



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMAS
NPK EN ESPECIES DE INTERÉS
ECONÓMICO Y FORESTAL EN CULTIVO
HIDROPONICO**

SIOMARA FLORES ROJAS

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

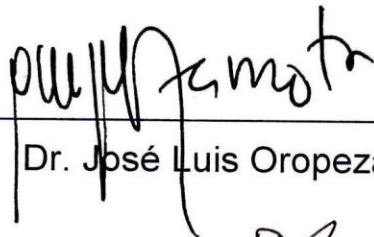
2010

La presente tesis titulada: **Determinación de dosis óptimas NPK en especies de interés económico y forestal en cultivo hidropónico**, realizada por la alumna, **Siomara Flores Rojas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, *ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:*

**MAESTRO EN CIENCIAS
POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

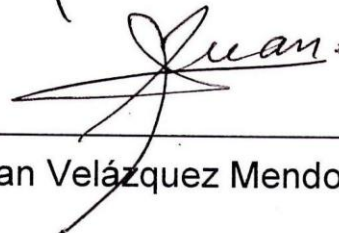
CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. José Luis Oropeza Mota

Director de Tesis:



Dr. Juan Velázquez Mendoza

Asesor:



Dra. Ma. Edna Álvarez Sánchez

Montecillo, Estado de México a 27 de Septiembre de 2010

DETERMINACIÓN DE DOSIS ÓPTIMAS NPK EN ESPECIES DE INTERÉS ECONÓMICO Y FORESTAL EN CULTIVO HIDROPONICO

Siomara Flores Rojas, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010

A fin de determinar la dosis óptima de fertilización NPK en árboles de tres años de edad en especies de interés económico y forestal (*Pinus cembroides* Zucc., *Cupressus lusitanica* Mill., *Cupressus sempervirens* L. y *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh), el efecto del abastecimiento nutrimental se evaluó con distintos balances NPK, sobre el crecimiento de los árboles en altura y diámetro, así como en la asignación de materia seca hacia crecimiento nuevo. El experimento tuvo un arreglo factorial incompleto 4^3 con diseño completamente al azar y los tratamientos (12) se diseñaron con la técnica de la matriz San Cristóbal, éste se condujo en sistema de cultivo hidropónico con sustrato corteza de pino. Las tasas de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro fueron variables y se determinó para ellas que los balances nutrimentales N:P:K mejores fueron 1.6:1:0.3, 2.9:1:0.8 y 3.6:1:5. La asignación de biomasa seca hacia crecimiento nuevo en las especies estudiadas fue primariamente hacia hojas nuevas y el crecimiento relativo fue función de los tratamientos NPK que se aplicaron. *Fraxinus uhdei* presentó el porcentaje mayor de biomasa seca destinada a dicha variable, en tanto que *Cupressus lusitanica* y *C. sempervirens* mostraron patrones de respuesta similares. Las dosis N – P – K (meq L⁻¹) que se determinaron como óptimas fueron: 12.0 – 4.2 – 3.3 para *Pinus cembroides* y *Fraxinus uhdei*; 9.3 – 2.5 – 2.0 para *Cupressus lusitanica*; y 4.0 – 2.5 – 2.0 para *C. sempervirens*

Palabras clave: Balance nutrimental N:P:K, Tasa de crecimiento relativo instantáneo, *Pinus cembroides*, *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitanica*, *Cupressus sempervirens*

DETERMINATION OF OPTIMAL DOSAGES NPK IN SPECIES OF ECONOMIC AND FOREST INTEREST IN HYDROPONIC CULTURE

Siomara Flores Rojas, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2010

To determine the optimal dosages of NPK fertilization on trees three years of age in species of economic and forestry interest (*Pinus cembroides* Zucc., *Cupressus lusitanica* Mill., *Cupressus sempervirens* L. and *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh), the effect of nutrient supply was evaluated with different NPK balances on the tree growth in height and diameter, as well as in the allocation of dry mass to new growth. The experiment was an incomplete factorial arrangement 4^3 with a complete randomized design and treatments (12) were designed with the technique of the Matrix San Cristobal, the experiment was conducted in hydroponic culture system with pine bark substrate. The instantaneous relative growth rates in height and diameter were variable and determined for themselves that the best nutrient balances N:P:K were 1.6:1:0.3, 2.9:1:0.8 y 3.6:1:5. The dry biomass allocation to new growth in the studied species was primarily to new leaves and relative growth was a function of NPK treatments. *Fraxinus uhdei* presented the highest percentage of dry biomass for that variable, while *Cupressus lusitanica* and *C. sempervirens* showed similar response patterns. Dosages N – P - K (meq L⁻¹) that were identified as optimal were: 12.0 - 4.2 – 3.3 for *Pinus cembroides* and *Fraxinus uhdei*; 9.3 – 2.5 – 2.0 for *Cupressus lusitanica*; and 4.0 – 2.5 – 2.0 for *C. sempervirens*.

Key words: Nutrient balance N:P:K, Instantaneous relative growth rate, *Pinus cembroides*, *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitanica*, *Cupressus sempervirens*

El triunfo del verdadero hombre surge de las cenizas de su error.

Nunca te quejes de tu soledad o de tu suerte, enfréntala con valor y acéptala. De una manera u otra eres el resultado de tus actos y prueba que tú siempre has de ganar.

No te amargues de tu propio fracaso ni se lo cargues a otro, acéptate ahora o seguirás justificándote como un niño. Recuerda que cualquier momento es bueno para comenzar.

No olvides que la causa de tu presente es tu pasado así como la causa de tu futuro será tu presente.

Piensa menos en tus problemas y más en tu trabajo; tus problemas, sin alimentarlos, morirán.

Aprende a nacer desde el dolor y a ser más grande que el más grande de los obstáculos.

Mírate en el espejo de ti mismo y serás libre y fuerte y dejarás de ser un títere de las circunstancias porque tú mismo eres tu destino.

Levántate y mira el Sol por las mañanas y respira la luz del amanecer.

Tú eres parte de la fuerza de tu vida, ahora despiértate, lucha, camina, decídete y triunfarás en la vida; nunca pienses en la suerte, porque la suerte es el pretexto de los fracasados.

Pablo Neruda

AGRADECIMIENTOS

- ♫ Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, por permitirme la oportunidad de desarrollar mis estudios de maestría
- ♫ Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mi permanencia en la maestría
- ♫ A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por el apoyo y todas las facilidades prestadas durante la realización del presente trabajo
- ♫ A la Comisión del Lago de Texcoco por la donación del material vegetal, objeto de estudio de esta investigación
- ♫ A mi director de tesis, el Dr. Juan Velázquez Mendoza por su invaluable amistad, confianza, paciencia y apoyo; y por compartir sus amplios conocimientos siempre con su característica jovialidad y sencillez
- ♫ A la Dra. Edna Álvarez por su apoyo, paciencia y confianza, así como sus atinadas observaciones y comentarios en la revisión de este escrito
- ♫ Al Dr. José Luis Oropeza Mota por el tiempo dedicado a la revisión del presente trabajo y sus oportunas sugerencias
- ♫ Al Sr. Raúl Eduardo López Lozano, Laboratorista del Postgrado Forestal, por su amistad e invaluable apoyo durante las actividades realizadas a lo largo de este trabajo
- ♫ A los ingenieros forestales Rosa Ma. Monroy López y Ruperto Vergara González
- ♫ A **todos** aquellos que, a lo largo de esta etapa de mi vida académica y personal, me apoyaron con su invaluable amistad...mil gracias

ÍNDICE GENERAL

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	2
2.1 Hidroponia.....	2
2.2 Nutrición y nutrimentos.....	3
2.3 Funciones de los nutrimentos N, P y K en las plantas.....	7
2.3.1 Nitrógeno.....	7
2.3.2 Fósforo.....	8
2.3.3 Potasio.....	9
2.4 Factores que afectan la composición de las plantas.....	10
2.5 Soluciones nutritivas, fertilizantes y fertilización.....	12
2.6 Crecimiento de árboles forestales.....	19
2.7 Planta de calidad.....	20
2.8 El diseño de tratamientos San Cristóbal.....	21
3. OBJETIVOS.....	24
3.1 Objetivo General.....	24
3.2 Objetivo Específico.....	24
4. HIPÓTESIS.....	25
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
5.1 Material biológico.....	26
5.2 Sustrato.....	26
5.3 Riego.....	26
5.4 Diseño de las soluciones nutritivas.....	27
5.5 Variables de respuesta.....	29
5.6 Modelos y análisis estadísticos.....	30
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
6.1 Altura y diámetro.....	32
6.2 Peso seco.....	41

7. CONCLUSIONES.....	52
8. ANEXO 1.....	53
9. LITERATURA CITADA.....	55

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

	Página
Cuadro 1. Clasificación de los nutrimentos, de acuerdo a su concentración en la biomasa seca, identificados para el crecimiento de las plantas.....	4
Cuadro 2. Tratamientos de la matriz San Cristóbal para tres factores.....	23
Cuadro 3. Tratamientos NPK determinados con base a las curvas de abastecimiento y la matriz San Cristóbal.....	28
Cuadro 4. Balances NPK determinados para el crecimiento en altura y diámetro con base al índice de esbeltez.....	40
Cuadro 5. Balances NPK de mayor acumulación de biomasa en crecimiento nuevo en especies forestales.....	49
Cuadro 6. Tratamientos NPK de rendimiento mayor en especies forestales.....	50
Cuadro 7. Costo de la solución nutritiva considerada como óptima para cuatro especies forestales de tres años de edad	51
Cuadro 8. Intervalos de confianza de <i>Pinus cembroides</i> para la tasa de crecimiento relativo absoluto.....	53
Cuadro 9. Intervalos de confianza de <i>Cupressus lusitanica</i> para la tasa de crecimiento relativo absoluto.....	53

Cuadro 10. Intervalos de confianza de <i>Cupressus sempervirens</i> para la tasa de crecimiento relativo absoluto.....	54
Cuadro 11. Intervalos de confianza de <i>Fraxinus uhdei</i> para la tasa de crecimiento relativo absoluto.....	54
Figura 1. Relaciones entre el contenido nutrimental del tejido y el crecimiento de la planta.....	6
Figura 2. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de <i>Pinus cembroides</i> en respuesta a distintos tratamientos NPK....	33
Figura 3. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de <i>Cupressus lusitanica</i> en respuesta a distintos tratamientos NPK...	35
Figura 4. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de <i>Cupressus sempervirens</i> en respuesta a distintos tratamientos NPK..	36
Figura 5. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de <i>Fraxinus uhdei</i> en respuesta a distintos tratamientos NPK.....	37
Figura 6. Gráficas de crecimiento en altura y diámetro de especies forestales en el tratamiento considerado óptimo para cada especie.....	39
Figura 7. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en <i>Pinus cembroides</i> en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados.....	42
Figura 8. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en <i>Pinus cembroides</i> en los posibles tratamientos óptimos de NPK.....	43

Figura 9. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en <i>Cupressus lusitanica</i> en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados.....	44
Figura 10. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en <i>Cupressus lusitanica</i> en los posibles tratamientos óptimos de NPK.....	45
Figura 11. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en <i>Cupressu sempervirens</i> en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados.....	46
Figura 12. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en <i>Cupressus sempervirens</i> en los posibles tratamientos óptimos de NPK.....	47
Figura 13. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en <i>Fraxinus uhdei</i> en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados.....	47
Figura 14. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en <i>Fraxinus uhdei</i> en los posibles tratamientos óptimos de NPK.....	48

1. INTRODUCCIÓN

Los programas actuales de reforestación, con fines ecológicos, así como el establecimiento de plantaciones forestales comerciales, demandan de planta de calidad que garantice su supervivencia, ya que según estimaciones realizadas por Bello y Cibrian (2000), la supervivencia fue apenas de 43%; atribuyéndose a factores no considerados en la plantación, como: calidad de la planta, transplante y manejo inadecuados, condiciones del sitio (acidez o alcalinidad de suelo, sequía, heladas). Dentro de estos factores, la calidad de la planta es determinante en la supervivencia de la plantación y dicha calidad depende del manejo que se le haya brindado en la fase de vivero.

La fertilización es una práctica indispensable para mejorar la calidad y productividad forestal (Fritz-Helmut, 1991) y es, después del riego, la práctica que más influye en el crecimiento y calidad de las plantas, al incidir en los procesos fisiológicos. Un programa de fertilización debe mantener soluciones balanceadas de los nutrientes y adecuarlas a los cambios en el ciclo de crecimiento. Debido al efecto pronunciado de la fertilización en el crecimiento de los árboles, hay tres niveles de fertilización que se ajustan según la etapa de desarrollo de éstos: 1) *Establecimiento* (emergencia y crecimiento de la planta hasta la fase cotiledonal), 2) *Crecimiento rápido* (fase logarítmica del crecimiento, principalmente en altura) y 3) *Endurecimiento* (inicia con el desarrollo de yema apical, donde el crecimiento en altura cesa, en tanto que el crecimiento en diámetro solo disminuye su tasa de crecimiento) (Landis *et al.*, 1989).

Los requerimientos nutrimentales varían según la especie forestal y es esencial su conocimiento para el diseño y aplicación de soluciones nutritivas. Dentro de los nutrientes requeridos en altas cantidades por estas especies son el nitrógeno, el fósforo y el potasio; el suministro de éstos debe diseñarse con base en pruebas experimentales que combinen los niveles óptimos de N, P y K obtenidos de las curvas de abastecimiento nutrimental. En el presente trabajo se evaluó el suministro de distintos balances de N:P:K mediante fertirriego en el crecimiento de cuatro especies forestales durante la fase de vivero.

2. ANTECEDENTES

2.1 Hidroponia

Aunque la definición *per se* del término hidroponía se refiere al cultivo en agua, el término se aplica también al sistema de cultivo que se da en ausencia de suelo y empleando material sólido, mineral u orgánico, carente de nutrientes, como medio de soporte para las plantas, pero se provee en el agua de riego los nutrientes que precisan éstas para su adecuado desarrollo. En 1699, John Woodward descubrió que no solo el agua sino también el suelo proveía las sustancias nutritivas a las plantas; sin embargo, fue hasta los 1800's, con los avances en la química, que se pudo ahondar en la naturaleza de dichas sustancias nutritivas aislándolas como minerales. Dos siglos más tarde, en 1804, De Saussure expuso el principio de que las plantas están compuestas por elementos químicos obtenidos del agua, suelo y aire, y en 1851 Boussingault comprobó este principio. En ese siglo, Knop y Sachs (1861 y 1869, respectivamente) lograron el cultivo de plantas en soluciones de agua que contenían solo los minerales determinados con anterioridad; así, fue que surgió lo que se conoce como *nutricultura* (cultivo nutrimental). Estas primeras investigaciones demostraron que se podía conseguir un crecimiento normal de las plantas sumergiendo sus raíces en una solución que tuviese sales de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B y Cl, elementos químicos esenciales conocidos actualmente como *nutrientes* (Resh, 2001; Mengel y Kirkby, 1978).

La mayor parte de los trabajos realizados en hidroponía se utilizan en la producción de hortalizas diversas; sin embargo, existen trabajos (aunque escasos) en especies forestales (e. g. Flores, 2007 y López, 1990). Trabajos inéditos de Velázquez-Mendoza (2007, comunicación personal) reflejan la importancia de la hidroponia como herramienta base en el estudio de los requerimientos nutrimentales de especies forestales.

El uso de la hidroponia en experimentos de abastecimiento nutrimental garantiza que la respuesta a evaluar será, en efecto, producto de las soluciones nutritivas aplicadas, por lo que la confiabilidad en los resultados obtenidos, al determinar una dosis óptima, serán confiables.

2.2 Nutrición y nutrimentos

La *nutrición* puede ser definida como el suministro y la absorción de componentes necesarios (nutrimentos) para el metabolismo y el crecimiento de un organismo; en tanto que, un *nutrimento* puede ser definido como aquel elemento esencial que es requerido para el ciclo de vida de un organismo y cuyas funciones no pueden ser sustituidas por ningún otro componente químico (Mengel y Kirkby, 1978).

Los efectos benéficos resultantes de agregar sustancias minerales al suelo, como ceniza de madera o limo, para mejorar el crecimiento en las plantas, se conocen por más de dos mil años; pero no fue sino hasta el siglo XIX que, gracias a las observaciones y especulaciones de Justus von Liebig, se formuló la *Teoría de los elementos minerales*, la cual establece que elementos como el nitrógeno, el azufre, el fósforo, entre otros, son *esenciales* para el crecimiento de las plantas (Marschner, 1986). De acuerdo con lo propuesto por Arnon y Stout, en 1939, deben ser satisfechos los requisitos siguientes para que un elemento sea considerado como nutrimento (Jones, 1983; Marschner, 1986):

1. La omisión del elemento debe resultar en crecimiento anormal, en la incapacidad para completar todas las fases del ciclo de vida, o en la muerte prematura de la planta
2. La función del elemento debe ser específica en el metabolismo de la planta y no es reemplazable por algún otro elemento

3. El elemento debe tener un efecto directo en el crecimiento y el metabolismo de la planta. De acuerdo con esta definición, los elementos que tengan efectos indirectos en el crecimiento y nutrición de las plantas, no son considerados como esenciales

Con base a lo anterior han sido identificados 17 nutrimentos para el crecimiento de las plantas los cuales se dividen, de acuerdo con su concentración en la biomasa seca, en macronutrimentos y micronutrimentos (Cuadro 1); basados en esta definición, los siguientes elementos químicos son considerados como esenciales para las plantas:

Cuadro 1. Clasificación de los nutrimentos, de acuerdo a su concentración en la biomasa seca, identificados para el crecimiento de las plantas

Macronutrimentos		Micronutrimentos	
Carbono	C	Fierro	Fe
Hidrogeno	H	Manganeso	Mn
Oxígeno	O	Cobre	Cu
Nitrógeno	N	Zinc	Zn
Fósforo	P	Molibdeno	Mo
Azufre	S	Boro	B
Potasio	K	Cloro	Cl
Calcio	Ca	Níquel	Ni
Magnesio	Mg		

Esta división de los nutrimentos de las plantas en macronutrimentos y micronutrimentos es arbitraria, porque en muchos casos las diferencias entre el contenido de un macronutriente y un micronutriente son considerablemente pequeñas (Mengel y Kirkby, 1978).

Pueden plantearse dos características generales sobre la nutrición de las plantas. Primero, todos los procesos fisiológicos en las plantas dependen finalmente de la absorción de uno o más nutrimentos en una forma apropiada para los procesos bioquímicos subyacentes, un incremento en el tamaño de los órganos de la planta y su correcto funcionamiento dependen de una apropiada disponibilidad de los nutrimentos. Segundo, el crecimiento depende de la asimilación de los nutrimentos absorbidos, de su almacenamiento y de su metabolismo en la planta (Mengel y Kirkby, 1978).

Tanto el almacenamiento como la reasimilación son fenómenos que pueden ser de importancia crítica en la sobrevivencia y buen estado físico de plantas, en ambientes con deficiencia nutrimental o bajo circunstancias de fluctuaciones en la disponibilidad edáfica de nutrimentos. La historia del desarrollo de los conceptos sobre requerimientos nutrimentales y los métodos usados para determinar la esencialidad de algunos elementos, los estudios de los factores que afectan la absorción, translocación, y funciones metabólicas han tenido la atención de muchos investigadores y aún hay muchas preguntas sin responder (Mengel y Kirkby, 1978; Hale y Orcutt, 1987).

La curva típica de abastecimiento nutrimental (Figura 1) engloba distintos estadios nutrimentales obtenidos con base en la relación entre el contenido nutrimental en el tejido de la planta y su crecimiento o rendimiento; de los estadios presentados, lo ideal es encontrar el óptimo fisiológico y para ello, de acuerdo con Velázquez-Mendoza (2008, Comunicación personal), es preciso primero determinar las curvas de abastecimiento nutrimental y, segundo, experimentar con los niveles óptimos obtenidos a fin de determinar una dosis NPK óptima.

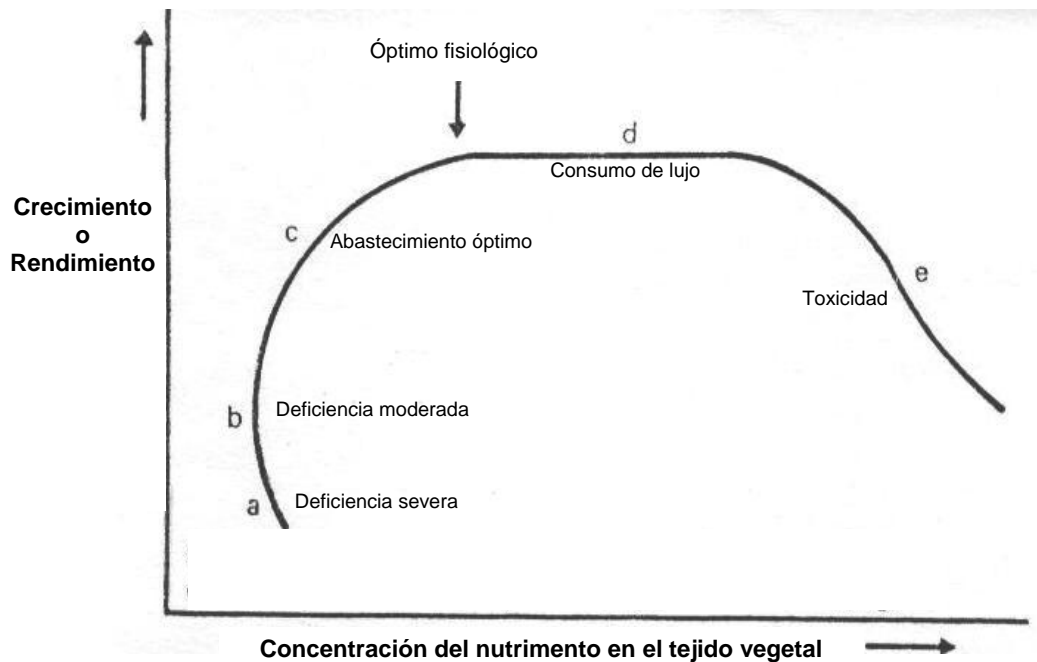


Figura 1. Relaciones entre el contenido nutrimental del tejido y el crecimiento de la planta (Modificado de Mengel y Kirkby, 1978)

Se ha mencionado que mejorar las condiciones para el crecimiento, modificando diversos factores, puede o no tener efecto dependiendo de si existe o no algún factor limitante. Si los nutrientes no están disponibles, cuando se necesitan, en cantidades y proporciones adecuadas, el crecimiento y la productividad de la planta se verán afectados negativamente. Cada especie tiene requerimientos particulares de nutrientes que le permitirán un crecimiento y vigor óptimos; estos requerimientos no son constantes, y cambian según las plantas crecen y se desarrollan (Mengel y Kirkby, 1978; Timmer y Armstrong, 1987).

2.3 Funciones de los nutrientes N, P y K en las plantas

Los nutrientes ejercen funciones específicas en la vida de las plantas y estas funciones pueden ser clasificadas en tres grandes grupos (Alcántar y Trejo-Téllez, 2007):

1. Estructural. El nutriente forma parte de la molécula de uno o más compuestos orgánicos, e. g. Nitrógeno (N) en aminoácidos y proteínas, y Fósforo (P) como parte integral de los nucleótidos y ácidos nucleicos
2. Constituyente de enzima. El nutriente forma parte de las enzimas y participan como activadores de numerosas reacciones enzimáticas, e. g. cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc y níquel, que participan como activadores de numerosas reacciones enzimáticas
3. Transporte y regulación osmótica. El nutriente forma enlaces iónicos con moléculas orgánicas de bajo peso molecular, para favorecer su movilidad de un órgano a otro. Se almacena en vacuola para procesos de osmorregulación, e. g. Potasio (K)

2.3.1 Nitrógeno

El nitrógeno constituye, aproximadamente, del 1 al 5% del peso seco de las hojas, y una parte menor, pero aún importante, del peso seco de los demás tejidos vegetales (Bonner y Galston, 1961). De éste un 80 - 85% corresponde a las proteínas y un 10% a los ácidos nucleicos (Domínguez, 1997).

Las plantas superiores, en general, tienen la capacidad de asimilar las diversas formas de nitrógeno (N) inorgánico; principalmente el NH_4^+ y el NO_3^- . Sin embargo, estas dos formas de nitrógeno representan solo una pequeña fracción de la cantidad total del nutriente en el planeta (Alcántar y Trejo-Téllez, 2007).

El nitrógeno se encuentra en la planta cumpliendo importantes funciones bioquímicas y biológicas. El nitrógeno inorgánico (NH_4^+ y NO_3^-) una vez en el interior de las células pasa a constituir las bases nitrogenadas para distintas funciones bioquímicas; ingresa en la formación de aminoácidos y estos a su vez conducen a la formación de proteínas vegetales, además de encontrarse en fitohormonas, ácidos nucleicos y clorofila. Cuando hay suficiente cantidad de nitrógeno se incrementa la densidad de clorofila así la asimilación y síntesis de productos orgánicos, lo cual se observa en el color verde intenso del follaje y en el incremento en volumen y peso, respectivamente (Rodríguez, 1982).

Una deficiencia de nitrógeno, casi invariablemente, se traduce en una palidez gradual (clorosis) de las hojas maduras, sin presentar necrosis. Las plantas responden de varias maneras a suministros altos o bajos de este nutrimento, *e. g.* el exceso de nitrógeno causa con frecuencia una gran proliferación de tallos y hojas pero determina una reducción de frutos en plantas de cultivo (Bidwell, 1979).

2.3.2 Fósforo

Las plantas tienen un contenido en fósforo que varía entre el 0.1% y el 1.2%, estando al menos el 80% incorporado a compuestos orgánicos (Domínguez, 1997).

Las plantas absorben el fósforo (P) en forma de fosfatos inorgánicos, principalmente como aniones H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} ; no obstante, la planta puede también, a través de sus enzimas, desprender los grupos fosfatos de los compuestos orgánicos y posteriormente absorberlos. Este elemento, a diferencia del nitrógeno o el azufre, no es reducido en la planta al ser asimilado por ella, sino que es incorporado a los compuestos orgánicos en su mismo estado de oxidación (Alcántar y Trejo-Téllez, 2007).

La inoculación de raíces de algunos cultivos con micorrizas ha probado ser muy efectiva en la absorción del fósforo, debido a la gran afinidad de las hifas del hongo para la absorción de este elemento.

El fósforo está particularmente involucrado en la transferencia de energía, pues el ATP es necesario para la fotosíntesis y el metabolismo de carbohidratos, siendo esencial para la regulación de vías metabólicas en el citoplasma y el cloroplasto, síntesis de almidón y sacarosa, transporte de triosas-fosfato, translocación de sacarosa, entre otros. El fósforo se encuentra, además, como constituyente de nucleoproteínas, y participa también en la división celular y en la transferencia de características hereditarias por los cromosomas como constituyentes del DNA y RNA (Nélio, 2006; Alcántar y Trejo-Téllez, 2007).

Cómo es de esperar, la deficiencia de fósforo afecta todos los aspectos del metabolismo vegetal y del crecimiento, pues las plantas con deficiencia de dicho nutrimento son achaparradas y de crecimiento lento y pueden manifestar pérdida de hojas maduras, y, en casos extremos, desarrollo de áreas necróticas en diversas partes de la planta (Bidwell, 1979).

La nutrición adecuada de fósforo tiene los siguientes efectos favorables: acelera la maduración, mejora los frutos, mejora el crecimiento del follaje y aumenta la resistencia a enfermedades (Barber, 1962).

2.3.3 Potasio

El potasio (K) se encuentra en la planta en concentraciones que varían del 1 al 6% (Mengel y Kirkby, 1978). Cuando el potasio absorbido se asimila en las células, puede formar compuestos con los ácidos orgánicos e inorgánicos del interior de las mismas, que sirven conjuntamente con el potasio en forma iónica para regular el potencial osmótico celular, regulando, así, el contenido del agua interna. En

algunas plantas jóvenes esta función osmoreguladora puede ser reemplazada por otros cationes como el litio y el sodio, pero siempre de una forma restringida, es decir, antes de los efectos tóxicos que puedan traer colateralmente (Rodríguez, 1982). Se han observado efectos favorables del potasio en la resistencia de las plantas al frío y heladas, al evitar el deterioro de la permeabilidad de las membranas celulares. También tiene un efecto benigno sobre la resistencia a la sequía, como un elemento regulador de la actividad de los estomas, así como para reducir la transpiración, aumentando la eficiencia de agua por la planta (López, 1990).

El potasio se acumula, principalmente, en las partes vegetales donde la división celular y los procesos de crecimiento son más activos. En los casos de deficiencia, el potasio es trasladado de las hojas adultas a los tejidos meristemáticos y puede provocar también la acumulación de aminoácidos solubles, que son alimento de patógenos. La función exacta del potasio en el crecimiento vegetal no se ha definido claramente; sin embargo, se asocia al mantenimiento de la turgencia, la cual es imprescindible para el desarrollo normal de los procesos metabólicos y cuya pérdida puede ser un factor físico que facilite la penetración tanto de hongos como de insectos (Jacob y Uexküll, 1954; Yamada, 2004).

2.4 Factores que afectan la composición de las plantas

Las plantas vivas están constituidas de materia orgánica, agua y minerales; el porcentaje de distribución de estos tres componentes es: agua, de 60 a 70%; materia orgánica, de 20 a 30%; y minerales, de 1-10% (Mengel y Kirkby, 1978; Hale y Orcutt, 1987).

Existen factores que afectan la composición de las plantas, entre ellos: Método de cultivo, nivel del suministro nutrimental a la planta, variedad, tipo de órgano y factores genéticos (Gauch, 1972).

De acuerdo con Mengel y Kirkby (1978), el principal factor que controla el contenido mineral del material de la planta es el potencial de asimilación de nutrimentos, determinado genéticamente para los diferentes nutrimentos. Esto explica el hecho de que el contenido de nitrógeno y potasio en el material verde de las plantas sea 10 veces mayor que el de fósforo y magnesio, que es a su vez de 100 a 1000 veces mayor que el contenido de los micronutrimentos; patrón que ocurre generalmente en todas las especies de plantas superiores. El segundo factor que controla el contenido mineral en la planta es la disponibilidad de nutrimentos en el medio; de manera que la concentración de un nutrimento aumenta en la planta en forma de una curva de saturación, sí aumenta la disponibilidad del nutrimento.

El contenido mineral difiere considerablemente entre los órganos de la planta. Generalmente, las partes vegetativas como hojas, tallos y raíces varían en su composición mineral en comparación con frutos y semillas. El contenido mineral de las plantas depende también de la edad. Plantas y tejidos jóvenes tienen altos contenidos de nitrógeno, potasio y fósforo, mientras que plantas viejas y partes maduras de la planta, presentan altos contenidos de calcio, manganeso, hierro y boro (Mengel y Kirkby, 1978). Benton *et al.* (1991) también consideran la genética, el tipo de tejido, la edad de la planta y la posición de los órganos, como factores que afectan la composición de las plantas, aunque a diferencia de los antes mencionados, incluyen el clima y las propiedades del suelo.

Es importante mencionar que aunque en general la composición nutrimental de las plantas es similar, sus requerimientos nutrimentales son distintos incluso entre variedades de una misma especie. Por ejemplo, Prieto *et al.* (2002) sugieren emplear dosis de 50-125-101, 100-15-79 y 40-109-290 ppm de NPK para plántulas de *Pinus engelmannii*, en tanto que para plántulas de *P. greggii* Román *et al.* (2001) encontraron los rendimientos mayores en la dosis de 84 - 273 ppm de NK; Domínguez *et al.* (2000) sugieren dosis de 150-70-30, 250- 70-30 y 20-10-30 ppm de

NPK para *P. pinea*. Es decir, que las dosis empleadas difieren por especie, aun a pesar de que tienen el mismo estado fenológico.

2.5 Soluciones nutritivas, fertilizantes y fertilización

Una solución nutritiva está definida como el sistema homogéneo donde los nutrimentos necesarios para la planta están solubles, generalmente, en forma iónica y en proporciones adecuadas. Además, de los nutrimentos, la solución nutritiva contiene O₂ y está a la temperatura adecuada para la absorción de los nutrimentos (Nélio, 2006).

En cualquier sistema de cultivo sin suelo, dos factores son preponderantes sobre la productividad: el *ambiente*, determinado por el tipo de protección de las plantas, especialmente la cubierta con plásticos transparentes y mallas de sombreo, y una *solución nutritiva* que puede estar libre o dispersa en un sustrato. Tanto en investigaciones de nutrición de plantas como en la producción de alimentos en sistema hidropónico, la solución nutritiva se caracteriza por ser el objeto y la herramienta de trabajo y estudio. No existe una solución nutritiva ideal única aplicable a todos los cultivos, de tal suerte que su composición varía respecto a una serie de factores: especie, estadio fenológico, época del año (fotoperíodo), factores ambientales (temperatura, humedad relativa); además de eso, aspectos intrínsecos a la solución afectan su composición, como pH, temperatura y presencia de quelatos (Nélio, 2006).

Los fertilizantes son sustancias o mezclas químicas naturales o sintéticas que se utilizan para enriquecer el suelo y complementar las necesidades nutrimentales de las plantas para su crecimiento y desarrollo (Rodríguez, 1987).

Para la aplicación de fertilizantes en las plantas producidas en los viveros forestales, deben considerarse algunos aspectos esenciales como los requerimientos de la planta, el ambiente en el cual se desarrolla (suelo, clima organismos) así como la genética de la propia planta. Las propiedades del suelo y los efectos de la fertilización guardan estrecha relación, así mismo, la correcta dosificación de los fertilizantes ayuda tanto al crecimiento y calidad de la planta, como a su mantenimiento y a la fertilidad del suelo (Castro, 1995). Las formas más comunes de aplicación de fertilizante en vivero son la incorporación de un fertilizante de lenta liberación dentro del sustrato o bien la adición de un fertilizante líquido en el agua de riego.

La clasificación de los fertilizantes puede hacerse de acuerdo a su naturaleza (orgánicos e inorgánicos), por el tipo de nutrimentos que contenga (nitrogenados, fosfatados y potásicos) o bien por el aspecto físico; en este último caso pueden ser sólidos (más utilizados), líquidos o gaseosos y teniendo en cuenta los nutrimentos principales (N, P y K), pueden clasificarse en *simples* (contienen sólo un nutrimento) y *compuestos* (dos o tres nutrimentos) (Castro, 1995, Rodríguez, 1987).

De acuerdo con Jacob y Uexküll (1954), tres son los grupos de fertilizantes nitrogenados a caracterizar y, según la forma en que aportan el nutrimento, se agrupan en *fertilizantes nítricos* (nitrato de sodio (Na NO_3), nitrato de calcio ($\text{Ca (NO}_3)_2$), nitrato de potasio (KNO_3)), *fertilizantes amoniacales* (sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$), cloruro de amonio, amonio anhídrido, soluciones amoniacales) y *fertilizantes amidos* (cianamida de calcio, urea).

Los fertilizantes nítricos se absorben particularmente rápido, en casos de clara deficiencia de nitrógeno, debido a la alta movilidad de los iones nitrato en el suelo, y su rápida absorción por la planta. El nitrato de sodio (NaNO_3) es un producto natural que contiene un 16% de nitrógeno en forma nítrica, fácilmente soluble y asimilable, y es el fertilizante nítrico de mayor uso.

Los fertilizantes amoniacales no actúan con tanta rapidez como los nítricos, debido a que el ión amonio (NH_4) es retenido por el suelo; sin embargo, en suelos con alta actividad microbiana el amonio sufre una transformación violenta a nitrato. El sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$) es el más importante de los fertilizantes amoniacales debido a su bajo costo y su acción benéfica.

En los fertilizantes amidos el nitrógeno no resulta ser aprovechable de forma directa por la planta, pues su absorción tiene lugar después de haber sufrido un cambio químico en el suelo, hasta llegar a su transformación en iones NO_3 ; sin embargo, su efecto es más lento y perdurable comparado con los fertilizantes nítricos y amoniacales aunque suele resultar más costoso (e. g. cianamida de calcio o cal nitro).

Los fertilizantes fosfóricos son productos químicos que contienen fósforo asimilable en forma de anión fosfato, o lo producen por transformación, y se dividen, según la forma de combinación y grado de aprovechamiento que presente su ácido fosfórico, en tres grupos: *fertilizantes fosfóricos solubles en agua* (superfosfato (16-20% de P_2O_5), superfosfato doble (43 - 49% de P_2O_5), fosfato monoamónico (11% de N, 48% de P_2O_5), fosfato biamónico (21% N, 53% de P_2O_5)), *fertilizantes fosfóricos solubles en ácido cítrico o citrato de amonio* (fosfato Rhenania (27-28% de P_2O_5), fosfato bicálcico (39% de P_2O_5)), y *fosfatos con ácido fosfórico insoluble en solventes* (fosfatos roca) (Jacob y Uexküll, 1954).

Los fertilizantes fosfóricos solubles en agua tienen una gran ventaja debido a su rápida disponibilidad para la planta. Se fertiliza normalmente cuando las plantas están jóvenes y aún su sistema radical no está completamente desarrollado, por lo que el fertilizante se lixivia o es absorbido por la maleza. Esto, desde luego, reduce la eficiencia de la fertilización. En suelos ácidos se da una fijación irreversible del fósforo, por lo que los fertilizantes fosfóricos solubles en ácido cítrico o citrato de amonio son particularmente propicios para la fertilización de estos suelos. El fósforo

en estos fertilizantes presenta una fijación menor que en los fertilizantes fosfóricos solubles en agua.

Los fertilizantes, pertenecientes al grupo de los fosfatos con ácido fosfórico insoluble en solventes, constituyen la materia prima para la elaboración de los fertilizantes fosfóricos de las dos primeras categorías antes mencionadas. Su contenido de ácido fosfórico fluctúa ampliamente por lo que es difícil proporcionar especificaciones exactas acerca de su valor fosfórico.

Los fertilizantes potásicos se caracterizan sin excepción alguna por presentar el nutrimento K en su forma soluble en agua, el cuál es de fácil absorción por la planta. El potasio se aplica a los cultivos, en los fertilizantes : cloruro de potasio (KCl), sulfato de potasio (K_2SO_4), nitrato de potasio (KNO_3), sulfato de potasio y magnesio (K_2SO_4 Mg_2SO_4), y metafosfato de potasio (KPO_3). El contenido de potasio en los fertilizantes se expresa convencionalmente en la forma de óxido (K_2O). El fertilizante potásico más usado y barato es el cloruro de potasio, que es conocido comercialmente como muriato de potasio, contiene cerca de 50% de K. El sulfato de potasio contiene 41% de K y es más caro, debido a su alto costo de producción; en regiones áridas, así como en cultivos en los que habrá de obtenerse determinadas características de calidad (e.g. mejor combustibilidad del tabaco y mayor contenido de aceite y almidón en algunos cultivos), el sulfato de potasio tiene preferencia sobre el cloruro. El sulfato de potasio y magnesio contiene de 26-30% de K y 9-12% de Mg (MgO) y puede considerarse como análogo al sulfato de potasio, resultando, además, especialmente apropiado para la fertilización de suelos ligeros, deficientes en magnesio. El nitrato de potasio (37% K), y el metafosfato de potasio (33% K), son particularmente preferidos en la fertirrigación (Jacob y Uexküll, 1954; Mengel y Kirkby, 1978).

La fertilización es una práctica cultural que mejora la calidad y productividad forestal (Fritz-Helmut, 1991) y es, después del riego, la práctica que más influye en el crecimiento y calidad de las plantas al incidir en los procesos fisiológicos, por ello

un programa de fertilización, deberá ser diseñado con la intención de mantener soluciones específicas y balanceadas de los nutrimentos en el medio de crecimiento, que incluya cambios nutrimentales acordes al desarrollo y ciclo de cultivo (Landis *et al.*, 1989).

Una fórmula de fertilización se representa de diversas formas *e. g.* N-P-K; 20-20-20, N-P₂O₅-K₂O, y expresada en distintas unidades (mg L⁻¹, ppm, meq), por lo que antes de preparar una solución nutritiva debe considerarse esto, para no errar los cálculos y con ello la preparación de la solución.

La expresión *balance nutrimental* se refiere tanto al intervalo permisible como a la influencia de las modificaciones de los cambios en la concentración de cada elemento presente en la solución. La importancia que tienen el balance nutrimental y la concentración absoluta de los nutrimentos en el crecimiento de las plantas no son siempre fáciles de distinguir (Hewitt, 1966). El balance entre los diferentes nutrimentos minerales es importante, desde la óptica biológica por dos razones principales; la primera es que el exceso de ciertos iones en la solución del medio de crecimiento afecta la absorción y utilización de otros nutrimentos, y segunda, que el balance iónico afecta el pH de la solución del medio de crecimiento. Una de las teorías de balance nutricional más ampliamente usada en el cultivo de especies forestales, está basada en el trabajo de Ingestad (1979), quien establece las proporciones de todos los otros nutrimentos, para diferentes especies de coníferas y de latifoliadas, en relación al nitrógeno; este autor recomienda concentraciones de N de 20 a 50 ppm para *Pinus sylvestris*, y de 60 a 100 ppm para *Picea abies*, siempre y cuando el resto de los nutrimentos se aporten en proporciones adecuadas (Landis *et al.*, 1989).

Es importante mencionar que, la forma que se propone y utiliza en el presente trabajo para expresar el balance nutrimental, se obtiene al dividir los requerimientos de nutrimentos (expresados en g, meq, mg, µg, etc.) por la planta entre aquel de menor cantidad (arbitrariamente el fósforo) de manera que sí tenemos un

requerimiento nutrimental vegetal 420-60-240 (N-P-K) el balance nutrimental se obtendría al dividir cada valor entre 60, es decir, que la formula antes citada tiene un balance 7:1:4 (N:P:K).

Para calcular la cantidad de fertilizante a utilizar es necesario, primero, conocer el nivel de productividad de nuestro suelo, así como, el potencial productivo de la especie cultivada. Además, será necesario conocer los requerimientos nutrimentales de la especie de interés; no solo los requerimientos totales de cada nutrimento, sino también, la demanda de los mismos durante las distintas etapas de desarrollo de la especie, para lograr un buen rendimiento y calidad del producto a cosechar.

Al respecto, cabe señalar que comúnmente se asumen los óptimos obtenidos en experimentación de campo. En los años 60's los trabajos de fertilización incluían dosis desde testigo (sin nutrimentos) hasta dosis crecientes altas. Los rendimientos que se obtuvieron presentaban un máximo, y a dosis mayores no aumentaba el rendimiento (consumo de lujo) obteniendo una curva, cuyo punto de inflexión era considerado como óptimo; este punto cambia en función del tipo de suelo, debido a la concentración y disponibilidad nutrimental. Por último, es necesario saber calcular la cantidad de fertilizantes a utilizar en base a su concentración nutrimental.

Es importante mencionar que un nivel óptimo de abastecimiento determinado en hidroponía tendrá mayor amplitud de uso, ya que solo se restringe por las isoyectas térmicas y no por las edáficas; de ahí la importancia del uso de la hidroponía en este tipo de experimentos.

Una cantidad importante de trabajos de fertilización en especies forestales, generalmente, se llevan a cabo en plantaciones jóvenes (>10 años), realizando fertilizaciones y muestreos mensuales o anuales, lo cual, difícilmente puede servir de referencia para un trabajo en hidroponía a nivel de vivero.

Existen pocos trabajos en materia de nutrición vegetal aplicada a especies forestales, en la etapa de vivero (e. g. Calderón-Paniagua *et al.*, 2006; Harvey y Van Den Driessche, 1999; Landis *et al.*, 1989; López, 1990; Prieto *et al.*, 2002; Román *et al.*, 2001, y Xinjian Xu & Timmer, 1998); lo anterior, debido quizá a la falta de difusión y publicación de dichos trabajos (e. g. Cuevas *et al.*, 1992; Velázquez-Mendoza, 2007). La mayoría de los trabajos publicados en materia de nutrición en especies forestales basan el diseño de sus dosis de fertilización en aquellas que se emplean en viveros (e. g. Cuevas *et al.*, 1992) y cuyo diseño, generalmente, parte de trabajos de ensayo y error, y en general, no mencionan las bases teóricas o experimentales sobre las cuales diseñaron sus soluciones; dichos trabajos, ordinariamente, emplean fertilizantes comerciales como Peters Professional®, Osmocote®, Multicote®, Micromax®, o fórmulas prediseñadas como Triple 14 o Triple 17, y solo modifican las cantidades de uno u otro fertilizante y evalúan el efecto de estos en el crecimiento, sobrevivencia o productividad de las especies, pero dejan de lado las relaciones entre nutrimentos (e. g. K:N) o los posibles efectos de un abastecimiento de consumo de lujo o toxicidad en el rendimiento de la especie.

Las dosis de fertilización presentadas en Landis *et al.* (1989), y obtenidas del trabajo de varios autores, han sido la base de varios experimentos de fertilización en especies forestales, así como los tres niveles de fertilización que se ajustan según la etapa de desarrollo de éstas:

1. *Establecimiento* (emergencia y crecimiento de la planta hasta la fase cotiledonal)
2. *Crecimiento rápido* (fase logarítmica del crecimiento, principalmente en altura)
3. *Endurecimiento* (inicia con el desarrollo de yema apical, donde el crecimiento en altura cesa, en tanto que el crecimiento en diámetro solo disminuye su tasa de crecimiento)

2.6 Crecimiento de árboles forestales

Las especies forestales presentan dos tipos de crecimiento: primario y secundario; el crecimiento primario tiene lugar en los meristemos apicales; en tanto que, el crecimiento secundario tiene su origen en el cambium. Por lo general, el meristemo apical es el responsable del crecimiento en longitud, mientras que el cambium es el determinante del crecimiento en espesor, debido a que la división de sus células se da típicamente en planos paralelos al eje longitudinal del tallo y de la raíz (Bonner y Galstone, 1961).

En la mayoría de las especies forestales la tasa de crecimiento en altura es mayor en las primeras etapas de desarrollo, mientras que los incrementos en diámetro son relativamente mayores en etapas posteriores. El grado de desarrollo está determinado por las especies asociadas, la densidad poblacional del bosque en la localidad y la calidad del sitio (tipo de suelo, clima, precipitación, impacto de las actividades humanas y demás factores propios de sitio que pudieran afectar el desarrollo de las especies). La tasa de crecimiento en altura en las diferentes especies varía durante una estación de crecimiento; especies tales como el encino blanco tienen la mayor parte de su crecimiento anual en altura, normalmente a mediados de junio, después de esta época presenta sólo pequeños incrementos. Esta característica parece mantenerse en las especies que solo tienen una activación anual de crecimiento en altura. Especies como los pinos, completan varios períodos de crecimiento en altura durante la estación de crecimiento. El crecimiento radial anual comienza en la primera parte de la primavera y no termina hasta la última parte del verano o primera del otoño (Hocker, 1979).

El carácter perennifolio ofrece una ventaja para las especies que tienen esta característica, debido a que al no perder hojas, la capacidad fotosintética se mantiene y por ende la capacidad de continuar con los procesos de absorción y utilización de nutrimentos, para continuar su desarrollo bajo condiciones deseables para el crecimiento en cualquier época del año. Sin embargo, el ritmo endógeno

restringe el crecimiento de las coníferas en la última parte del otoño y durante la primera parte del invierno. Las especies caducifolias presentan una fotosíntesis limitada en el período en que brotan nuevas hojas. Las especies arbóreas que crecen en las regiones templadas tienen períodos anuales de reposo vegetativo, que se presenta durante la estación invernal, cuando las temperaturas son bajas y el fotoperíodo corto. El reposo vegetativo es un mecanismo adaptativo que han desarrollado los árboles de las regiones templadas para poder sobrevivir a la estación invernal (Hocker, 1979).

Aunque el crecimiento está definido como un incremento irreversible en tamaño, forma, peso o volumen, en ocasiones puede aparecer lo que se conoce como *crecimiento negativo*, el cual se asocia con cambios en la transpiración producida en las hojas, ya que durante el día, a medida que se incrementa el grado de transpiración, se incrementa la tensión en las células de la hoja y del tallo de manera que la fuerza generada es suficiente para provocar una contracción de las células, que se traduce en una reducción del diámetro del tronco, y menos apreciable quizá en la altura de la planta (Hocker, 1979).

2.7 Planta de calidad

Para garantizar una adecuada supervivencia al momento de establecer una plantación (a reserva de posibles disturbios posteriores en el sitio) se precisa contar con planta de calidad, la cual de acuerdo con Rodríguez (2008), es aquella que posee ciertas propiedades morfológicas y fisiológicas que le permiten establecerse, crecer y desarrollarse vigorosamente en el sitio de plantación (aclimatarse). Los atributos que denotan calidad de planta son de muy diversa índole, involucrando una gama en: facilidad de obtención, tiempo, costo, amplitud de uso y confiabilidad. Sin embargo, debe señalarse que aunque algunos atributos son útiles en una diversidad de situaciones (e. g. altura y diámetro), otros son más específicos (e. g. crecimiento potencial de la raíz). Lo más recomendable es considerar cada atributo

o grupo de atributos para una especie, procedencia, tecnología de producción en el vivero (fertilización, podas, etc.) y para ciertas condiciones ambientales (luz, humedad, sitio, etc.), e incluso manejo de la plantación (Rodríguez, 2008).

Los atributos para evaluar la calidad de las plantas se dividen básicamente en morfológicos y fisiológicos. Entre los atributos morfológicos se encuentran los siguientes: forma de la parte aérea, altura, diámetro, forma de la raíz, nivel de micorrización, biomasa y yema apical; algunos de estos atributos se emplean en la determinación de índices morfológicos, que no son sino relaciones numéricas entre indicadores individuales que también brindan información sobre la condición de la planta, *e. g.* relación parte aérea vs. raíz, índice de esbeltez, índice de Dickson, por mencionar algunos. Los atributos fisiológicos a considerar en una planta de calidad incluyen: concentración de carbohidratos y su distribución en los distintos órganos de la planta (tallo, ramas, hojas, raíz principal y raíces laterales y finas), concentración de nutrimentos en el follaje, tensión hídrica, estado de desarrollo de las yemas y nivel de fitohormonas entre otros (Rodríguez, 2008).

2.8 El diseño de tratamientos San Cristóbal

Dentro de los diseños de tratamientos empleados en la investigación, el uso de diseños factoriales es más conveniente, debido a que permite determinar la existencia y significancia de interacciones entre los factores de variación, que dan mayor información que los efectos simples de los mismos.

Los factoriales completos tienen el inconveniente de que al aumentar los factores de variación y los niveles de cada factor, el número de tratamientos aumenta considerablemente, volviendo a veces costosa e impráctica la realización de un experimento; por ello se idearon los factoriales incompletos, en los que solo se incluye una parte, estratégicamente seleccionada, del factorial completo, a cuyo conjunto de tratamientos se le conoce como matriz de tratamientos (Muñoz, 1974).

El diseño de tratamientos San Cristóbal es un diseño Compuesto Central modificado, que fue desarrollado por el Dr. Basilio Rojas (1962), con fines de lograr una gran reducción de los tratamientos de un diseño factorial, incluir el tratamiento testigo, de fundamental importancia en los ensayos de fertilización que se realizan a nivel regional, para la generación de recomendaciones de fertilizantes para cultivos (Rojas, 1980, citado en Volke *et al.*, 2005).

Para un experimento con tres factores con cuatro niveles igualmente espaciados, a decir 1, 2, 3 y 4, que constituyen un factorial 4^3 , el diseño San Cristóbal reduce los 64 tratamientos a 12, a saber: los ocho tratamientos del factorial 2^3 que forman las combinaciones de los niveles 1 y 3 de los tres factores, y que constituyen un cubo; un tratamiento en el centro del cubo, formado por la combinación del nivel 2 de los tres factores; y los tres tratamientos formados por las combinaciones del nivel 4 de cada factor y el nivel 2 de los restantes (Cuadro 2) (Rojas, 1981, y Martínez, 1996).

Cuadro 2. Tratamientos de la matriz San Cristóbal para tres factores

Tratamiento	Factores y sus niveles		
	N	P	K
1	1	1	1
2	3	1	1
3	1	3	1
4	1	1	3
5	3	3	1
6	3	1	3
7	1	3	3
8	3	3	3
9	2	2	2
10	4	2	2
11	2	4	2
12	2	2	4

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Estudiar la relación de fertilización N:P:K y su influencia en el crecimiento de diámetro, altura y la acumulación de biomasa de *Pinus cembroides*, *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitanica* y *Cupressus sempervirens* durante la fase de vivero

3.2 Objetivo Específico

Determinar el balance óptimo de suministro de N:P:K para las especies *Pinus cembroides*, *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitanica* y *Cupressus sempervirens*, con base en el crecimiento en diámetro y altura, así como en la acumulación de biomasa

4. HIPÓTESIS

Los balances de suministro N:P:K afectan tanto el crecimiento en diámetro y altura, como la acumulación de biomasa en cada especie forestal estudiada

El balance de suministro óptimo N:P:K es distinto para cada especie forestal estudiada

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estableció un experimento en cultivo hidropónico, en el Campo Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (19 °21' N, 98°53' W y 2250 m.s.n.m.) en el período comprendido de Mayo a Agosto de 2009.

5.1 Material biológico

Se evaluaron árboles de tres años de edad de las especies siguientes: *Pinus cembroides* Zucc., *Cupressus lusitanica* Mill., *Cupressus sempervirens* L. y *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, las cuales fueron donadas por la Comisión del Lago de Texcoco.

5.2 Sustrato

Los árboles se trasplantaron en bolsas de polietileno negro de 30 L de capacidad, se empleó como sustrato una mezcla homogénea de corteza de pino de dos granulometrías: fina (2-5 mm diámetro) y gruesa (5-20 mm diámetro) (30:70). La elección de dicho sustrato, en lugar de usar suelo, obedeció a su nulo aporte nutricional (inerte), bajo costo y alta retención de humedad.

5.3 Riego

El volumen de riego a aplicar se determinó con base en la curva de retención de humedad del sustrato (corteza de pino), el volumen del agua de riego quedó finalmente en un total de 2 L solución nutritiva día⁻¹ por maceta. A lo largo del

experimento se mantuvo un mínimo del 80 % de la humedad aprovechable, lo cual se obtuvo con la aplicación diaria de dos riegos de superficie a las 9 y 13 h.

5.4 Diseño de las soluciones nutritivas

Para el diseño de las soluciones nutritivas fue necesario lo siguiente:

- a) Se determinaron en experimentos previos (Velázquez-Mendoza, 2007 y Flores, 2008) las curvas de abastecimiento para N, P y K, para lo cual se partió de un nivel 0 (cero) hasta un nivel de consumo de lujo
- b) Se obtuvieron las dosis óptimas de cada curva de abastecimiento, lo que permitió determinar los intervalos de dosis siguientes: nitrógeno (N) de 4 – 12 meq L⁻¹, fósforo (P) de 2.5 – 7.5 meq L⁻¹, y potasio (K) de 2.0 – 6.0 meq L⁻¹
- c) Se diseñaron las soluciones nutritivas – con los intervalos mencionados en b - considerando cuatro niveles igualmente espaciados de los nutrimentos N, P y K, de acuerdo con la metodología de la Matriz San Cristóbal (Cuadro 3) (Rojas, 1962; Rojas, 1981, y Martínez, 1996)
- d) La metodología de la matriz San Cristóbal indica que se utilice un diseño experimental y número de repeticiones pertinente, que en este caso correspondió a un diseño experimental completamente al azar con dos repeticiones

Cuadro 3. Tratamientos NPK determinados con base a las curvas de abastecimiento y la matriz San Cristóbal

Tratamiento	N	P (meq L⁻¹)	K
1	4.0	2.5	2.0
2	9.3	2.5	2.0
3	4.0	5.8	2.0
4	4.0	2.5	4.7
5	9.3	5.8	2.0
6	9.3	2.5	4.7
7	4.0	5.8	4.7
8	9.3	5.8	4.7
9	6.7	4.2	3.3
10	12.0	4.2	3.3
11	6.7	7.5	3.3
12	6.7	4.2	6.0

A cada tratamiento (solución nutritiva) se le adicionaron los micronutrientes con base en la fórmula de Hewitt y Smith (1975), en tanto que el calcio (Ca) y el magnesio (Mg) se agregaron en cantidades de 3 y 1.5 meq L⁻¹, respectivamente (Flores, 2008). Todas las soluciones nutritivas se ajustaron a un pH 5.5 con H₂SO₄ 0.1 N o KOH 0.1 N, según los requerimientos.

La razón de obtener un intervalo de dosis óptimo en lugar de un solo valor, obedece al hecho de que al conjuntar los óptimos de cada nutriente (obtenidos en las curvas de abastecimiento) no se obtiene un crecimiento óptimo de la planta, sino que es necesario diseñar nuevas dosis que incluyan los intervalos óptimos antes de sugerir una verdadera dosis NPK óptima (Mengel y Kirkby, 1978).

5.5 Variables de respuesta

De acuerdo a un experimento previo (Velázquez-Mendoza, 2007 (material inédito); Flores, 2008) en el cual se observó que la tasa de crecimiento mayor se presentó en el período comprendido entre finales de primavera y principios de verano, las evaluaciones de crecimiento se realizaron durante cinco semanas en el período respectivo. Se registraron datos semanales de incrementos en diámetro basal y altura total. La altura de la planta se registró a partir del nivel del sustrato y hasta la base de la yema apical, para ello se usó un flexómetro con aproximación a 0.1 cm. En tanto que el diámetro se midió a nivel del cuello de la raíz con un vernier digital, con aproximación a 0.01 mm. Debido a que el tiempo entre muestreos fue corto se optó por marcar el tallo tanto a nivel de la base del tronco como a nivel de la punta del mismo (crecimiento nuevo). En el primer caso fue para disminuir errores en la toma de datos, debido a la morfología no cilíndrica del tronco, en tanto que, en el segundo caso fue para evitar sesgos en las mediciones, debido a que en algunos casos, el espesor del follaje dificultaba la precisión en la toma de datos.

La acumulación de biomasa se cuantificó solo al momento de la cosecha, con la finalidad de determinar efectos de los tratamientos en dicha variable; por lo cual al término del experimento los árboles fueron cortados a nivel del cuello de la raíz, y seccionados a modo de obtener los órganos siguientes: Tallo Nuevo, Tallo Viejo, Rama Vieja, Rama y Hoja Nueva, y finalmente Hoja Vieja. La forma de separar el crecimiento nuevo del viejo se apoyó en un trabajo realizado por Campos (2004), en cuyo estudio menciona la marcada diferencia entre dichos crecimientos, con base en características como color y textura, características que fue posible apreciar en las especies aquí evaluadas. Una vez que se separaron los órganos, estos fueron colocados en bolsas de papel, previamente etiquetadas, y se metieron en una estufa con convección de aire hasta alcanzar peso constante ($70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 72 h^{-1}); transcurrido este tiempo se registró el peso seco con una balanza digital con aproximación a 0.01 g.

Los análisis de contenido de nitrógeno total en hoja nueva y hoja vieja se realizaron en aquellos tratamientos que presentaron una acumulación mayor de materia seca, únicamente al término del experimento, con base en la técnica semimicro-Kjeldahl (AOAC, 1980). El análisis se realizó sólo en este órgano, por considerarse el de mayor acumulación nutrimental. La razón de analizar el contenido de nitrógeno, solo en aquellos tratamientos que presentaron mayor acumulación de materia seca, fue para que éstos contenidos sirvieran de referencia en la determinación del balance óptimo.

5.6 Modelos y análisis estadísticos

Una vez obtenidos los datos, se sistematizaron y analizaron usando el paquete estadístico SAS, V6 (1985).

Los datos de altura y diámetro se analizaron con la Técnica de Análisis de Crecimiento (Fisher 1921), para ello se convirtieron a logaritmo natural (Ln) y posteriormente se hizo una regresión lineal. Con ello se obtuvo la Tasa de Crecimiento Relativo Instantáneo (R) con el modelo que abajo se cita:

$$\ln a = b + R (DDIE)$$

Donde:

a = Variable evaluada

b = Intercepto

R = Tasa de Crecimiento Relativo Instantáneo o Coeficiente de Regresión

$$R = \left(\frac{1}{a} \right) \times \left(\frac{da}{dt} \right)$$

Donde:

R = Tasa de Crecimiento Relativo Instantáneo

t = Tiempo

a = Variable evaluada

DDIE = Días después de iniciado el experimento

El modelo estadístico que se empleó para analizar el efecto de los tratamientos sobre el crecimiento, en la cosecha, de las especies en estudio, correspondió al diseño experimental completamente al azar, que es de la forma siguiente:

$$Y_i = \mu + T_i + \delta_i$$

Donde

Y_i = Observación tomada del i-ésimo tratamiento

μ = Efecto de la media general

T_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

δ_i = Efecto del error aleatorio

El modelo que se ajustó, mediante regresión lineal simple, de acuerdo con la técnica de análisis de la Matriz San Cristóbal, fue el que a continuación se cita:

$$Y = N + P + K + N^2 + P^2 + K^2 + NP + NK + PK$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Altura y diámetro

Los resultados de análisis de crecimiento para las variables altura y diámetro de las especies evaluadas se presentan a continuación, mostrándose en el Anexo 1 los valores correspondientes a los intervalos de confianza para la tasas de crecimiento relativo instantáneo de altura (R_A) y diámetro (R_D), con un valor de t-Student de 0.05.

En la Figura 2 se presenta la R_A y R_D de *Pinus cembroides* en respuesta a los tratamientos NPK aplicados; en ella se observa que los tratamientos 2 y 12 presentaron valores altos de R_A con valores promedio de R_D , en relación al resto de los tratamientos. En el tratamiento 2, el incremento en R_A pudo deberse a que este tratamiento presenta la concentración mayor de N, y los niveles menores de P y K, por lo que un alto nivel de N favoreció un incremento de crecimiento vegetativo; lo cual pudo traducirse en crecimiento en altura, en tanto que, en el crecimiento en diámetro no se observó dicho efecto. Lo anterior, debido probablemente a que dicho crecimiento se da al efectuarse los procesos de división y alargamiento celular, para lo cual son necesarios tanto el P como el K. En el tratamiento 12, las dosis de N y P son intermedias, en tanto que la de K es alta; lo cual explicaría que la diferencia en los valores de R_A y R_D no sean tan extremos como en el caso anterior; es decir, que al existir mayor abastecimiento de P y K se favorecen los procesos de división y alargamiento celular, y al modificarse la relación K:N, el crecimiento en altura no se dispara puesto que el K ayuda a que el N sea empleado en otras funciones y no solo se destine a crecimiento vegetativo. Sin embargo, la relación K:N en este último tratamiento es de 2.5, lo cual excede por mucho los valores de dicha relación en las dosis de fertilización aplicadas en otros experimentos de coníferas (e. g. Landis *et al.*, 1989; López, 1990; Xinjian Xu & Timmer, 1998; Harvey & Van Den Driessche 1999; Román *et al.*, 2001; Prieto *et al.*, 2002, y Calderón-Paniagua *et al.*, 2006), cuyos valores recalculados de K:N se hallan hasta 1.5.

Estos resultados ponen de manifiesto que las relaciones interiónicas (N:P:K) median la fisiología de la planta. Además, se puede inferir preliminarmente que la concentración de un nutrimento interviene sobre la fisiología y bioquímica de la planta, pero esta participación depende también del balance que guarda con respecto a otros nutrimentos, y puede, por tanto, verse favorecido o disminuido su efecto.

Por lo anterior convendría considerar la respuesta en crecimiento de *P. cembroides* en el tratamiento nueve, cuyo valor R_D fue igual al del tratamiento 12, y, aunque el valor de R_A no es el mayor, sí elimináramos los tratamientos 6 y 12, veríamos que el R_A en el tratamiento nueve sería mayor con respecto a los otros tratamientos; por lo que, de manera tentativa podría decirse, que el balance nutrimental que se adecua a las necesidades de *Pinus cembroides* se encuentra en 93 N, 26 P y 130 K (ppm), con una relación K:N de 1.4; al menos, en lo que respecta al crecimiento de altura y diámetro.

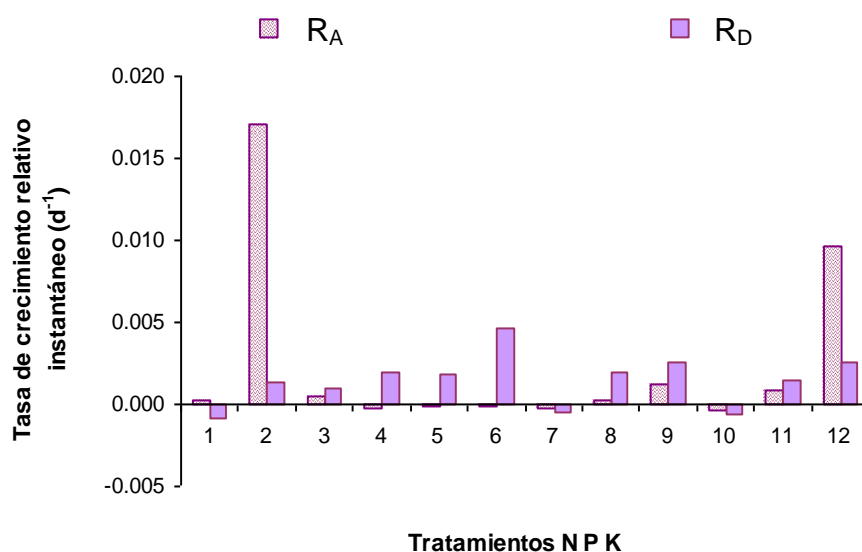


Figura 2. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de *Pinus cembroides* en respuesta a distintos tratamientos NPK

Es notorio que el crecimiento de *P. cembroides* fue preferencialmente en diámetro más que en altura. Este efecto no se presentó en el tratamiento 2 y 12; e incluso el crecimiento en altura excedió sustantivamente al crecimiento en diámetro. El balance N:P:K en los tratamientos 2 y 12 fue 8.4:1:5 y 3.6:1:9.1, respectivamente; en tanto que dicho balance en el tratamiento 9 fue de 3.6:1:5, es decir, que el tratamiento 9 tuvo las mismas dosis de N y P que el tratamiento 12 y una dosis media (3.3 meq L^{-1}) de K, lo cual llevó a una relación intermedia K:N = 1.4. Esta respuesta resalta el hecho que la concentración nutrimental es importante y al parecer el balance nutrimental es aún más.

En la Figura 3 se muestran los R_A y R_D de *Cupressus lusitanica*, se observa que en todos los tratamientos hubo crecimiento en altura, más o menos similar, en tanto que, en diámetro el crecimiento fue muy distinto. Los tratamientos 6 y 10 fueron los que presentaron los incrementos mayores en R_D , en tanto que, sus correspondientes valores de R_A se mantuvieron dentro de los valores intermedios de dicha variable. Esto es algo realmente deseable pues debido a la morfología propia de la especie, existe un cierto *desbalance* en la proporción altura:diámetro (mayor altura con relación al diámetro) que sí bien, nunca va a igualar a la que se presenta en especies del género *Pinus*, si puede mejorar la calidad de planta de la especie en cuestión.

Flores (2008) encontró que *Cupressus lusitanica* tolera dosis con relaciones K:N hasta de 1.25 sin presentar una merma considerable en su crecimiento; aquí se encontró que las relaciones K:N están entre 1.4 y 0.8 para los tratamiento 6 y 10, respectivamente; sin embargo, es en éste último tratamiento en el que parece existir una mejor proporción en cuanto a los incrementos en altura y diámetro, lo cual no ocurre en el tratamiento 6, debido probablemente a que el K pudiera estar ejerciendo un efecto antagónico sobre el N (Mengel y Kirkby, 1978), lo cual estaría disminuyendo el crecimiento vegetativo. Es notorio que las tasas de crecimiento relativo instantáneo más sobresalientes en esta especie fueron en diámetro, caso

contrario a *Pinus cembroides*, donde la planta le dio prioridad al crecimiento en altura.

Los tratamientos 5 y 7 mostraron R 's similares y es conveniente resaltar que los niveles de fósforo en ambos tratamientos corresponden al nivel 3 y que los niveles de N y K son recíprocos. Es decir, en el tratamiento 5 se tiene el nivel 3 y 1 de N y K, respectivamente, y en el tratamiento 7 se tiene el nivel 1 y 3 de N y K, respectivamente. Esto pudiera interpretarse, que cuando la dosis de N es alta se esperaría un crecimiento vegetativo exuberante; sin embargo, la dosis baja de potasio parece que restringe los procesos de transporte de carbohidratos y del estado hídrico de la planta y por tanto no se traduce en un crecimiento exuberante y suculento, típico del exceso de N. Cuando decrece la dosis de N y la dosis de K es alta, al parecer, se incrementa la eficiencia fisiológica de la planta y el efecto benéfico de crecimiento con el N disponible se maximiza. Es muy probable que la relación K:N apropiada para esta especie sea la que se presentó en el tratamiento 6 que fue 1.4. Merece indicarse que el requerimiento nutricional por P, de la especie es relativamente bajo y está entre los niveles 1 y 2.

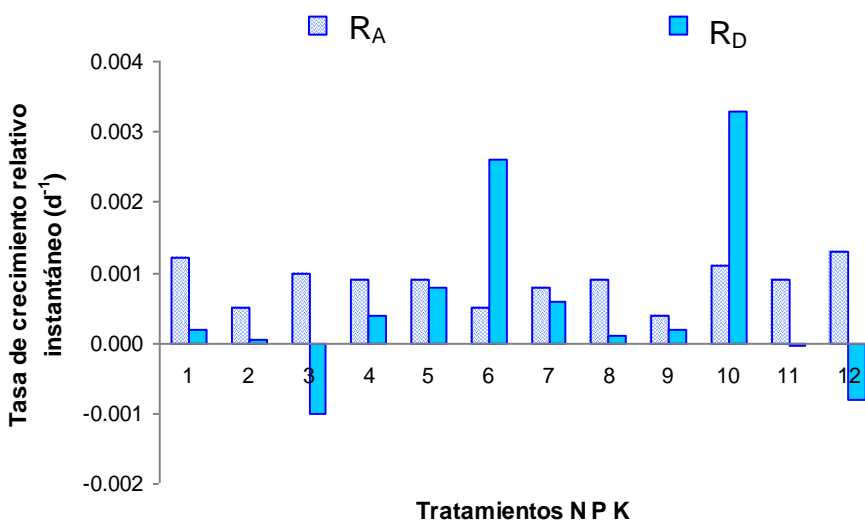


Figura 3. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de *Cupressus lusitanica* en respuesta a distintos tratamientos NPK

Los datos correspondientes a las R_A y R_D de *Cupressus sempervirens*, se muestran en la Figura 4, donde se observa mayor similitud en cuanto a los valores de R_A y R_D , en comparación con lo encontrado en *Pinus cembroides* y *C. lusitanica*, donde los crecimientos en ambas variables mostraban cierta variabilidad. En este caso, nuevamente los valores mayores de R_D se presentan en el tratamiento 6, el cual tiene una relación K:N de 1.4; al respecto cabe señalar que dicha relación nutricional en el género *Pinus* va desde 0.1 hasta 1.0, según algunos trabajos realizados en especies forestales y comentados en Flores (2008); sin embargo, considerando lo mencionado en el caso de *C. lusitanica*, es posible que dicho tratamiento no sea el mejor, por lo que convendría considerar al tratamiento 10 como el más adecuado, cuyos incrementos en altura y diámetro son similares y relativamente superiores a los presentados en el resto de los tratamientos.

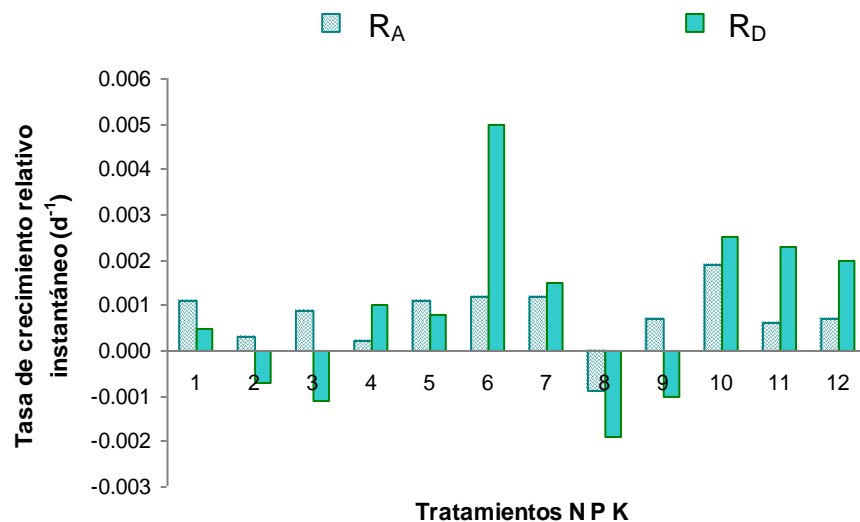


Figura 4. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de *Cupressus sempervirens* en respuesta a distintos tratamientos NPK

En el caso de las R_A y R_D de *Fraxinus uhdei* (Figura 5), nuevamente se observa una gran diferencia en los valores de ambas variables respecto a los distintos tratamiento aplicados; en este caso, aunque los tratamientos 1 y 6 parecieran ser los mejores, la relación K:N es de 1.4 en ambos casos y dichos tratamientos presentan la dosis menor de P, lo que pudiera ser un factor limitante para el adecuado desarrollo de la planta. A pesar de que el tratamiento 5 pudiera no parecer adecuado, la dosis de K (2 meq L⁻¹) coincide con la dosis óptima de la curva de abastecimiento de K para el crecimiento en altura y diámetro presentada por Flores (2008), la cual contenía 8 meq L⁻¹ de N; y el que el incremento en altura no sea muy marcado puede obedecer a que, durante el período de muestreo, la mayoría de los árboles de esta especie, aún no rompían la yema apical.

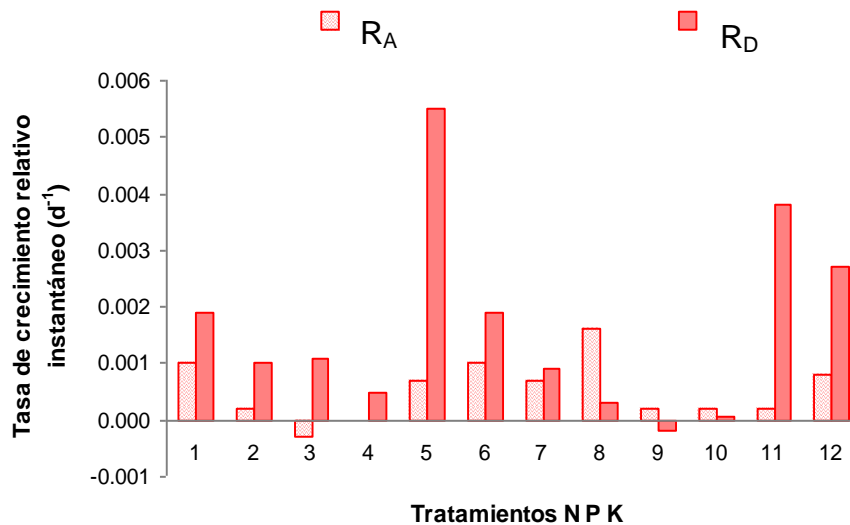


Figura 5. Tasa de crecimiento relativo instantáneo en altura y diámetro de *Fraxinus uhdei* en respuesta a distintos tratamientos NPK

A los tratamientos considerados tentativamente como los más adecuados para cada especie, en lo que se refiere a altura y diámetro, y cuyos datos ya se habían transformado a logaritmos naturales, se procedió a graficarlos (Figura 6). En la gráfica se observa que ambas variables presentaron incrementos en cuanto al crecimiento en altura y diámetro, con una tendencia lineal, siendo esto último un requisito de la técnica de análisis de crecimiento que se empleó. Además, es notorio que ambas variables, altura y diámetro, presentaron la misma tendencia, es decir, que incrementaron en forma lineal ascendente (pendiente [TCRI] mayor de cero).

La respuesta obtenida fue la esperada, debido a que los árboles se encontraban en la fase de crecimiento rápido, período en el cual se presenta la tasa de crecimiento mayor. Esto pudo deberse a que las condiciones ambientales (*e. g.* intensidad luminosa, temperatura, humedad relativa) estimularon y favorecieron los procesos de crecimiento y diferenciación en las plantas. A pesar de que las metodologías tradicionales para la evaluación del crecimiento en especies perennes se realiza, convencionalmente, en períodos mínimos mensuales, es importante mencionar que los muestreos con intervalos de tiempo menores a 30 días resultaron ser una medida confiable, para evaluar el crecimiento, sí se realizan en el período en que la planta se encuentra en su fase de crecimiento logarítmico. Período que, en este experimento en particular, tuvo como base un experimento realizado en 2006, en el mismo sitio y con las mismas especies, en el cual se observó que la etapa de crecimiento logarítmico se encontraba entre los meses de junio a septiembre.

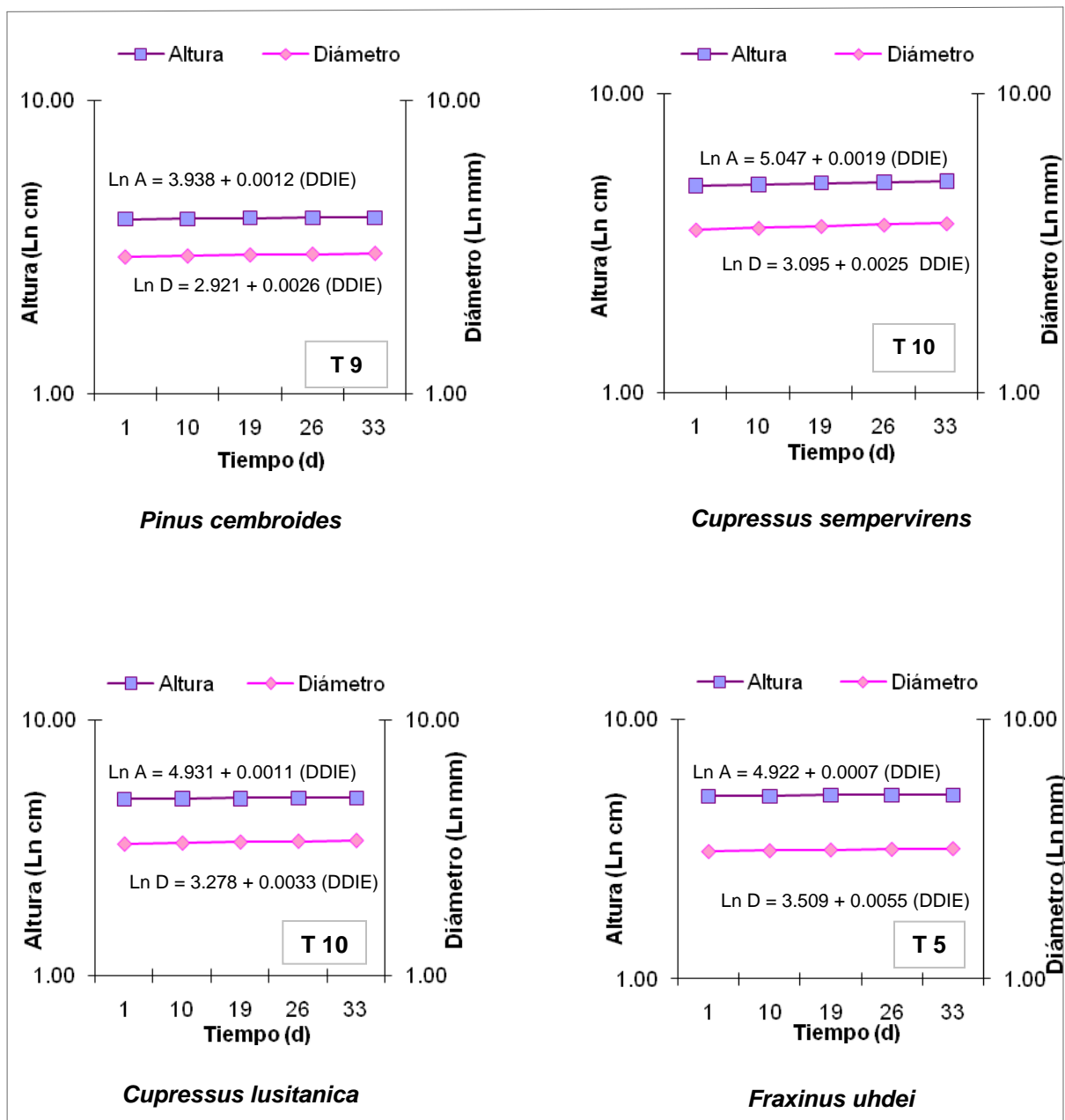


Figura 6. Gráficas de crecimiento en altura y diámetro de especies forestales en el tratamiento considerado óptimo para cada especie

El Cuadro 4 presenta, a manera de resumen, los balances nutrimentales NPK considerados como los más adecuados en lo que se refiere a crecimiento en altura y diámetro en las especies evaluadas, así como el índice de esbeltez, el cual de acuerdo con Rodríguez (2008) es una característica necesaria para evaluar la calidad de la planta, y aunque en términos generales los valores comprendidos entre uno y seis indican que se tiene una planta de calidad, valores mayores a seis, como los presentados en *Cupressus lusitanica* y *C. sempervirens*, pudieran no necesariamente indicar planta de mala calidad; lo anterior debido a que el índice de esbeltez se calcula al dividir la altura (expresada en cm) entre el diámetro basal (expresado en mm); sin embargo, la morfología propia del género *Cupressus*, en especial *C. sempervirens*, es distinta a la que, generalmente, presentan los géneros *Pinus* o *Fraxinus*, los cuales tienden a presentar tallos con diámetros considerablemente mayores a los del cedro o el ciprés.

Cuadro 4. Balances NPK determinados para el crecimiento en altura y diámetro con base al índice de esbeltez

Especie	Balace N:P:K	R_A	R_D	Índice de esbeltez
<i>Pinus cembroides</i>	3.6 : 1 : 5.0	0.0012	0.0026	1.9
<i>Cupressus lusitanica</i>	6.5 : 1 : 5.0	0.0011	0.0033	8.8
<i>Cupressus sempervirens</i>	6.5 : 1 : 5.0	0.0019	0.0025	7.2
<i>Fraxinus uhdei</i>	3.6 : 1 : 2.2	0.0007	0.0055	3.7

Sí se analizan con detenimiento los valores de R_A y R_D en los tratamientos propuestos como óptimos en el cuadro anterior, puede verse que *Cupressus sempervirens* tuvo la R_A mayor; en tanto que, *Fraxinus uhdei* presentó el valor más alto para R_D. Lo anterior pudiera explicarse con base en la capacidad de respuesta a los cambios ambientales, así como por las diferencias morfológicas de las especies; en este caso, *F. uhdei* a pesar de ser una especie de rápido crecimiento no mostró dicha característica, pues presentó los valores más bajos

de R_A . Lo cual puede ser atribuible a que durante el tiempo de muestreo las variaciones climáticas fluctuaron de tal manera que, en la mayoría de los árboles de dicha especie sus yemas apicales se mantuvieron en latencia.

6.2 Peso seco

En lo que al peso seco se refiere y debido al tiempo que duró el experimento, se consideró que el efecto real de los tratamientos aplicados se vería reflejado principalmente en el peso seco del crecimiento nuevo. Motivo por el cual, se realizó el análisis de varianza en dicha variable, encontrándose efecto estadísticamente significativo de los tratamientos únicamente en *Fraxinus uhdei* ($p \leq 0.05$). Los resultados de los análisis de los datos, de acuerdo a lo indicado para la Matriz San Cristóbal, mostraron que a excepción del caso de *Fraxinus uhdei*, no hay diferencia significativa entre tratamientos en lo que a crecimiento nuevo se refiere.

Lo anterior puede atribuirse a que los niveles de N, P y K empleados en los tratamientos se encuentran dentro de los intervalos óptimos, por lo que estadísticamente todos los tratamientos fueron iguales; sin embargo, es conveniente analizar las tendencias que se observan en cuanto al peso seco del crecimiento nuevo en las distintas especies.

En la Figura 7 se presenta la distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo de *Pinus cembroides* en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados, en donde se observa que los tratamientos 8 y 10, con balances nutrimentales 3.6:1:5 y 6.5:1:5 respectivamente, son los que presentaron un porcentaje mayor de crecimiento nuevo.

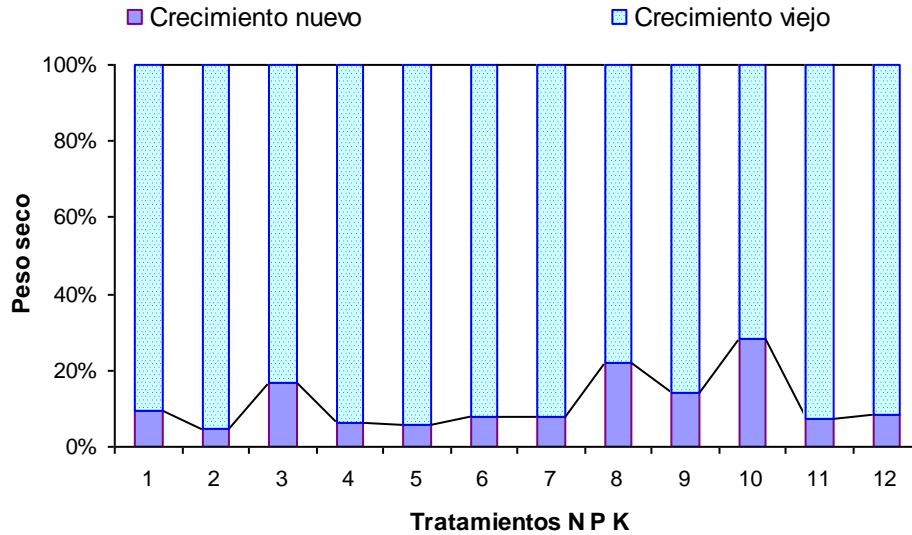


Figura 7. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en *Pinus cembroides* en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados

De manera comparativa la Figura 8 muestra la partición del peso seco del crecimiento nuevo de *Pinus cembroides* en los tratamientos ocho y 10, donde se observa que el porcentaje mayor se destina al crecimiento de hoja nueva, con valores de 21.5 y 27.8 % respectivamente; lo cual es muy deseable ya que este órgano es la fábrica de energía de las plantas y cuanto mayor sea la superficie fotosintética de la planta mayor será su capacidad energética, para realizar los procesos de crecimiento y diferenciación. En lo que a tallo se refiere; se observa que el porcentaje que se destina a tallo en el tratamiento 10 es de más del doble de lo que se obtuvo en el tratamiento 6; por lo que, una dosis de 168 N, 26 P y 130 K (ppm), sería la que facilitaría la mejor producción de crecimiento nuevo.

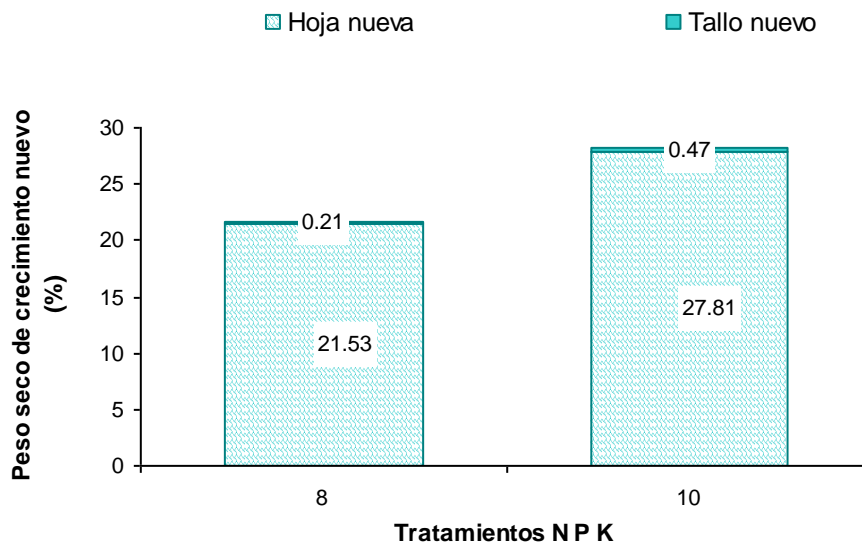


Figura 8. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en *Pinus cembroides* en los posibles tratamientos óptimos de NPK

En lo que respecta a la partición de la materia seca en *Cupressus lusitanica*, en la Figura 9 se observa que el porcentaje del peso seco total destinado a crecimiento nuevo es similar, exceptuando los tratamientos 7 y 9, en los que el porcentaje fue menor, y siendo evidente que entre los tratamientos 2, 5, 6, 10 y 12, la variación en el porcentaje del crecimiento nuevo fue mínima, lo que permitiría presuponer que el tratamiento óptimo para el crecimiento nuevo de *C. lusitanica* se encuentra entre los balances 8.4:1:5, 3.6:1:2.2, 8.4:1:11.7, 6.5:1:5 y 3.6:1:9.1 con relaciones K:N de 0.6, 0.6, 1.4, 0.8 y 2.5 respectivamente. Es importante mencionar que la relación K:N determinada en la dosis óptima para esta especie (Flores, 2008) fue de 0.8.

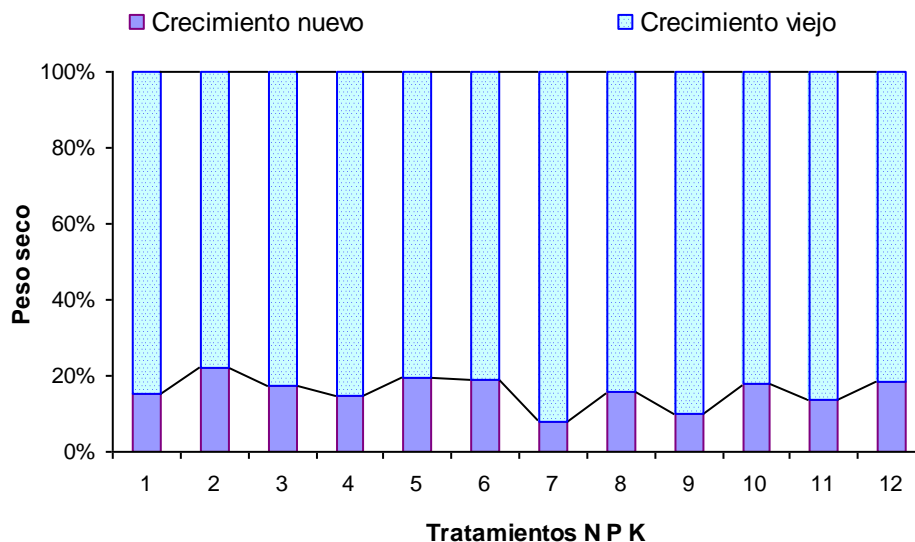


Figura 9. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en *Cupressus lusitanica* en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados

Considerando los tratamientos 2, 5, 6, 10 y 12, en los cuales se obtuvieron los porcentajes mayores de crecimiento nuevo para *C. lusitanica*, y sus respectivas relaciones K:N (0.6, 0.6, 1.4, 0.8 y 2.5), es conveniente analizar con un poco más de detalle la partición del crecimiento nuevo, antes de pensar en elegir una dosis NPK ideal para dicha especie. En la Figura 10 se muestran de manera comparativa los tratamientos con los porcentajes mayores de crecimiento nuevo para *C. lusitanica* y se observa que el tratamiento dos, con 22.27 % de crecimiento nuevo, fue el mejor en lo que se refiere a dicha variable; y que, en general, el porcentaje mayor de crecimiento nuevo se encuentra en las hojas, lo cual es entendible, sí se considera que este órgano es donde se realiza la fotosíntesis, la cual es el centro de producción de energía de la planta. Otro efecto muy importante de resaltar es que entre los tratamientos 2, 5 y 6, la partición hacia tallo se incrementa conforme la partición hacia hoja disminuye; sin embargo, este comportamiento cambia hacia el tratamiento 10, donde la partición del crecimiento nuevo destinado a tallo es considerablemente menor.

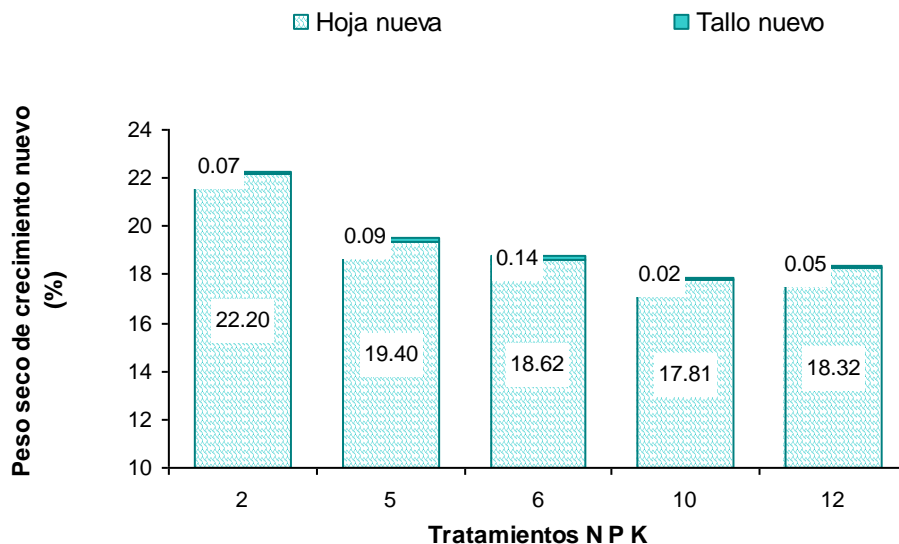


Figura 10. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en *Cupressus lusitanica* en los posibles tratamientos óptimos de NPK

En el tratamiento 12 el porcentaje de crecimiento nuevo destinado a hoja es apenas de 0.3 % menos que el del tratamiento 6; sin embargo, a pesar de que la diferencia en el porcentaje de crecimiento nuevo destinado a tallo entre ambos tratamientos es de apenas 0.09 %, la especie en el tratamiento 6 asigna casi el 300% más hacia el crecimiento de tallo nuevo, en comparación con el tratamiento 12. Lo anterior indicaría claramente que una relación K:N mayor a 1.5 influye de manera significativa, no solo en el crecimiento del árbol sino también en la asignación de recursos hacia uno u otro órgano, lo cual es un factor importante a considerar en la producción de planta de calidad. Por todo lo anterior, una dosis NPK adecuada para *C. lusitanica* sería aquella con valores de 131, 16 – 36 y 18 mg L⁻¹ de N, P y K, respectivamente.

La Figura 11 muestra que el porcentaje de crecimiento nuevo de *C. sempervirens* no mostró efectos contrastantes respecto a los tratamientos NPK aplicados, lo cual indica que en lo que a peso seco de crecimiento nuevo se refiere, cualquiera de los tratamientos NPK aplicados podría ser adecuado.

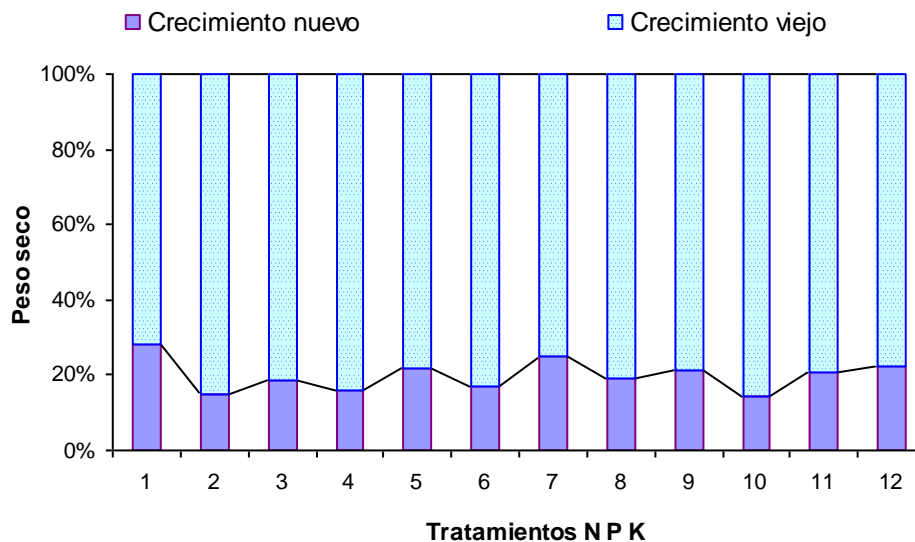


Figura 11. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en *Cupressu sempervirens* en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados

Sin embargo, los tratamientos 1 y 7 mostraron porcentajes de crecimiento nuevo ligeramente superiores al resto de los tratamientos, *i. e.* 28.07 y 25.01 %, respectivamente; de los cuales la mayor parte estuvo representada por el crecimiento en hoja nueva y, un porcentaje muy pequeño, en tallo nuevo (Figura 12). Los tratamientos 1 y 7 presentan relaciones K:N de 1.4 y 3.3, respectivamente, y aunque no hubo ningún efecto visible que permitiera pensar que el tratamiento siete fuera excesivo o tóxico para la planta, quizá convendría hacer pruebas por períodos de tiempo mayores para aseverar que no hay efectos negativos; por lo anterior, se decidió considerar la dosis nutrimental 56 N, 16 P y 78 K (ppm), correspondiente al tratamiento 1, como el tratamiento que permite un rendimiento mayor en lo que a crecimiento nuevo se refiere.

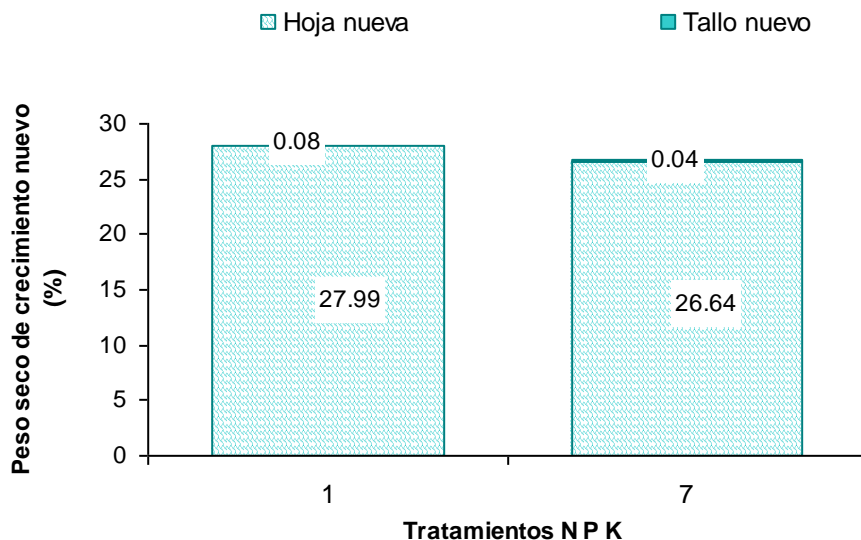


Figura 12. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en *Cupressus sempervirens* en los posibles tratamientos óptimos de NPK

En lo que respecta a la partición del peso seco en *Fraxinus uhdei*, en la Figura 13 se observa la variabilidad en la respuesta a los tratamientos NPK aplicados, siendo evidente que los tratamientos 7 y 10 fueron los que mayor peso seco acumularon en crecimiento nuevo.

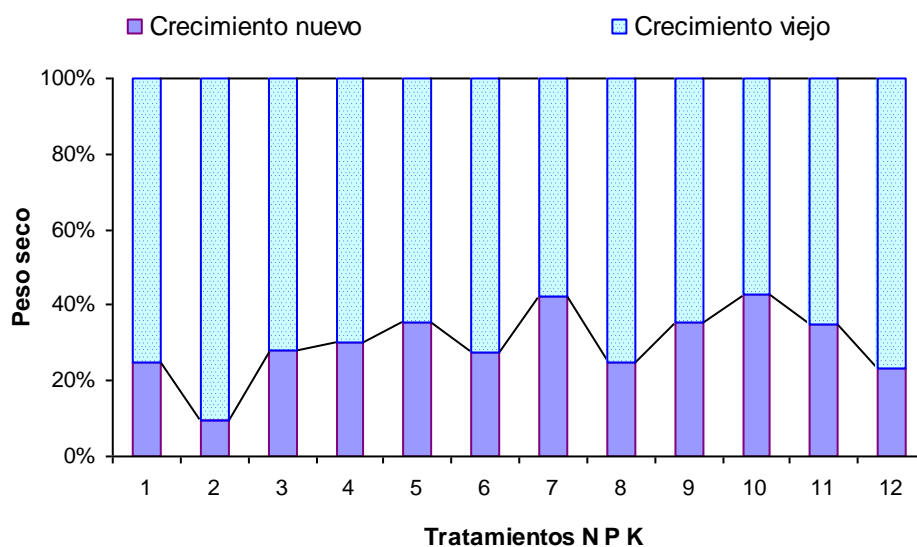


Figura 13. Distribución del peso seco total en crecimiento nuevo y crecimiento viejo en *Fraxinus uhdei* en respuesta a los distintos tratamientos NPK aplicados

La Figura 14 muestra a detalle la diferencia entre los tratamientos con mayor porcentaje de peso seco en crecimiento nuevo, y aunque la diferencia en porcentaje entre los tratamientos siete y 10 (42.44 y 43.03 %, respectivamente) pareciera muy pequeña, la partición entre tallo nuevo y hoja nueva es distinto, y aunque se pensara que el tratamiento 7 provee los resultados más deseables en cuanto a la asignación de crecimiento nuevo en tallo y hoja, la alta relación K:N (3.3) de dicho tratamiento y la nula, información al respecto del efecto de dicha relación en el crecimiento de las plantas, conlleva a considerar como preferible el balance nutrimental siguiente: 168 N, 26 P y 130 K (ppm), con una relación K:N de 0.8.

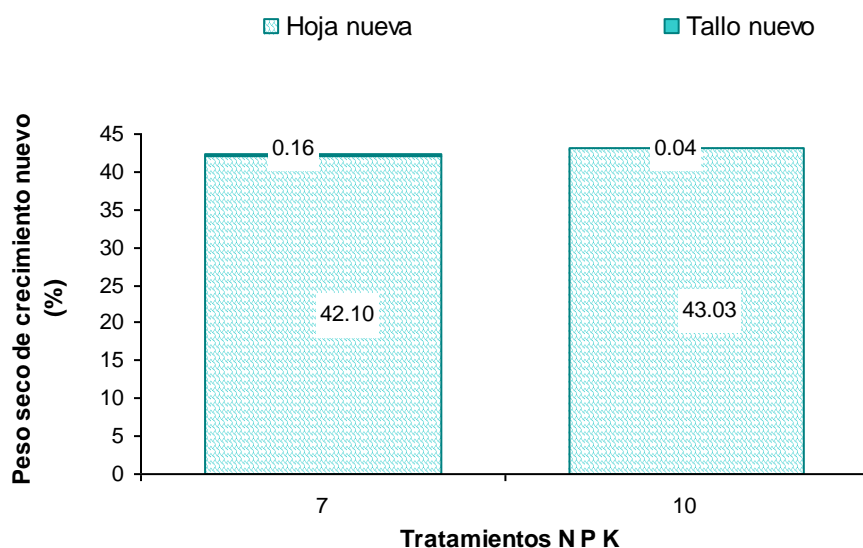


Figura 14. Distribución del peso seco de crecimiento nuevo en *Fraxinus uhdei* en los posibles tratamientos óptimos de NPK

Es interesante resaltar que independientemente de la especie, la partición de la materia seca es casi únicamente hacia hoja, pues la diferencia en los porcentajes es de centecimas de porcentaje. Sin embargo, en *Fraxinus uhdei* la producción de crecimiento nuevo, fue el doble que las otras especies; lo anterior, es atribuible a las características morfológicas propias de *F. uhdei*, la cual es una

especie latifoliada, lo que puede explicar el que presentara una asignación mayor de crecimiento de hojas en comparación con el resto de las especies; sin embargo, en lo que respecta al crecimiento nuevo de tallo, la asignación fue similar en todas las especies.

Debido a que sólo *F. uhdei* mostró significancia en la respuesta a los tratamientos, sólo fue posible determinar en esta especie la ecuación para estimar el rendimiento con base a la asignación de materia seca al crecimiento nuevo, de acuerdo a la metodología de Matriz San Cristóbal, quedando de la forma siguiente:

$$\text{Peso seco de crecimiento nuevo} = 23.58 + 36.90 K + 8.70 N^2$$

El Cuadro 5 se presenta a manera de resumen los balances N:P:K, en los que se obtuvieron los rendimientos mejores, con relación a la asignación de materia seca al crecimiento nuevo; donde se observa que las relaciones K:N de los balances NPK se encuentran dentro de los intervalos probados en trabajos como los de Landis *et al.*, 1989 (K:N = 1.00), López, 1990 (K:N = 0.19), Harvey y Van Den Driessche, 1999 (K:N = 0.10), Román *et al.*, 2001 (K:N = 0.31), y Prieto *et al.*, 2002 (K:N = 0.79) para especies forestales. La gran aportación de este trabajo reside en la base teórico-práctica para sustentar la especificidad de los balances NPK respecto a las especies evaluadas.

Cuadro 5. Balances NPK de mayor productividad de biomasa en crecimiento Nuevo en especies forestales

Especie	Tratamiento NPK	Balace N:P:K	K:N
<i>Pinus cembroides</i>	10	6.5 : 1 : 5	0.8
<i>Cupressus lusitanica</i>	2	8.4 : 1 : 5	0.6
<i>Cupressus sempervirens</i>	8	3.6 : 1 : 5	1.4
<i>Fraxinus uhdei</i>	10	6.5 : 1 : 5	0.8

Después de evaluar en conjunto los resultados obtenidos, tanto en los incrementos en diámetro y altura, como la asignación de materia seca al crecimiento nuevo, en el Cuadro 6 se presentan los tratamientos NPK en los que se observó el rendimiento mayor para cada una de las especies, en las variables mencionadas.

Cuadro 6. Tratamientos NPK de rendimiento mayor en especies forestales

Especie	Crecimiento en Altura y diámetro	Crecimiento nuevo
<i>Pinus cembroides</i>	9	10
<i>Cupressus lusitanica</i>	10	2
<i>Cupressus sempervirens</i>	10	1
<i>Fraxinus uhdei</i>	5	10

Es claro que, a excepción de *Pinus cembroides*, existe una gran diferencia en lo que respecta al tratamiento más adecuado para las especies ya sea para el incremento en altura o diámetro, o bien para la asignación de materia seca al crecimiento nuevo; por lo anterior, es conveniente tomar una decisión en función de aquella variable que más nos interese. En este caso, lo que más nos interesa es la asignación de materia seca a crecimiento nuevo, ya que cuanto mayor sea la producción de hojas, mayores serán los rendimientos; siempre y cuando se consideren los balances N:P:K, ya que el exceso o carencia de uno u otro nutrimento afecta el rendimiento. Además, debe recordarse que son árboles de tres años de edad y, generalmente, en condiciones comerciales de plantaciones ya están establecidos en campo. Por lo que, en esta fase del crecimiento anual lo que más interesa es la formación de follaje. Es muy probable que al final de la estación de crecimiento la partición de biomasa sea a tallo (altura y diámetro)

Es importante mencionar que para hacer un estudio más integral en lo referente al crecimiento y acumulación de materia seca, para este tipo de experimentos se requiere extender el período de evaluación, ya que una vez que la masa foliar se formó y expandió, la planta le da prioridad al crecimiento en tallo.

Quizá el escaso crecimiento del tallo que se registró en este experimento obedeció al corto período de evaluación, el cual debió extenderse probablemente, hasta finales de octubre o principios de noviembre, que es la época en la cual el crecimiento en altura decrece y el crecimiento en diámetro se dispara. El experimento, sin embargo, proveyó de información suficiente para alcanzar los objetivos que se plantearon.

En lo que respecta a la determinación del tratamiento NPK que más favoreció el rendimiento de cada especie evaluada, está se hizo con base a diferencias en la asignación de materia seca al crecimiento nuevo, quedando las dosis que se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Costo de la solución nutritiva considerada como optima para cuatro especies forestales de tres años de edad

Especie	Tratamiento NPK	N	P	K	Costo (\$ solución Árbol⁻¹ mes⁻¹)
<i>Pinus cembroides</i>	10	12.0	4.2	3.3	3.18
<i>Cupressus lusitanica</i>	2	9.3	2.5	2.0	2.46
<i>Cupressus sempervirens</i>	1	4.0	2.5	2.0	1.91
<i>Fraxinus uhdei</i>	10	12.0	4.2	3.3	3.18

La razón de considerar la asignación de materia seca al crecimiento nuevo como factor determinante para sugerir una formula balanceada N:P:K adecuada a cada especie reside en que, como ya se discutió, la mayor parte del crecimiento nuevo se asigna a hojas, que son el órgano productor de energía para llevar a cabo todos los procesos metabólicos de la planta.

7. CONCLUSIONES

- ✿ La ausencia de síntomas visibles de deficiencia o toxicidad en los árboles mostraron que los niveles de N, P y K evaluados, en general, son adecuados a las necesidades de la especies estudiadas
- ✿ Los balances nutrimentales óptimos del crecimiento vegetativo en el período de estudio resultaron ser distintos para cada especie, esto como consecuencia de un crecimiento diferencial en altura y diámetro de *Pinus cembroides*, *Fraxinus uhdei*, *Cupressus lusitanica* y *Cupressus sempervirens*
- ✿ La asignación de biomasa seca hacia crecimiento nuevo en las especies estudiadas fue dirigido principalmente hacia hojas nuevas y el crecimiento relativo fue función de los tratamientos NPK que se aplicaron. *Fraxinus uhdei* presentó el mayor porcentaje de biomasa seca destinada a dicha variable, en tanto que *Cupressus lusitánica* y *C. sempervirens* mostraron patrones de respuesta muy similares
- ✿ Las relaciones K:N de los tratamientos sugeridos como óptimos se encuentran entre 0.6 y 1.4
- ✿ Las dosis N – P - K (meq L⁻¹) que se determinaron como óptimas fueron: 12.0 – 4.2 – 3.3 para *Pinus cembroides* y *Fraxinus uhdei*; 9.3 – 2.5 – 2.0 para *Cupressus lusitanica*; y 4.0 – 2.5 – 2.0 para *C. sempervirens*

ANEXO 1

Cuadro 8. Intervalos de confianza de *Pinus cembroides* para la tasa de crecimiento relativo absoluto

Tratamiento	Intervalo de confianza	
	Altura	Diámetro
1	± 0.009	± 0.005
2	± 0.019	± 0.009
3	± 0.004	± 0.012
4	± 0.007	± 0.005
5	± 0.014	± 0.007
6	± 0.008	± 0.016
7	± 0.020	± 0.020
8	± 0.035	± 0.014
9	± 0.017	± 0.013
10	± 0.020	± 0.004
11	± 0.008	± 0.006
12	± 0.026	± 0.009

Cuadro 9. Intervalos de confianza de *Cupressus lusitanica* para la tasa de crecimiento relativo absoluto

Tratamiento	Intervalo de confianza	
	Altura	Diámetro
1	± 0.001	± 0.003
2	± 0.009	± 0.002
3	± 0.002	± 0.001
4	± 0.012	± 0.017
5	± 0.003	± 0.002
6	± 0.004	± 0.009
7	± 0.001	± 0.005
8	± 0.009	± 0.003
9	± 0.002	± 0.002
10	± 0.011	± 0.007
11	± 0.002	± 0.004
12	± 0.006	± 0.009

Cuadro 10. Intervalos de confianza de *Cupressus sempervirens* para la tasa de crecimiento relativo absoluto

Tratamiento	Intervalo de confianza	
	Altura	Diámetro
1	± 0.007	± 0.005
2	± 0.001	± 0.003
3	± 0.002	± 0.012
4	± 0.001	± 0.003
5	± 0.003	± 0.004
6	± 0.005	± 0.004
7	± 0.005	± 0.008
8	± 0.002	± 0.007
9	± 0.002	± 0.003
10	± 0.008	± 0.010
11	± 0.0004	± 0.008
12	± 0.006	± 0.004

Cuadro 11. Intervalos de confianza de *Fraxinus uhdei* para la tasa de crecimiento relativo absoluto

Tratamiento	Intervalo de confianza	
	Altura	Diámetro
1	± 0.005	± 0.008
2	± 0.0003	± 0.001
3	± 0.009	± 0.008
4	± 0.001	± 0.009
5	± 0.001	± 0.006
6	± 0.008	± 0.003
7	± 0.003	± 0.008
8	± 0.003	± 0.005
9	± 0.005	± 0.006
10	± 0.002	± 0.004
11	± 0.003	± 0.004
12	± 0.005	± 0.007

8. LITERATURA CITADA

AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 1980. **Oficial methods of analysis of the association of oficial agricultural chemists**. 13th edition. Horwitz, W. Ed. AOAC (publishers), Washington. Pp 15

Alcántar G. G. y Trejo-Téllez L. I. 2007. **Nutrición de cultivos**. Mundi-Prensa México y Colegio de Postgraduados, Méx. 438 p

Barber S. A. 1962. **A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability**. Soil Science 93: 39-49 p

Bello, L. A. y Cibrián, T. J. 2000. **Evaluación técnica de la reforestación 1998**. Resúmenes del 1er. Congreso Nacional de Reforestación, Colegio de Postgraduados, Méx.

Benton, J. J. Jr., B. Wolf and H. A. Mills. 1991. **Plant analysis handbook, a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide**. Micro-Macro publishing, USA. 213 p

Bidwel, R. G. S. 1979. **Fisiología vegetal**. A. G. T. Editor, México. 784 p

Booner, J and A. W. Galston. 1961. **Principles of plant physiology**. W. H. Freeman and Company Publishers. Traducción de Portillo F. 1961. Principios de fisiología vegetal. Ed. Aguilar, Madrid. 485 p

Calderón-Paniagua, N.; Jasso-Mata, J.; Martínez-Hernández, J. J.; Vargas-Hernández, J. y Gómez-González, A. 2006. **Estimulación temprana del crecimiento del epicotilo en plántulas de *Pinus montezumae* Lamb.** Ra Ximhai Vol. 2. Número 3, Septiembre – Diciembre 2006, pp. 847-864

Castro, S. J. M. 1995. **Fertilización.** En Viveros Forestales, publicación especial No. 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 48-57 Pp

Cuevas, R. R. A., J. M. Castro S., M. P. de la Garza L. y F. Nepamuceno M. 1992. **Evaluación de diferentes dosis de fertilizantes en la propagación de algunas especies forestales.** Informe Final de Proyecto. México, D. F. Material inédito

Dominguez L. S., J. Oliet P., P. Ruiz, I. Carrasco M., J. L. Peñuelas R. y R. Serrada H. 2000. **Influencia de la relación N-P-K en el desarrollo en vivero y en campo de planta de *Pinus pinea*.** Actas del Congreso I Simposio del pino piñonero 2000. Valladolid. Volumen: 195-202

Domínguez V. A., 1997. **Tratado de la fertilización.** Mundial Prensa. Madrid, España. 42-47 p

Flores R., S. 2008. **Evaluación nutrimental de potasio en especies forestales en cultivo hidropónico.** Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México. 62 p

Fritz-Helmut, E. 1991. **Forest fertilization-present state and history with special reference South German conditions.** Fertilizer research 27(1):71-86

Gauch, H. G. 1972. **Inorganic plant nutrition.** Dowden, Hutchinson and Ross. 488 p

Hale, M. G. and D. M. Orcutt, 1987. **The physiology of plants under stress.** John Wiley & Sons, USA. 206 p

Harvey, H. P. and R. Van Den Driessche. 1999. ***Nitrogen and potassium effects on xylem cavitation and water-use efficiency in poplars.*** Tree Physiology 19:943-950

Hewitt, E. J. 1966. ***Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition.*** Technical communication No. 22. Commonwealth Agricultural Bureaux. England. 547 p

Hewitt, E. J. and, T.A. Smith. 1975. ***Plant mineral nutrition.*** The University Press Ltd. 298 p

Hocker Jr. H. W. 1979. ***Introduction to forest biology.*** Bellomo, L. F. A. (Trad.) 1984. Introducción a la biología forestal. A.G.T. Editor. México. 446 p.

Jacob A. and H. Uexküll. 1954. ***Fertilizer use - nutrition and manuring of tropical crops,*** López M. L (Trad.). 1973. Fertilización. Ediciones Euroamericanas, Méx. 626 p

Jones, J. B. Jr. 1983. ***A guide for the hydroponic and soilless culture grower.*** Portland, OR: Timber Press. 124 p

Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. McDonald and J. P. Barnett. 1989. ***Manual de vivero para la producción de especies forestales en contenedor, Vol. 4 Fertilización y riego.*** (Trad.) Trejo, D. A. R. Dirección General del Programa Nacional de Reforestación, Méx. 126 p.

López, L. M. A. 1990. ***Estudio de nutrición de Pinus patula Schl. et Cham., en sistema hidropónico.*** Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. 69 p

McDonald, A. J. S. 1994. **Nutrient supply and plant growth**. Lumsden P. J., J. R. Nicholas and W.J. Davies (eds.). *Physiology, growth and development of plants in culture*. Dordrecht: Kluwer Academic. pp 47-57

Marschner, H. 1986. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, San Diego CA. 674 p

Martínez G. A. y D. M. Martínez 1996. **Diseño de experimentos con fertilizantes**. Publicación especial 5, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Colegio de Postgraduados. 155 p

Mengel, K. and E. A. Kirkby. 1978. **Principles of plant nutrition**. International Potash Institute. 593 p

Muñoz, O. A. 1974. **Tamaño de la parcela, diseños y uso de factoriales en la experimentación agrícola**. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, SAG. Folleto misceláneo N° 25, Diciembre 1974. 38 p

Nélio, C. N. 2006. **Soluções nutritivas: Formulação e aplicações**. En Nutrição mineral de plantas. Editor Manlio Silvestre Fernandes. Voçosa, M. G.: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 432 p

Prieto, R. J. A.; P. A. Domínguez C., E. H. Cornejo O., J. J. Návar Ch., J. J. Jiménez y P. J. G. Marmolejo M. 2002. **Efecto de la fertilización en la producción de la planta de Pinus engelmannii Carr. en vivero**. Rev. Cien. For. en Méx. 27 (92):79-94

Resh, M., H. 2001. **Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción**. Ediciones Mundi-Prensa. Barcelona, España. 558 p

Rodríguez, S. F. 1982. **Fertilizantes**. A. G. T. Editor, México. 157 p

Rodríguez, T. D. A. 2008. **Indicadores de calidad de planta forestal**. Mundi-Prensa México. 156 p

Rojas, B. A. 1962. **The San Cristobal design for fertilizer experiments**. Proc. Of the Int. Soc. of Sugarcane Technologist 11:197-203

Rojas, B. A., 1981. **Planeación y análisis de experimentos de fertilizantes**. INIA, SARH. México, D. F. 45 p

Román, A. R. J., J. J. Vargas H., G. A. Baca C., A. Trinidad S. y M. P. Alarcón B. 2001. **Crecimiento de plántulas de Pinus greggii Engelm. en respuesta a la fertilización**. Rev. Cien. For. en Méx. 26 (89):19-43

SAS (Statistical Analysis System). 1985. **SAS/STAT Guide for personal computers** Version 6 edition. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 941 p

Timmer, V. R. and G. Armstrong. 1987. **Growth and nutrition of containerized Pinus resinosa at exponentially increasing nutrient additions**. Can. J. For. Res., 17: 644-647

Velázquez-Mendoza, J. 2007. **Informe técnico final del proyecto “Estudio nutricional en especies forestales y restauración económica y ecológica del Bosque de La Primavera, Guadalajara”** (CONAFOR-2002-C01-6506)

Volke H., V., A. Turrent F. y A. Castillo M. 2005. **Diseños de tratamientos y estimación de funciones de respuesta en la investigación agrícola**. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. 68 p

Xinjian, Xu and V. R., Timmer. 1998. **Biomass and nutrient dynamics of Chinese fir seedlings under conventional and exponential fertilization regimes**. Plant and Soil 203: 313–322, 1998

Yamada, T. 2004. *Resistência de plantas às pragas e doenças: pode ser afetada pelo manejo da cultura?*. Informações agronômicas 108:1-7
nômicas 108:1-7