



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

EFFECTO DE FERTILIZACIÓN DE N, P y K EN LA
CALIDAD DE PLANTA DE *P. patula* y *P. devoniana* EN
VIVERO

GRACIELA BELEM SORIANO ESPINOSA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO

2011

La presente tesis titulada: “Efecto de fertilización de N, P y K en la calidad de planta de *P. patula* y *P. devoniana* en vivero”, realizada por la alumna: **Graciela Belem Soriano Espinosa**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
POSTGRADO FORESTAL

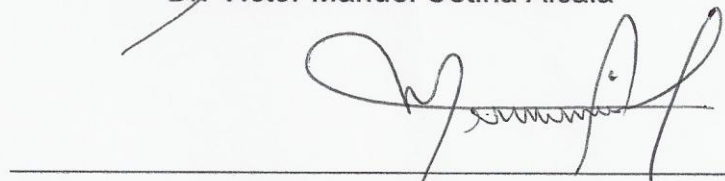
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



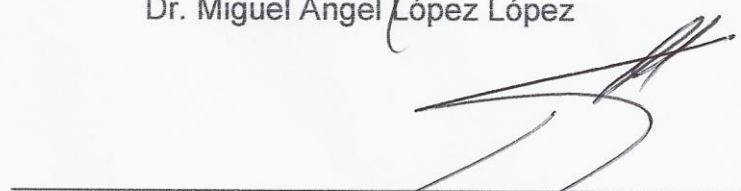
Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá

ASESOR



Dr. Miguel Ángel López López

ASESOR



Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

ASESOR



Dr. Gerardo Cruz Flores

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2011

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT, por la beca otorgada, durante mis estudios de maestría correspondiente al periodo de Agosto de 2008 a Agosto de 2010.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, especialmente al Postgrado Forestal y todo su personal, por las facilidades otorgadas durante la realización de mi maestría.

Al Dr. Miguel Ángel López López, por compartir sus conocimientos, amistad, confianza, apoyo, tiempo y dedicación, pero sobre todo por el gran ser humano que es.

Al Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá, por brindarme su amistad, confianza, enseñanzas y disponibilidad de ayuda en todo momento y más aún por su gran calidad humana.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, por ser una vez más punto clave en mi formación académica, y por darme siempre su amistad, apoyo, confianza y todas las enseñanzas de vida.

Un honor haber sido su estudiante. ¡A ustedes, mi respeto y admiración siempre!

Al Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas, por sus atinadas y valiosas observaciones para mejorar este trabajo, además de su disponibilidad de tiempo y ayuda siempre.

A los doctores: Javier López Uptón, Carlos Herrera Ramírez y a los trabajadores del vivero: Asunción, Maximino, Luis y Raúl, mil gracias por la ayuda y atención brindada durante toda la fase experimental.

A mis amigos del CP: Irma, Dulce, Alex, Yunuen, Amparo y Paty, por darme la oportunidad de conocerlos; por ser una gran compañía y hacer más agradable y llevadera esta travesía, nada hubiera sido igual sin ustedes y a todos aquellos que involuntariamente omití pero que han dejado algo en mí.

A TODOS MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA

“No importa cuán estrecho sea el portal, cuán cargada de castigos la sentencia, soy el amo de mi destino, soy el capitán de mi alma”.
William E. Henley: In Hospital, 1903.

A DIOS y a mi virgen de Guadalupe, por mi existencia, por ser mis guías en el camino y darme fuerza de voluntad para seguir creciendo personal y profesionalmente.

Con mi más profundo amor, respeto y admiración, dedico esta tesis a mis padres, Adolfo Soriano Cruz y Graciela Espinosa Lara. Simplemente por ser como son. Quienes son mi ejemplo, inspiración y apoyo de toda la vida. ¡Dios me los cuide por siempre!

A mis hermanas, Nayelly y Guadalupe Soriano Espinosa, por ser ejemplo de superación constante en todos los aspectos, ya sea personal o profesional, por su tenacidad y fuerza para ser mejores cada día. Además de su amor y apoyo que siempre me dan. Mi admiración y respeto. Las quiero mucho.

A mi abuelita Socorro Lara Cruz, mi tía Altagracia Loyola Lara y mi primo Juan Fuentes Loyola, por todo el apoyo y ayuda siempre. Porque juntos formamos la gran familia que somos.

A mis amigos del alma: Claudia Bautista Escobedo, Enriqueta Nolasco Covarrubias, Nayeli Rodríguez Toledano, Jazmín y Octavio Reyes Rodríguez, Cristian Medina Silva y Nestor Peña Galicia, por el privilegio de haberlos conocido, por conocer el valor de la amistad y compartir juntos inolvidables y bellos momentos. Un honor ser su amiga. Los quiero mucho.

Sinceramente

Graciela Belem Soriano Espinosa

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.2 HIPÓTESIS	3
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Nutrición vegetal.....	4
2.2 Absorción de los nutrimentos.....	7
2.2.1 <i>Teorías de absorción</i>	7
2.3 Funciones de los nutrimentos	10
2.4 Vivero forestal.....	12
2.5 Fertilización en viveros.....	14
2.5.1 <i>Características de los fertilizantes utilizados en viveros</i>	15
2.6 Calidad de planta	16
2.6.1 <i>Criterios morfológicos para evaluar la calidad de planta</i>	16
2.7 Índices de calidad de planta	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1 Área de estudio	21
3.2 Siembra.....	21
3.3 Diseño experimental.....	22
3.4 Fertilización.....	25
3.4.1 Preparación de las soluciones nutritivas o tratamientos de fertilización.....	25
3.5 Levantamiento del experimento	27
3.6 Captura de datos y análisis estadístico	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4.1 Germinación de las semillas.....	30

4.2 Efectos de tratamientos de fertilización sobre variables morfológicas de <i>P. patula</i> y <i>P. devoniana</i>	29
4.2.1 Altura.....	31
4.2.2 Diámetro.....	33
4.2.3 Acumulación de biomasa.....	35
4.2.3.1 Peso seco del follaje	35
4.2.3.2 Peso seco del tallo	36
4.2.3.3 Peso seco de raíz	37
4.2.3.4 Biomasa total.....	38
4.2.4 Índices de calidad de planta	41
4.2.4.1 Relación parte aérea raíz.....	41
4.2.4.2 Índice de esbeltez.....	42
4.2.4.3 Índice de calidad de Dickson.....	43
4.3 Efecto de tratamientos de fertilización a nivel de macronutrientes primarios en variables morfológicas de <i>P. patula</i> y <i>P. devoniana</i> en vivero	46
4.3.1 Efecto de dosis de N en variables morfológicas de <i>P. patula</i> y <i>Pinus devoniana</i>	46
4.3.2 Efecto de dosis de P en variables morfológicas de <i>P. patula</i> y <i>P. devoniana</i>	56
4.3.3 Efecto de dosis de K en variables morfológicas de <i>P. patula</i> y <i>P. devoniana</i>	64
4.4 Balance nutrimental de N-P-K, en la solución nutritiva y en el follaje...	67
V.CONCLUSIONES	70
VI. LITERATURA CITADA	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Elementos esenciales en la nutrición vegetal de plantas superiores y sus concentraciones para un crecimiento adecuado	6
2.	Esencialidad en estructura y función de nutrimentos de las plantas.....	11
3.	Niveles de fertilización de N, P y K aplicados.....	22
4.	Total de macronutrimentos comprendidos en la fórmula de Hewitt y Smith.....	23
5.	Tratamientos de fertilización utilizados en el experimento.....	26
6.	Total de micronutrimentos comprendidos en la fórmula de Hewitt y Smith.....	27
7.	Análisis de varianza de variables morfológicas para plántulas de <i>P. patula</i> , en respuesta a 27 tratamientos de fertilización NPK.....	30
8.	Análisis de varianza de variables morfológicas para plántulas de <i>P. devoniana</i> , en respuesta a 27 tratamientos de fertilización.....	30
9.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para crecimiento de altura y diámetro en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de <i>P. patula</i> y <i>P. devoniana</i>	34
10.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para la acumulación de biomasa en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de <i>P. patula</i>	39
11.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para la acumulación de biomasa en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de <i>P. devoniana</i>	40
12.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para los índices de calidad de planta en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de <i>P. patula</i>	44
13.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para los índices de calidad de planta en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de <i>P. devoniana</i>	45
14.	Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones en variables morfológicas en plántulas de <i>P. patula</i>	47
15.	Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones en índices sobre índices de calidad de planta en <i>P. patula</i>	48

16.	Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones sobre variables morfológicas en plántulas de <i>P. devoniana</i>	49
17.	Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones sobre índices de calidad de planta en <i>P. devoniana</i>	50
18.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis de P en <i>P. patula</i>	63
19.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis en <i>P. devoniana</i>	63
20.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis de K en <i>P. patula</i>	65
21.	Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para efecto de las dosis de K en <i>P. devoniana</i>	66
22.	Balance nutrimental en solución nutritiva y tejido foliar de plántulas de <i>P. atula</i>	67
23.	Balance nutrimental en solución nutritiva y tejido foliar de plántulas de <i>P. devoniana</i>	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Formas de absorción de nutrimentos en las plantas.....	9
2.	Muestra de una unidad experimental de cada especie.....	23
3.	Aleatorización de las unidades experimentales en el invernadero.....	24
4.	Plántulas de <i>P. devoniana</i> y <i>P. patula</i> en la fase de establecimiento....	29
5.	Efecto de dosis de N en altura y diámetro de <i>P. patula</i>	51
6.	Efecto de dosis de N en altura y diámetro en <i>P. devoniana</i>	51
7.	Efecto de las dosis de N en acumulación de biomasa de <i>P. patula</i>	52
8.	Efecto de las dosis de N en acumulación de biomasa de <i>P. devoniana</i> ..	52
9.	Efecto de las dosis de N en RPAER e IESB de <i>P. patula</i>	53
10	Efecto de las dosis de N en RPAER e IESB de <i>P. devoniana</i>	53
11	Efecto de las dosis de N en ICD de <i>P. patula</i>	54
12	Efecto de las dosis de N en ICD de <i>P. devoniana</i>	54
13	Efecto de dosis de P en altura y diámetro de <i>P. patula</i>	57
14	Efecto de dosis de P en altura y diámetro de <i>P. devoniana</i>	57
15	Efecto de las dosis de P en acumulación de biomasa de <i>P. patula</i>	58
16	Efecto de las dosis de P en acumulación de biomasa de <i>P. devoniana</i> .	59
17	Efecto de las dosis de P en la RPAER e IESB de <i>P. patula</i>	60
18	Efecto de las dosis de P en la RPAER e IESB de <i>P. devoniana</i>	60
19	Efecto de las dosis de P en el ICD en <i>P. patula</i>	61
20	Efecto de las dosis de P en el ICD en <i>P. devoniana</i>	61

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de fertilización con N, P y K, en el crecimiento y la calidad de planta de *Pinus patula* y *Pinus devoniana*. Las plantas fueron cultivadas por un periodo de ocho meses, en contenedores de 120 cm³, usando como sustrato una mezcla de perlita, vermiculita y musgo turba en proporción 20:20:60. El experimento consistió en un diseño factorial 3³ completamente al azar con tres repeticiones. Los factores probados fueron N, P y K cada uno de ellos con tres niveles. Los niveles de N fueron 0, 100 y 200 ppm; los de P, 0, 60 y 125 ppm, los de K 0,75 y 150 ppm. Las variables morfológicas evaluadas fueron; altura, diámetro, peso seco del follaje, peso seco de tallo y peso seco de raíz. Los índices de calidad de planta evaluados fueron índice de calidad de Dickson (ICD), relación parte aérea/raíz e índice de esbeltez. El N afectó significativamente casi todas las variables morfológicas, excepto el peso seco de raíz. El P influyó en altura y diámetro; el K, influyó en el peso seco del tallo e ICD. Las combinaciones de dosis (N-P-K) más convenientes para las variables morfológicas en *P. patula* fueron; altura de la planta (200-125-75), diámetro (200-125-50), peso seco de follaje y peso seco de tallo (200-60-150), peso seco de raíz (100-125-150) y biomasa total (200-60-150). En *P. devoniana*; altura de la planta (200-60-75), diámetro (200-125-0), peso seco de follaje y peso seco del tallo (200-0-150), peso seco de raíz (200-0-75), y biomasa total (200-60-150). Para los índices de calidad de planta las dosis más convenientes en *P. patula* fueron; índice de esbeltez (0-0-150), relación parte aérea raíz (0-125-50) e índice de calidad de Dickson (200-60-150). En *P. devoniana* índice de esbeltez (0-60-150), relación parte aérea raíz (0-60-75) e índice de calidad de Dickson (200-60-150). Las características morfológicas responden de diferente manera a las concentraciones de los nutrimentos, por tanto en la fertilización es mejor conocer el balance entre los nutrimentos que su concentración individual.

Palabras clave: fertilización química, vivero forestal, pino, índice de calidad de Dickson, variables morfológicas.

SUMMARY

The aim of this study was to determine the effect of N, P and K fertilization on *Pinus patula* and *Pinus devoniana* seedling growth and quality. Seedlings were grown for eight months in containers 120 cm³ in volume using a mixture of perlite, vermiculite and peat moss as substrate in proportion 20:20:60. The experiment consisted of a 3³ factorial design completely randomized with three replicates. The factors tested were N, P and K, each of them with three doses. The doses were for nitrogen 0,100,200, for phosphorus 0, 60, 125, and for potassium 0, 75 and 150 ppm. The morphological variables evaluated were total height, stem diameter and foliage, stem and root dry weight. The plant quality indexes evaluated were Dickson`s quality index (DQI), shoot to root ratio and slenderness index. Nitrogen significantly affected almost all morphological variables, except root dry weight. Phosphorus positively influenced seedling height and diameter. Potassium affected the stem dry weight and DQI. The most convenient dose combinations for the morphological variables for *P. patula* were 200-125-75, 200-125-50, 200-60-150, 100-125-150, 200-60-150 for height, diameter, foliage dry weight and stem dry weight, root dry weight and total biomass, respectively. In *P. devoniana* the most convenient dose combinations for the morphological variables were; 200-60-75, 200-125-0, 200-0-150, 200-0-75, 200-60-150 for height, diameter, foliage dry weight and stem dry weight, root dry weight and total biomass, respectively. The best combinations for plant quality index were for *P. patula* 0-0-150, 0-125-50, 200-60-150, for slenderness index, shoot to root ratio and DQI, respectively. In *P. devoniana* were 0-60-150, 0-60-75, 200-60-150 for slenderness index, shoot to root ratio and DQI, respectively. Morphologic features respond differently way to concentrations of nutrients, therefore in fertilization is best to know the balance of nutrients that their individual concentration.

Key words: chemical fertilization, forest nursery, pine, Dickson quality index, morphologic variables.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente aumento de la población humana ha impactado fuertemente los bosques y selvas. Para revertir tal impacto se requiere, entre otras acciones, establecer programas de reforestación o plantaciones comerciales, utilizando planta de calidad producida en vivero. La planta de calidad es aquella que presenta buena supervivencia y crecimiento en campo. Este concepto involucra características morfológicas y fisiológicas (Johnson y Cline, 1991).

Un grave problema que se presenta en los viveros nacionales, es que generalmente las plantas producidas no son de la calidad deseada. En estos casos, si el sitio de plantación presenta inconvenientes climáticos o de suelo, tales como escases de agua, temperaturas extremas ya sean altas o bajas; suelos de baja fertilidad o propiedades físicas poco deseables, esto conlleva al fracaso en el establecimiento de plantaciones. Para evitar este tipo de contratiempos, es necesario lograr planta en el vivero que presente buenas tasas de crecimiento, dimensiones y vigor adecuados (López, 1990).

La fertilización junto con el manejo de riego, son de las prácticas culturales de mayor importancia en la producción y calidad de planta en vivero (Landis, 1989). La fertilización es el ingrediente principal para que la planta tenga un adecuado estado nutrimental, atributo de calidad relacionado con el vigor y la supervivencia, ya que en las primeras etapas del trasplante, la planta no es capaz de aprovechar los nutrimentos del suelo y ha de recurrir a los acumulados en sus tejidos durante la fase de vivero (Domínguez *et al.*, 2000).

El problema de la fertilización radica en la posibilidad de lograr un apropiado diagnóstico de los nutrimentos limitantes del crecimiento, debido a la escasa información de la demanda nutrimental de la mayoría de las especies forestales mexicanas producidas en viveros, lo que por lo general se traduce en una sobreutilización de fertilizantes, que se ve reflejada en costos elevados y contaminación ambiental.

Con base en lo antes mencionado los objetivos generales del presente trabajo fueron:

- 1) Determinar el efecto de tres niveles de fertilización de cada uno de los tres macronutrientes primarios (N, P y K), sobre la morfología, calidad de planta y estado nutrimental de *P. patula* Schl et. Cham y *P. devoniana* Lindley en vivero.
- 2) Identificar el balance adecuado entre N, P y K en la solución nutritiva y follaje para plántulas de *P. patula* Schl et. Cham y *P. devoniana* Lindley, mediante un ensayo factorial en vivero.

1.1 Objetivos específicos

- Determinar los efectos de N, P y K sobre el crecimiento de *Pinus patula* y *Pinus devoniana* en vivero
- Determinar los efectos de N, P y K sobre la calidad de planta de *Pinus patula* y *Pinus devoniana* en vivero
- Identificar el balance adecuado entre N, P y K en la solución nutritiva y en el follaje de *Pinus patula* y *Pinus devoniana* en vivero

1.2 Hipótesis

- La fertilización con N, P y K no afecta el crecimiento de *Pinus patula* y *Pinus devoniana* durante la etapa de vivero.
- La fertilización con N, P y K no afecta la calidad de planta de *Pinus patula* y *Pinus devoniana* durante la etapa de vivero
- No existe un balance nutrimental óptimo para mejorar tasas de crecimiento y calidad de planta de *Pinus patula* y *Pinus devoniana* durante la etapa de vivero.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Nutrición vegetal

La nutrición vegetal, es el proceso mediante el cual la planta absorbe del medio; sustancias de tipo mineral que le son necesarias para llevar a cabo su metabolismo; en consecuencia, desarrollarse y crecer (Vivancos, 1984; Raven, 1992).

El adecuado desarrollo de las plantas requiere de la combinación favorable de agua, elementos esenciales, anhídrido carbónico, oxígeno, luz y temperatura que están en función de las exigencias específicas de cada especie (Raven, 1992).

Se define como elementos esenciales aquellos que son imprescindibles para el desarrollo completo del ciclo vegetativo. Por mucho tiempo se consideró solo dieciséis elementos esenciales: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Cl, Zn, Mn, Mo y B (Vivancos, 1984; Buckman y Brady, 1991; Rodríguez, 2002). Hoy en día él Ni forma parte de esta clasificación. La lista anterior no debe considerarse completa aún, puede suceder que en el futuro algún otro elemento se agregue a dicha lista (Vivancos, 1984; Hopkins *et al.*, 2009).

Se ha visto que algunas plantas, requieren elementos adicionales, sin embargo estos no son requeridos por todas las plantas vasculares. Es por ello que se excluyen de la lista de elementos necesarios, tal es el caso del Na, Si y el Co, que parecen ser requeridos solo para algunas especies vegetales a los cuales se les ha nombrado elementos benéficos (Hopkins *et al.*, 2009).

De acuerdo con Arnon y Stout, (1939); citados por Cruz, (2006). Los elementos son esenciales si cumplen los siguientes criterios

1. La falta de un elemento esencial impide a la planta completar su ciclo vegetativo.
2. La falta o deficiencia es exclusiva del elemento en cuestión y sólo puede ser corregida suministrando dicho elemento.
3. El elemento esencial está relacionado directamente con la nutrición de la planta bien por ser constituyente de algunas sustancias esenciales o por participar en funciones vitales de ella.

Anteriormente se mencionó que son 16 los elementos esenciales. El C, H y O se hallan libremente a disposición de la planta en la atmósfera, en forma de anhídrido carbónico (CO₂), oxígeno (O₂) y del agua (H₂O) que absorben (Buckman y Brady, 1991). De aquí que se consideren como elementos fertilizantes los trece restantes, que en muchos casos, es necesario suministrar a las plantas para corregir deficiencias nutrimentales (Vivancos, 1984).

Los elementos esenciales se clasifican en macronutrientes y micronutrientes según la cantidad requerida por la planta (Cuadro 1)

- a) Macronutrientes: Son requeridos en cantidades mayores (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S).

Primarios: N, P y K

Secundarios: Ca, Mg y S

- b) Micronutrientes: La planta los absorbe en cantidades mínimas, con las que quedan cubiertas sus necesidades (Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B, Cl y Ni).

Cuadro 1. Elementos esenciales en la nutrición vegetal de plantas superiores y sus concentraciones para un crecimiento adecuado (Tomado de Hopkins *et al.*, 2009).

Elemento	Forma disponible	Concentración en peso seco (mmol kg ⁻¹)
<i>Macronutrientes</i>		
H	H ₂ O	60,000
C	CO ₂	40,000
O	O ₂ , CO ₂	30,000
N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1,000
K	K ⁺	250
Ca	Ca ²⁺	125
Mg	Mg ²⁺	80
P	HPO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	60
S	SO ₄ ²⁻	30
<i>Micronutrientes</i>		
Cl	Cl ⁻	3.9
B	BO ₃ ³⁻	2.0
Fe	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	2.0
Mn	Mn ²⁺	1.03
Zn	Zn ²⁺	0.3
Cu	Cu ²⁺	0.1
Ni	Ni ²⁺	0.05
Mo	Mo ₄ ²⁺	0.001

La importancia de conocer el estado nutricional, radica en su influencia directa en los procesos fisiológicos de las plantas, tales como; la regulación del crecimiento, el flujo de energía y la síntesis de los complejos orgánicos moleculares que componen las plantas (Peñuelas y Ocaña, 2000).

2.2 Absorción de los nutrimentos

Los macro y micronutrimentos son absorbidos por la planta, generalmente desde la solución del suelo a través de la raíz. La absorción de elementos nutritivos presenta características muy específicas como la selectividad de los elementos químicos y la entrada de elementos en la planta cuando la concentración interna es superior a la externa o la carga eléctrica es la contraria. Esto es, la absorción se hace en contra de gradientes de concentración o eléctricos, lo que necesariamente exige el consumo de energía para superar estas barreras físicas (Landis, 1989; Raven, 1992).

Membrana celular. La membrana celular constituye una barrera al paso de determinados elementos inorgánicos y compuestos orgánicos. Las membranas semipermeables de las células están formadas por dos capas de fosfolípidos, constituidas por cadenas hidrocarbonadas hidrófobas que tienen grupos hidrófilos en un extremo de la misma. Estas capas se orientan de modo que quedan en contacto los grupos hidrófobos y en consecuencia tanto la superficie interna como externa de la membrana presenta grupos hidrófilos. Estos grupos son puntos de reacción con cargas positivas y negativas que permiten la adsorción de cationes y aniones en la superficie externa (Vivancos, 1984).

2.2.1 Teorías de absorción

La absorción de nutrimentos por la raíz de las plantas, requiere de 32 kJ de energía, esta se obtiene del enlace de alta energía del trifosfato de adenosina (ATP) mediante la acción de la enzima ATPasa, que descompone el ATP, según la siguiente reacción:



Existen dos teorías de selectividad y absorción contra gradientes eléctricos o de concentración

- a) Teoría del transportador: La molécula transportadora, generalmente es un lípido que se difunde por la membrana mediante la acción energética del ATP, quedando enlazada a un grupo fosfato. El transportador activado recoge en la superficie externa un ión específico y lo conduce a la superficie interna donde una enzima fosfatasa deshace la unión con el fosfato liberando al tiempo el ión en el interior.
- b) Teoría de la impulsión de iones: Consiste en la expulsión a través de la membrana de protones (H^+), transporte que se realiza con el consumo de energía liberado por el ATP, mediante la acción de la enzima ATPasa, ligada a la superficie de la membrana. Se transfieren dos protones (H^+), por cada molécula de ATP. Con este proceso se genera un potencial eléctrico con una carga negativa muy superior en el interior, lo que permite la entrada de cationes atraídos por esta carga negativa, mediante un proceso de difusión selectiva que sería puramente física.

Cuando la concentración interior del elemento nutritivo es inferior a la que sería posible obtener por la diferencia de potencial, según la ecuación de Nernst, se dice que la absorción es pasiva, ya que se realiza en contra de gradientes electroquímicos.

Absorción pasiva. Tiene lugar cuando los iones son transportados dentro de la planta a través de la raíz mediante el flujo de agua de transpiración. Los factores que controlan este tipo son el volumen de agua en movimiento en la planta (demanda de transpiración) y la concentración de iones de la solución en el sustrato que rodea las raíces.

Absorción activa. Aquí los iones nutrientes son tomados por el gradiente osmótico que normalmente existe entre las células de la raíz y las soluciones del sustrato (Jones, 1983, citado por Landis, 1989).

Tres conceptos deben conocerse y tenerse presentes sobre la absorción de nutrimentos en las plantas:

1. La planta es capaz de tomar de forma selectiva iones, aún cuando la concentración de iones y la proporción de las soluciones circundantes del sustrato, sean diferentes que las existentes en las células de la raíz.
2. La acumulación de iones en la raíz tiene en base a un notable gradiente.
3. La absorción de iones activos requiere energía, la cual es generada por el metabolismo celular (Ruano, 2003).

En el suelo o en el medio de crecimiento, la disponibilidad de nutrimentos minerales es afectada por el movimiento pasivo de iones con la solución del suelo, por difusión y por el crecimiento de las raíces de las plantas (Barber, 1962 citado por Landis, 1989). El movimiento pasivo de los iones a través de la raíz de la planta, con el agua del suelo durante la absorción transpiratoria es denominada “flujo de masa” (A, en la figura 1), la tasa de éste es controlada por la demanda transpiratoria. Dentro de la solución del medio de crecimiento que rodea a las raíces, los iones son absorbidos de la rizosfera (B, en la figura 1) por la difusión pasiva (movimiento de una concentración relativamente elevada a una menor concentración) o por la absorción activa. Las plantas también absorben nutrimentos minerales mediante la extensión de sus raíces (C, en figura 1).

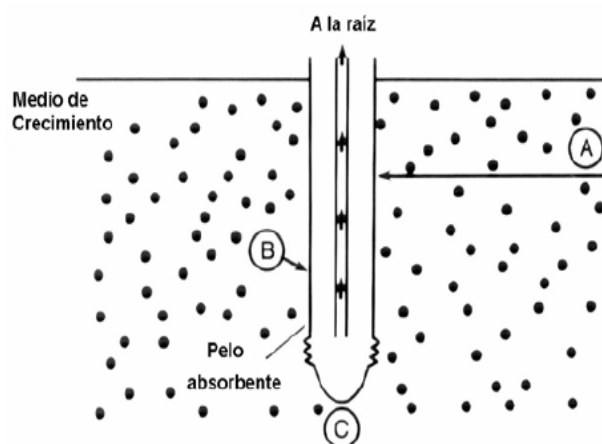


Figura 1. Formas de absorción de nutrimentos en las plantas. A) Flujo de masa, B) Iones absorbidos por la rizósfera C) Absorción de nutrimentos mediante la extensión de sus raíces (Tomado de Landis, 1989).

2.3 Funciones de los nutrimentos

Los elementos C, O, H, N y S son constituyentes de compuestos orgánicos básicos en el metabolismo de la planta, además de ser participes activos en las reacciones bioquímicas básicas del metabolismo. El C y O forman parte del grupo carboxílico, el N en grupos amino y amidas principalmente y el S como grupo sulfhídrico, en todos ellos participa el H (Raven, 1992).

El P participa en todas las reacciones de la planta en las que hay intercambio de energía, siendo la más importante la molécula ATP (trifosfato de adenosina) (Salisbury y Ross, 1994).

Los cationes Ca, Mg, K y el anión Cl, regulan los potenciales osmóticos, la permeabilidad de la membrana y conductividad, además pueden enlazarse con enzimas, modificando su estructura. El Cu, Fe, Zn y Mn participan en reacciones de óxido-reducción (Raven, 1992).

Entre los complejos orgánicos importantes, destaca la clorofila, que es la base de la fotosíntesis, al ser capaz de emitir electrones, cuando es excitada por la luz. La clorofila tiene integrado en su estructura un átomo de Mg enlazado por cuatro átomos de N (Marschner, 1995).

El Cuadro 2, indica las principales funciones de los 16 nutrimentos esenciales en la nutrición vegetal.

Cuadro 2. Esencialidad en estructura y función de nutrimentos de las plantas (Arnon, 1974; Marschner, 1995, citado por Cruz, 2006).

Elemento y forma química absorbida	Funciones
C, H, O: (CO ₂ , H ₂ O)	<p>C, H y O: Componentes de todos los compuestos orgánicos: Carbohidratos, Proteínas, Lípidos y Ácidos Nucleicos.</p> <p>El H además de componente de todos los compuestos orgánicos, es importante en el balance iónico, actúa como el más importante agente reductor y juega papel clave en la regulación energética de la célula.</p>
N (NO ₃ ¹⁻ , NH ₄ ¹⁺)	<p>N y S: Constituyentes de las proteínas, de enzimas, compuestos de reserva, y componentes de las biomembranas.</p>
S (SO ₄ ²⁻)	<p>El S, está además relacionado con algunos procesos energéticos de la célula vegetal y en procesos antioxidantes de la célula y de tolerancia a altas concentraciones de metales pesados como Cd y Zn.</p>
P (HPO ₄ ²⁻ y H ₂ PO ₄ ¹⁻) y N (NO ₃ ¹⁻ , NH ₄ ¹⁺)	<p>P y N: Nucleótidos, transferencia de energía (ATP), transferencia de electrones (NADP), información genética (DNA y RNA) y en el metabolismo de las proteínas. Fosfolípidos- membranas fosfato inorgánico - síntesis de ATP.</p>
K (K ¹⁺)	<p>Ion Potasio: Cofactor en la activación del funcionamiento de varias enzimas del metabolismo de proteínas y carbohidratos, regulador osmótico y iónico</p>
Ca (Ca ²⁺)	<p>Ion Calcio: En complejo con la calmodulina (<i>proteína modulada por Ca</i>) reguladora de actividad enzimática, reguladora de homeóstasis citoplásmica. Está involucrado en la división celular y en el mantenimiento de la integridad de la membrana celular.</p>
Mg (Mg ²⁺)	<p>ión Mg: Ion central en el complejo clorofila-fotosíntesis. Cofactor de varias reacciones enzimáticas.</p>

Fe (Fe ²⁺)	Fe: Componente esencial de Ferroenzimas (Hemo y no hemo) y transportadores de electrones como el citocromo y la ferredoxina. Su función es clave en la fotosíntesis, fijación de N y transferencia de electrones.
Cl (Cl ¹⁻) Mn (Mn ²⁺) Zn (Zn ²⁺) B (H ₃ BO ₃) Cu (Cu ²⁺)	Cl¹⁻, Mn²⁺, Zn²⁺, B, Cu²⁺. Asociados con catalizadores o activadores de enzimas, el Cl está involucrado con la división de la molécula del agua durante la fotosíntesis y también en la osmoregulación de plantas que están en suelos salinos. El Mn está involucrado en el sistema de evolución de O ₂ en la fotosíntesis y en las enzimas arginasa y fosfotransferasa. El Zn es componente de varias deshidrogenasas, proteínasas, y peptidasas incluidas la anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa, glutámico deshidrogenasa, y málico deshidrogenasa. El B está involucrado en el metabolismo y síntesis de componentes de la pared celular. El Cu forma parte de la citocromo oxidasa ácido ascórbico oxidasa y lactosa
Mo (MoO ₄ ²⁻)	Mo. Componente de enzimas del proceso de fijación de N ₂ , reducción de NO ₃ ¹⁻ .

2.4 Vivero forestal

Un vivero forestal es una superficie de terreno dedicada a la producción de planta destinada a las repoblaciones forestales (Ruano, 2003).

En esencia, las plántulas o brinzales producidas en el vivero, deberán poseer la máxima calidad con el menor costo posible. La connotación calidad se refiere a que la planta debe poseer características morfológicas y fisiológicas especiales que avalen la supervivencia en su ambiente natural (espacio y tiempo), sin ayuda de ningún tipo y con ello contribuyan a una exitosa repoblación forestal (Ruano, 2003).

Durante la fase de producción de planta, se deben considerar los factores de control, estos son todos los parámetros que están implicados en el proceso de cultivo y producción de la planta, hasta que ya está lista para salir del vivero y en consecuencia se debe tener control total de estos.

Los principales factores de control son los siguientes:

1. Ubicación del vivero
2. Semillas, frutos y estacas
3. Suelo
4. Riego
5. Fertilización
6. Micorrización
7. Patología
8. Depredadores
9. Infraestructuras
10. Preparación de la planta.
11. Carga y transporte

Todos ellos son de igual importancia, no obstante esta investigación se centra en el factor fertilización.

En términos amplios se considera material fertilizante, cualquier sustancia, sea de origen orgánico o mineral, que contiene al menos uno de los tres nutrientes primarios, o bien otros elementos esenciales, contenidos en cantidad apreciable y en forma asimilable por las plantas (Vivancos, 1984; Castro, 1994).

2.5 Fertilización en viveros

La fertilización es después del riego la práctica cultural que influye directamente en el desarrollo de las plantas (Peñuelas y Ocaña, 2000), ya que interviene en su productividad (rendimiento). Su importancia radica en que reduce el tiempo de permanencia de la planta en vivero, lo cual trae consigo reducción de costos, que se ve reflejado en menor número de actividades que contempla el mantenimiento de las plantas, tales como el riego (Cruz, 2003).

El uso de fertilizantes en los viveros forestales, debe considerar las necesidades de las plántulas, el ambiente en el que se desarrollan (sustrato, clima y organismos), así como la genética de las plantas (Castro, 1995).

No es precisamente una práctica sencilla, ni habitual en los viveros forestales, sin embargo se recomienda que periódicamente sean monitoreados los nutrimentos esenciales con el fin de conocer el estado nutrimental de las plántulas; en caso de identificar deficiencias, corregirlas mediante un programa de fertilización (Gregoire *et al.*, 2004).

Un programa de fertilización, sirve para ajustar adecuadamente las cantidades que se suministrarán, en el momento óptimo (Ruano, 2003). Este debe ser diseñado para mantener las concentraciones específicas de los distintos nutrimentos en el sustrato, conservando un equilibrio y además que sea capaz de permitir los cambios nutricionales durante el ciclo de crecimiento (Peñuelas y Ocaña, 2000).

El seguimiento del estado nutrimental, durante el cultivo (fase de germinación, crecimiento y endurecimiento), en el binomio sustrato-planta permite conocer la causa-efecto de la fertilización (Ruano, 2003; Rodríguez, 2008).

2.5.1 Características de los fertilizantes utilizados en viveros

En viveros forestales con sistema de producción de planta en contenedor, se pueden utilizar todas las formas de abonos disponibles en el mercado pero los más usados son los que contienen N-P-K, por ser macronutrientes primarios, en presentaciones ya sean en forma líquida o seca de liberación lenta (Peñuelas y Ocaña, 2000).

Los fertilizantes líquidos se suministran mediante el sistema de riego (fetriego), en tanto que los sólidos se incorporan en forma de gránulos directamente al sustrato o bien aplicados en la superficie (Galloway, 1986; Ruano, 2003). Generalmente en los abonos solubles, la liberación de nutrientes es muy rápida y por ello se aplican en dosis bajas y con alta frecuencia, lo que hace complicado y costoso su manejo, en cambio permiten un manejo de la fertilización mucho más acorde con las necesidades puntuales de las plantas en cada una de las fases del cultivo (Peñuelas y Ocaña, 2000).

La concentración de cada nutriente en la solución del medio es lo más importante en la fertilización. Con una concentración muy baja el crecimiento se verá reducido mientras que concentraciones altas pueden producir excesos de salinidad y afectar el crecimiento y la calidad de las plantas, siendo el nitrógeno el que más afecta su crecimiento, por lo tanto los programas de fertilización se realizan con base en este macronutriente y su proporción con respecto al fósforo y potasio (Peñuelas y Ocaña, 2000; Salifu *et al.*, 2008).

Los macronutrientes secundarios (Ca, Mg y S) generalmente se aportan mediante el riego, especialmente el Ca y Mg en zonas con aguas duras, también se aportan por calizas y dolomitas o bien por fórmulas comerciales tales como sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y nitrato de calcio $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$.

Respecto a la fertilización con micronutrientes, éstos deben ser utilizados con sumo cuidado, puesto que un desequilibrio de uno de ellos en el sustrato puede interferir en la disponibilidad de otros. Estos pueden ser aportados por cualquier fuente orgánica o inorgánica, aunque sus propiedades pueden variar (Ruano, 2003).

2.6 Calidad de planta

La planta de calidad es aquella que posee las características morfológicas y fisiológicas necesarias para su establecimiento, crecimiento y desarrollo en campo (Prieto y Alarcón, 1998; Rodríguez, 2008), a este concepto Johnson y Cline (1991) le suman el aspecto económico, y definen una planta de buena calidad, aquella producida al menor costo posible en función de su objetivo, siendo capaz de sobrevivir y crecer adecuadamente después de ser plantada. Esta capacidad se atribuye principalmente a las características genéticas de la semilla y a las técnicas empleadas por los viveristas durante el ciclo de producción (Prieto *et al.*, 1999). Sin embargo, el concepto de calidad de planta es relativo, debido a que las exigencias de ésta pueden variar de acuerdo a diferentes factores como el clima, suelo, especie, objetivo y época de plantación, estos factores definen el nivel de exigencia de uno o más atributos morfológicos de la planta para un sitio determinado (Peñuelas y Ocaña, 2000). Para garantizar el establecimiento y crecimiento de las plantas en una plantación, se deben cumplir las siguientes características: a) altura de 15 a 25 cm, diámetro del cuello de 4 a 6 mm, c) tallo sin ramificaciones, lignificado y sin daños, d) follaje abundante y uniformemente distribuido, e) sistema radical con al menos siete raíces secundarias, f) raíces con abundantes puntos de crecimiento, g) cepellón integro al extraerlo del envase y h) libre de plagas y enfermedades (Prieto 2004., *et al*).

2.6.1 Criterios morfológicos para evaluar la calidad de planta

La morfología es definida por Thompson (1985); como la forma o estructura de un organismo o cualquiera de sus partes, cuya evaluación podrían incluir un número cuantioso de mediciones potenciales desde la altura y biomasa hasta el número de estomas o dientes en el borde de las hojas. No obstante, solo algunos criterios morfológicos como la altura, diámetro del tallo, arquitectura del tallo y/o la raíz y la relación raíz parte aérea podrían ser suficientes para definir la calidad de planta y predecir su tolerancia al estrés así como su crecimiento y supervivencia.

a) Altura de la planta. Por si sola carece de valor, pero al relacionarse con el diámetro y arquitectura del tallo adquiere mayor importancia. Es un indicador de la superficie fotosintética y del área de transpiración Prieto *et al.*, (1999). En algunas especies se correlaciona con la supervivencia y el crecimiento durante los primeros años de establecida la plantación (Birchler *et al.*, 1998; Rodríguez, 2008), tal como lo reportaron Rodríguez y Duryea (2003) en plántulas de *P. palustris* Mill, producidas a raíz desnuda, donde la longitud de raíz se correlacionó positivamente con la supervivencia, la altura y el diámetro del tallo.

En algunos viveros, la planta con altura excesiva es discriminada por presentar desbalance con la parte radical, ya que es más vulnerable a daños físicos por el viento en el sitio de plantación (Rodríguez, 2008). Por otra parte, cuando el sitio de plantación presenta condiciones de competencia por herbáceas y otros arbustos, es conveniente utilizar planta de 15 a 20 cm de altura para minimizar este efecto y lograr su desarrollo (Prieto *et al.*, 1999).

b) Diámetro del cuello. Define la robustez del tallo y se asocia con el vigor de las plantas ya que un mayor diámetro está relacionado con un adecuado transporte de agua y nutrimentos, así mismo refleja el tamaño del sistema radicular, da una aproximación de la resistencia mecánica y la capacidad relativa para tolerar temperaturas extremas en la superficie del suelo (Birchler *et al.*, 1998; Prieto *et al.* 1999; Rodríguez, 2008).

Plantas con diámetros grandes presentan mayor resistencia a daños mecánicos causados por el viento o insectos; por tanto la supervivencia y el crecimiento están relacionados con plantas de mayor tamaño y diámetros grandes (Johnson y Cline, 1991). Clearly *et al.*,(1978) citado por Córdova (2006) señalan que plantas con mayor diámetro tienen mayor posibilidad de sobrevivir en condiciones adversas, porque presentan una corteza con mayor aislamiento en contra de temperaturas extremas, ya que les proveen mayor cantidad de sustancias de reserva, por lo tanto están sujetas a menos estrés.

Mexal y Landis, (1990), propusieron que para que exista una supervivencia mayor al 80%, la planta debe tener 5 a 6 mm de diámetro; sin embargo, para definir

un diámetro adecuado es necesario conocer el hábito de crecimiento inicial de cada especie.

c) Sistema radical. Una planta de calidad debe poseer un sistema de raíces con una raíz principal bien formada, recta y sin enroscamiento, con alto porcentaje de fibrosidad y abundantes puntos de crecimiento (Sigala, 2009).

A mayor sistema radical y número de raíces finas la planta tendrá mayores posibilidades de supervivencia en campo debido a que exploran mayor área de suelo, luego entonces tienen mayor capacidad de absorber agua y nutrimentos. No obstante, si existe un desbalance con la parte aérea, se pueden presentar problemas de tensión hídrica por diferencia entre la absorción de agua en la raíz y la transpiración en el follaje (Prieto *et al.*, 1999).

d) Biomasa. Este criterio está ampliamente asociado con la supervivencia y desarrollo en campo, debido a que el contenido de humedad en la estructura de la planta no es uniforme. Con la finalidad de evitar variaciones en los resultados se opta por utilizar el peso seco de la misma, esta medida denota la capacidad fotosintética y de transpiración, así como el almacenaje de carbohidratos (Rodríguez, 2008; Prieto *et al.*, 2009). Para garantizar la supervivencia de la planta, es importante que al elegirla tenga la mayor biomasa posible y exista un balance entre las partes transpirante y absorbente (Thompson, 1985).

e) Relación peso seco aérea/peso seco raíz. Se refiere a la proporción de la biomasa aérea con respecto a la raíz. Prieto *et al.*, (1999), mencionan que plantas con una relación entre 1.5 y 2.5 reflejan un balance óptimo, relaciones mayores a 2.5 señalan desproporción entre las partes aérea y radical. Córdova (2006), menciona que una proporción mayor de tres incrementa las posibilidades de desequilibrio hídrico y pone en riesgo la supervivencia.

f) Relación altura/diámetro del cuello. A menor valor, más baja y robusta será la planta y por consiguiente tendrá mayor calidad, que le permita ser apta para condiciones ambientales adversas (Rodríguez, 2008).

2.7 Índices de calidad de planta

Un índice de calidad es la combinación de parámetros morfológicos o fisiológicos que describe atributos abstractos de la planta como son el balance y la esbeltez, que representa un valor más cercano a predecir el rendimiento de la planta en campo, comparado con lo que pudiera determinar cualquier parámetro individual (Thompson, 1985).

a) Índice de esbeltez. Define la relación entre la altura de la planta (cm) y el diámetro (mm). Valores bajos están asociados a mejor calidad de planta, ya que esta es más robusta, en cambio valores altos indican que la planta es más esbelta y que existe desproporción entre la altura y el diámetro de la planta; generalmente se recomienda que este sea menor a seis (Prieto *et al.*, 1999).

b) Índice de calidad de Dickson. Agrupa los atributos morfológicos más representativos de la calidad de planta, cuyo resultado será directamente proporcional a su calidad. La fórmula propuesta por Dickson *et al.*, (1960), citado por Olivo y Buduba (2004), es:

$$\text{índice de calidad} = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Peso seco parte aérea (g)}}{\text{Peso seco raíz (g)}}}$$

Los valores altos representan plantas mejor balanceadas en sus dimensiones de la parte aérea y radical.

c) Índice de lignificación. Es una medida que expresa el grado de preacondicionamiento o endurecimiento de las plantas, en el cual se pretende estimular el crecimiento radical y reducir el crecimiento en altura, promoviendo la aparición de la yema apical e iniciar mecanismos de resistencia a sequías y bajas temperaturas lo cual se logra sometiendo a la planta a periodos de estrés hídrico (Prieto *et al.*, 2004).

Este índice se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{índice de lignificación} = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\text{Peso húmedo total (g)}} \times 100$$

c) Relación parte aérea raíz. La comparación de las tasas de crecimiento de la parte aérea y la raíz, es una medida dinámica de distribución de carbono en la planta (Johnson y Cline, 1991); por lo tanto esta relación representa el balance entre el área de transpiración y el área de absorción de agua. La mejor calidad de planta se obtiene cuando la parte aérea es relativamente menor a la parte radical, lo que puede garantizar una mayor supervivencia, ya que se evita que la transpiración exceda a la capacidad de absorción (May, 1984, citado por Reyes *et al*, 2005).

Para determinar el cociente, se utilizan los pesos secos de ambas partes, en este sentido una planta de calidad debe tener un coeficiente de relación lo más bajo posible, de tal forma que asegure su supervivencia en campo (Thompson, 1985).

Olivo y Buduba (2004), establecieron un experimento para conocer la influencia de seis sustratos en el crecimiento de *P. ponderosa* en invernadero y en su metodología reportaron tres índices de calidad de planta: el de Dickson, el índice tallo raíz (ITR) y el índice de esbeltez de Schmidt-Vogt (IE).

El (ITR), relaciona el peso seco del tallo y el peso seco de la raíz, mientras que el índice de esbeltez de Schmidt-Vogt (IE), utiliza la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{\text{diámetro tallo (mm)} / \text{altura tallo (cm)}}{10} + 2$$

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

El experimento se desarrolló durante el ciclo primavera-verano 2010, en el invernadero de Botánica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México. Sus coordenadas geográficas son 19° 29' latitud oeste y 98° 53' latitud norte, a una altitud de 2 250 m.

3.2 Siembra

La siembra se realizó el 9 de febrero de 2010 en contenedores de 120 mL. Por contenedor se sembró dos semillas para asegurar que en el 100% de los contenedores se obtuviera al menos una plántula. Durante este periodo y hasta el inicio de su germinación (aproximadamente 15 días después de la siembra), se cuidó de mantener siempre húmedo el sustrato.

El sustrato fue una mezcla inerte compuesta por musgo de turba (peat moss), vermiculita y perlita; en proporción 60:20:20.

La semilla de *P. devoniana* procedente de Zacapú, Michoacán fue donada por el vivero de San Luis Tlaxialtemalco, adscrito a la Comisión de Recursos Naturales de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (CORENA), mientras que la semilla de *P. patula*, procedente de Huayacocotla, Veracruz, fue donada por el Postgrado Forestal del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados.

3.3 Diseño experimental

Se estableció un experimento bajo un diseño factorial (3^3) con arreglo de las unidades experimentales completamente al azar.

Los factores involucrados fueron N, P y K, cada uno de ellos con tres niveles de fertilización, para nitrógeno (N) 0, 100 y 200, fósforo (P) 0, 60 y 125 y potasio (K) 0, 75 y 150 ppm respectivamente (Cuadro 3); estos niveles fueron adoptados de acuerdo a las conclusiones del trabajo desarrollado por López (1990) en *Pinus patula*, habiéndose utilizado la solución nutritiva de Hewitt y Smith (1974) (Cuadro 4).

Cuadro 3. Niveles de fertilización de N, P y K aplicados

Tratamiento	N	P	K
-----ppm-----			
1	0	0	0
2	0	0	75
3	0	0	150
4	0	60	0
5	0	60	75
6	0	60	150
7	0	125	0
8	0	125	75
9	0	125	150
10	100	0	0
11	100	0	75
12	100	0	150
13	100	60	0
14	100	60	75
15	100	60	150
16	100	125	0
17	100	125	75
18	100	125	150
19	200	0	0
20	200	0	75
21	200	0	150
22	200	60	0
23	200	60	75
24	200	60	150
25	200	125	0
26	200	125	75
27	200	125	150

Cuadro 4. Total de macronutrientos comprendidos en la fórmula de Hewitt y Smith (1974), tomado de López (1990).

Macronutriente	ppm que aporta/L	
	Solución tipo NO ₃	Solución tipo NH ₄
Nitrógeno (N)	170	113 o 141
Fósforo	41	41
Potasio (K)	156	156
Calcio (Ca)	160	160
Magnesio (Mg)	36	36

La combinación de los niveles de cada factor dio 27 tratamientos. Cada tratamiento se replicó tres veces. De tal manera que el experimento consistió de 81 charolas, cada charola contuvo dos unidades experimentales, una para cada especie. Cada unidad experimental estuvo constituida por 21 plántulas (tres hileras de siete contenedores cada una (Figura 2), esto representa un total de 1701 individuos por especie.



Figura 2. Muestra de una unidad experimental de cada especie

En el invernadero, el experimento se estableció en tres bancales habiendo quedado distribuidas las unidades experimentales según se muestra en la figura 3.

Bancal 1

T11 ₃	T20 ₂	T23 ₁	T4 ₂	T23 ₃	T27 ₂	T5 ₃	T1 ₃
T7 ₃	T2 ₁	T21 ₁	T25 ₃	T19 ₁	T5 ₂	T10 ₃	T12 ₁
T26 ₁	T17 ₁	T19 ₂	T17 ₃	T14 ₃	T23 ₂	T2 ₃	T13 ₃
T4 ₃	T20 ₁	T27 ₁	T17 ₂	T6 ₂	T11 ₂	T21 ₃	T16 ₂

Bancal 2

T27 ₃	T20 ₃	T3 ₃	T12 ₃	T25 ₁	T7 ₂	T13 ₁	T14 ₁
T18 ₁	T18 ₃	T24 ₁	T10 ₂	T7 ₁	T16 ₃	T15 ₃	T22 ₂
T8 ₃	T9 ₃	T15 ₁	T6 ₃	T2 ₂	T19 ₃	T14 ₂	T11 ₁

Bancal 3

T12 ₂	T21 ₂	T22 ₁	T15 ₂	T25 ₂	T24 ₂	T18 ₂	T18 ₂
T9 ₁	T3 ₂	T8 ₁	T5 ₁	T16 ₁	T22 ₃	T9 ₂	T6 ₁
T1 ₂	T3 ₁	T10 ₁	T13 ₂	T26 ₂	T1 ₁	T26 ₃	T14 ₁
T24 ₃							

Figura 3. Aleatorización de las unidades experimentales en el invernadero

3.4 Fertilización

3.4.1 Preparación de las soluciones nutritivas o tratamientos de fertilización

Los fertilizantes que se utilizaron fueron: sulfato de potasio (K_2SO_4), sulfato de calcio ($CaSO_4$), sulfato de magnesio ($MgSO_4$), ácido fosfórico (H_3PO_4) y nitrato de calcio $Ca(NO_3)_2$ en grado reactivo. Fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4) y urea ($CO_2(NH_2)_2$) en presentación fertilizante comercial.

Los reactivos se pesaron en una balanza analítica a excepción del H_3PO_4 , que se midió con una pipeta graduada de 0.1mL. Posteriormente, en un mortero de porcelana se trituraron los reactivos sólidos hasta obtener un polvo fino, para luego disolver en 3 litros de agua destilada, cantidad que se preparaba semanalmente. Seguido de esto se midió y se ajustó el pH con un potenciómetro digital marca OYSTER 10. El pH de las soluciones se ajustó en un intervalo entre 5.5 a 6 con NaOH 1N y H_2SO_4 1N según fuera el caso. Una vez que la solución se mantenía en el intervalo del pH mencionado se procedía a adicionar manualmente la solución fertilizante a cada una de las plántulas.

Los tratamientos de fertilización de N-P-K, se iniciaron antes de que las plántulas comenzaran a presentar deficiencias por algún nutrimento, esto es, antes de que se consumieran las reservas nutritivas del endospermo. La primera fertilización fue el 16 de abril de 2010, a cada plántula se le aplicó 20 mL de solución fertilizante (tratamiento), semanalmente, hasta finalizar el experimento, que fue la última semana de agosto de 2010.

Los tratamientos de fertilización aplicados (Cuadro 5), fueron elaborados con base en la solución nutritiva de Hewitt y Smith (1974), citados por López (1990). Las unidades experimentales recibieron todos los nutrimentos incluidos en esta solución, ajustando las concentraciones sólo de aquellos correspondientes a cada tratamiento. De esta forma, el tratamiento 1 (N-P-K), solamente recibió calcio, magnesio y las dosis de micronutrimentos recomendada por Hewitt y Smith (1974) (Cuadro 6).

Cuadro 5. Tratamientos de fertilización utilizados en el experimento.

Tratamiento	Concentración (ppm)			g de reactivo en 1 L						
	N	P	K	K ₂ SO ₄	CaSO ₄	MgSO ₄	H ₃ PO ₄	Ca(NO ₃) ₂	KH ₂ PO ₄	(CO ₂ (NH ₂) ₂) urea
1	0	0	0	*	0.529	0.368	*	*	*	*
2	0	0	75	0.181	0.529	0.368	*	*	*	*
3	0	0	150	0.362	0.529	0.368	*	*	*	*
4	0	60	0	*	0.529	0.368	0.255	*	*	*
5	0	60	75	0.181	0.529	0.368	0.255	*	*	*
6	0	60	150	0.362	0.529	0.368	0.255	*	*	*
7	0	125	0	*	0.529	0.368	0.531	*	*	*
8	0	125	75	0.181	0.529	0.368	0.531	*	*	*
9	0	125	50	0.362	0.529	0.368	0.531	*	*	*
10	100	0	0	*	*	0.368	*	0.645	*	*
11	100	0	75	0.181	*	0.368	*	0.645	*	*
12	100	0	150	0.362	*	0.368	*	0.645	*	*
13	100	60	0	*	*	0.368	0.255	0.645	*	*
14	100	60	75	*	*	0.368		0.645	0.265	*
15	100	60	150	0.362	*	0.368	0.255	0.645	*	*
16	100	125	0	*	*	0.368	0.531	0.645	*	*
17	100	125	75	0.181	*	0.368	0.531	0.645	*	*
18	100	125	150	0.362	*	0.368	0.531	0.645	*	*
19	200	0	0	*	0.529	0.368	*	*	*	0.434
20	200	0	75	0.181	0.529	0.368	*	*	*	0.434
21	200	0	150	0.362	0.529	0.368	*	*	*	0.434
22	200	60	0	*	0.529	0.368	0.255	*	*	0.434
23	200	60	75	0.181	0.529	0.368	0.255	*	*	0.434
24	200	60	150	0.362	0.529	0.368	0.255	*	*	0.434
25	200	125	0	*	0.529	0.368	0.531	*	*	0.434
26	200	125	75	0.181	0.529	0.368	0.531	*	*	0.434
27	200	125	150	0.362	0.529	0.368	0.531	*	*	0.434

↻Aún cuando en esta investigación solo se probó N, P y K (macronutrientes primarios), siempre se consideró a los macronutrientes secundarios Ca, Mg y S. Nótese que las partes por millón de Ca y Mg son iguales en todos los tratamientos, lo que no sucedió en el caso del S.

En el presente estudio se consideraron a los micronutrientes, con el fin de evitar deficiencia nutrimental en las plántulas; por falta de alguno de ellos. Por tal razón, se aplicó mensualmente una solución nutritiva de Mn, Zn, Cu, B, y Fe (Cuadro 6), la cual fue sugerida por Hewitt y Smith (1974) citado por López (1990).

Cuadro 6. Total de micronutrientes comprendidos en la fórmula de Hewitt y Smith (1974).

Micronutriente	Concentración	g de reactivo en 1 L				
		MnSO ₄	ZnSO ₄	CuSO ₄	H ₃ BO ₃	FeSO ₄
	ppm					
Manganeso (Mn)	0.55	0.0594	*	*	*	*
Zinc (Zn)	0.065	*	0.00729	*	*	*
Cobre (Cu)	0.064	*	*	0.00675	*	*
Boro (B)	0.54	*	*	*	0.0837	*
Fierro (Fe)	5.6	*	*	*	*	0.7155

3.5 Levantamiento del experimento

El experimento se levanto la primera semana de septiembre; se evaluó: altura total de la planta (cm), diámetro del tallo (mm), peso seco del follaje, tallo y raíz (g), relación raíz parte aérea e índice de Dickson, estos dos últimos considerados índices de calidad de planta y composición nutrimental.

Altura total de la planta. Se midió con una regla graduada en centímetros, desde el cuello de la raíz hasta la yema apical.

Diámetro al cuello de la raíz. Se midió con un vernier digital modelo Mitutoyo graduado en milímetros tomando como punto de referencia la base del tallo.

Peso seco del follaje, tallo y raíz. La planta se limpio cuidadosamente del sustrato, se lavo la raíz con abundante agua para eliminar todo residuo. Posteriormente se hizo una incisión a la altura del cuello de la raíz, con el fin de separar el tallo (parte aérea) de la raíz. Luego, ambas partes se guardaron en bolsas de papel,

previamente etiquetadas y se metieron a la estufa de secado a una temperatura de 70°C, hasta que alcanzaran peso constante, posteriormente se peso en una balanza analítica, con precisión a miligramos.

Composición nutrimental. Una vez que las muestras alcanzaron el peso constante, el follaje se separo en bolsas de papel etiquetadas y se mando al laboratorio de análisis químico vegetal del Colegio de Postgraduados, para su análisis químico (N, P y K). La concentración de N en el follaje se determinó con el método de semimicro-kjeldal (Brenner, 1965; citado por Jackson, 1982). El P, por el método vanadato-molibdato (Allan, 1971) y el K por digestión ácida y espectroscopia de emisión atómica (Jackson, 1982).

Índice de esbeltez. Se calculo mediante el cociente de la altura entre el diámetro del tallo.

Relación parte aérea/raíz. Se estimo como el cociente entre el peso seco aéreo (g) y el peso seco radical (g).

Índice de calidad de Dickson (ICD). Resulto de integrar los valores de peso seco total, índice de esbeltez y la relación parte aérea/raíz.

$$\text{índice de calidad} = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Peso seco parte aérea (g)}}{\text{Peso seco raíz (g)}}}$$

3.6 Captura de datos y análisis estadístico

Los datos de las variables medidas, se organizaron en tablas de Excel. El análisis estadístico se realizó a través del programa SAS versión 9.0. Se hizo un análisis de varianza mediante el procedimiento PROC GLM, posteriormente se efectuaron comparaciones de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para todas las variables evaluadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Germinación de las semillas

P. devoniana germinó el 25 de febrero y tuvo 72 % de germinación, *P. patula* germinó el 7 marzo de 2010 y tuvo 65 % de germinación (Figura 4). Durante todo el experimento se observó siempre mayor tamaño y vigor en plántulas de *P. devoniana*, esto debido a la calidad de su semilla, y a la ventaja ecológica que esta le confiere; ya que su semilla es 4 veces mayor que la de *P. patula*, alcanzando un tamaño aproximadamente de 5 mm de largo (Velázquez *et al.*, 2004). Una semilla grande implica mayor reserva de carbohidratos y nutrientes necesarios durante la fase de germinación.



Figura 4. Plántulas de *P. devoniana* (izquierda) y *P. patula* (derecha) en la fase de establecimiento.

4.2 Efectos de tratamientos de fertilización sobre variables morfológicas de *P. patula* y *P. devoniana* en vivero

En ambas especies el análisis de varianza mostró diferencia altamente significativa ($P < 0.0001$) en las variables: altura, diámetro, peso seco del follaje, tallo y raíz, biomasa total, relación parte aérea raíz e índice de esbeltez en respuesta a los 27 tratamientos de fertilización; es decir, al menos un tratamiento fue diferente de los demás (Cuadros 7 y 8).

Cuadro 7. Análisis de varianza de variables morfológicas para plántulas de *P. patula*, en respuesta a 27 tratamientos de fertilización con N, P y K.

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	R ²	CV	Pr>F
Altura	26	6996.152	269.082	0.70	18.38	<0.0001**
Diámetro	26	24.063	0.925	0.60	14.34	<0.0001**
PSF	26	1.523	0.058	0.37	53.42	<0.0001**
PSR	26	0.117	0.004	0.18	49.53	<0.0001**
PST	26	0.416	0.016	0.44	50.92	<0.0001**
BIOMTOT	26	4.140	0.159	0.47	36.46	<0.0001**
IESB	26	1917.3	73.744	0.41	18.02	<0.0001**
RPAER	26	516.973	19.883	0.23	66.82	<0.0001**
ICD	26	12.119	0.466	0.03	1670.76	0.417 ns

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de la raíz, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total, RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson.

**Altamente significativo, ns no significativo en (Pr >0.05).

Cuadro 8. Análisis de varianza de variables morfológicas para plántulas de *P. devoniana*, en respuesta a 27 tratamientos de fertilización con N, P y K.

Variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	R ²	CV	Pr>F
Altura	26	2157.62	82.98	0.36	18.40	<0.0001**
Diámetro	26	140.82	5.41	0.15	61.35	<0.0001**
PSF	26	2.20	0.084	0.27	39.13	<0.0001**
PSR	26	0.43	0.0166	0.10	65.75	<0.0001**
PST	26	1.10	0.042	0.27	49.19	<0.0001**
BIOMTOT	26	4.14	0.159	0.47	36.46	<0.0001**
IESB	26	354.56	14.79	0.15	21.14	<0.0001**
RPAER	26	251.13	9.66	0.16	52.70	<0.0001**
ICD	26	28.38	1.09	0.03	99.52	0.559 ns

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de la raíz, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total, RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson.

**Altamente significativo, ns no significativo en (Pr >0.05).

En ambas especies, todas las variables morfológicas estudiadas, excepto el índice de calidad de Dickson, fueron afectadas por los tratamientos de fertilización (Cuadros 7 y 8).

4.2.1 Altura

Las plántulas de *P. patula* alcanzaron la mayor altura con el tratamiento (T), 26 (200-125-75), con un valor promedio de 15.26 cm, mientras que el valor más bajo correspondió al tratamiento testigo (5.89 cm). De acuerdo con la prueba de Tukey o diferencia honesta significativa (HSD) ($\alpha=0.05$), el tratamiento 26 fue el que produjo la mayor altura de planta, seguido por los tratamientos 22 y 25 (Cuadro 9).

En *P. devoniana* el valor máximo de altura (14.54 cm), se observó en las plantas fertilizadas con el T23 (200-60-75), y el mínimo en el T1 (0-0-0) con 8.33 cm (Cuadro 10). La prueba de Tukey demostró que los tratamientos: 23, 24, 17, 21, 26 y 10, fueron los que produjeron los mayores crecimientos de altura, en un intervalo de 14.54 a 13.45 cm. Los tratamientos que presentaron menores alturas, en orden descendente son: 3, 7, 8 y 1, los cuales produjeron alturas de planta entre 9.96 a 8.33 cm (Cuadro 9).

García (2010), probó el efecto de la fertilización en el preacondicionamiento de *Pinus engelmannii* en vivero y encontró que las plantas crecieron más en altura con las dosis mayores de fertilización (70-191-508), alcanzando una altura de 11.9 cm.

Los resultados de ambos experimentos, se encuentran por debajo del mínimo propuesto por Prieto y Alarcón (1998) de 20 cm, aunque la altura obtenida en *Pinus engelmannii* Carr se considera aceptable debido a su hábito cespitoso durante su etapa de crecimiento en vivero.

Prieto *et al.*, (2004), evaluaron tres rutinas de fertilización basadas en Multicote™ y Peters profesional™ en las fases de iniciación, crecimiento rápido y preacondicionamiento en *Pinus cooperi* en vivero. Las rutinas de fertilización en la fase de establecimiento fueron: R1 (50-125-101), R2 (75-187-151) y R3 (100N, 249, 202). Encontraron que las dosis de nutrimentos aplicadas tuvieron efecto significativo ($p < 0.05$) en la variable altura, pero con diferencias estadísticas solo entre los tratamientos R2 y R3. Aunque el crecimiento de las plantas en altura no fue significativo esta fase es importante debido a que es cuando el sistema radical se establece en el medio de crecimiento y las plantas están listas para formar nuevos tejidos en las regiones meristemáticas e iniciar la fase de crecimiento rápido. Pese a que existe controversia sobre la conveniencia de suministrar fertilizante en la fase de establecimiento de las plantas, Starkey (2002) sugiere aplicar dosis bajas de N (50ppm). Por su parte, Dumroese *et al.*, (1998) señalan que la fertilización debe iniciar dos a tres semanas después de la germinación, en dosis de 33 a 65 ppm de N.

En el cuadro 9 se observa que el tratamiento 27, el cual recibió las máximas concentraciones de N, P y K en la solución nutritiva, no produjo la mayor tasa de crecimiento de altura en ninguna de las dos especies. En *Pinus patula*, la mayor altura se obtuvo con el tratamiento 26, el cual es estadísticamente superior al 27 (Cuadro 9), mientras que en *Pinus devoniana* la altura máxima de planta se logró con el tratamiento 23, el cual es también estadísticamente superior que el tratamiento 27 (Cuadro 9). Esto demuestra que no siempre el aumento de las dosis de nutrimentos se refleja en mayores rendimientos. Este comportamiento de la variable altura con respecto a los tratamientos indica que probablemente es más importante proporcionar a la planta los nutrimentos en un balance adecuado, que suministrar dosis elevadas, como lo propone Ingestad (1985), citado por López (1990).

De acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 9, si el viverista se interesa en optimizar el crecimiento de altura, el tratamiento 26 es el mejor para *P. patula*. Si por el contrario, desea obtener planta de *P. patula* con mayores diámetros de tallo, el tratamiento 27 es estadísticamente mejor que el 26.

4.2.2 Diámetro

En *P. patula*, el T27 (200-125-150), fue el que presentó el mayor diámetro (1.28 mm) y el T1 el mínimo 0.71 mm (Cuadro 9). De acuerdo con la prueba de Tukey, hubo diferencia significativa entre tratamientos. Siendo en este orden, T27, 24, 25, 22 y 26, los tratamientos que presentaron los valores más altos en diámetro en un intervalo de 1.27 a 1.22 mm. Los tratamientos con menor diámetro fueron; 2, 5, 6, 9, 8, 7 y 1, los cuales se mantuvieron en un intervalo entre 0.71 a 0.78 unidades (Cuadro 9). Es menester hacer notar que en el caso del diámetro del tallo de *P. patula*, el tratamiento 27 sí fue el que produjo el mayor crecimiento de diámetro. Es decir, al parecer, la optimización de diferentes variables de respuesta se logra mediante diferentes balances de los nutrimentos en las soluciones nutritivas.

En *P. devoniana*, el mayor diámetro se presentó en plántulas que fueron fertilizadas con el T25 (200-125-0) alcanzando un valor promedio de 1.73 mm (Cuadro 9). El diámetro mínimo (1.36 mm), correspondió al T5 (0-60-75). La comparación de medias mostró que, los tratamientos más favorecedores en el crecimiento del diámetro fueron: 25, 19, 23, 27, 21 y 17; alcanzando valores promedio de 1.73 a 1.71 mm. Por el contrario los menos benéficos son: 8, 3, 1, 15 y 5 (Cuadro 9).

Los valores de diámetros en las plantas estudiadas son bajos y no alcanzan los recomendados por Mexal y Landis (1990), quienes señalan un diámetro deseable de 5 a 6 mm, principalmente en *P. engelmanni*, especie que tiende a ser robusta. Los bajos valores de diámetro de plantas se deben a la corta edad en que se cosechó el experimento debido a restricciones de tiempo; no obstante, al momento de la cosecha, las plantas mostraban diferencias claras entre tratamientos.

Las plantas con diámetros grandes poseen mayor cantidad de raíces, las cuales les proporcionara un buen soporte y resistencia contra el torcimiento, causado por diversos factores, además de tener mayor aislamiento contra temperaturas extremas y mayor cantidad de sustancias de reserva. Esto aumenta la probabilidad de supervivencia de las plantas en condiciones de escasa humedad una vez en el campo (Cleary *et al.*, 1978, citado por Pineda *et al.*, 2004).

Cuadro 9. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para crecimiento de altura y diámetro en respuesta a tratamientos de fertilización de N, P y K, en plántulas de *P. patula* y *P. devoniana*

TRAT	CONCENTRACIÓN NPK	<i>P. patula</i>		<i>P. devoniana</i>	
		ALT	DIAM	ALT	DIAM
		cm	mm	cm	mm
1	0-0-0	5.89 M	0.71 P	8.33 P	1.37 G
2	0-0-75	7.65 R	0.83 N	10.94 J	1.42 E
3	0-0-150	7.05 K	0.88 M	9.96 O	1.38 G
4	0-60-0	7.24 R	0.84 M	10.32 L	1.41 F
5	0-60-75	6.67 K	0.82 N	10.29 L	1.36 G
6	0-60-150	6.91 K	0.80 N	10.13 N	1.45 E
7	0-125-0	6.20 K	0.71 P	9.96 O	1.43 E
8	0-125,75	6.59 K	0.78 N	9.73 O	1.39 G
9	0-125-50	7.65 R	0.80 N	10.21 M	1.46 E
10	100-0-0	11.68 E	0.99 H	13.45 C	1.41 F
11	100-0-75	9.11 G	0.95 K	12.62 E	1.54 D
12	100-0-150	8.43 H	0.90 K	12.29 G	1.50 D
13	100-60-0	12.53 D	1.03 G	13.38 C	1.57 D
14	100-60-75	13.03 C	1.08 G	13.32 C	1.54 D
15	100-60-150	12.61 D	0.98 H	11.62 I	1.45 G
16	100-125-0	13.30 C	1.13 D	12.49 E	1.65 B
17	100-125-75	13.13 C	1.08 F	13.91 B	1.69 B
18	100-125-150	11.08 F	0.93 K	10.86 K	1.47 E
19	200-0-0	13.08 C	1.11 E	13.28 C	1.73 A
20	200-0-75	12.13 D	1.09 F	12.19 H	1.60 D
21	200-0-150	11.70 E	1.16 D	13.90 B	1.70 B
22	200-60-0	14.15 B	1.21 C	12.41 F	1.55 D
23	200-60-75	13.32 C	1.11 E	14.54 A	1.71 A
24	200-60-150	13.06 C	1.27 A	13.94 B	1.63 C
25	200-125-0	14.11 B	1.27 A	12.70 E	1.73 A
26	200-125-75	15.26 A	1.22 B	13.62 C	1.64 C
27	200-125-150	12.66D	1.28 A	13.06 D	1.72 A
	MAX	15.26	1.28	14.54	1.73
	MIN	5.89	0.71	8.33	1.36
	DESV EST	1.66	0.13	1.66	0.13

TRAT: tratamiento, ALT: altura y DIAM: diámetro.

Dentro de una columna, letras iguales indican diferencias no estadísticamente significativas entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

4.2.3 Acumulación de biomasa

4.2.3.1 Peso seco del follaje

En *P. patula*, el valor máximo de biomasa foliar fue de 0.2 g, en plántulas fertilizadas con el T24 (200-60-150), mientras que el mínimo fue de 0.04 g, correspondiente a los tratamientos 7 y 1. La prueba de Tukey, indicó que los tratamientos 27, 20, 22, 15 y 26 fueron estadísticamente similares entre sí y presentaron los valores promedios más altos después del tratamiento 24, el cual fue significativamente mayor que aquellos. Por otro lado, los valores más bajos corresponden a los T4, 3, 6, 5, 8, 7 y 1, siendo los dos últimos los que produjeron la menor biomasa, la cual es significativamente inferior a la de los tratamientos 4,3,6,5 y 8 (Cuadro 10).

En *P. devoniana*, el tratamiento 20 (200-0-75), fue el que tuvo la mejor respuesta, con un valor promedio de 0.329 g. El menor valor se obtuvo con el T1 (0.041g). La prueba de Tukey indicó que los tratamientos que indujeron las mayores biomasa foliares fueron: 20, 24, 12, 17, 26, 2 y 19, siendo el T20 diferente y superior de ellos. Los tratamientos 8, 7, 18 y 1; fueron los menos favorecidos (Cuadro 11). Valores bajos de peso seco aéreo, reflejan menor área foliar y por consiguiente menor capacidad para almacenar carbohidratos (Prieto *et al.*, 1999).

Se nota que en ninguna de las dos especies estudiadas se obtuvo la mayor producción de follaje con el tratamiento que contuvo las máximas dosis de los nutrimentos. En el caso de *Pinus patula*, la mayor producción de follaje se obtuvo con la máxima dosis de N, la dosis media de P y la alta de K. En el caso de *Pinus devoniana*, el mejor tratamiento en cuanto a producción de biomasa foliar contuvo la dosis máxima de N, la mínima de P y la intermedia de K. Esto confirma la idea de que es más importante cuidar el balance de los nutrimentos dentro de la planta que lograr elevadas concentraciones de los mismos.

En este punto, es necesario discutir el hecho de que la mayor biomasa foliar en *Pinus devoniana* se obtuvo cuando no se aplicó P en la solución nutritiva. La probable explicación a este hecho es que el agua de riego probablemente contuvo

este nutrimento, aportando la cantidad de P que produjo, cuando se aplicó la dosis máxima de N y la dosis media de K, el balance adecuado entre los tres macronutrientes para maximizar la biomasa foliar. En este trabajo no se hizo un análisis químico del agua de riego; sin embargo, López *et al.*, (2000) en un estudio sobre la influencia del pH de riego en la variación morfológica de plántulas de *Pinus greggii*, reportaron un pH de 7.5 y una conductividad eléctrica de 5.2mmhos/cm. para el agua de riego de Montecillo. El agua de riego es salina por lo que es posible que aporte cantidades considerables de nutrimentos a la solución nutritiva. Una prueba de esta hipótesis es la supervivencia a cinco meses de establecido el experimento que presenta el tratamiento 1 el cual no recibió ninguno de los macronutrientes primarios

Otro factor que pudo contribuir a mantener un nivel de P adecuado en el follaje de *Pinus devoniana* es la reserva de nutrimentos en la semilla de esta especie. La semilla de *P. devoniana* es considerablemente de mayor tamaño que la de *P. patula*, por lo que puede aportar mayores cantidades de nutrimentos para el crecimiento inicial de las plantas. Es quizá por esta razón que las plantas de *P. devoniana* crecieron a mayor velocidad que las de *P. patula* hasta el momento de la cosecha de este experimento.

4.2.3.2 Peso seco del tallo

En *P. patula*, el tratamiento 24 (200-60-150); fue el que dio mejor respuesta en el crecimiento del tallo, con 0.11 g, mientras que los T5, 4, 3, 2 y 1, fueron los de menor respuesta, todos ellos con una biomasa de 0.02 g (Cuadro 10). En la prueba de comparación de medias se observó que el T24, fue diferente de todos los tratamientos ya que no cayó en ninguno de los grupos, siendo este el mejor (Cuadro 10).

En *P. devoniana* al igual que en el peso seco del follaje el tratamiento 20 (200-0-75), fue el que dio el valor promedio más alto (0.192 g), el mínimo se obtuvo con el T1 (0.021 g). La comparación de medias indicó que los promedios mayores son para: T20, 22, 24, 12 y 2, mientras que los valores más bajos corresponden a los T7, 3, 5 y 1 (Cuadro 11)

4.2.3.3 Peso seco de raíz

En *P. patula*, el tratamiento 18 con niveles N-P-K (100-125-150) y el 9 (0- 125-50), tuvieron el mismo valor promedio, el cual resulto ser el más alto (0.08 g), el mínimo fue para el testigo (0.02 g). La prueba de Tukey mostró que los T18, 9, 17, 20, 22 y 19 son los que mayor incidencia tuvieron en el crecimiento de la raíz, mientras que los menos favorecedores resultaron ser los T2, 6, 7 y 1 (Cuadro 10).

En *P. devoniana*, con el T20 (200-0-75) se alcanzó el valor máximo de biomasa de raíz (0.167 g) mientras que el valor mínimo (0.022 g), correspondió al T1. La prueba de Tukey, indicó que los T20 y 2 fueron los más favorecedores, siendo estos significativamente diferentes (Cuadro 11).

En *P. patula*, la dosis media de N y las dosis altas de P y K, tuvieron el mayor efecto en el crecimiento de la raíz, mientras que en *P. devoniana* fueron dosis altas de N, nada de P y dosis medias de K. Los resultados muestran diferencias de crecimiento de raíz entre especies, y por tanto diferente absorción nutrimental. Esto es probable que sea atribuible a la expresión del carácter genotípico de cada especie, el cual inclusive varía de una planta a otra, siendo aun de la misma especie y cultivadas bajo un mismo tratamiento. Los cambios genotípicos entre especies, variedades, cultivares y familias obedecen a modificaciones en la anatomía, fisiología y metabolismo de la planta que se refleja en la absorción y utilización de nutrimentos por las plantas (Marschner, 1995).

Sin embargo hay que enfatizar el papel del P en la morfología de la planta, este nutrimento actúa en el desarrollo del sistema radical frente al aéreo (López, 1990, Salisbury y Ross, 1994), contribuyendo a la producción de planta en contenedor más equilibrada. Otros trabajos confirman lo anterior, Calderón *et al.*, (2006), en un trabajo de hidroponía, utilizaron dos soluciones nutritivas, Estándar (150-40- 225) y Cooper (200-60-300), encontraron que la materia seca acumulada de raíz, está estrechamente relacionada con un mayor abastecimiento de N y P, en la solución nutritiva, ya que el P, es un nutrimento que favorece la absorción de N como NH_4^+ , y de otros nutrimentos al incrementar el volumen radical.

4.2.3.4 Biomasa total

Se consideró biomasa total a la sumatoria de los pesos secos del follaje, tallo y raíz. En ambas especies se alcanzó la mayor biomasa con el tratamiento 24 (200-60-150) de NPK. En *P. patula*, el valor más alto de biomasa fue de 0.36 g, mientras que en *P. devoniana* fue de 0.84 g. El testigo tuvo la menor biomasa (0.09), para las dos especies (Cuadros 10 y 11).

En *P. patula* la prueba de Tukey mostró que los T24, 27, 22 y 19 son estadísticamente diferentes entre sí, no obstante fueron tratamientos que si tuvieron respuesta en el crecimiento de biomasa total, debido a que tenían dosis altas de los macronutrientes. Los tratamientos menos favorecedores fueron aquellos con dosis bajas de N-P-K en orden descendente: 4, 2, 3, 6, 8, 5, 7 y 1 (Cuadro 10). En *P. devoniana*, los tratamientos 14 (100-60-75) y 24 (200-60-150) fueron los que produjeron mayor crecimiento de biomasa. En general la prueba de Tukey identificó 3 grupos de medias, valores altos en un intervalo de 0.51 a 0.73, valores intermedios (0.49-0.42) y los bajos (0.37-0.0.32). Siendo diferentes de todos ellos los T24 y T1 (Cuadro 11).

Cuadro 10. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para la acumulación de biomasa en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de *P. patula*

TRAT	CONCENTRACIÓN ppm	PSF	PSR	PST	BIOMTOT
		-----g-----			
1	0-0-0	0.04 M	0.02 H	0.02 J	0.09 K
2	0-0-75	0.08 J	0.04 G	0.02 H	0.14 J
3	0-0-150	0.06 K	0.05 E	0.02 H	0.14 J
4	0-60-0	0.06 K	0.05 E	0.03 H	0.14 J
5	0-60-75	0.05 L	0.04 G	0.02 K	0.11 R
6	0-60-150	0.05 L	0.04 G	0.04 F	0.13 J
7	0-125-0	0.04 M	0.04 G	0.03 G	0.10 J
8	0-125,75	0.05 L	0.05 F	0.02 K	0.11 J
9	0-125-50	0.09 H	0.08 A	0.04 B	0.21 F
10	100-0-0	0.12 E	0.05 E	0.05 E	0.23 F
11	100-0-75	0.08 J	0.05 E	0.04 B	0.17 G
12	100-0-150	0.14 D	0.06 E	0.04 E	0.24 E
13	100-60-0	0.14 D	0.05 E	0.05 E	0.24 E
14	100-60-75	0.12 E	0.06 C	0.06 D	0.24 E
15	100-60-150	0.15 B	0.05 F	0.07 C	0.27 D
16	100-125-0	0.10 G	0.05 F	0.05 E	0.19 G
17	100-125-75	0.11 F	0.07 B	0.06 D	0.24 E
18	100-125-150	0.09 H	0.08 A	0.05 E	0.21 F
19	200-0-0	0.15 C	0.06 C	0.08 C	0.29 C
20	200-0-75	0.16 B	0.07 B	0.07 C	0.30 B
21	200-0-150	0.13 E	0.06 E	0.05 E	0.23 E
22	200-60-0	0.15 B	0.06 B	0.07 C	0.29 C
23	200-60-75	0.14 D	0.05 E	0.08 B	0.27 D
24	200-60-150	0.20 A	0.06 E	0.11 A	0.36 A
25	200-125-0	0.07 J	0.04 F	0.04 E	0.16 H
26	200-125-75	0.15 B	0.05 F	0.07 D	0.26 D
27	200-125-150	0.16 B	0.06 E	0.09 B	0.30 B
MAX	.	0.20	0.08	0.11	0.36
MIN	.	0.04	0.02	0.02	0.09
DESV EST	.	0.04	0.01	0.02	0.07

TRAT: tratamiento, PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de la raíz, PST: peso seco del tallo y BIOMTOT: biomasa total.

Dentro de una columna letras iguales indican diferencias no estadísticamente significativas entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

Cuadro 11. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para la acumulación de biomasa en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de *P. devoniana*.

TRAT	CONCENTRACIÓN ppm	PSF	PSR	PST	BIOMTOT
		-----g-----			
1	0-0-0	0.04 P	0.02 G	0.02 Q	0.09 E
2	0-0-75	0.26 C	0.16 B	0.16 E	0.59 B
3	0-0-150	0.16 L	0.10 C	0.08 N	0.34 D
4	0-60-0	0.24 F	0.10 C	0.11 L	0.45 C
5	0-60-75	0.16 L	0.09 E	0.08 N	0.33 D
6	0-60-150	0.22 J	0.13 C	0.09 M	0.44 C
7	0-125-0	0.14 N	0.09 D	0.09 M	0.33 D
8	0-125,75	0.15 M	0.12 C	0.09 M	0.37 D
9	0-125-50	0.16 L	0.11 C	0.09 M	0.36 D
10	100-0-0	0.24 F	0.08 F	0.12 J	0.44 C
11	100-0-75	0.21 J	0.10 D	0.11 K	0.42 C
12	100-0-150	0.28 B	0.10 C	0.17 D	0.56 B
13	100-60-0	0.17 K	0.08 F	0.11 L	0.36 D
14	100-60-75	0.24 E	0.11 C	0.14 K	0.73 B
15	100-60-150	0.22 G	0.08 F	0.12 J	0.43 C
16	100-125-0	0.22 G	0.11 C	0.12 J	0.45 C
17	100-125-75	0.27 C	0.12 C	0.14 G	0.54 B
18	100-125-150	0.14 O	0.07 F	0.10 L	0.32 D
19	200-0-0	0.26 C	0.08 F	0.13 H	0.48 C
20	200-0-75	0.32 A	0.16 A	0.19 A	0.68 B
21	200-0-150	0.25 D	0.09 E	0.16 E	0.51 B
22	200-60-0	0.24 E	0.08 F	0.18 B	0.52 B
23	200-60-75	0.19 J	0.11 C	0.14 F	0.45 C
24	200-60-150	0.28 B	0.10 D	0.17 C	0.84 E
25	200-125-0	0.16 LI	0.10 C	0.10 L	0.37 D
26	200-125-75	0.27 C	0.07 F	0.14 G	0.49 C
27	200-125-150	0.22 H	0.09 E	0.11 K	0.43 C
MAX	.	0.33	0.17	0.19	0.84
MIN	.	0.04	0.02	0.02	0.09
DESV EST	.	0.06	0.03	0.03	0.15

Donde TRAT: tratamiento, PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de la raíz, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total.

Dentro de una columna letras iguales indican diferencias no estadísticamente significativas entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

4.2.4 Índices de calidad de planta

4.2.4.1 Relación parte aérea raíz

De acuerdo con este índice, la mejor calidad de planta corresponde a una menor parte aérea en relación con la raíz, de esta manera se garantiza una mayor supervivencia en campo, porque se evita que la transpiración de la planta exceda su capacidad de absorción de agua (May, 1984; citado por Pineda *et al.*, 2004). Esta relación no debe ser mayor a 2.5 particularmente cuando la planta se llevará a sitios con escasa precipitación (Thompson, (1985). Estas plantas también pueden establecerse en sitios que tengan condiciones ambientales favorables o donde exista la posibilidad de aplicar riegos durante la fase de establecimiento (Haasey, 1993). Sin embargo deben tomarse precauciones, ya que este valor (2.5), puede cambiar durante una misma estación de crecimiento. Por otro lado el valor crítico de la relación se modifica con el tamaño y edad de la planta a tal grado que las plantas de mayor edad puedan sobrevivir mejor, aún cuando su relación parte aérea raíz sea mayor que en plantas de menor edad (Carlson y Preisig, 1981; Thompson, 1985; citados por Reyes *et al.*, 2005).

En *P. patula*, los tratamientos 20, 21, 10 y 19, fueron los que dieron valores de 2.37 a 2.51, mientras que en *P. devoniana*, las plántulas fertilizadas con los tratamientos 20, 17, 16 y 13 produjeron valores promedio que están en un intervalo de 2.27 a 2.50 (Cuadros 12 y 13). De acuerdo con lo anterior, si estas plantas fueran llevadas al sitio de reforestación deberían contar con riego suficiente para asegurar su supervivencia.

De acuerdo con el Cuadro 12, los menores valores de la RPAER se obtuvieron con los tratamientos sin nitrógeno, sin embargo, las plantas producidas con estos tratamientos presentaron tallas reducidas en diámetro y altura, por lo que su capacidad para sobrevivir después del trasplante a campo puede ser baja.

4.2.4.2 Índice de esbeltez

Se refiere a la relación que hay entre la altura y el diámetro y permite estimar la resistencia física de las plantas durante las operaciones de plantación y su resistencia al efecto mecánico por el viento (Quiroz *et al.*, 2009). En coníferas su valor debe ser menor a seis, valores bajos están asociados con una mejor calidad de planta ya que implica una planta más robusta, esto es de poca altura, diámetros grandes y además con tallo vigoroso, esto le permitirá tener menor daño físico por la acción del viento, sequías o heladas en el sitio de plantación (Cibrián y Bello 2000; Pineda *et al.*, 2004;). Nájera, (2008); señala que valores bajos de robustez están asociados con árboles más cónicos que pueden ser más resistentes al efecto de fuertes vientos.

En ambas especies se obtuvieron plantas con valores mayores a seis: en *P. patula* el índice de esbeltez de las plántulas se ubicó en un intervalo de 7.9 a 12.8 (Cuadro 12). Para el caso de *P. devoniana*, el índice se ubicó en un intervalo de 6.14 a 9.67 (Cuadro 13). En ambos casos las plantas fueron muy esbeltas, y correrían el riesgo de sufrir daños por el viento en caso de que fueran llevadas a un sitio de plantación.

Quiroz *et al.*, (2009), consideran que el valor de esbeltez no debe ser mayor a seis, por su parte Hunt (1990), menciona que la esbeltez debe ser menor o igual a ocho para que la planta esté equilibrada. Según este criterio para *P. patula* sólo las plántulas fertilizadas con el tratamiento 3 (0-0-150), se pueden considerar de calidad aceptable ya que presentaron un valor promedio de 7.94 (Cuadro 12). En *P. devoniana* las plántulas fertilizadas con los tratamientos: 1 al 9, 18, 19, 20, 25 y 27 fueron las que estuvieron en un intervalo de 6.14 a 7.82, considerándose de calidad óptima de acuerdo con el criterio antes mencionado (Cuadro 13).

Un dato interesante es que en ambas especies; las plántulas más robustas fueron aquellas fertilizadas con altas dosis de potasio.

Arruda y Malavolta (2001), reportan que aún cuando este elemento no forma parte de ningún compuesto orgánico, ni toma parte en ninguna función estructural en la planta, actúa como activador enzimático y tiene importancia en la síntesis de material para la formación de la pared celular, por ello plantas bien nutridas de K, son más resistentes a la sequía y a las heladas; función asociada a su mayor retención de agua.

4.2.4.3 Índice de calidad de Dickson

Dickson *et al.*, (1960) citados por Olivo y Buduba (2006), sugirieron que cuanto mayor es el valor de su índice, mejor es la calidad de la planta. No obstante en ambas especies el análisis de varianza reveló que no fue una variable estadísticamente sensible a los tratamientos de fertilización (Cuadros 12 y 13), la falta de efectos en esta variable probablemente se debe a que las plantas se cosecharon muy pequeñas. Posiblemente si se hubiera fertilizado durante más tiempo, las diferencias entre tratamientos hubieran sido más obvias. De cualquier manera, este índice resultó ser menos sensible a los tratamientos que los otros índices de calidad de planta evaluados.

Cuadro 12. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para los índices de calidad de planta en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de *P. patula*.

TRATAMIENTO	CONCENTRACIÓN			
	NPK (ppm)	IESB	RPAER	ICD
1	0-0-0	8.38 H	2.38 G	0.01 A
2	0-0-75	9.22 G	2.04 H	0.01 A
3	0-0-150	7.94 K	1.14 M	0.02 A
4	0-60-0	8.56 G	1.20 K	0.01 A
5	0-60-75	8.17 K	1.22 K	0.01 A
6	0-60-150	8.62 G	1.52 J	0.01 A
7	0-125-0	8.77 G	1.19 M	0.01 A
8	0.125,75	8.42 H	1.07 N	0.01 A
9	0-125-50	10.14 E	1.86 J	0.02 A
10	100-0-0	11.78 C	2.37 G	0.02 A
11	100-0-75	9.58 F	1.75 J	0.01 A
12	100-0-150	9.37 G	2.73 E	0.02 A
13	100-60-0	12.23 A	2.61 F	0.02 A
14	100-60-75	12.01 B	2.05 H	0.02 A
15	100-60-150	12.84 A	3.37 C	0.02 A
16	100-125-0	11.75 C	2.06 H	0.01 A
17	100-125-75	12.15 B	1.81 J	0.02 A
18	100-125-150	11.85 C	1.47 J	0.02 A
19	200-0-0	11.81 C	2.51 F	0.02 A
20	200-0-75	11.32 D	2.48 G	0.02 A
21	200-0-150	10.05 E	2.37 G	0.02 A
22	200-60-0	11.70 C	2.81 D	0.02 A
23	200-60-75	12.03 B	2.75 E	0.02 A
24	200-60-150	10.35 F	4.19 A	0.03 A
25	200-125-0	11.38 D	1.65 J	0.01 A
26	200-125-75	12.58 A	3.63 B	0.02 A
27	200-125-150	10.15 E	3.45 C	0.02 A
MAX	.	12.84	4.19	0.03
MIN	.	7.94	1.07	0.01
DESV EST	.	1.58	0.82	0.004

IESB: índice de esbeltez, RPAER: relación raíz parte aérea e ICD: índice de calidad de Dickson.

Dentro de una columna letras iguales indican diferencias no estadísticamente significativas entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

Cuadro 13. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para los índices de calidad de planta en respuesta a tratamientos de fertilización con N, P y K, en plántulas de *P. devoniana*.

TRATAMIENTO	CONCENTRACIÓN			
	NPK (ppm)	IESB	RPAER	ICD
1	0-0-0	6.14 M	2.37 H	0.01 A
2	0-0-75	7.77 F	2.33 H	0.05 A
3	0-0-150	7.22 H	1.70 M	0.04 A
4	0-60-0	7.34 G	2.72 G	0.04 A
5	0-60-75	7.65 G	2.27 J	0.03 A
6	0-60-150	6.97 L	1.85 L	0.05 A
7	0-125-0	7.13 J	1.49 P	0.03 A
8	0.125,75	7.08 J	1.21 Q	0.04 A
9	0-125-50	7.03 K	1.97 K	0.04 A
10	100-0-0	9.67 A	3.08 D	0.03 A
11	100-0-75	8.26 E	2.15 J	0.04 A
12	100-0-150	8.31 E	2.77 G	0.05 A
13	100-60-0	8.66 C	2.50 H	0.03 A
14	100-60-75	8.52 D	3.27 C	0.03 A
15	100-60-150	8.76 B	2.92 F	0.04 A
16	100-125-0	7.82 F	2.27 J	0.37 A
17	100-125-75	8.29 E	2.37 H	0.05 A
18	100-125-150	7.45 G	1.99 K	0.03 A
19	200-0-0	7.71 F	3.17 C	0.04 A
20	200-0-75	7.72 F	2.38 H	0.07 A
21	200-0-150	8.23 E	2.90 F	0.04 A
22	200-60-0	8.10 F	2.99 E	0.04 A
23	200-60-75	8.59 O	2.05 J	0.09 A
24	200-60-150	8.54 D	3.33 B	0.88 A
25	200-125-0	7.50 G	1.59 N	0.04 A
26	200-125-75	8.45 E	3.66 A	0.04 A
27	200-125-150	7.70 F	2.66 G	0.04 A
MAX	.	9.67	3.66	0.88
MIN	.	6.14	1.21	0.01
DESV EST	.	0.73	0.61	0.191

IESB: índice de esbeltez, RPAER relación parte aérea raíz e ICD es índice de calidad de Dickson.

Dentro de una columna letras iguales indican diferencias no estadísticamente significativos entre tratamientos (Tukey, $\alpha=0.05$).

4.3 Efectos de tratamientos de fertilización a nivel de macronutrientes primarios en variables morfológicas de *P. patula* y *Pinus devoniana* en vivero

4.3.1 Efectos de dosis de nitrógeno en variables morfológicas de *P. patula* y *Pinus devoniana*

El N es constituyente esencial de toda la materia viva conocida, forma parte de los aminoácidos, ácidos nucleicos, proteínas, porfirinas, amidas, aminos, además de enzimas y varios metabolitos secundarios; tomando un papel importante en las reacciones metabólicas, por lo que las plantas exigen grandes cantidades de este elemento (Salisbury y Ross, 1994; Marschner, 1995; Hopkins *et al.*, 2009). El N es el nutriente más frecuentemente limitante en el crecimiento vegetativo, el cual consiste en la formación y crecimiento de nuevas hojas, tallos y raíces, por tal razón durante dicho periodo el N controla las tasas de crecimiento (Mengel y Kirkby, 1982).

En ambas especies, se encontró que el efecto del N fue altamente significativo en las variables altura, diámetro, peso seco del follaje (PSF), biomasa total (BIOMTOT), e índices de calidad de planta: relación parte aérea raíz (RPAER), índice de esbeltez (IESB), e índice de calidad de Dickson (ICD) según los análisis de varianza (Cuadros 14, 15, 16 y 17)

Cuadro 14. Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones sobre variables morfológicas en plántulas de *P. patula*

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Pr > F
Altura	N	2	568.483	284.241	<0.0001**
	P	2	53.381	26.690	<0.0001**
	K	2	2.274	1.137	0.6098 ns
	N*P	4	26.180	6.545	0.0314*
	N*K	4	12.004	3.001	0.2754 ns
	P*K	4	2.677	0.669	0.8808 ns
	N*P*K	8	15.514	1.939	0.5628 ns
Diámetro	N	2	2.055	1.027	<0.0001**
	P	2	0.081	0.040	0.4100 ns
	K	2	0.011	0.005	0.6120 ns
	N*P	4	0.081	0.020	0.1683 ns
	N*K	4	0.038	0.009	0.5295 ns
	P*K	4	0.007	0.001	0.9636 ns
	N*P*K	8	0.127	0.015	0.2547 ns
PSF	N	2	0.106	0.053	<0.0001**
	P	2	0.002	0.001	0.3896 ns
	K	2	0.003	0.001	0.3194 ns
	N*P	4	0.009	0.002	0.2160 ns
	N*K	4	0.009	0.002	0.2294 ns
	P*K	4	0.004	0.001	0.6274 ns
	N*P*K	8	0.007	0.0009	0.7682 ns
PSR	N	2	0.001	0.115	0.0088 *
	P	2	0.0007	0.0003	0.1467 ns
	K	2	0.0003	0.00014	0.3975 ns
	N*P	4	0.0026	0.0006	0.0171 *
	N*K	4	0.0006	0.0001	0.5008 ns
	P*K	4	0.0017	0.0004	0.0760 ns
	N*P*K	8	0.0012	0.0001	0.6278 ns
BIOMTOT	N	2	0.2876	0.1438	<0.0001**
	P	2	0.0124	0.006	0.1736 ns
	K	2	0.0098	0.004	0.2494 ns
	N*P	4	0.0267	0.0061	0.1182 ns
	N*K	4	0.0163	0.004	0.3300 ns
	P*K	4	0.0119	0.002	0.4922 ns
	N*P*K	8	0.0103	0.001	0.9287 ns

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de raíz y BIOMTOT: biomasa total.

** Altamente significativo, * significativo, ns=no significativo en (Pr >0.05).

Cuadro 15. Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones sobre índices de calidad de planta en *P. patula*

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Pr > F
IESB	N	2	124.059	62.029	<0.0001**
	P	2	20.120	10.060	0.0092*
	K	2	1.381	0.690	0.7054 ns
	N*P	4	14.455	3.613	0.1349 ns
	N*K	4	2.955	0.738	0.8249 ns
	P*K	4	5.712	1.428	0.5778 ns
	N*P*K	8	1.593	0.199	0.9990 ns
RPAER	N	2	31.010	15.505	<0.0001**
	P	2	0.8104	0.405	0.6040 ns
	K	2	1.432	0.716	0.4126 ns
	N*P	4	5.952	1.488	0.1292 ns
	N*K	4	3.289	0.822	0.3988 ns
	P*K	4	2.479	0.619	0.5439 ns
	N*P*K	8	5.574	0.696	0.5430 ns
ICD	N	2	0.0005	0.0002	<0.0001**
	P	2	0.000005	0.00002	0.8511 ns
	K	2	0.00008	0.00004	0.1131 ns
	N*P	4	0.00008	0.00002	0.3000 ns
	N*K	4	0.00008	0.00002	0.3467 ns
	P*K	4	0.00007	0.00001	0.4144 ns
	N*P*K	8	0.00005	0.000006	0.9256 ns

IESB: índice de esbeltez, RPAER: relación parte aérea raíz e ICD: índice de calidad de Dickson.

** Altamente significativo, * significativo, ns= no significativo en (Pr >0.05).

Cuadro 16. Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones, sobre variables morfológicas en plántulas de *P. devoniana*

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Pr > F
Altura	N	2	166.97	83.488	<0.0001**
	P	2	2.624	1.312	0.4648 ns
	K	2	5.284	2.642	0.2281 ns
	N*P	4	1.237	0.309	0.9776 ns
	N*K	4	15.022	3.755	0.1187 ns
	P*K	4	3.441	0.860	0.7619 ns
	N*P*K	8	20.151	2.518	0.2547 ns
Diámetro	N	2	0.886	0.443	<.0001**
	P	2	0.054	0.443	0.3535 ns
	K	2	0.004	0.002	0.9150 ns
	N*P	4	0.035	0.008	0.8471 ns
	N*K	4	0.084	0.021	0.4966 ns
	P*K	4	0.017	0.004	0.9453 ns
	N*P*K	8	0.158	0.019	0.6539 ns
PSF	N	2	0.079	0.039	<0.0001**
	P	2	0.016	0.008	0.0164 *
	K	2	0.024	0.012	0.0028**
	N*P	4	0.024	0.006	0.0196*
	N*K	4	0.004	0.001	0.6752 ns
	P*K	4	0.037	0.009	0.0018**
	N*P*K	8	0.106	0.013	<0.0001**
PSR	N	2	0.0007	0.0003	0.6455 ns
	P	2	0.00009	0.00004	0.9428 ns
	K	2	0.0152	0.0076	0.0006**
	N*P	4	0.003	0.0009	0.3840 ns
	N*K	4	0.005	0.0013	0.2253 ns
	P*K	4	0.016	0.004	0.0033**
	N*P*K	8	0.017	0.0022	0.0210*
BIOMTOT	N	2	0.230	0.115	<0.0001**
	P	2	0.039	0.019	0.0275*
	K	2	0.123	0.061	<0.0001**
	N*P	4	0.074	0.018	0.0107*
	N*K	4	0.022	0.005	0.3441 ns
	P*K	4	0.182	0.045	<0.0001**
	N*P*K	8	0.311	0.038	<0.0001**

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de raíz y BIOMTOT: biomasa total

** Altamente significativo, * significativo, ns= no significativo en (Pr >0.05).

Cuadro 17. Análisis de varianza del efecto de N, P, K y sus interacciones sobre índices de calidad de planta en *P. devoniana*

Variable	Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	Pr > F
IESB	N	2	23.29	11.647	<0.0001**
	P	2	3.75	1.875	0.0275*
	K	2	1.365	0.682	0.3204 ns
	N*P	4	3.092	0.773	0.2704 ns
	N*K	4	3.406	0.851	0.1852 ns
	P*K	4	0.659	0.164	0.8480 ns
	N*P*K	8	6.882	0.860	0.1301 ns
RPAER	N	2	7.632	3.816	<0.0001**
	P	2	3.300	1.650	0.0086**
	K	2	0.108	0.054	0.8490 ns
	N*P	4	1.169	0.292	0.4828 ns
	N*K	4	0.878	0.219	0.6086 ns
	P*K	4	3.785	0.946	0.0282 *
	N*P*K	8	9.187	1.148	0.0021**
ICD	N	2	0.0006	0.0003	0.0090**
	P	2	0.00004	0.00002	0.6539 ns
	K	2	0.0011	0.0005	0.0002**
	N*P	4	0.0011	0.0002	0.0025**
	N*K	4	0.0004	0.0001	0.1124 ns
	P*K	4	0.0025	0.0006	<0.0001**
	N*P*K	8	0.0021	0.0002	0.0002**

RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson.

** Altamente significativo, * significativo, ns= no significativo en (Pr >0.05).

Aunado a lo anterior se observó que, la dosis de 200 ppm de N, proporcionó el mayor crecimiento en altura, diámetro y acumulación de biomasa en ambas especies, habiendo diferencia significativa con respecto a los otros niveles de N, de acuerdo a la Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) (Figuras 5, 6, 7 y 8).

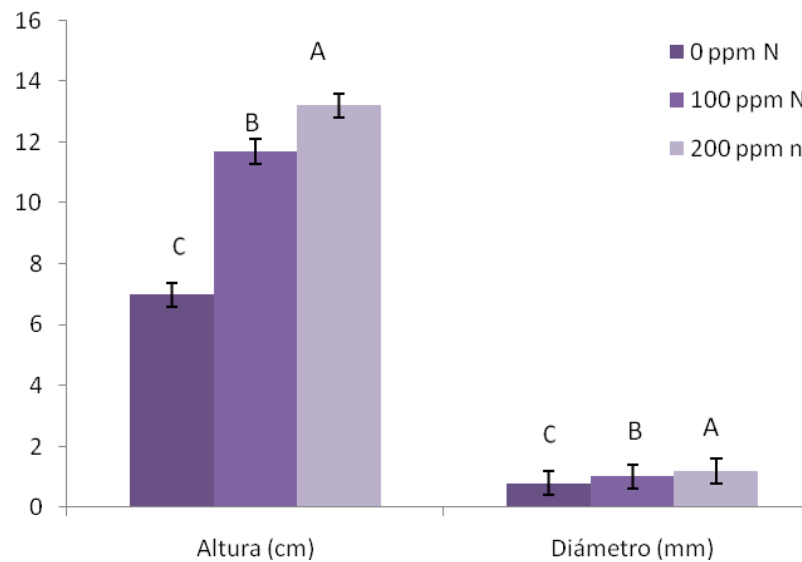


Figura 5. Efecto de dosis de N en altura y diámetro de *P. patula*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

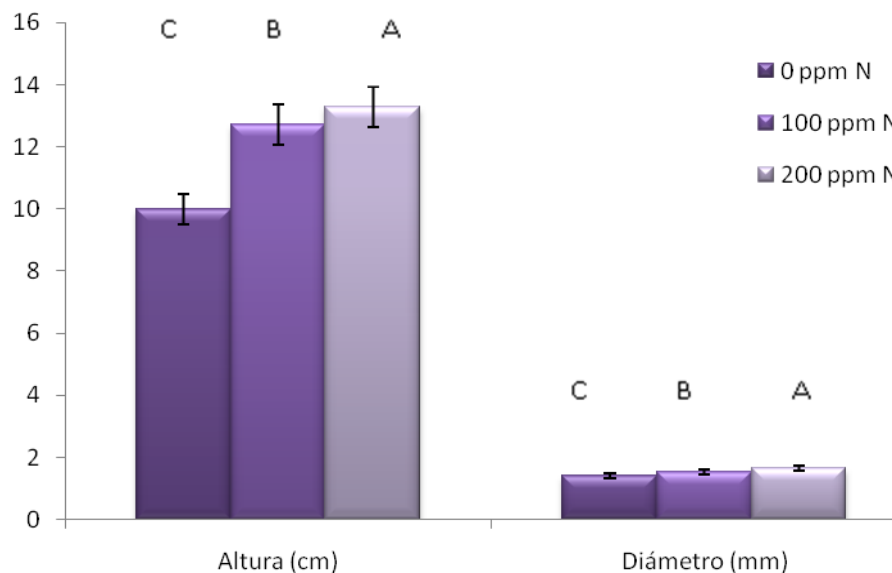


Figura 6. Efecto de dosis de N en altura y diámetro de *P. devoniana*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

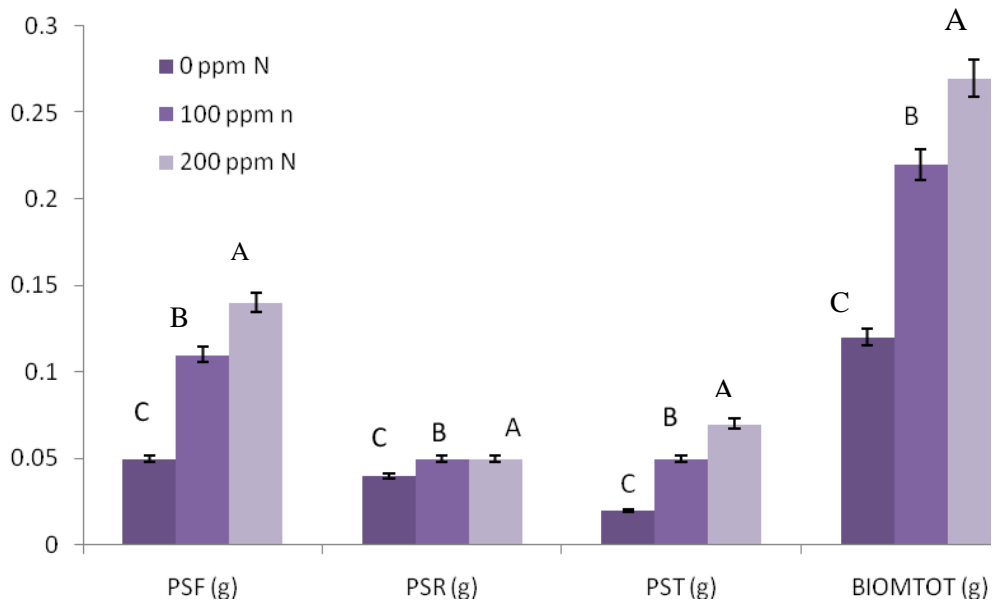


Figura 7. Efecto de las dosis de N en acumulación de biomasa de *P. patula*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$). PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco raíz, PST: peso seco tallo y BIOMTOT: biomasa total.

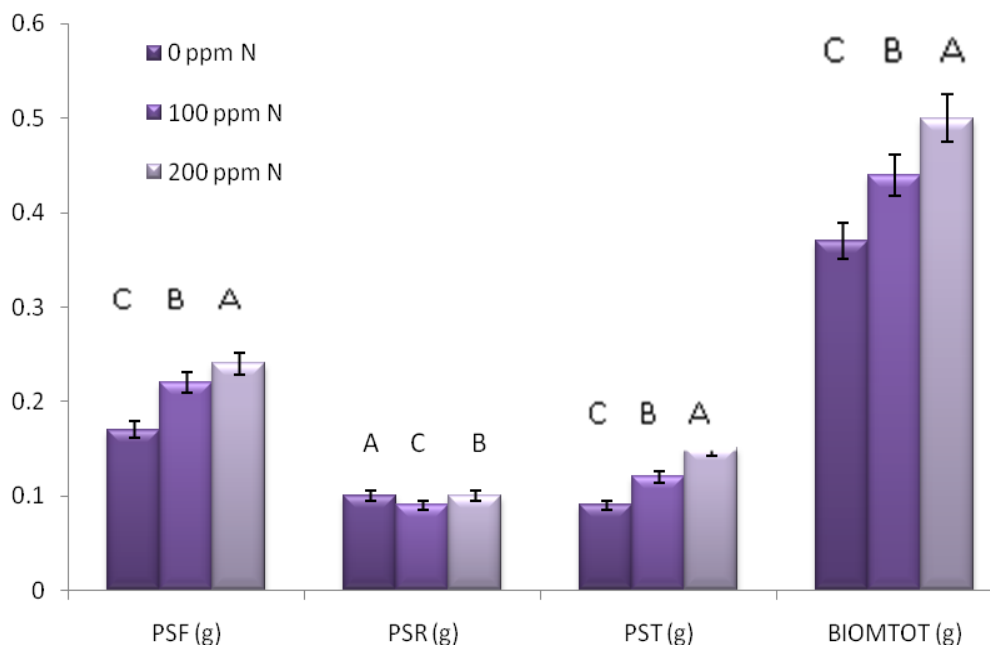


Figura 8. Efecto de las dosis de N en acumulación de biomasa de *P. devoniana*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$). PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco raíz, PST: peso seco tallo y BIOMTOT: biomasa total.

De acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), la dosis de 0 ppm N, fue la más conveniente en la relación parte aérea raíz e índice de esbeltez, por poseer el menor valor promedio en *P. patula* y *P. devoniana* (Figuras 9 y 10).

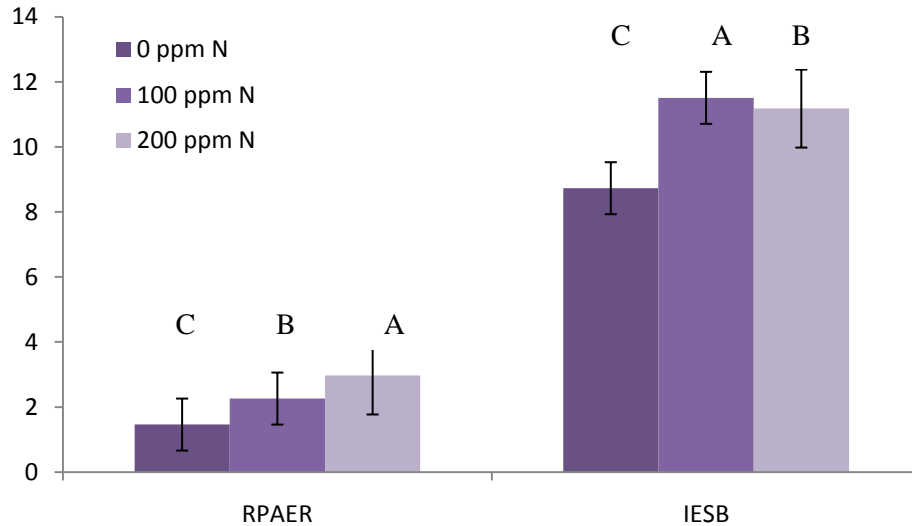


Figura 9. Efecto de las dosis de N en relación parte aérea raíz (RPAER) e índice de esbeltez (IESB) de plántulas de *P. patula*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas entre niveles aplicados de N (Tukey; $\alpha=0.05$).

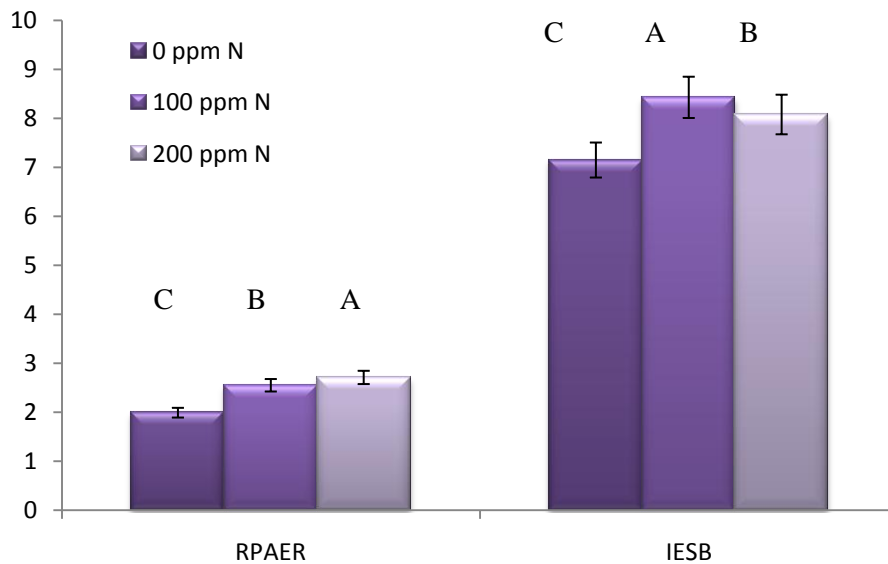


Figura 10. Efecto de las dosis de N en relación parte aérea raíz (RPAER) e índice de esbeltez (IESB) de plántulas de *P. devoniana*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas entre niveles aplicados de N (Tukey; $\alpha=0.05$).

En el ICD no hubo diferencia significativa entre las dosis de N en plántulas de *P. patula*, mientras que en *P. devoniana* si hubo diferencia significativa entre las dosis medias y altas.

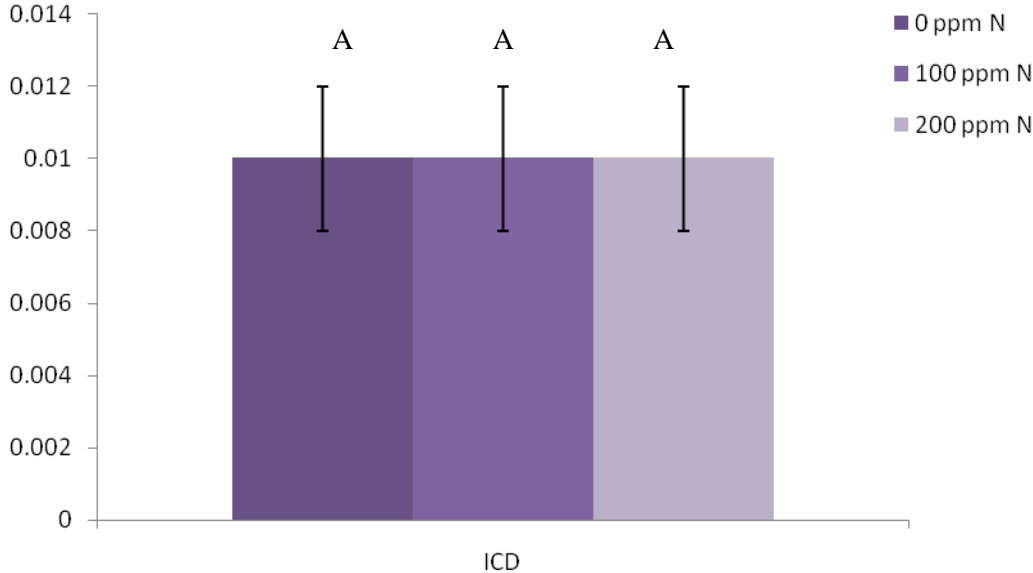


Figura 11. Efecto de las dosis de N en índice de calidad de Dickson de *P. patula*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

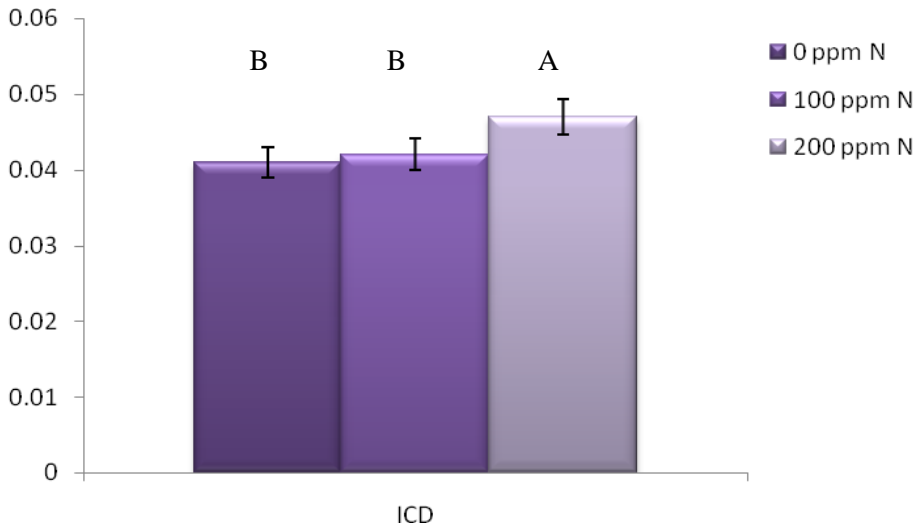


Figura 12. Efecto de las dosis de N en índice de calidad de Dickson de *P. devoniana*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

Según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), en *P. patula* y *P. devoniana* hubo diferencias significativas en todas las variables de respuesta evaluadas, pero no en el ICD de *P. patula*.

En ambas especies, la dosis de 200 ppm N, fue la que dio los valores promedios más altos en todas las variables, excepto en el IESB, observándose mayor influencia del N en altura, diámetro y biomasa total. Lo anterior coincide con lo reportado por Van Den Driesche (1982) quien encontró que el diámetro de algunas especies forestales se incrementa al aumentar las dosis de N. En este mismo sentido, Mexal y Landis (1990), mencionaron que la nutrición con N, es un factor importante en el crecimiento del diámetro en coníferas a nivel vivero. Calderón *et al.*, (2006), evaluaron el efecto del crecimiento del epicótilo en plántulas de *P. montezumae* Lamb, utilizando un diseño experimental de bloques al azar; fertilizando con dos soluciones nutritivas: Cooper (200-60-300) y Estándar (150-40-225), encontraron que las plántulas abastecidas con la solución nutritiva Cooper (mayor dosis de N), crecieron en promedio más en altura, diámetro y peso seco.

En el PSR, la prueba de Tukey mostró diferencias altamente significativas en ambas especies. No obstante, en plántulas de *P. devoniana* se obtuvo la misma biomasa de raíz (0.10 g), con las dosis de 0 y 200 ppm de N, igualmente en *P. patula*, la diferencia entre las dosis antes mencionadas es mínima (0.01g). Es probable que el efecto del N por sí solo no sea determinante en el crecimiento de la raíz (Figuras 7 y 8). Arteaga *et al.*, (2005), evaluaron el efecto del sustrato y fertilización en *Pseudotsuga macrolepis*, y encontraron que las dosis de N resultaron ser estadísticamente iguales, no hubo efecto significativo del N ni del P en la longitud de la raíz principal, raíces secundarias y PSR, mientras que para las variables altura de la planta, diámetro del tallo y biomasa total, las dosis de N aplicadas si fueron significativas.

Domínguez *et al.*, (2000), estudiaron la influencia de N-P-K en *Pinus pinea*, en vivero y campo y encontraron que un mayor aporte de N (250 mg /L solución), produjo un efecto negativo en el crecimiento de la raíz ya que disminuyó significativamente el número de raíces nuevas, sin embargo dosis bajas de N, generaron raíces muy finas. López (1990), en un estudio de nutrición de *P. patula* en

sistema hidropónico, encontró que la longitud y el peso seco de raíz, no mostraron correlación con los niveles aplicados de N, ni diferencias estadísticamente significativas entre los niveles aplicados del nutrimento, en cambio si hubo respuesta con la altura, diámetro y biomasa total, tal como sucedió en la presente investigación.

El índice de esbeltez (IESB), en *P. devoniana* obtuvo un valor promedio de 8.43, y en *P. patula* de 11.51, con la dosis de 100 ppm N. En ambos casos las plantas fueron muy esbeltas, es conveniente obtener valores bajos de este índice, ya que esto implica mayor robustez en la planta, por tal razón es recomendable aportar mayores cantidades de N.

4.3.2 Efecto de dosis de fósforo en variables morfológicas de *P. patula* y *P. devoniana* en vivero

En *P. patula* el efecto del fósforo fue altamente significativo en las variables altura e IESB ($P < 0.0001$) La interacción N*P tuvo efecto significativo en altura y PSR, de acuerdo al análisis de varianza (Cuadro 14 y 15). Arteaga *et al.*, (2005) en *Pseudotsuga macrolepis* encontraron que la interacción N*P fue significativa para PSR, ya que aumentó el valor de la relación raíz parte aérea, no obstante no se alcanzó el valor ideal, siendo que el PSF fue mayor que el PSR. Al parecer, existen interacciones importantes entre los diferentes nutrimentos. Esto hace que el balance de los nutrimentos sea muy importante para el crecimiento de las plantas incluso más significativo que su concentración absoluta.

En *P. devoniana* el efecto del fósforo fue altamente significativo en el PSF y la altura de la planta. La interacción P*K tuvo efecto significativo en la biomasa total, el IESB y la RPAER. Mientras que las interacciones N*P, P*K y N*P*K fueron responsables del efecto en el ICD (Cuadro 16 y 17).

Según la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), en ambas especies la dosis de 60 ppm produjo mayor altura, mientras que en el diámetro fue la de 125 ppm P, habiendo diferencias significativas entre dosis (Figuras 13 y 14).

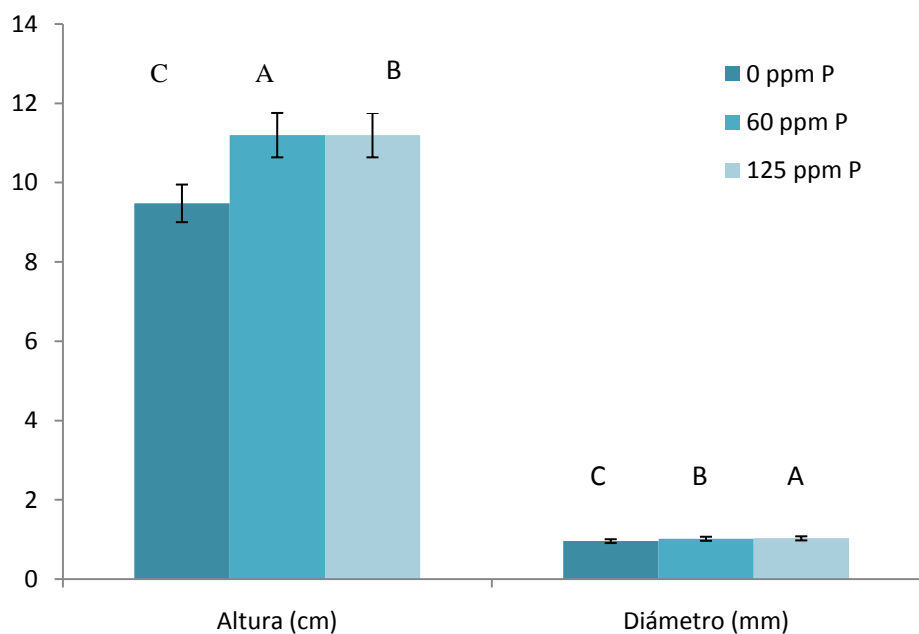


Figura 13. Efecto de las dosis de P en altura y diámetro de *P. patula*. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). Para una variable de respuesta, letras diferentes implican diferencias estadísticamente significativas entre los niveles aplicados de P.

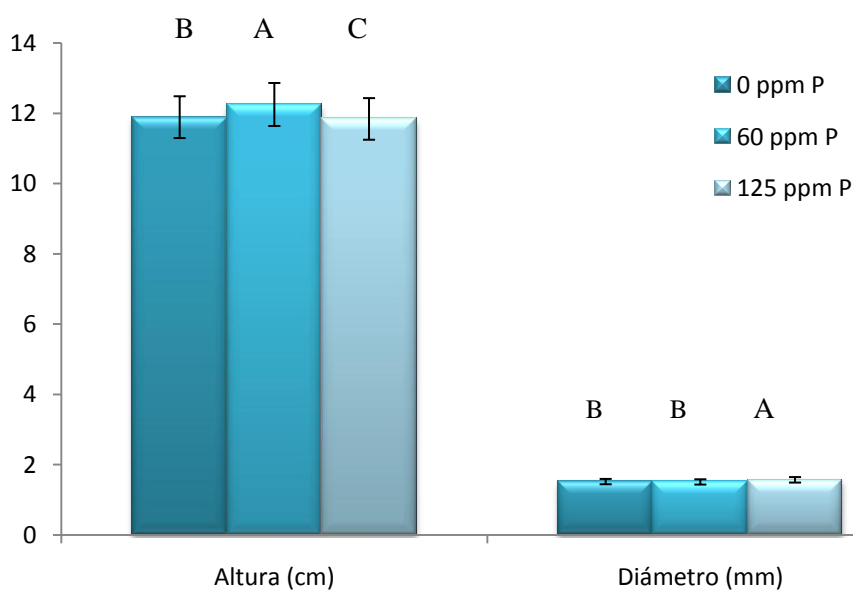


Figura 14. Efecto de las dosis de P en altura y diámetro de *P. devoniana*. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). Para una variable de respuesta, letras diferentes implican diferencias estadísticamente significativas entre los niveles aplicados de P.

En el peso seco del follaje (PSF), la dosis de 60 ppm de P tuvo el mayor efecto en *P. patula*, mientras que en *P. devoniana* fue la de 0 ppm. En el peso seco de raíz (PSR) las dosis 60 y 125 ppm dieron mejor respuesta en *P. patula*, no existiendo diferencia significativa entre ellas, en *P. devoniana* fue superior la de 0 ppm P. En el peso seco del tallo 60 ppm fue mejor en *P. patula* y 0 ppm en *P. devoniana* (Figuras 15 y 16). En resumen, en acumulación de biomasa la dosis de 60 ppm, fue mejor en *P. patula* y la de 0 ppm P en *P. devoniana*.

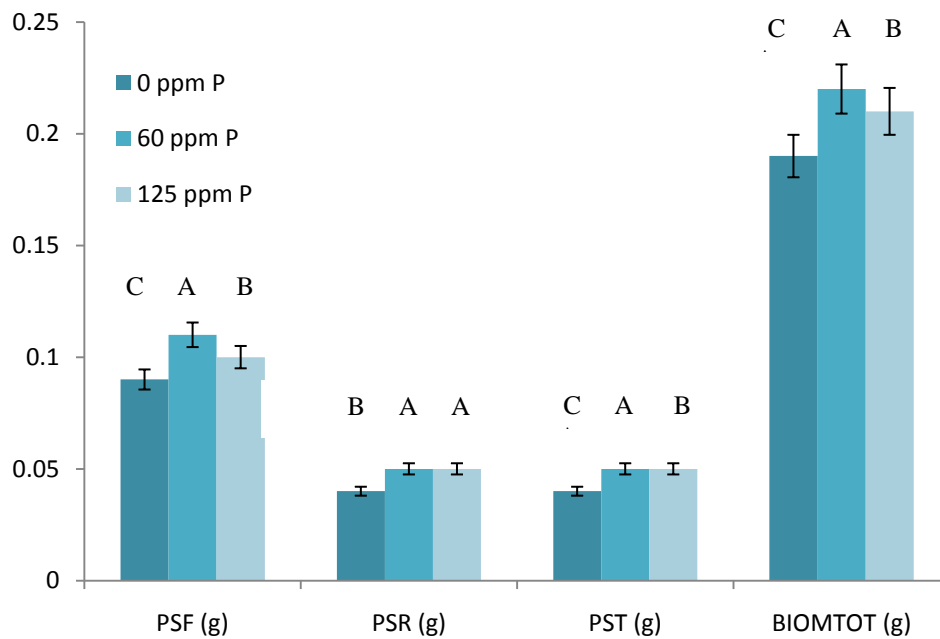


Figura 15. Efecto de las dosis de P en acumulación de biomasa de *P. patula* para una variable de respuesta. Letras diferentes para la misma variable indican diferencias significativas entre los niveles aplicados de P (Tukey; $p=0.05$).

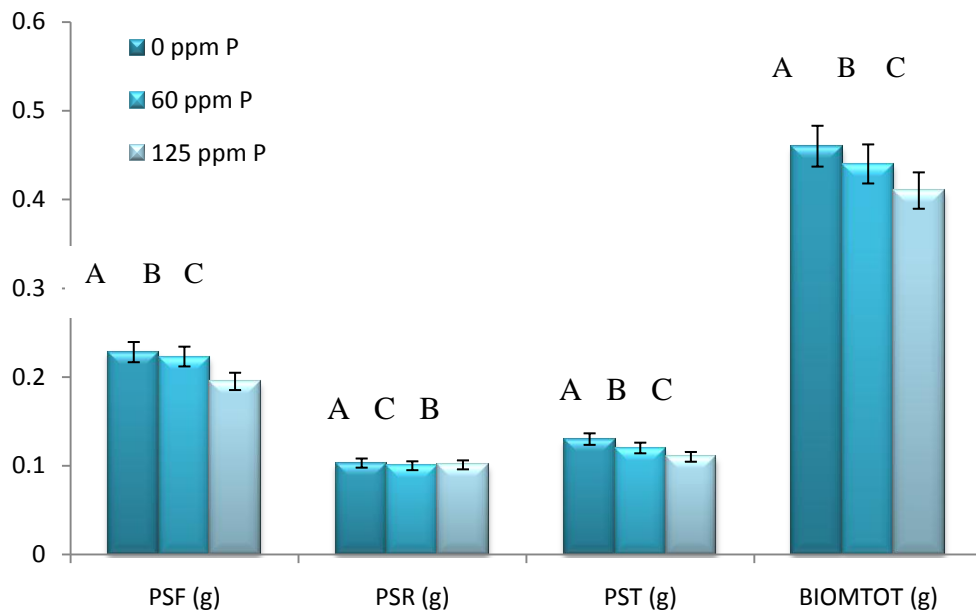


Figura 16. Efecto de las dosis de P en acumulación de biomasa de *P. devoniana*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas entre los niveles aplicados de P ($\alpha=0.05$).

En la relación raíz parte aérea, en ambas especies generó mayores valores la dosis de 60 ppm (Figura 17). Esto implica que la dosis más alta de P provocó saturación (consumo de lujo o incluso algún nivel de toxicidad) en cuanto a esta variable de respuesta. Dosis menores a 60 ppm produjeron planta de mejor calidad en cuanto a este índice.

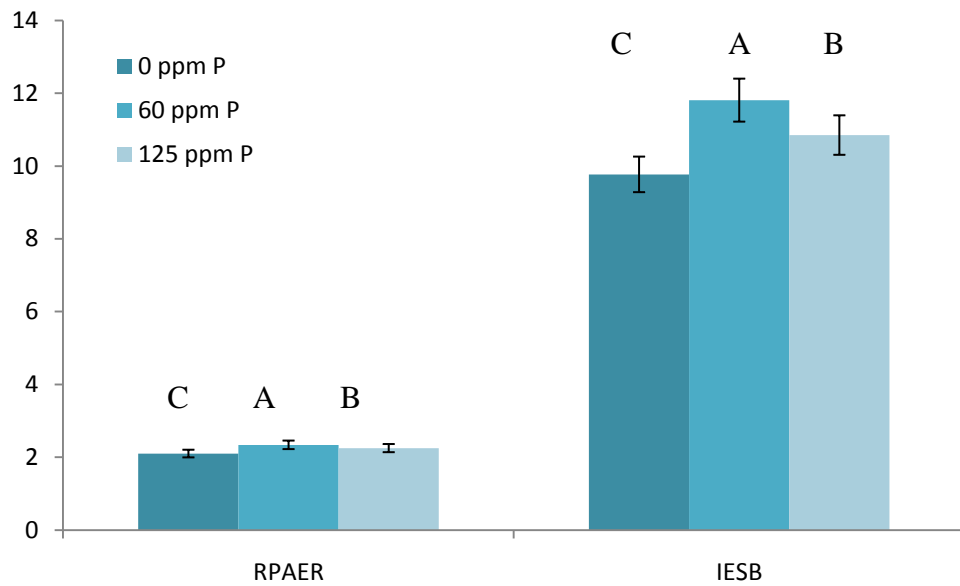


Figura 17. Efecto de las dosis de P en la relación raíz parte aérea (RPAER) e índice de esbeltez (IESB) en *P. patula*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas entre los niveles aplicados de P ($\alpha=0.05$).

En el índice de esbeltez la dosis de 60 ppm tuvo mayor efecto en *P. patula* y la de 0 ppm de *P. en P. devoniana* (Figura 18).

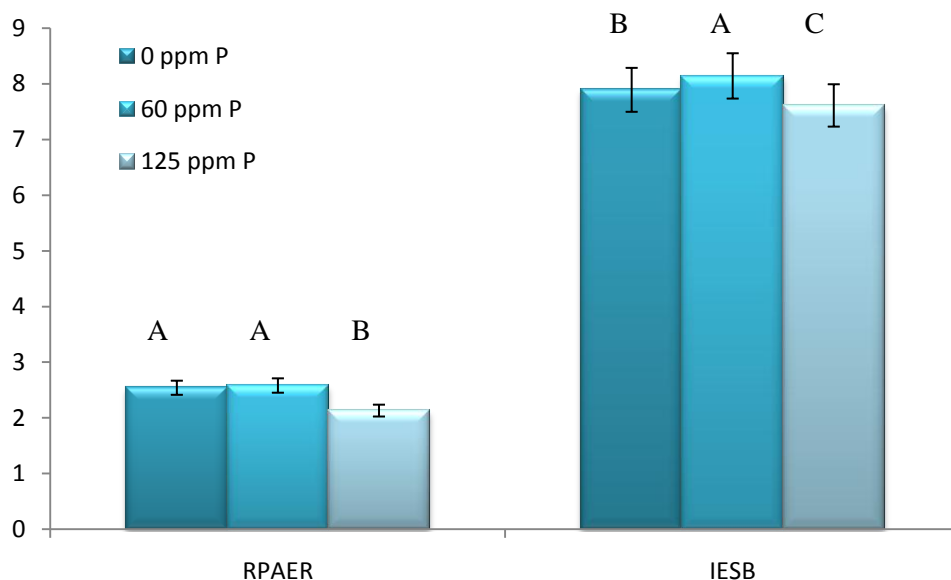


Figura 18. Efecto de las dosis de P en la relación raíz parte aérea (RPAER) e índice de esbeltez (IESB), en *P. devoniana*. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas entre los niveles probados de P ($\alpha=0.05$).

En el índice de calidad de Dickson, la dosis alta de P, tuvo el mayor efecto en *P. patula*, a diferencia de *P. devoniana* que fue la de 0 ppm, es probable que por ser *P. patula* una especie de rápido crecimiento requiera mayores concentraciones de nutrimentos, particularmente de P. En este trabajo se observó que *P. devoniana* requiere menores cantidades de P con respecto a *P. patula* (Figura 19 y 20).

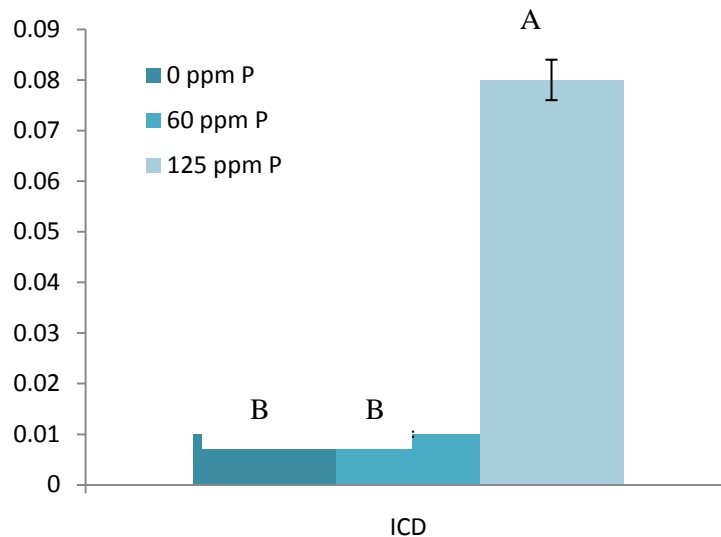


Figura 19. Efecto de las dosis de P en índice de calidad de Dickson de *P. patula*. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los niveles probados de P (Tukey; $p=0.05$).

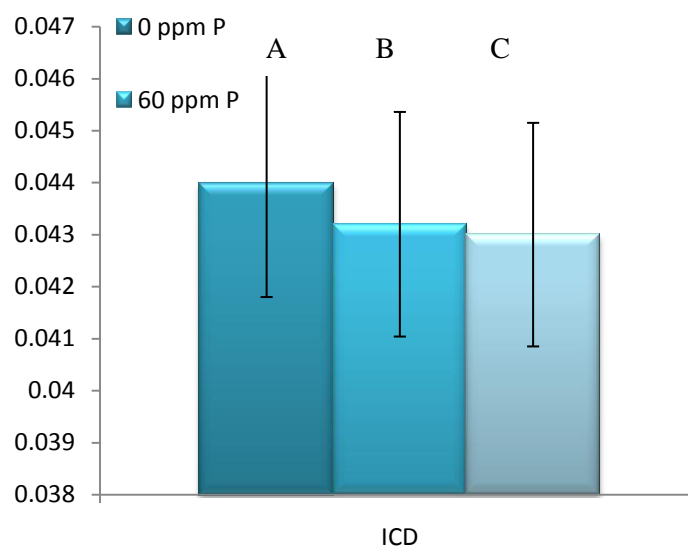


Figura 20. Efecto de las dosis de P en índice de calidad de Dickson de *P. devoniana*. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los niveles probados de P (Tukey; $p=0.05$).

En *P. patula*, la dosis de 60 ppm, indujo el valor más alto en PSF, BIOMTOT, RPAER, IESB, mientras que la dosis de 125 ppm, lo fue para el crecimiento en altura, diámetro, PSR e ICD (Cuadro 18). En esta investigación las dosis altas de P promovieron los valores más altos en *P. patula* pero no en *P. devoniana*. Esto debido a que *P. patula* probablemente tiene mayores requerimientos de P comparado con *P. devoniana*.

Estos últimos resultados coinciden con los de Domínguez (2000), quien reportó que la altura, peso seco aéreo y radical, respondieron de forma creciente al mayor aporte de P, en *Pinus pinea*. López (1990) encontró que el P, favorece el crecimiento en longitud de la raíz de *Pinus patula*, y mencionó que el efecto quizás se deba a la función del P en la división celular al activar los meristemos de la parte aérea y radical, además del papel que desempeña en la fotosíntesis y en la transferencia de energía en el adenosin trifosfato (ATP).

La prueba de Tukey para el caso de *P. devoniana* (Cuadro 19), reveló que la dosis de 60 ppm de P produjo el mayor valor para altura de planta, RPAER e IESB, mientras que la dosis de 125 ppm indujo el mayor crecimiento en diámetro. La dosis de 0 ppm produjo los valores más altos para peso seco del follaje, peso seco de raíz, peso seco de tallo, biomasa total e índice de calidad de Dickson, la posible explicación a esto es que los niveles de P fueron suficientes para abastecer la demanda de P a las plantas y esto se manifiesta porque el agua de riego contuvo P y otros nutrimentos, lo cual es muy probable, ya que solo de esta manera se puede explicar que las plantas del tratamiento testigo (0-0-0), hayan sobrevivido cinco meses después de la germinación, además de que si muchas variables de respuesta fueron mejores con 0 ppm P. Esto significa que posiblemente toda el agua de riego contuvo el P necesario para la especie, por ende las dosis mayores resultaron ser excesivas. Esto no sucedió en N, donde si hubo correlación positiva de las dosis de N con las variables de respuesta, en este caso el agua de riego probablemente no contuvo el N necesario requerido por las plantas.

Gallegos (2001), quien trabajó sobre deficiencias nutrimentales en tres especies de pinos: *P. pinea*, *P. halepensis* y *P. pinaster*, en cultivo hidropónico, encontró reducción del crecimiento en la biomasa radical y aérea, además de hojas con apariencia “quemada” al reducir las dosis de P.

Cuadro 18. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis de de P en *P. patula*

Variable	TRATAMIENTOS DE P (ppm)		
	0	60	125
Altura (cm)	9.48 C	11.20 A	11.20 B
Diámetro (mm)	0.96 C	1.02 B	1.03 A
PSF (g)	0.09 C	0.11 A	0.10 B
PSR (g)	0.049 B	0.050 B	0.056 A
PST (g)	0.043 C	0.057 A	0.051 B
BIOMTOT (g)	0.19 C	0.22 A	0.21 B
RPAER	2.10 C	2.34 A	2.25 B
IESB	9.77 C	11.81 B	10.85 A
ICD	0.0161 C	0.0164 B	0.0168 A

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de raíz, PST: peso seco tallo, BIOMTOT: biomasa total, RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

Cuadro 19. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis de P en *P. devoniana*

Variable	TRATAMIENTOS DE P (ppm)		
	0	60	125
Altura (cm)	11.89 B	12.25 A	11.84C
Diámetro (mm)	1.52 B	1.51 B	1.57 A
PSF (g)	0.228 A	0.223 B	0.195 C
PSR (g)	0.103 A	0.100 C	0.101 B
PST (g)	0.13 A	0.12 B	0.11 C
BIOMTOT (g)	0.46 A	0.44 B	0.41C
RPAER	2.54 B	2.58 A	2.13 A
IESB	7.89 B	8.14 A	7.61 C
ICD	0.044 A	0.0432 B	0.043 C

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de raíz, PST: peso seco tallo, BIOMTOT: biomasa total, RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

4.3.3 Efecto de dosis de potasio en variables morfológicas de *P. patula* y *P. devoniana*

De acuerdo con el análisis de varianza el K no tuvo efecto en ninguna variable morfológica e índice de calidad de planta en *P. patula* (Cuadros 14 y 15). No obstante en *P. devoniana* el K y las interacciones P*K, N*P*K tuvieron efecto altamente significativo en el PSF, PSR, BIOMTOT e ICD ($P<0.0001$) (Cuadros 16 y 17).

Con base en la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$), en *P. patula*, la dosis de 150 ppm generó mayores valores de PSF, PSR, PST, BIOMTOT, RPAER e ICD, mientras que la de 75 ppm, aumentó el IESB y la de 0 ppm mejoró la altura (Cuadro 20). Esto se contrapone a lo encontrado por López (1990), quien realizó un estudio de nutrición en *P. patula*, él reportó que la dosis de 150 ppm resultó ser una dosis elevada, reflejándose en una falta de respuesta en casi todas las variables evaluadas. Sin embargo fue el suministro de 25 ppm la dosis que mejoró significativamente la biomasa de tallo y total.

Para las variables altura, diámetro, peso seco de raíz, y peso seco de hoja, las diferencias en el efecto de los niveles aplicados de K no fueron significativas, pero en todos los casos, las medias más altas se presentaron con la dosis de 25 ppm de K.

En *P. devoniana*, la prueba de Tukey reveló que la dosis de 75 ppm fue la que produjo los mayores valores de altura, diámetro, PSF, PSR, PST, BIOMTOT e ICD, mientras que la dosis de 0 ppm produjo el valor menos adecuado de la RPAER (Cuadro 21).

En ambas especies se observó que la concentración de 150 ppm de K no favoreció el crecimiento en altura, sino por el contrario este disminuyó con esta dosis, siendo mejor el tratamiento con 75 ppm de K (Cuadros 20 y 21).

En el crecimiento del diámetro, la dosis alta de K, disminuyó su crecimiento. En *P. patula* fue mejor la dosis de 0 ppm K. mientras que en *P. devoniana* no existió diferencia significativa entre las dosis, aun cuando numéricamente las diferencias son mínimas, estadísticamente fueron significativas (Cuadros 20 y 21).

Destaca que en ambas especies el efecto del K se vio reflejado en la biomasa total. En *P. patula* la dosis de 150 ppm produjo las medias más altas en PSF, PSR, PST y BIOMTOT, mientras que la mejor dosis para *P. devoniana* fue 75 ppm (Cuadro 20 y 21). Mengel y Kirkby (1982), señalaron que el K tiene incidencia en el crecimiento del tallo, debido a que actúa sinérgicamente con los reguladores de crecimiento (ácidos giberélico e indolacético) estimulando así su elongación. En este mismo sentido Gallegos (2001), en un trabajo sobre deficiencias nutritivas de *P. pinaster*, *P. halepensis* y *P. pinea*, en cultivo hidropónico, encontró que el efecto del K no fue significativo en las variables morfológicas, no obstante *P. pinaster* y *P. halepensis* tuvieron reducción en el crecimiento de la biomasa aérea, mientras que en biomasa de raíz *P. pinaster* aumentó y *P. halepensis*, disminuyó.

Respecto al índice de calidad de Dickson la dosis de 150 ppm fue la más conveniente en *P. patula* (Cuadro 20) y la de 75 ppm en *P. devoniana* (Cuadro 21).

Cuadro 20. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis de K en *P.patula*

Variable	TRATAMIENTOS DE K (ppm)		
	0	75	150
Altura (cm)	10.82 A	10.65 B	10.41 C
Diámetro (mm)	1.02 A	0.99 C	1.00 B
PSF (g)	0.103 B	0.10 C	0.11 A
PSR (g)	0.049 B	0.053 A	0.054 A
PST (g)	0.048 C	0.049 B	0.055 A
BIOMTOT (g)	0.201 C	0.203 B	0.225 A
RPAER	2.22 B	2.07 C	2.40 A
IESB	10.46 B	10.64 A	10.32 C
ICD	0.015 C	0.016 B	0.017 A

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de raíz, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total, RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

Cuadro 21. Prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) para el efecto de las dosis de K en *P. devoniana*

Variable	TRATAMIENTOS DE K (ppm)		
	0	75	150
Altura (cm)	11.82 B	12.35 A	11.80 C
Diámetro (mm)	1.53 A	1.54 A	1.52 A
PSF (g)	0.19 C	0.23 A	0.21 B
PSR (g)	0.08 C	0.11 A	0.10 B
PST (g)	0.11 C	0.13 A	0.12 B
BIOMTOT (g)	0.39 C	0.48A	0.44 B
RPAER	2.46 A	2.38 C	2.41 B
IESB	7.79 B	8.06 A	7.78 C
ICD	0.038 C	0.047 A	0.044 B

PSF: peso seco del follaje, PSR: peso seco de raíz, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total, RPAER: relación parte aérea raíz, IESB: índice de esbeltez e ICD: índice de calidad de Dickson. Letras diferentes para la misma variable de respuesta indican diferencias significativas (Tukey; $\alpha=0.05$).

4.5 Balance nutrimental N-P-K, en la solución nutritiva y en el follaje

Con el fin de que la presente investigación sea de utilidad práctica para los viveristas y todos aquellos interesados en la producción de *P. patula* y *P. devoniana* en contenedor en vivero, en los cuadros 22 y 23 se presentan las dosis de N-P-K que produjeron los valores más altos en cada una de las variables de respuesta evaluadas y los balances nutrimentales en la solución nutritiva y el follaje para cada especie.

Cuadro 22. Balance nutrimental en solución nutritiva y tejido foliar de plántulas de *P. patula*.

Variable	Trat	N-P-K ppm	Concentración foliar			Balance	Balance
			N	P	K	nutrimental en la solución nutritiva N:P:K	nutrimental en follaje N:P:K
			_____ % _____				
Altura	26	200-125-75	1.78	0.19	1.4	1: 0.625: 0.375	1:0.107:0.785
Diámetro	27	200-125-150	1.79	0.18	1.5	1: 0.625: 0.75	1: 0.10: 0.837
PSF PST BIOMTOT ICD	24	200-60-150	1.69	0.17	1.35	1: 0.3: 0.75	1: 0.10: 0.79
PSR	18	100-125-150	1.84	0.17	1.5	1: 1.25: 1.5	1: 0.09: 0.81
RPAER	20	200-0-75	1.64	0.16	1.65	1: 0: 0.375	1: 0.09: 1.0

Trat: tratamiento que produjo el mejor valor para la variable de respuesta, PSF: peso seco del follaje, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total e ICD: índice de calidad de Dickson

Cuadro 23. Balance nutrimental en solución nutritiva y tejido foliar de plántulas de *P. devoniana*.

Variable	Trat	N-P-K ppm	Concentración foliar (%)			Balance nutrimental	Balance
			N	P	K	en la solución nutritiva N:P:K	nutrimental en follaje N:P:K
			%				
Altura	23	200-60-75	1.56	0.17	1.1	1: 0.3: 0.375	1: 0.10: 0.7
Diámetro	25	200-125-0	1.63	0.19	1.1	1: 0.625: 0	1: 0.11: 0.7
PSF PST PSR RPAER ICD	20	200-0-75	1.6	0.15	1.35	1: 0: 0.375	1: 0.09: 0.84
BIOMTOT	24	200-60-150	1.66	0.19	1.1	1: 0.3: 0.75	1: 0.11: 0.66

Trat: tratamiento que produjo el mejor valor para la variable de respuesta, PSF: peso seco del follaje, PST: peso seco del tallo, BIOMTOT: biomasa total e ICD: índice de calidad de Dickson

Cada vivero tiene objetivos y metas diferentes. En función de ello se tiene que elegir la planta que cumpla y satisfaga las características deseables, por ejemplo si interesa que *P. patula* crezca más en altura es conveniente utilizar la combinación de dosis N-P-K (200-125-75), pero si se prefiere que la planta tenga mayor biomasa de la mayoría de componentes (excepto radical), entonces la dosis más adecuada es (200-60-150) (Cuadro 22). Esto quiere decir que las características morfológicas responden de diferente manera a las concentraciones de los nutrimentos y que en la fertilización es mejor conocer el balance entre los nutrimentos que la concentración o dosis por si sola de cada nutrimento.

Jones (1983), citado por Oliveira *et al.*, (2006), establece que las proporciones entre nutrimentos son más importantes que la concentración absoluta de cualquier nutrimento.

Para obtener la mejor calidad de planta se deben considerar entre otros aspectos, las tres etapas de crecimiento de la planta: la de establecimiento, que comprende la germinación, el crecimiento de la plántula y sus cotiledones (alrededor de 4 semanas), la de crecimiento rápido en la cual las plantas crecen a una tasa exponencial y la de endurecimiento que comienza cuando las plantas tienen formadas sus yemas y el crecimiento aéreo cesa, pero el diámetro y el crecimiento de la raíz aumentan (Oliveira *et al.*, 2006).

El control de los niveles de N es el factor más importante para manipular el crecimiento de las plantas. Aunque el nivel óptimo de N varía entre viveros y especies forestales, la tendencia es adoptar niveles similares a los recomendados por Mullin y Hallet (1983); N moderado (50 ppm) durante la fase de establecimiento, niveles elevados (100 ppm) durante la fase de crecimiento rápido y niveles bajos (25 ppm) durante la fase de endurecimiento.

La definición de las proporciones en concentración foliar de N, P y K para cada variable, resulta útil para diagnosticar de manera sencilla si un nutrimento se encuentra dentro de la planta en un nivel inadecuado. Actualmente muchos autores coinciden que el estado nutricional de una planta es buen indicador de supervivencia de las plántulas en el campo, porque un apropiado manejo nutricional durante la etapa de vivero permite la producción de plántulas de alta calidad con reservas internas de nutrimentos que van a servir para mejorar la supervivencia en campo (Timmer y Munson, 1991; Mailk y Timmer, 1996; Salifu *et al.*, 2008)

5. CONCLUSIONES

P. patula creció más en altura con el tratamiento 26 (200-125-75K) y *P. devoniana* con el T23 (200-60-75).

P. patula creció más en diámetro con el tratamiento 27 (200-125-150) y *P. devoniana* con el T25 (200-125-0).

P. patula tuvo la mejor respuesta en el crecimiento del peso seco del follaje (PSF) y peso seco del tallo (PST), con la aplicación del tratamiento 24 (200-60-150), mientras que *P. devoniana* respondió favorablemente en las variables antes mencionadas con el tratamiento 20 (200-0-75).

El peso seco de raíz (PSR) de *P. patula*, tuvo mayor respuesta con el tratamiento 18 (100-125-150), en el caso de *P. devoniana* fue con el tratamiento 20 (200-0-75).

La biomasa total tuvo mayor respuesta con el tratamiento 24 (200-60-150) en ambas especies.

Valores menores de relación raíz parte aérea se obtuvieron con tratamientos sin N, sin embargo estas plantas crecieron poco en altura y diámetro.

Las plantas mas robustas fueron aquellas fertilizadas con altas dosis de K. En *P. patula* la mejor dosis fue (0-0-150) para el índice de esbeltez y (0-60-150) para *P. devoniana*.

El índice de calidad de Dickson resultó ser menos sensible a los tratamientos que los índices: relación parte aérea raíz e índice de esbeltez.

El efecto del N, fue altamente significativo en casi todas las variables evaluadas, siendo la dosis de 200 ppm, la que proporcionó el mayor crecimiento en altura, diámetro, peso seco del follaje y biomasa total, sin embargo no tuvo efecto en el crecimiento de la raíz en ninguna de las dos especies.

El P por sí solo no fue determinante en el crecimiento de las plantas. Necesitó interactuar con él para tener efectos significativos. Sin embargo la dosis de 60 ppm de P tuvo efecto positivo en la relación raíz parte aérea e índice de esbeltez en ambas especies.

El K en dosis de 150 ppm afectó negativamente el crecimiento de altura y diámetro, siendo mejor la dosis 0 ppm K, en ambas especies.

No siempre el aumento de las dosis de nutrimentos se refleja en mayores rendimientos.

Existen diferencias en los requerimientos nutrimentales entre las dos especies vegetales estudiadas, siendo *P. patula* la especie de mayor requerimiento nutrimental.

El suministro de nutrimentos a través del agua de riego puede alterar las conclusiones de los estudios de nutrición si tal suministro no se interpreta adecuadamente

Las características morfológicas responden de diferente manera a las concentraciones de los nutrimentos, por tanto en la fertilización es mejor conocer el balance entre los nutrimentos que la concentración individual de cada nutrimento.

6. LITERATURA CITADA

- Arteaga, M.B., Zenil J. R. 2005. Fertilización en vivero de *Pseudotsuga macrolepis* Flous. *Foresta Veracruzana* 7:41-45.
- Allan, J. E. 1971. The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy, Varian Techtron, Walnut Creek, California, USA.
- Arruda, S.R., Malavolta, E. 2001. Nutricao y adubacao potassica em Eucalyptus. *Informacoes Agronómicas. POTAFOS. Encarte Técnico* 91:1-10
- Birchler, T. R. Rose, R. W., Royo, A. M. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos forestales* 7:109-121.
- Buckman, H. O., Brady, N. C. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Limusa. México. 590p.
- Calderón, P. N., Jasso, J. M., Martínez, H. J., Vargas, H, J., Gómez, G. A. 2006. Estimulación temprana del crecimiento del epicótilo en plántulas de *Pinus montezumae* Lamb. *Ra Ximhai* 2:847-864.
- Castro, S. J. 1995 *Viveros forestales*. Centro de Investigación disciplinaria en conservación y mejoramiento de ecosistemas forestales. INIFAP. Publicación especial número 3. Compiladora y Editora Alicia E. Martínez Bautista. México, DF. 166p.
- Cibrián, T. J., Bello, L. 2000. Calidad de planta. In: *Memorias del primer congreso nacional de reforestación*. SEMARNAP-COLPOS Montecillo, México. 10p.
- Córdova, S. T. 2006. Caracterización de sustratos y su influencia en la producción de plántulas de *Pinus patula* Schl et Cham. Tesis de Maestría en Ciencias. COLPOS Montecillo, México. 80p.

- Cruz, F. G. 2006. Fertilidad del suelo y nutrición vegetal: Un enfoque ecológico. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 240p.
- Cruz, N. J. 2003. Fertilización en plántulas de *Abies religiosa* (H .B. K) Schl. et Cham y *Pinus ayacahuite* Ehren. en vivero. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. 88p.
- Domínguez, L. S., Oliet, P. J., Peñuelas, R. J.L., Serrada, H.R. 2000. Influencia de la relación N-P-K en el desarrollo en vivero y en campo de planta de *Pinus pinea*. Actas del Congreso. Simposio del pino piñonero. Valladolid. pp 195-202.
- Dumroese, R., K. Landis, T. D. Wenny, D.L. 1998. Raising forest tree seedlings at home: Simple methods for growing conifers of the Pacific Northwest from seeds. Moscow, Idaho: University of Idaho. Forest Wildlife and Range Experiment Station. Contribution Number 860. 56p.
- Galloway, G. 1986. Guía sobre la repoblación forestal en la sierra ecuatoriana. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección Nacional Forestal. Ecuador. 291p.
- Gallegos, P. V., Navarro, C. R. M., Alcántara, V. E., 2001. Deficiencias nutritivas en plantas de una savia de tres especies del género *Pinus sp.* en cultivo hidropónico. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 10:44-58.
- García, P. J. L. 2010. Efecto de la condición ambiental y la fertilización en el preacondicionamiento de *Pinus engelmannii* Carr, en vivero. Tesis de Licenciatura. Universidad Juárez del Estado de Durango. 55p.
- Gregoire, N., Fisher, R. F. 2004. Nutritional diagnoses in loblolly pine (*Pinus taeda* L), established stands using three different approaches. Forest Ecology and Management 203:195-208.

- Jackson, M. L. 1982. Análisis químicos de suelos. Omega, 4a ed., Barcelona, España. 662p.
- Johnson, M. J., Cline, M. L. 1991. Seedling quality of southern pines. In: M.L. Duryea and P. M. Dougherty (eds). Forest Regeneration Manual. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London. 141p.
- Haasey, L.D., Rose, R., 1993. Soil moisture stress induces transplant shock in stored and unstored 2+0 Douglas fir seedlings of varying root volumes. For Sci 39:275-294.
- Hopkins, W.G., Norman, P. A., Hünner. 2009. Introduction to Plant Physiology. Wiley. 4th edition. 558p.
- Hunt, G. A. 1990. Effect of styroblock design and copper on morphology of conifer seedlings. In: Rose, R. S. J. Campbell y T.D. Landis (eds). Proceedings, Western Forest Nursey Association; 1990. General Technical Report. USA Department Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: 218-222.
- Landis, T. D. 1989. Mineral nutrients and fertilization. In: Landis, T.D.; Tinus R.W.; McDonald, S.E.; Barnett, J.P. The Container Tree Nursery Manual, Volume 4. Agriculture. Handbook. 674. Washington, DC. U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 1-67.
- López, L.M. A. 1990. Estudio de nutrición de *Pinus patula* Schl et Cham en sistema hidropónico. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, 69p.
- López, U.J., Mendoza, H. A., Jasso, M. J., Vargas, H. J., Gómez, G, A. 2000. Variación morfológica de plántulas e influencia del pH del agua de riego en doce poblaciones de *Pinus greggii* Engelm. Madera y Bosques 6:81-94.

- Malik, V. Timmer, V. R. 1996. Growth, nutrient dynamics and interespecific competition of nutrient-loaded black spruce seedlings on a boreal mixedwood site. *Canadian Journal of Forest Research* 26:1651-1659.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Second edition. Academic Press. London. 657p.
- Mengel, K., Kirby, E. A. 1982. *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Institute Bern. 655p.
- Mexal, J.G. Landis, T. D. 1990. Target seedling concepts: height and diameter. In: Rose, R. S.J. Campbell y T.D. Landis (eds). *Target seedling Symposium Proceedings, Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations*. General Technical Report R. M-200. pp 17-36.
- Mullit, T. J. Hallet, R. D. 1983. Fertilization of containerized tree seedlings by the replacement method. Tech Note 93. Fredericton, NB: Canadian Forestry Service, Maritimes Forest Research Centre. 8 p.
- Nájera, L. J. A., Hernández, H. E. 2008. Relaciones morfométricas de un bosque coetáneo de la región del Salto, Durango. *Ra Ximhai* 4:69-81.
- Olivo, B, V., Buduba, G, C. 2006. Influencia de seis sustratos en el crecimiento de *Pinus ponderosa* producido en contenedores bajo condiciones de invernáculo. *Bosque* 27: 267-271.
- Oliveira, P. J. A., Afif, K.E., Mayor, M. M. 2006. *Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado*. Ediciones Universitarias. Universidad de Oviedo. España. 159p.
- Peñuelas, R. J. L., Ocaña, B. L. 2000. *Cultivo de plantas forestales en contenedor*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 190p.

- Pineda, O. T., Cetina, A. V. M., Vera, C. J., Cervantes, M. C., Khalil, G. A. 2004. El trasplante contenedor-contenedor (1+1) y contenedor-raíz desnuda (P+1) en la producción de planta de *Pinus greggii* Engelm. *Agrociencia*: 38:679-686.
- Prieto, R. J. A., Alarcón, M. B, 1998. Producción de planta forestal. Folleto técnico número 10. Campo experimental Valle de Guadiana-INIFAP-SAGAR. Durango, Dgo. 19p.
- Prieto, R. J. A., Vera, C. G. Merlín, B. E. 1999. Factores que influyen en la calidad de brinzales y criterios para su evaluación. Folleto técnico número 12. Campo experimental Valle de Guadiana--INIFAP-SAGAR. Durango, Durango. 23p.
- Prieto, R. J. A. Domínguez, P. A., Návar Chaídez, J. J. Cornejo, E. H. 2004. Factores que influyen en la producción de planta en *Pinus cooperi* blanco en vivero. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10:63-70.
- Quiroz, M. I., González, O, M. García. R, E., Soto, R. H., Casanova, D.K. 2009. Evaluación de la germinación de semillas y crecimiento de *Pitavia punctata* Mol de la costa de la región del Maule. Instituto forestal- INFOR. Centro Tecnológico de la Planta Forestal. Chile. 14p.
- Raven, P. H. y Evert. 1992. *Biología de las plantas*. Reverté, S. A. Barcelona. 773p.
- Reyes, R. J., Aldrete, A., Cetiná, A. V. M., López, U. J. 2005. Producción de plántulas de *Pinus pseudostrobus* en sustratos a base de aserrín. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 11: 105-110
- Rodríguez, S. F. 1982. *Fertilizantes. Nutrición vegetal*. AGT Editor S. A. Chile .157p.
- Rodríguez, F. H. 2002. *Métodos de análisis de suelos y plantas, criterios de interpretación*. Trillas. México. 196 p.
- Rodríguez, D. T. Duryea, M. L. 2003. Indicadores de calidad de planta en *Pinus palustris* Mill. *Agrociencia* 37:299-307.

- Rodríguez, T. D. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Ed. Mundi Prensa. México, DF. 156p.
- Ruano, M. R. 2003. Viveros forestales. Manual de cultivo y proyectos. Ed. Mundi Prensa. España. 281p.
- Salisbury, F. B. Ross, C. W. 1994. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana. México. 759p.
- Salifu, F. K. Jacobs, D. F. Birge, Z. K. 2008. Performance of nutrient-loaded Red Oak and White Oak seedlings on Mine Lands in Southern Indiana. In: National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. USDA. Department of Agriculture. USA. 174p. 65-71.
- Salmerón, G, J. 1995. Manual de repoblaciones forestales. Tomo II. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Ed. Mundi Prensa. España.
- Starkey, E. 2002- Irrigation and fertilization type, rate and frequency of application. In: Barnett J., Dumroese R., K; Moorhead D., J. (eds). Proceedings: Growing longleaf pine in containers 1999 and 2001 workshops. Gen. Tech. Rep. SRS. Asheville, N. C. USDA. Forest Service, Southern Research Station. 30-34 p.
- Sigala, R. J. A. 2009. Calidad de planta en diez viveros forestales del estado de Durango. Tesis de licenciatura. UACH. 117p.
- Timmer, V. R., Munson, A. D., 1991. Site-specific growth and nutrition of planted *Picea mariana* in the Ontario Clay Belt. Canadian Journal of Forest Research 21:1058-1065.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphology: what you can tell by looking. In: Evaluating seedling Quality. Principles, procedures, and Predictive Abilities of Major Test. Duryea M. L. ed Corvallis Oregon. FRL pp 59-71.

Van, D.D.R. 1982. Relationship between spacing and nitrogen fertilization of seedlings in the nursery, seedling size and outplanting performance. Canadian Journal Forest Research 12:865-875.

Vivancos, D. A. 1984. Tratado de fertilización Ed. Mundi prensa. España. 613p.

Velázquez, M. A., Ángeles, P. G., Llanderal, O. T., Román, J. A. R., Reyes, H. V. 2004. Monografía de *Pinus patula*. CONAFOR. COLPOS Montecillo, 1ª edición, México. 124p.