de Waugh *et al.* (1973).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis gráfico de dispersión preliminar para observar las tendencias entre las variables comparadas y posteriormente otro de varianza para todos los nutrimentos foliares, para las variables diámetro, altura, volumen y su

interacción, todo en función de los tratamientos de P aplicados. Además, se realizó un análisis de regresión lineal del diámetro *v* altura y el diámetro *v* volumen.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la fertilización con P sobre las variables edáficas

Los suelos de las plantaciones tienen texturas franco-arenosas, una profundidad efectiva mayor a 1,2 m, sin pedregosidad, drenaje bueno (tanto superficial como interno) y presentan erosión moderada en algunos sectores. El suelo de la plantación de 7 años tiene más arena que el suelo de las otras 2 plantaciones (Cuadro 2), lo cual se

Cuadro 2. Análisis granulométrico de suelos en plantaciones de *A. acuminata* de 2, 4 y 7 años de edad inicial.

Plantación edad (años)	n = 5	% Arcilla 2 μ m	% Limo 20 μ m	% Limo 50 μ m	% Arena 20 μ m- 2 mm	% Arena 50 μ m- 2 mm	Textura USDA
2	Promedio	6,91	24,23	40,44	68,85	52,65	Franco- Arenoso
	Desv. Típica	± 0,22	± 1,32	± 1,68	± 1,41	± 1,86	
4	Promedio	8,36	21,63	34,03	69,99	57,60	Franco- Arenoso
	Desv. Típica	± 2,73	± 1,58	± 2,51	± 4,15	± 4,83	
7	Promedio	2,60	15,86	30,54	81,54	66,87	Franco- Arenoso
	Desv. Típica	± 1,05	± 2,42	± 2,42	± 3,24	± 3,20	

asocia con un menor grado de desarrollo pedogenético de este suelo, debido a que en este sitio se acumuló mucha ceniza de la última erupción del Volcán Irazú, por lo que su contenido de materia orgánica, pH en NaF y el contenido de Al y Fe amorfo son bajos; datos similares mencionan Alvarado *et al.* (2001) al discutir la génesis de Andisoles de Costa Rica.

Las principales variables de fertilidad evaluadas (testigos de cada plantación), reflejan ligeras variaciones entre plantaciones en los contenidos de P, Cu y de Zn, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Las concentraciones de Cu y Zn en los suelos de las plantaciones de 2 y 4 años son similares y diferentes a los de la plantación de 7 años, la cual presenta valores de Cu más bajos y de Zn más altos, posiblemente debido a diferencias en la mineralogía del material parental en la última plantación. En general, los niveles de los elementos en el suelo se encuentran dentro del ámbito de suficiencia para el crecimiento de cultivos agrícolas, descrito por Molina (1993).

La mayoría de las variables de suelo analizadas, presentaron cambios ligeros con la adición de niveles crecientes de P, excepto los contenidos de P, Cu y Zn disponibles de todas las plantaciones (Cuadro 3). Con la adición de 61 g P₂O₅ árbol⁻¹ se duplicó el nivel de P disponible en el suelo con relación al testigo; sin embargo, con la adición de niveles de P mayores a 61 g P₂O₅ árbol⁻¹ el comportamiento del P disponible en el suelo fue errático y afectado por fenómenos de precipitación del P como fosfatos de Al y Fe. Otros estudios en Andisoles de Costa Rica muestran que los contenidos de P disponible aumentan en forma lineal conforme se adiciona P como fertilizante a los cultivos sembrados en Andisoles (Alvarado 1982, Soto 1998).

La clasificación de los suelos de las plantaciones bajo estudio requiere de la determinación del contenidos de materiales amorfos (Al y Fe), del pH en NaF y de su contenido de materia orgánica; de esta manera, todos los suelos clasificaron como Udivitrands, dentro del subgrupo Typic en Landelina y Vista de Mar y Entic en el caso de

Matinilla, denotando valores más bajos en los 3 parámetros mencionados con anterioridad. En el cuadro 4 se observa que los contenidos de Al y Fe amorfo son bajos, para las condiciones de suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica mencionados por (Alvarado *et al.* 2001). Esta situación se atribuye a que en sitios donde las cenizas son recientes o en regiones con temperatura baja, normalmente la meteorización de los minerales primarios (arenas) es baja, lo cual conduce a formar poco Al y Fe amorfo. El efecto de la cantidad de Al y Fe amorfo sobre el aumento de P disponible en el suelo conforme se adicionan cantidades crecientes del elemento es sustancial, de manera que cuando los niveles de elementos amorfos son pequeños (Matinilla 1,02%) el incremento en P disponible fue de 44.5 mg l⁻¹, mientras que en los otros sitios estudiados (Landelina 1,67% y Vista de Mar 2,12%), los incrementos alcanzados fueron de 6,9 y 7,2 respectivamente. Inversamente, la adición de niveles crecientes de P causa una disminución importante de los contenidos de Al y Fe amorfo del suelo, por lo que se podría considerar la adición de P como una enmienda.

La adición de dosis crecientes de P, además de aumentar el contenido de éste en el suelo, tiende a disminuir los contenidos de materiales amorfos (Al y Fe) y del pH en NaF en los 3 sitios comparados (Cuadro 4). El contenido de P disponible en Andisoles está relacionado con la presencia de Al y Fe amorfos y a su porcentaje de materia orgánica (Alvarado 1982, Soto 1998), por lo que el hecho de que disminuya el contenido de materiales amorfos con la aplicación de P, confirma lo establecido por Fassbender *et al.* (1968), en el sentido de que se forman en el suelo fosfatos de Fe y Al de baja solubilidad. Sin embargo, otros factores también pueden afectar la disponibilidad del P, lo que explicaría como en la plantación de 2 y 4 años con contenidos similares de materia orgánica, los contenidos de P son menores en la plantación de 2 años. Sería de esperar que la plantación de menor edad fuera la que presentara una mejor respuesta a la fertilización con P, ya que es la que tiene una menor cantidad inicial de P disponible.

Cuadro 3. Análisis químico de suelos en plantaciones de *A. acuminata* de 2, 4, y 7 años de edad al primer año de la aplicación de P.

Tratamiento	pH	Ca	Mg	K	Al Int.	Acidez	CICE	P	Cu	Fe	Mn	Zn	M.O.	N Total
P ₂ O ₅ árbol ⁻¹	mg l ⁻¹													
	H ₂ O													
LANDELINA (3 años)														
0	5,77	3,27	1,30	0,21	0,26	0,32	5,10	7,4	20,7	302	3,1	4,2	7,14	0,34
61	5,78	2,96	1,17	0,25	0,24	0,28	4,66	7,8	24,2	418	3,9	5,7	6,83	0,36
122	5,75	2,96	1,31	0,24	1,20	1,38	5,89	7,2	24,7	402	3,9	4,7	6,64	0,33
183	5,73	2,84	1,21	0,21	0,87	0,98	5,24	9,6	23,4	378	3,9	4,0	5,95	0,36
244	5,63	2,97	1,31	0,22	1,80	1,96	6,46	14,3	21,4	455	4,3	5,5	7,39	0,38
VISTA DE MAR (5 años)														
0	5,74	3,93	1,48	0,36	0,52	0,56	6,33	19,6	17,5	274	3,9	4,8	6,51	0,34
61	5,69	3,61	1,26	0,31	0,64	0,60	5,78	21,1	19,9	325	4,3	4,8	7,01	0,38
122	5,74	3,53	1,23	0,28	0,97	1,03	6,07	16,9	18,5	214	3,9	5,5	6,89	0,38
183	5,83	3,54	1,32	0,39	0,32	0,38	5,63	16,2	20,3	300	4,3	4,5	6,51	0,35
244	5,82	4,15	1,38	0,36	0,32	0,32	6,21	26,8	18,5	311	4,5	5,0	6,32	0,35
MATINILLA (8 años)														
0	5,79	6,30	1,16	0,20	0,30	0,35	8,01	11,0	16,6	234	2,7	6,4	4,45	0,22
61	5,62	2,33	1,02	0,24	0,30	0,35	3,94	38,9	9,4	459	3,4	7,7	3,38	0,20
122	5,60	2,04	0,94	0,21	0,40	0,42	3,61	32,3	10,8	433	2,5	7,4	3,26	0,17
183	5,69	2,27	1,02	0,21	0,32	0,36	3,86	30,7	11,7	410	2,8	7,6	4,38	0,18
244	5,59	2,07	0,93	0,23	0,34	0,37	3,60	55,8	9,3	490	2,7	7,3	3,63	0,17
TODAS LAS LOCALIDADES (Promedio)														
0	5,77	4,50	1,31	0,26	0,36	0,41	6,48	12,6	18,2	270	3,2	5,1	6,03	0,30
61	5,70	2,97	1,15	0,27	0,39	0,41	4,79	22,6	17,8	400	3,9	6,8	5,74	0,31
122	5,70	2,84	1,16	0,24	0,86	0,94	5,19	18,8	18,0	349	3,4	5,9	5,59	0,29
183	5,75	2,88	1,18	0,27	0,50	0,57	4,91	18,8	18,4	362	3,7	5,4	5,61	0,30
244	5,68	3,06	1,21	0,27	0,82	0,88	5,42	32,3	16,4	418	3,8	5,9	5,78	0,30

Cuadro 4. Efecto del P adicionado al suelo sobre los valores de P, Al y Fe amorfos, pH en NaF en los suelos de las plantaciones comparadas.

Trat (g P ₂ O ₅ árbol ⁻¹)	P mg l ⁻¹	Al + Fe %	pH a 2 min	pH a 60 min
LANDELINA (2 AÑOS)				
0	7,4	1,67	9,70	10,27
61	7,8	1,52	9,68	10,36
122	7,2	1,60	9,67	10,32
183	9,6	1,63	9,61	10,32
244	14,3	1,50	9,60	10,23
VISTA DE MAR (4 AÑOS)				
0	19,6	2,12	9,73	10,43
61	21,1	2,05	9,78	10,45
122	16,9	2,01	9,95	10,55
183	16,2	1,81	9,92	10,45
244	26,8	1,93	9,78	10,39
MATINILLA (7 AÑOS)				
0	11,0	1,02	9,42	9,59
61	38,9	0,79	8,47	8,59
122	32,3	0,73	8,60	8,70
183	30,7	0,83	8,76	8,85
244	55,8	0,71	8,42	8,59
TODAS LAS LOCALIDES (Promedio)				
0	12,6	1,60	9,62	10,10
61	22,6	1,45	9,31	9,80
122	18,8	1,45	9,41	9,86
183	18,8	1,42	9,43	9,87
244	32,3	1,38	9,27	9,74

Efecto de la adición de P sobre la concentración foliar de nutrimentos en jaúl

En general, la adición de niveles crecientes de P al suelo, no hizo variar la concentración foliar de ningún elemento en forma significativa. Sin embargo, con la adición de 61 g P₂O₅ árbol⁻¹, se encontró aumentos leves en la concentración foliar de K (p=0,043) en la plantación de 7 años y en el contenido de B foliar (p=0,065) en la plantación de 2 años (Cuadro 5). Los contenidos de Ca y Mn foliar son más altos en la plantación de 4 años, lo cual no obedece a la fertilización con P, sino a una mayor disponibilidad de estos elementos en dicha plantación (Cuadros 3 y 5).

No se logró hacer una mejor interpretación sobre niveles críticos de concentración foliar en *A. acuminata*, debido a que no se encontró información bibliográfica sobre el tema.

Efecto de la adición de P sobre el diámetro, la altura y el volumen del tronco de árboles de jaúl

No hubo diferencias debidas a tratamiento en diámetro, altura y volumen en ninguno de los sitios o de las evaluaciones realizadas (Cuadro 6); esto fue corroborado por el análisis del incremento relativo de las 3 variables dasométricas (Figura 1). El tratamiento de 61 g de P₂O₅ árbol⁻¹ es el

Cuadro 5. Efecto del P adicionado al suelo en el contenido foliar de nutrimentos de *A. acuminata* un año después de su aplicación.

Tratamiento	N Total	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
g P ₂ O ₅ árbol ⁻¹	(%)						mg kg ⁻¹				
LANDELINA (3 años)											
0	3,51	0,28	0,49	0,19	1,12	0,15	79	19,7	34,0	32,0	21,6
61	3,69	0,29	0,52	0,20	1,09	0,15	73	21,5	36,0	34,5	26,6
122	3,72	0,26	0,50	0,19	0,98	0,15	70	20,7	30,3	35,3	21,8
183	3,50	0,30	0,48	0,19	1,07	0,14	73	18,7	33,3	42,3	22,2
244	3,56	0,28	0,48	0,20	1,11	0,14	72	18,0	34,7	41,0	19,9
Promedio	3,60	0,28	0,50	0,19	1,07	0,15	73	19,7	33,7	37,0	22,4
Pr >F	0,47	0,84	1,00	0,96	0,35	0,74	0,94	0,60	0,96	0,78	0,07
VISTA DE MAR (5 años)											
0	3,24	0,28	0,72	0,14	1,04	0,10	77	17,7	38,3	32,0	14,4
61	3,13	0,28	0,70	0,15	1,04	0,10	72	16,7	24,3	39,7	15,7
122	3,29	0,28	0,79	0,13	1,09	0,10	84	19,7	28,0	44,3	14,9
183	3,22	0,34	0,95	0,19	1,52	0,10	100	22,7	36,3	56,3	17,7
244	3,15	0,28	0,80	0,16	1,03	0,10	77	18,3	34,0	36,3	14,5
Promedio	3,21	0,29	0,79	0,15	1,14	0,10	82	19,0	32,2	41,7	15,4
Pr >F	0,80	0,30	0,28	0,28	0,88	0,93	0,17	0,14	0,27	0,30	0,54
MATINILLA (8 años)											
0	3,26	0,29	0,52	0,19	1,00	0,14	84	20,7	25,3	26,3	17,8
61	3,53	0,30	0,45	0,21	1,17	0,13	76	19,7	29,3	20,0	18,4
122	3,47	0,31	0,54	0,18	0,97	0,12	93	20,3	39,0	29,0	17,5
183	3,45	0,30	0,45	0,17	1,01	0,13	85	18,3	28,3	29,3	14,6
244	3,39	0,28	0,48	0,18	1,14	0,13	91	19,3	27,7	27,3	15,4
Promedio	3,42	0,30	0,49	0,19	1,06	0,13	86	19,7	29,9	26,4	16,7
Pr >F	0,43	0,86	0,90	0,55	0,04	0,59	0,66	0,88	0,37	0,93	0,36

que muestra la mayor tasa de crecimiento en las 3 plantaciones.

Las diferencias en diámetro, altura y volumen entre edades fueron evidentes desde el inicio del experimento y se mantuvieron a lo largo del mismo (Cuadro 6). Esta tendencia se mantiene constante en las 3 plantaciones, por lo que no parece que la edad entre 2 y 9 años sea un factor determinante en la absorción de P por los árboles.

Las diferencias de diámetro y altura entre tiempos de evaluación en las 3 plantaciones, muestran que la interacción tiempo x edad

fue significativa ($p=0,0001$); en la plantación Landelina entre la primera y la última evaluación se observó un aumento de 6,4 cm en el diámetro y la altura aumentó 7,22 m. De manera similar, en la plantación de Vista de Mar, el diámetro aumentó 2,3 cm y la altura 4,62 m y en la plantación de Matinilla se observó un incremento de 1,1 cm en el diámetro y de 3,74 m en la altura (Cuadro 6).

Cuando se analizó la variable volumen (Cuadro 6), se observó que en la plantación de Landelina el incremento en altura y diámetro fue mayor al incremento en volumen, mientras que

Cuadro 6. Diámetro, altura y volumen promedio árbol⁻¹ de jaúl en función de los tratamientos y entre tiempo de evaluación en plantaciones de *A. acuminata*.

Tratamientos g P ₂ O ₅ árbol ⁻¹	Diámetro (cm)*			Altura (m)*			Volumen (m ³)*		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
LANDELINA (2 años)									
0	5,30	7,05	11,63	4,62	7,15	12,06	0,0059	0,0148	0,0651
61	6,02	7,94	12,26	4,88	8,60	12,73	0,0076	0,0216	0,0752
122	6,28	8,03	12,79	4,90	7,41	12,46	0,0079	0,0191	0,0800
183	5,07	7,13	12,16	4,47	6,64	11,07	0,0049	0,0138	0,0649
244	5,84	7,44	11,98	4,73	7,15	11,36	0,0073	0,0168	0,0654
Promedio	5,70	7,52	12,16	4,72	7,39	11,936	0,0067	0,0172	0,0701
Pr >F	0,58	0,64	0,76	0,95	0,14	0,27	0,9999	0,9966	0,9726
VISTA DE MAR (4 años)									
0	13,89	14,36	16,1	12,49	14,14	16,96	0,0954	0,1144	0,1705
61	14,12	14,72	16,61	12,39	14,03	17,45	0,0998	0,1210	0,1898
122	13,98	14,6	16,32	12,65	14,35	16,82	0,1019	0,1247	0,1808
183	12,73	13,22	15,09	12,50	13,90	16,72	0,0795	0,0949	0,1473
244	13,99	14,42	15,99	12,79	14,53	18,01	0,0989	0,1182	0,1776
Promedio	13,74	14,26	16,02	12,56	14,19	17,19	0,0951	0,1146	0,1732
Pr >F	0,45	0,36	0,51	0,97	0,92	0,54	0,8135	0,6984	0,643
MATINILLA (7 años)									
0	19,26	20,37	21,69	18,39	20,6	21,84	0,2667	0,3297	0,3954
61	20,47	20,9	22,21	18,29	20,86	22,36	0,2980	0,3513	0,4239
122	20,76	21,34	22,91	19,02	20,49	22,50	0,3168	0,3592	0,4530
183	19,11	19,8	21,1	18,32	20,27	22,07	0,2616	0,3093	0,3801
244	20,01	20,92	22,37	18,61	20,73	22,54	0,2896	0,3499	0,4337
Promedio	19,92	20,67	22,06	18,53	20,59	22,26	0,28654	0,33988	0,41722
Pr >F	0,23	0,37	0,32	0,76	0,94	0,91	0,0704	0,1882	0,1085

*1, 2 y 3 se refieren a mediciones a los 3, 9 y 22 meses después de la primera aplicación de P.

en las plantaciones de Vista de Mar y Matinilla, el incremento en volumen fue mayor que el incremento en altura y diámetro, todo conforme al tipo de crecimiento normal de la especie a la última medición. Los aumentos de volumen fueron de 0,0634 m³, 0,0781 m³ y 0,1307 m³ en las plantaciones de menor a mayor edad, respectivamente.

En el cuadro 7 y en las figuras 2 y 3, se puede observar los índices ICA e IMA promedios, que muestran cómo es el crecimiento en diámetro, altura y rendimiento total de los árboles de

jaúl según la edad. En la plantación de 3,6 años el ICA para las variables mencionadas es mayor que el encontrado en las plantaciones de mayor edad, en las cuales disminuye. El IMA alcanza un punto máximo a la edad de 7,5 años y luego tiende a disminuir; sin embargo, este comportamiento podría esperarse a una edad mayor en jaúl ya que la plantación ha llegado a la mitad de su ciclo de corta. Al respecto Clutter *et al.* (1982) mencionan que la curva del ICA alcanza un valor máximo a una temprana edad en la vida de la

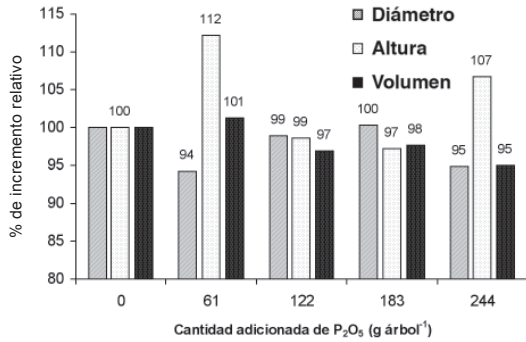


Fig. 1. Incremento relativo promedio en diámetro, altura y volumen por tratamiento de plantaciones de 2, 4 y 7 años de edad inicial.

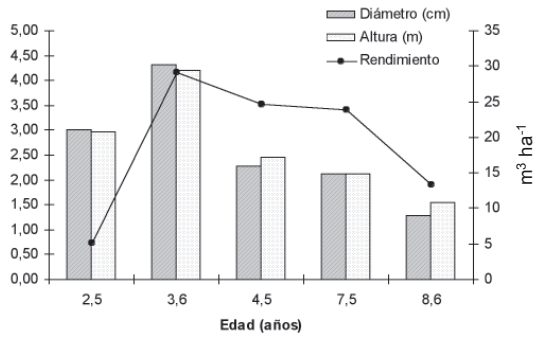


Fig. 2. Variación del Incremento Corriente Anual (ICA) en diámetro, altura y rendimiento para plantaciones de *A. acuminata* de diferente edad.

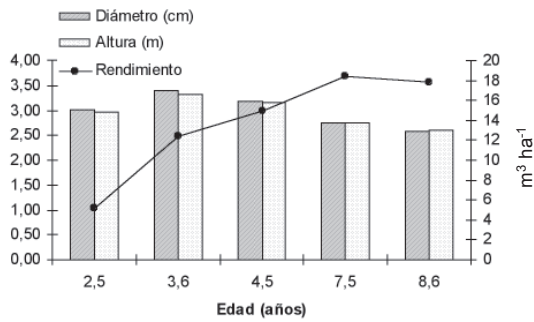


Fig. 3. Variación del Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro, altura y rendimiento para plantaciones de *A. acuminata* de diferente edad.

Cuadro 7. Crecimiento y producción de plantaciones de *A. acuminata* de diferente edad.

Edad	Densidad	Diámetro		Rendimiento	Diámetro		Rendimiento	Volumen		Rendimiento
		cm	cm		ICA	IMA		ICA	IMA	
Años	árbol ha ⁻¹	cm	cm	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
2,5	752	7,52	3,01	12,97	3,01	2,96	0,0069	5,19	5,19	5,19
3,6	633	12,16	4,30	44,36	4,30	4,21	0,0490	29,07	29,07	12,39
4,5	585	14,26	2,28	67,05	2,28	2,45	0,0484	24,67	24,67	14,90
7,5	408	20,66	2,13	138,67	2,13	2,13	0,0751	23,87	23,87	18,49
8,6	367	22,05	1,28	152,98	1,28	2,57	0,0716	13,25	13,25	17,83

plantación forestal y luego declina. Este valor máximo ocurre a la edad donde la pendiente de la curva de producción tiene forma de campana. El IMA alcanza este valor máximo a una edad posterior e intercepta la curva del ICA a este punto máximo. Esta relación indica que, si el ICA es mayor que el IMA, el IMA debe estar aumentando mientras que si el ICA es menor que el IMA, el IMA debe estar disminuyendo. La plantación de 7,5 años presentó problemas fitosanitarios que influyeron en una disminución en la densidad, el crecimiento y la producción. Esto se refleja en la disminución de la densidad de 4,5 a 7,5 años por raleos fitosanitarios y no por área basal, la cual debe alcanzar los 20 m² ha⁻¹ a estas edades para realizar los raleos respectivos.

Relaciones alométricas entre el diámetro, la altura y el volumen de los árboles de jaúl

El análisis de regresión mostró que existe un modelo lineal significativo ($p=0,0001$) para la predicción de la altura y el volumen a partir de la variable independiente diámetro. Se observó una correlación alta ($r^2=0,93$) entre diámetro y la variable dependiente altura (Figura 4). También

se obtuvo un modelo potencial significativo ($p=0,0001$) a partir del análisis de regresión para la predicción del volumen a partir de la variable diámetro. Se observó una correlación alta ($r^2=0,9951$) entre el diámetro y el volumen de los árboles de jaúl a distintas edades (Figura 5). A partir de los datos de diámetros se puede predecir los valores de la altura y volumen utilizando las ecuaciones de regresión que se muestran en las figuras 4 y 5 siempre y cuando se realicen estas determinaciones bajo condiciones de sitio y de manejo similares.

Castaing (1982) encontró resultados similares a los de esta investigación entre el diámetro y la altura de rodales de *Cedrela odorata* en plantaciones jóvenes; sin embargo, los coeficientes de determinación disminuyeron en los rodales más viejos y se atribuye a un efecto de edad ya que en plantaciones más jóvenes hay una mayor relación entre estas variables. Esto sugiere que la alometría es una forma práctica para conocer de una manera más sencilla y precisa cuales son las condiciones en las plantaciones de jaúl y poder establecer de este modo cual es el método de manejo más conveniente. Sin embargo, es conveniente extender este estudio hasta el período

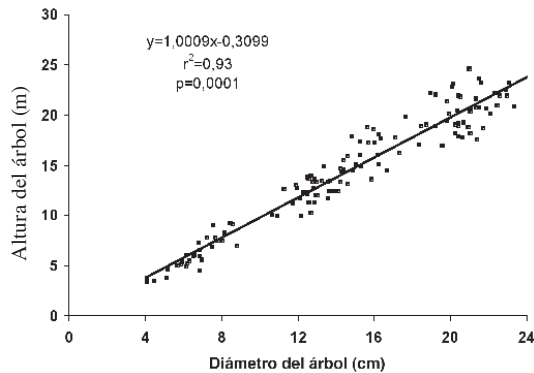


Fig. 4. Regresión entre el diámetro y la altura de árboles de jaúl de 2 a 9 años de edad.

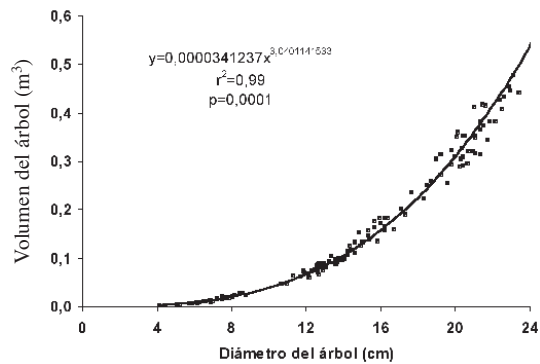


Fig. 5. Regresión entre diámetro y volumen para árboles de jaúl de 2 a 9 años de edad.

de aprovechamiento de los árboles (15 años) para determinar si los coeficientes encontrados se mantienen con el tiempo en plantaciones de *A. acuminata*.

CONCLUSIONES

Dos años después de la adición de niveles crecientes de P al suelo, no se encontró ninguna diferencia del diámetro, la altura o el volumen de los árboles en ninguno de los sitios comparados. Lo anotado es válido para las condiciones de edad y de sitio de las plantaciones estudiadas en donde se asume que el contenido de P en el suelo es suficiente para maximizar el crecimiento de jaúl.

La adición de niveles crecientes de P al suelo, no hizo variar la concentración foliar de ningún elemento en forma significativa en las plantaciones de jaúl de 2, 4 y 7 años de edad.

Las relaciones alométricas entre variables de crecimiento de las plantaciones de jaúl son significativas y permiten hacia futuro utilizar las más simples de medir para predecir otras de mayor dificultad de medición.

La adición de dosis crecientes de P, además de favorecer un aumento en los contenidos de P en el suelo, tienden a disminuir los contenidos de materiales amorfos (Al y Fe) y del pH en NaF en las 3 localidades analizadas. Otras variables químicas del suelo no se vieron afectadas por la adición de P.

Es conveniente extender este estudio hasta el período de aprovechamiento de los árboles (15 años), para determinar si los resultados encontrados se mantienen con el tiempo en plantaciones de *A. acuminata*.

AGRADECIMIENTOS

A la Compañía Nacional de Fuerza y Luz por el financiamiento de esta investigación y al personal del vivero de su departamento de Recursos Naturales por la colaboración en la determinación de las variables de crecimiento.

Al personal del Laboratorio de Suelos y de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica por su colaboración en el procesamiento y análisis de las muestras y a todas las personas que de una u otra forma colaboraron para la realización de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- ALVARADO A. 1982. Phosphate retention in Andepts from Guatemala and Costa Rica as related to other soil properties. Ph.D. Thesis, North Carolina University, North Carolina, USA. 82 p.
- ALVARADO A., BUOL S.W. 1985. Field estimation of phosphate retention by Andepts. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 911-914.
- ALVARADO A., BERTSCH F., BORNEMISZA E., CABALCETA G., FORSYTHE W., HENRÍQUEZ C., MATA R., MOLINA E., SALAS R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 111 p.
- BERTSCH F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. p. 83-88.
- BLAKEMORE L.C., SEARLE P.L., DALY B.K. 1981. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau. Wellington, New Zealand. 70 p.
- BRICEÑO J., PACHECO R. 1984. Métodos analíticos para el análisis de suelos y plantas. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. p 27.
- CAMACHO P., MURILLO O. 1986. Algunos resultados preliminares de la epidometría del jaúl *Alnus acuminata* (H.B.K.) O. Kundze. Departamento de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. p.i.
- CASTAING A. 1982. Algunos factores edáficos y dasométricos relacionados con el crecimiento y comportamiento de *Cedrela odorata* L. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 123 p.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1995. Jaúl. *Alnus acuminata* ssp. *arguta* (Schlectendal) Furlow. Especie de árbol de uso

- múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica. Colección de guías silviculturales No. 18. 85 p.
- CLUTTER J.L., FORTSON J.C., PIENAAR L.V., BRISTER G.H., BAILEY R.L. 1982. Timber management: A quantitative approach. John Wiley. New York, USA. 333 p.
- DÍAZ-ROMEY R., HUNTER A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE. Turrialba, Costa Rica. p. 8-27.
- FASSBENDER H.W., MÜLLER L., BALERDI F. 1968. Estudio de fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con las plantas. Turrialba 18(4): 333-347.
- FIELDS M., PERROTT K.W. 1966. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. Journal Science 9: 623-629.
- FORSYTHE W. 1975. Física de suelos. Manual de laboratorio. IICA. San José, Costa Rica. 211 p.
- HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., SALAS R. 1995. Fertilidad de suelos: Manual de laboratorio. Asociación Costarricense Ciencias del Suelo. San José, Costa Rica. 64 p.
- JUMKOV M. 1994. Evaluación de muestreo del bosque. Guía de campo para extensionistas, UICN/ORMA. San José, Costa Rica. pi.
- MOLINA E. 1993. Calibración de métodos de análisis de Cu, Zn, Mn disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 142 p.
- MONTOYA A. 1999. Plan de reforestación para la plantación de Dorval S.A. FUNDECOR. San José, Costa Rica. 233 p.
- SEGURA M., CASTILLO A., ALVARADO A., BLANCO F. 2005. Extracción de nutrimentos en plantaciones de jaíl (*Alnus acuminata* (H.B.K.) O. Kuntze) en la cuenca del río Virilla, Costa Rica. Agronomía Costarricense 29(2): 109-120.
- SHARMA E., AMBASHT R.S. 1987. Litterfall, decomposition and nutrient release in an age sequence of *Alnus nepalensis* plantation stands in the Eastern Himalaya. Journal of Ecology 75(4): 997-1010.
- SHARMA G., SHARMA R., SHARMA E., SINGH K.K. 2002. Performance of series of *Alnus*-cardamom plantations in the Sikkim Himalaya: Nutrient dynamics. Annals of Botany 89: 273-282.
- SOTO J.A. 1998. Formas de fósforo y su liberación en Andisoles de la región central oriental de Costa Rica. Tesis de doctorado. Universidad de Córdoba, Córdoba, España. 155 p.
- VITOUSEK P.M., SANFORD R.L. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. Ann. Rev. Ecol. Syst. 17: 137-167.
- WAUGH D.L., CATE R.B., NELSON L.A. 1973. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes. OI de Mendoza (Trad.). International soil fertility. Carolina del Norte, USA, 106 p. (Boletín Técnico No. 7).
- ZOU X., BINKLEY D., CALDWELL B.A. 1995. Effects of dinitrogen – fixing trees on phosphorus biogeochemical cycling in contrasting forests. Soil Sci. Soc. Am. J. 59(5): 1452-1458.