



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

FERTILIZACIÓN NPK EN ÁRBOLES DE *Pinus patula* Schl. et Cham.

MARTHA OLIVIA LÁZARO DZUL

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2011

La presente tesis titulada: **Fertilización NPK en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham.** realizada por la alumna: **Martha Olivia Lázaro Dzul** 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
FORESTAL

CONSEJO PARTICULAR



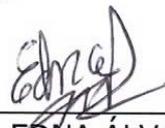
CONSEJERO

DR. JUAN VELÁZQUEZ MENDOZA



ASESOR

DR. JOSE J. VARGAS HERNÁNDEZ



ASESOR

DRA. MA. EDNA ÁLVAREZ SÁNCHEZ



ASESOR

DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Enero de 2011

DEDICATORIA

A Dios por concederme la alegría de vivir cada día.

A mis amados padres María del Rosario y Carlos quienes nunca me han dejado sola, y a pesar de todo me han alentado a seguir adelante.

A mis hermanas Nayely y Carla y a mi hermano Ángel por su cariño y apoyo incondicional a lo largo de estos años y por estar ahí siempre en los momentos felices y también en los difíciles, los quiero mucho.

A mi sobrina Isis Noemí quien con su sonrisa y ternura es capaz de alegrar mi existencia.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) quien a través del apoyo que otorga, permite que jóvenes con deseos de superación y de trabajar en beneficio de su país, continúen sus estudios.

Al Dr. Juan Velázquez Mendoza por el invaluable apoyo que me brindó cuando más lo necesitaba y creer en mí; por transmitirme sus conocimientos, y por todos sus consejos y acertadas sugerencias, no solo para la realización del presente trabajo, sino también para mi vida personal, mil gracias.

A mis asesores Dr. Jesús Vargas Hernández, Ma. Edna Álvarez Sánchez y Armando Gómez Guerrero quienes con sus acertadas sugerencias contribuyeron para enriquecer y mejorar el presente trabajo.

Al Dr. Miguel Ángel López por su apoyo para el desarrollo del presente trabajo en la fase de campo.

A los ingenieros Salvador Castro Zavala y León Jorge Castaños Martínez por el financiamiento otorgado para llevar a cabo este trabajo, como parte del proyecto Diagnóstico del Estado Nutricional y Recomendación de Fertilización en *Pinus patula* en Predios Particulares de Fracción Rancho Chichicaxtla y Conjunto Predial Forestal.

Con aprecio a la maestra Georgina Vargas Simón, por ser una invaluable persona y animarme a iniciar un reto más en vida, mis más sinceras gracias.

A mí querido amigo Haidel por estar a mi lado y darme ánimos siempre, y compartir no solo alegrías y éxitos sino también tristezas, mil gracias.

A Siomara, quien me brindo su ayuda incondicional y por ser mi amiga, gracias.

A Tere, María y Clemente por ser excelentes amigos y hacer más amena mi estancia en el tiempo de conocernos.

A Karla, Mayita, Vero y Enrique por los agradables momentos compartidos.

A mis compañeros del programa forestal Roy, Amparo, Angélica, Marlen por su apoyo en los cursos que tomamos juntos.

A Sandra por sus atenciones y ayuda con trámites administrativos.

A los señores Raúl y Sergio, a Israel y Ricardo por su apoyo en el trabajo de laboratorio.

Y a todas y cada una de las personas que aunque no aparezcan aquí, han contribuido con mi formación no solo académica sino también personal.

CONTENIDO

No.		Página
	DEDICATORIA	III
	AGRADECIMIENTOS	IV
	CONTENIDO	VI
	ÍNDICE DE CUADROS	VIII
	ÍNDICE DE FIGURAS	IX
	ÍNDICE DE ANEXOS	X
	RESÚMEN	XI
	SUMMARY	XII
1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1	GENERAL	3
2.2	ESPECÍFICO	3
3.	HIPÓTESIS	4
4.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
4.1	Generalidades de la especie.....	5
4.2	Crecimiento.....	6
4.3	Crecimiento de árboles de coníferas.....	6
4.4	Medición del crecimiento.....	8
4.4.1	Tasa relativa de crecimiento (TRC).....	9
4.5	Nutrientes.....	9
4.6	Funciones de los nutrientes en las plantas.....	11
4.6.1	Nitrógeno.....	11
4.6.2	Fósforo.....	12
4.6.3	Potasio.....	13
4.7	Como obtienen las plantas los nutrientes.....	14
4.8	Relación entre la concentración de un nutriente y el crecimiento de una planta.....	14
4.9	Fuentes de nutrientes de las plantas.....	15
4.10	Fertilización y fertilizantes.....	17
4.10.1	Fertilizantes nitrogenados.....	18

4.10.2	Fertilizantes fosfatados.....	19
4.10.3	Fertilizantes potásicos.....	20
4.10.4	Fertilización en plantaciones arbóreas.....	21
4.11	Análisis vegetal.....	23
4.12	Análisis de vectores.....	23
5.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
5.1	Ubicación del experimento.....	25
5.2	Diseño experimental.....	25
5.3	Generalidades experimentales.....	26
5.3.1	Dosis de fertilización.....	26
5.3.2	Fertilización.....	27
5.3.3	Fuentes de fertilizantes.....	27
5.4	Criterios de muestreo.....	28
5.5	Procesamiento de muestras.....	28
5.6	Variables evaluadas.....	29
5.6.1	Área basal.....	29
5.6.2	Volumen.....	29
5.6.3	Peso seco.....	29
5.7	Tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI).....	30
5.8	Análisis vegetal.....	30
5.8.1	Estado nutricional de los árboles.....	31
5.9	Análisis de datos.....	32
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
6.1	Volumen.....	34
6.2	Peso seco.....	35
6.3	Tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI)...	37
6.3.1	Volumen.....	37
6.3.2	Peso seco.....	39
6.4	Área basal.....	41
6.5	Estado nutricional de los árboles.....	43
6.6	Discusión general.....	46
7.	CONCLUSIONES.....	48
8.	LITERATURA CITADA.....	49
9.	ANEXOS.....	54

ÍNDICE DE CUADROS

No.		Página
Cuadro 1.	Fertilizantes nitrogenados importantes.....	18
Cuadro 2.	Tipos de fertilizantes fosfatados.....	19
Cuadro 3.	Tipos de fertilizantes potásicos.....	20
Cuadro 4.	Factores de variación del experimento.....	25
Cuadro 5.	Tratamientos de fertilización aplicados.....	26
Cuadro 6.	Valores promedio del análisis foliar al inicio del experimento (antes de fertilizar) y de biomasa anual estimada para <i>Pinus patula</i>	27
Cuadro 7.	Volumen de crecimiento nuevo en árboles de <i>P. patula</i> por bloque (perpendicular a la pendiente del terreno) experimental.....	34
Cuadro 8.	Mejores tratamientos por variables en estudio.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

No.		Página
Figura 1.	Relación entre el crecimiento de la planta y la concentración de nutrimentos en los tejidos de la planta (Mengel y Kirkby, 2001).....	16
Figura 2.	Arreglo de los puntos en los cuáles se aplicaron los fertilizantes dentro de cada parcela experimental.....	27
Figura 3.	Follaje o brote nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	28
Figura 4.	Efecto del fósforo en el volumen de follaje nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	35
Figura 5.	Efecto del nitrógeno en el peso seco de follaje nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	36
Figura 6.	Efecto de la interacción fósforo*potasio en el peso seco de follaje nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	37
Figura 7.	Tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de volumen de follaje nuevo de árboles de <i>P. patulla</i> . de 10 años. Aquixtla, Pue., México.	39
Figura 8.	Mejores tratamientos de tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de volumen de follaje nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	39
Figura 9.	Tasa relativa de crecimiento instantánea (TCRI) de peso seco de follaje nuevo de árboles de <i>P. patula</i> de 10 años. Aquixtla, Pue., México.....	40
Figura 10.	Mejores tratamientos de tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de peso seco de follaje nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	41
Figura 11.	Tasa relativa de crecimiento promedio (TRCP) de árboles de <i>P. patula</i> de 10 años. Aquixtla, Pue., México.....	42
Figura 12.	Mejores tratamientos para tasa relativa de crecimiento promedio (TRCP) de árboles de <i>P. patula</i>	42
Figura 13.	Respuesta foliar de macronutrientes a la aplicación de	

distintas dosis de fertilización NPK en árboles de <i>P. patula</i> de 10 años. Aquixtla, Pue., México.....	44
--	----

Figura 14. Respuesta foliar de micronutrientes a la aplicación de distintas dosis de fertilización NPK en árboles de <i>P. patula</i> de 10 años. Aquixtla, Pue., México.....	45
--	----

ÍNDICE DE ANEXOS

No.		Página
Anexo 1.	Análisis de varianza de volumen de crecimiento nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	54
Anexo 2.	Análisis de varianza de peso seco de crecimiento nuevo de árboles de <i>P. patula</i>	54
Anexo 3.	Croquis de parcelas experimentales.....	54
Anexo 4.	Bloques de parcelas experimentales perpendiculares a la pendiente del terreno	55
Anexo 5.	Análisis de suelo, antes del inicio del experimento Aquixtla, Puebla.....	55
Anexo 6.	Análisis de varianza de incremento de área basal de árboles de <i>P. patula</i>	55
Anexo 7.	Análisis de varianza de tasa relativa de crecimiento promedio de incremento de área basal de árboles de <i>P.</i> <i>patula</i>	56

FERTILIZACIÓN NPK EN ÁRBOLES DE *Pinus patula* Schl. et Cham.

Martha Olivia Lázaro Dzul, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011

RESUMEN

Se estudiaron diferentes dosis de fertilización NPK con relación al crecimiento de follaje nuevo e incremento de área basal, con un experimento factorial completo 3^3 en una plantación de *P. patula* Schl. et Cham. de 10 años de edad, Aquixtla, Puebla, durante el ciclo 2009-2010. Los factores fueron N (0, 138, 185), P (0, 15, 21) y K (0, 123, 164) kg ha^{-1} . Se determinó la tasa relativa de crecimiento instantáneo en volumen y peso seco de follaje nuevo (TRCIVFN y TRCIPSFN) y la tasa relativa de crecimiento promedio de incremento de área basal (TRCPIAB). La mayor TRCIVFN ($0.0255 \text{ mL mL}^{-1} \text{ día}^{-1}$) se obtuvo con la dosis 185-0-0 kg ha^{-1} de NPK. La TRCIPSFN presentó los valores más altos con las dosis 138-0-123 y 138-0-0 kg ha^{-1} de NPK, con valores de 0.0254 y $0.0249 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$, respectivamente. La mayor TRCPIAB ($0.034 \text{ m}^2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) se obtuvo con las dosis 185-0-0 kg ha^{-1} de NPK. Se determinó deficiencia de N, lo que se atribuyó a la acidez del suelo y a las tasas lentas de mineralización de la materia orgánica, predominantes en el sitio experimental. El N edáfico disponible fue menor a la demanda del árbol. La dosis recomendada para las condiciones edáficas y climáticas del sitio experimental fue 185-0-0 kg ha^{-1} para volumen e incremento de área basal y 138-0-0 kg ha^{-1} de NPK para peso seco.

Palabras clave: tasa relativa de crecimiento, follaje nuevo, fertilizantes líquidos.

NPK FERTILIZATION ON TREES OF *Pinus patula* Schl. et Cham.

Martha Olivia Lázaro Dzul, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2011

SUMMARY

Different doses of NPK fertilizer in relation to the growth of new foliage and the basal area increment were studied under a full factorial experiment 3^3 in a 10-years-old plantation of *P. patula* Schl. et Cham., Aquixtla, Puebla, during the 2009-2010 growth cycle. The factors were N (0, 138, 185), P (0, 15, 21) and K (0, 123, 164) kg ha^{-1} . The instantaneous relative growth rate in volume and dry weight of new foliage (TRCIVFN and TRCIPSFN) and average relative growth rate in basal area increment was determined. Highest TRCIVFN ($0.0255 \text{ mL mL}^{-1} \text{ day}^{-1}$) was obtained with the dose $185-0-0 \text{ kg ha}^{-1}$ NPK. The TRCIPSFN showed the highest values with the doses $138-0-0$ and $138-0-123 \text{ kg NPK ha}^{-1}$, with 0.0254 and $0.0249 \text{ g g}^{-1} \text{ day}^{-1}$, respectively. Highest TRCPIAB ($0.034 \text{ m}^2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) was obtained with the dose $185-0-0 \text{ kg ha}^{-1}$ NPK. N deficiency was determined, attributed to soil acidity and slow rates of mineralization of organic matter, that were predominant in the experimental site. The available soil N was lower than the demand of the trees. The recommended dose, considering the soil and climatic conditions at the experimental site, was $185-0-0 \text{ kg ha}^{-1}$ for volume and basal area increment and $130-0-0 \text{ kg ha}^{-1}$ for dry weight of foliage.

Keywords: relative growth rate, foliage, liquid fertilizers

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia de los ecosistemas forestales depende de una serie de factores ambientales, como la radiación, exposición, temperatura, agua, y disponibilidad de nutrimentos (Mayor *et al.*, 1994). Los especialistas forestales pueden hacer muy poco para modificar los factores climáticos, de tal manera que los esfuerzos que hacen para incrementar la productividad de los bosques se concentran, en parte, sobre el manejo de nutrimentos. La disponibilidad de éstos en el suelo puede modificarse en forma directa mediante diversos tratamientos, entre ellos la fertilización (Fisher y Binkley, 2000). Sin embargo, existe dificultad al tratar de llevarla a cabo, debido en parte a que, la cantidad de fertilizante a aplicar es un asunto muy complejo de determinar por la gran cantidad de interacciones que se presentan en el bosque. Dichas interacciones, se pueden expresar como una función entre los requerimientos nutricionales de los árboles, la naturaleza del fertilizante a emplear, la fertilidad natural del suelo, las interacciones entre el suelo y el fertilizante, el método de aplicación y el momento de aplicación. Por tanto, en ocasiones se aplican dosis y tipos de fertilizantes inadecuados.

Al respecto, se han realizado diversos estudios con la finalidad de conocer la influencia que la fertilización tiene en el crecimiento y desarrollo de las especies forestales, en los cuales se han probado diferentes dosis de fertilización, especialmente en la fase de vivero; algunos de estos estudios se han enfocado a mejorar las características de las plantas que les permitan tener un mejor desarrollo en campo, al momento del transplante (Oliét, *et al.*, 2008; Puértolas, *et al.*, 2003; Villar-Salvador, *et al.*, 2004; Rikala y Repo, 1997). Otros trabajos en plantaciones maduras se han enfocado principalmente al diagnóstico nutrimental por diversos métodos (Solla-Gullón *et al.*, 2004; Español *et al.*, 2000; Braekke y Salih, 2002).

Para el caso de especies forestales mexicanas, como es *Pinus patula*, los datos relacionados a dosis de fertilización aplicadas directamente en campo

son escasos y más aún en árboles mayores a cinco años; por lo cual, el presente trabajo tuvo como finalidad determinar la dosis de fertilización NPK adecuada para obtener mayor crecimiento en una plantación comercial de *P. patula* con árboles de 10 años de edad.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Evaluar los efectos de dosis crecientes de fertilización NPK en el crecimiento de un latizal maduro de *Pinus patula*.

2.2 ESPECÍFICO

Determinar la dosis de fertilización NPK para obtener mayor crecimiento nuevo en un latizal maduro de *P. patula*.

3. HIPÓTESIS

La fertilización NPK en dosis crecientes mejora el crecimiento en latizales maduros de *Pinus patula*.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Generalidades de la especie

Pinus patula Schl. et Cham. es un árbol considerado de rápido crecimiento, que presenta tasas de crecimiento en altura de hasta 2 m por año, y la formación de hasta dos anillos de crecimiento por año.

El área principal de distribución de *P. patula* en la República Mexicana está restringida a una franja de orientación NW a SE, que pasa por los estados de Hidalgo, Veracruz y Puebla. En estos Estados, la especie se considera como una de las más importantes. Su importancia radica en su abundancia y calidad de los rodales que forma (buena conformación, fuste recto y relativamente libre de nudos, y en general una buena calidad de la madera por su bajo contenido de resina) (Velázquez *et al.*, 2004).

La especie prospera en los subtipos climáticos C(fm) templado húmedo y C(w₂) templado subhúmedo. En cuanto a la luminosidad, Vela (1980) señala que la zona donde prospera la especie, presenta una iluminación diaria de 10.9 a 13.3 h. No obstante, cabe mencionar que debido a la exposición que presenta la zona donde se desarrolla ésta (Aquixtla, Puebla), la cantidad de iluminación mencionada no es aprovechada totalmente por la misma, para su crecimiento; se aprovecha alrededor de un ochenta por ciento (8 a 9 horas). En parte se debe a la presencia de neblina durante el día y en varios meses del año. Esto se refleja en el mayor ahusamiento de los árboles dentro de los rodales. Lo anterior se produce como consecuencia de la competencia por la luz solar que sufren los árboles, lo cual viene aunado también a la falta de tratamientos silvícolas que prevalecen en la zona. Si se realizan aclareos y podas en el tiempo adecuado, el efecto de competencia se reduciría considerablemente, obteniéndose un crecimiento mejor de los árboles tanto en altura como en diámetro, y en consecuencia se obtendría un volumen mayor de madera.

La precipitación total anual, según Vela (1980), varía de 1000 a 1500 mm en promedio. Ésta cantidad de lluvia se presenta en un periodo corto a lo largo del año (4 meses aproximadamente), por lo que con relación a la fotosíntesis, la cantidad de agua disponible es muy poca, considerando además la densidad de los árboles dentro del rodal. La zona donde prospera *P. patula* presenta nieblas frecuentes y lluvias invernales, esto influenciado también por la altitud en que se localiza la especie, entre los 1600 y 3100 m. Con estas condiciones, la especie experimenta con frecuencia una reducción de su crecimiento, como resultado de la poca disponibilidad de agua y a que con las frecuentes nieblas la radiación solar recibida por la especie decrece, afectándose la tasa de fotosíntesis.

En lo referente a los suelos, la especie prefiere suelos profundos y de texturas finas; también se asienta sobre suelos ácidos, con valores de pH entre 4 y 6 (Vela, 1980).

4.2. Crecimiento

El crecimiento se define como el aumento íntegro y gradual en biomasa, producto de la actividad biológica del individuo. En el crecimiento de un árbol influyen su constitución genética y el ambiente que le rodea. La información genética determina la respuesta del árbol a los diferentes ambientes, controlando sus manifestaciones. El ambiente proporciona los nutrimentos, el agua, iluminación, etc. Por lo tanto, el crecimiento del árbol es la respuesta a la acción conjunta de su información genética y de los factores del medio (Hocker, 1984).

4.3 Crecimiento de árboles de coníferas

En forma general, las coníferas presentan un crecimiento monopódico, lo que implica la formación de un tallo principal, constituido por secciones sucesivas de formación y elongación. Debido a la ubicación apical y a la elongación anual de estas nuevas secciones, se les ha denominado brote

terminal o brote anual. Sin embargo, el brote terminal puede incluir uno o varios segmentos formados en el mismo año, los cuales se pueden distinguir claramente entre sí y a los cuales se les ha identificado como ciclos o flujos de crecimiento (Gómez, 1993).

Los ciclos del brote anual son las porciones individuales y continuas del tallo que se desarrollan durante una misma estación de crecimiento. En este sentido, se pueden alargar de uno (especies monocíclicas) a varios (especies policíclicas) ciclos de crecimiento durante el año, lo cual ocurre según diferentes patrones de crecimiento.

Cada ciclo del brote anual se puede dividir en verticilo e interverticilo, de los cuales el primero generalmente es un conjunto de brotes largos, diferenciados como ramas o bien como estróbilos y dispuestos en torno al ápice del interverticilo. Este último es propiamente un segmento individual del tallo, el cual muestra dos porciones bien definidas. La porción distal y más larga porta los fascículos de acículas, acompañados de sus catafilos y yemas axilares. La porción basal presenta solamente catafilos, por lo que a esta parte se le conoce como zona de catafilos estériles. Ocasionalmente el verticilo puede estar ausente; sin embargo, la presencia de la zona de catafilos estériles indica la separación de cada ciclo del inmediato inferior (Gómez, 1993).

En el caso particular de *Pinus patula*, Vela (1980) señala que ésta es una especie de crecimiento binodal, es decir sus ramillas forman dos internodos (un internodo es un interverticilo y este junto con un verticilo forman un flujo de crecimiento) durante el año. Las hojas del primer internodo brotan a fines de invierno, alcanzando su madurez en la primavera y es en el mes de mayo cuando comienza la formación del segundo internodo y por consecuencia la aparición de nuevas hojas. No obstante, Gómez (1993) reporta que individuos jóvenes de *P. patula* pueden formar 3, 4 ó incluso 5 verticilos por año.

4.4 Medición del crecimiento

Por lo general, crecimiento significa aumento de tamaño; existen dos medidas que son las más habituales para medirlo: las que cuantifican los aumentos en volumen o en masa. Los aumentos de volumen (tamaño) a veces se calculan en forma aproximada midiendo la expansión en sólo una o dos direcciones, tal como la longitud (por ejemplo, la altura del tallo), el diámetro (por ejemplo, del tronco) o el área (por ejemplo de una hoja). Los aumentos de masa se miden a menudo cosechando la planta completa o la parte de interés, pesándola inmediatamente, antes de que se evapore demasiada agua de ella. Así se calcula la masa fresca, que es una cantidad bastante variable, porque depende del estado hídrico de la planta (Salisbury y Ross, 1994).

Sin embargo, debido a los problemas que produce el contenido variable de agua en la planta, se prefiere expresar el crecimiento de ellas en función del aumento de la masa seca de toda la planta o parte de ella. La masa seca se obtiene normalmente secando el material recién cortado durante un periodo de tiempo comprendido entre 24 y 48 horas a temperaturas entre 70 y 80°C (Salisbury y Ross, 1994).

Lira (2000) menciona que el crecimiento puede medirse como longitud, grosor o área, también como aumento en volumen, peso (ya sea fresco o seco). Cada parámetro describe algo diferente y rara vez existe una relación simple entre ellos en un organismo en crecimiento, esto se da porque a menudo ocurre en diferentes direcciones a distintas tasas y, a veces ni siquiera relacionadas.

4.4.1 Tasa relativa de crecimiento (TRC)

La tasa relativa de crecimiento representa la eficiencia de la planta para producir nuevo material por unidad de material existente en un periodo determinado; es decir, el incremento en biomasa por biomasa presente por unidad de tiempo. Generalmente, se expresa en $g\ g^{-1}\ día^{-1}$ y se calcula para un intervalo de tiempo. Desde el punto de vista del cálculo diferencial, la TRC expresa la tasa de cambio con respecto al tiempo. Asimismo, una consideración importante es que los valores de TRC pueden cambiar para los diferentes intervalos de tiempo medidos (Hunt, 1978).

Debido a que la TRC provee una integración conveniente del desempeño combinado de los diferentes órganos de la planta, es especialmente útil cuando existe necesidad de comparar especies y tratamientos diferentes; sin embargo, cuando se calcula a nivel de toda la planta, proporciona poca información del proceso causal que contribuye al desempeño de esta (Hunt, 1978).

Koslowski (1971) menciona que la TRC permite comparar el efecto de diversos factores en el ambiente sobre la tasa de crecimiento, independientemente del tamaño de las plantas que están siendo comparadas.

4.5 Nutrientes

El suministro, absorción y metabolismo de componentes químicos necesarios para el crecimiento puede definirse como nutrición, y los elementos químicos esenciales requeridos por un organismo se denominan nutrientes. (Mengel y Kirkby, 2001).

El término elemento esencial o nutriente fue propuesto por Arnon y Stout (1939). Estos autores concluyen que para que un elemento sea considerado esencial, deben cumplirse los siguientes criterios:

- Una planta debe ser incapaz de completar su ciclo de vida en ausencia del elemento mineral

- La función del elemento no debe ser reemplazada por otro elemento mineral
- El elemento mineral debe estar involucrado directamente en el metabolismo de la planta, por ejemplo como constituyente esencial de la planta (enzima), o éste puede ser requerido para un proceso metabólico específico (reacción enzimática) (Marschner, 1992).

Las plantas superiores (y casi todas las plantas cultivadas) necesitan 17 nutrientes; carbono (C), oxígeno (O), e hidrógeno (H), que son los principales componentes estructurales de la materia orgánica, y 14 elementos minerales adicionales, los cuales, dependiendo de las cantidades en que se encuentran en las plantas, pueden ser divididos en macronutrientes y micronutrientes. Los elementos C, H, O, N, P, K, S, Ca y Mg se encuentran entre los macronutrientes, ya que su concentración en el tejido vegetal seco es mayor a 1000 mg kg^{-1} (ppm), mientras que los que se encuentran en cantidades menores a 500 mg kg^{-1} (ppm) son considerados como micronutrientes, como sería el caso de Cl, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo y Ni (Alcántar *et al.*, 2007).

Etchevers (1999) menciona que la demanda de muchos de los nutrientes puede ser satisfecha por la fertilidad intrínseca de los suelos, particularmente, cuando los rendimientos esperados son bajos, así como el abastecimiento que hace el suelo de varios nutrientes, específicamente de los macronutrientes no es suficiente para satisfacer la demanda de los cultivos. Asimismo, entre los elementos que con mayor frecuencia se encuentran en déficit en los suelos, están el nitrógeno, el fósforo y el potasio, y con menor frecuencia el boro y el magnesio.

4.6 Funciones de los nutrientes en las plantas

4.6.1 Nitrógeno

Aunque el N_2 comprende el 78% de la atmósfera, en esta forma química no lo pueden asimilar las plantas, excepto aquellas que tienen la capacidad de llevar a cabo la fijación biológica de este elemento en asociación simbiótica con bacterias fijadoras de nitrógeno. A diferencia de otros nutrientes, el N no se encuentra en las rocas. Las fuentes primarias de este elemento para los ecosistemas terrestres son los iones amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) que están disueltos en el agua de lluvia y la fijación biológica del N que realizan los microorganismos.

El nitrógeno es un constituyente de muchos componentes de la célula, entre los que se incluyen los aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos; y junto con el carbono, es el nutriente que las plantas requieren en mayor cantidad (Mengel y Kirkby, 2001).

La demanda de nitrógeno por los árboles es muy alta y la respuesta a la falta de nitrógeno probablemente es la forma más general de deficiencia mineral en árboles. Durante el rompimiento de la yema en primavera ocurre una movilización de nitrógeno a las yemas acompañada por una marcada disminución en el nitrógeno total en vástagos y ramas más viejas, sugiriendo que ocurre una hidrólisis de proteínas y que el nitrógeno soluble es translocado de estos tejidos al meristemo en desarrollo (Koslowski, 1971).

El contenido de nitrógeno de las plantas varía de acuerdo a los tejidos. Generalmente, el follaje contiene de 0.9 a 4.0% de N, mientras que la madera, en general, tiene menos del 0.5% de este elemento (Binkley, 1993).

4.6.2 Fósforo

Las plantas absorben el P en forma de fosfatos inorgánicos, principalmente, como aniones H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} . El pH del suelo controla la abundancia relativa de estas dos formas: el H_2PO_4^- se ve favorecido por un pH menor que 7, mientras que el HPO_4^{2-} lo estará por encima de este valor. La máxima asimilabilidad de fosfatos por las plantas se alcanza cuando el pH se mantiene entre 6 y 7. En suelos ácidos, el fósforo se insolubiliza con el aluminio, hierro y manganeso. La planta también, a través de sus enzimas, desprende los grupos fosfatos de los compuestos orgánicos y posteriormente los absorbe. Este elemento, a diferencia del N y del S, 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 (Salisbury y Ross, 1994; Binkley, 1993).

El fósforo (P) forma parte de los ácidos nucleicos y participa en la síntesis de proteínas. Como constituyente del ATP y muchas coenzimas (e. g. NAD, FAD) interviene en todos los procesos metabólicos de transferencia de energía (Binkley, 1993). Koslowski (1971), señala que la aplicación de fósforo durante una estación de crecimiento incrementa el contenido de reservas en el árbol y estimula ampliamente el crecimiento durante el siguiente año.

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

4.6.3 Potasio

Los minerales de potasio (principalmente feldespatos de K) comúnmente se encuentran en las rocas y en las partículas de suelo, y el intemperismo de estos minerales constituye una fuente importante de K para los bosques. Parte del K se incorpora también a los ecosistemas en forma de sales disueltas en la precipitación pluvial (Fisher y Binkley, 2000).

El potasio representa a uno de los dos cationes que son absorbidos en mayor cantidad por las plantas, por lo que en la mayoría de los vegetales el contenido de K sobrepasa considerablemente a los cationes alcalinos y alcalinotérreos.

De todos los nutrimentos, el potasio (K) participa particularmente en procesos fisiológicos y bioquímicos relacionados con el movimiento de nutrimentos y carbohidratos, uso eficiente del agua y estimulación del crecimiento temprano; además, es vital para la persistencia del soporte, la longevidad, y la resistencia a sequía, heladas, plagas y enfermedades (Mengel y Kirkby, 2001).

Los árboles requieren potasio en grandes cantidades. El potasio cataliza reacciones celulares y una deficiencia de éste impide el metabolismo del nitrógeno y la translocación de carbohidratos. Cuando se presentan deficiencias, el potasio se mueve de tejidos más viejos a los puntos de crecimiento (Koslowski, 1971).

4.7 Como obtienen las plantas los nutrimentos

Las plantas obtienen sus nutrimentos en tres formas distintas:

1. A través de las hojas
2. De la solución del suelo
3. De los iones intercambiables en la arcilla y en la fracción húmica (complejo coloidal) del suelo

Un suelo fértil suministra suficientes cantidades de nutrimentos en balance razonable. Para promover el desarrollo vegetal, los iones deben ingresar al sistema de la planta. La absorción de iones es más eficiente cuando: a) el suelo tiene una alta concentración de iones, b) está bien aireado y permite la difusión de O₂ al suelo y del CO₂ a la atmósfera, c) está suficientemente húmedo para permitir el contacto de los iones en solución con una mayor superficie radical (Ortiz, 1984).

4.8 Relación entre la concentración de un nutrimento y el crecimiento de una planta

Existe una relación entre la concentración de un nutrimento en el tejido de la planta y el crecimiento de la misma (Figura 1). Cuando un nutrimento está presente en bajas concentraciones en el tejido vegetal se dice que está deficiente y limita el crecimiento. En el extremo inferior de este intervalo de deficiencia la planta con frecuencia exhibe ciertas anomalías visibles y tales "síntomas de deficiencia" son característicos de un nutrimento en especial. A pequeños incrementos de las concentraciones en el tejido el nutrimento está aún lo suficientemente deficiente y limita el crecimiento de las plantas, pero no tanto como para producir síntomas de deficiencia. Esta condición es denominada "deficiencia moderada o hambre oculta" porque, aunque el crecimiento de la planta es reducido, la deficiencia nutrimental es difícil de diagnosticar a simple vista. Los análisis nutrimentales en las plantas con frecuencia son útiles para identificar esta condición. Cuando la disponibilidad de nutrimentos minerales no es limitativa, el crecimiento de las plantas alcanza un comportamiento constante, denominado abastecimiento

óptimo. La amplitud de tal intervalo varía entre diferentes nutrientes, pero es en este intervalo donde acontece la maximización del crecimiento. Cuando los nutrientes minerales están presentes en el medio de crecimiento en cantidades excesivas, las plantas pueden continuar tomando esos nutrientes, aunque no exista ya un incremento medible en el crecimiento; esta condición es denominada "consumo de lujo". Cuando las concentraciones de nutrientes en el tejido de las plantas alcanzan niveles extremadamente elevados, puede acontecer toxicidad nutricional y el crecimiento de la planta disminuye. El punto de concentración crítica se da entre la deficiencia moderada y el consumo de lujo, y correspondería a lo que se conoce como óptimo fisiológico (Landis *et al.*, 1989; Mengel y Kirkby, 2001).

4.9 Fuentes de nutrientes de las plantas

Los nutrientes de las plantas pueden ser suministrados al suelo al agregar los siguientes materiales:

1. Fertilizantes comerciales: inorgánicos (*e. g.* sulfato de amonio, urea sintética, nitrato de amonio, superfosfato y cloruro de potasio) y orgánicos (*e. g.* urea y cianamida de calcio)
2. Abonos orgánicos voluminosos y concentrados. Estos productos suministran materia orgánica en distintas cantidades (*e. g.* estiércol, materia fecal sólida y líquida, composta, cieno, sangre seca o molida)



Figura 1. Relación entre el crecimiento de la planta y la concentración de nutrientes en los tejidos de la planta (Mengel y Kirkby, 2001).

3. Cultivos de abonos verdes. La biomasa de éste tipo de cultivos agregan materia orgánica y nutrientes
4. Mejoradores del suelo. Usados en primer término para corregir condiciones desfavorables del suelo, como acidez o alcalinidad, y falta de estructura (e. g. La caliza molida corrige la acidez y suministra Ca aprovechable)
5. Herbicidas y fungicidas. Estos compuestos también agregan cantidades significativas de nutrientes (e. g. el caldo bordelés suministra Cu y Ca solubles) (Ortiz, 1984).

4.10 Fertilización y fertilizantes

Se denomina fertilización a la aportación de productos que suministran elementos nutritivos disponibles para las plantas en un plazo más o menos corto (Fuentes, 2002).

La fertilización tiene como objetivo conseguir altos rendimientos en las cosechas y producir buena calidad. Su acción consiste en:

- Mejorar el suelo como sustrato nutritivo
- Complementar el suministro natural, en ciertos casos deficiente, de elementos nutritivos.
- Restituir los elementos nutritivos que han sido extraídos por el propio cultivo o que han desaparecido por otros motivos (Finck, 1988).

Los fertilizantes son sustancias que se aplican directa o indirectamente a las plantas, para favorecer su crecimiento, aumentar su producción o mejorar su calidad.

Los fertilizantes deben:

- a) Favorecer el crecimiento. En la mayoría de los casos esto equivale a favorecer la multiplicación de la masa vegetal, aunque también significa regular su aumento, en el sentido de limitar el crecimiento de determinadas partes de la planta, para así obtener producciones más importantes
- b) Aumentar la producción. Lo que principalmente interesa es el producto neto (constituido por la masa cosechada); puede tratarse tanto de órganos vegetativos (*e. g.*, las hojas) como de órganos generativos (*e. g.*, los frutos)
- c) Mejorar la calidad. Se trata de mejorar la calidad comercial (valor en el mercado), la calidad nutritiva y de aumentar la resistencia de la planta frente a cualquier tipo de influencias nocivas para asegurar el crecimiento) (Finck, 1988)

Según su origen, los fertilizantes pueden ser minerales o químicos y orgánicos. De acuerdo al contenido de elementos primarios estos pueden ser simples o compuestos. Según su estado físico los fertilizantes pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos (Fuentes, 2002).

4.10.1 Fertilizantes nitrogenados

Los fertilizantes nitrogenados son aquellos productos químicos que contienen el elemento nutritivo nitrógeno en forma asimilable (especialmente como amonio o nitrato), o que lo suministran como producto de su transformación (Cuadro 1) (Finck, 1988).

Cuadro 1. Fertilizantes nitrogenados importantes

Fuente de N	Fórmula química	Contenido de N (%)
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21
Amoniaco anhidro	NH_3	82
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	34
Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	46
Solución de nitrato de amonio-urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	28-32
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	15.5
Nitrato de sodio	NaNO_3	16
Nitrato de potasio	KNO_3	13
Fosfato monoamónico	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	10
Fosfato diamónico	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	18
Fosfato nítrico	$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	20
Nitrato cálcico-amónico	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	26

FUENTE: Instituto de la potasa y el fósforo (1997).

4.10.2 Fertilizantes fosfatados

Los fertilizantes fosfatados son productos químicos que contienen fósforo asimilable en forma de anión fosfato, o lo producen por transformación.

Los materiales de partida que se utilizan para producir los abonos fosfatados son sobre todo los fosfatos naturales de diversos yacimientos, los minerales que contienen fosfatos y otros compuestos fosfatados (Cuadro 2) (Finck, 1988).

Cuadro 2. Tipos de fertilizantes fosfatados

Nombre comercial	Fórmula de la fracción P (riqueza del abono)	La fracción de P es soluble en	Contenido de P aprovechable (%)	Contenido (%) de P ₂ O ₅
Superfosfato	Ca(H ₂ PO ₄) ₂		8	18
Superfosfato triple	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	Agua (al menos 93%) el resto, en citrato neutro	22	50
Fosfato de Renania	3CaNaPO ₄ . (Ca ₂ SiO ₄)	Citrato amónico alcalino	11	26
Fosfato Thomas	Ca ₃ (PO ₄) ₂ . (Ca ₂ SiO ₄)	Ácido cítrico	7	15

FUENTE: Finck (1988).

4.10.3 Fertilizantes potásicos

Los fertilizantes potásicos son sustancias químicas que contienen el nutrimento potasio (K) en la forma asimilable de catión potásico, o que suministran cationes K^+ por transformación (Cuadro 3) (Finck, 1988).

Cuadro 3. Tipos de fertilizantes potásicos

Nombre comercial	Fórmula de la fracción K (fracción activa)	Contenido en % de K	Contenido en % de K_2O
Sal potásica natural (cainita)	KCl	11	13
Cloruro potásico (sal potásica tipo 40)	KCl	33	40
Cloruro potásico (sal potásica tipo 50)	KCl	42	50
Cloruro potásico (sal potásica tipo 60)	KCl	50	60
Sulfato potásico	K_2SO_4	42	50
Residuos potásicos	K_2SO_4 , K_2CO_3 , etc.	17	20

FUENTE: Finck (1988).

4.10.4 Fertilización en plantaciones arbóreas

En México, se puede mencionar el trabajo realizado por Millán (1971) quien evaluó el efecto de distintas densidades de plantación y la aplicación de nitrato de amonio (33.5%) en plantaciones de *Pinus patula* y *Pinus leiophylla* en Uruapán, Michoacán. El fertilizante se aplicó al momento del establecimiento de la plantación, a razón de 30 y 60 kg ha⁻¹ de nitrógeno. En sus resultados señala que *P. patula* se comportó mejor en cuanto a crecimiento en altura que *P. leiophylla*, a partir del segundo año de establecida la plantación, esto debido a la fertilización y al espaciamiento de 75 por 75 cm; la respuesta fue la misma en ambas especies, con las dosis de 30 y 60 kg ha⁻¹ de nitrógeno.

Turner *et al.* (2002), evaluó la respuesta a la aplicación de fósforo de dos fertilizantes fosfatados, estos fueron superfosfato y roca fosfatada, aplicados a una razón de 96 kg ha⁻¹, después de 50 años en plantaciones de *Pinus radiata* en New Southwales, Australia. Se observó un aumento significativo en biomasa de 380 ton ha⁻¹ comparado con 278 ton ha⁻¹ en el tratamiento testigo.

Crous *et al.* (2009) diseñaron un ensayo para determinar el tiempo óptimo y la tasa de aplicación de fósforo (P) y potasio (K), para mitigar la declinación en el crecimiento observada en rodales de *Pinus patula*, en el bosque Usutu. El muestreo se realizó a la edad de rotación de 15 años. Aplicaron fertilizantes con P y K en tres cantidades 20/20, 40/40 y 80/80 kg P/K ha⁻¹. Los fertilizantes se aplicaron al momento del establecimiento de la plantación y cinco años después del establecimiento de la plantación. En sus resultados mencionan que la cantidad de fertilizante aplicado tuvo un mayor efecto sobre el crecimiento del árbol y la producción de madera, más que el tiempo de aplicación. Hubo evidencia que la aplicación de fertilizante inicial produjo más madera que la aplicación de fertilizante posterior. Asimismo, la aplicación de 80/80 kg P/K ha⁻¹, incrementó significativamente el diámetro a la altura del pecho de 20.0 cm a 23.0 cm, la altura del árbol de 19.6 m a 20.4 m, y la producción de volumen por 83 m³ ha⁻¹ (29%).

Por otra parte, Dovey (2009) realizó un estudio para conocer el efecto de tratamientos silviculturales sobre la producción de volumen, forma del árbol, densidad de la madera y contenido nutrimental en el tallo a una edad de rotación de 15 años en Swazilandia. Para ello aplicó fertilizantes con fósforo (P) y potasio (K) a razón de 80/80 (20 kg ha⁻¹ de P y K se aplicaron al momento de la plantación y 60 kg ha⁻¹ de P y K se aplicaron después de cinco años del establecimiento de la plantación). Reporta que a la edad de 15 años la aplicación de 80/80 kg ha⁻¹ de P y K incrementó la producción de madera en 32% (89.5 m³ ha⁻¹) comparado con el testigo. Los fertilizantes disminuyeron la densidad de la madera en 7% al nivel del suelo y en 5% a lo largo del tallo. Así también, la concentración de N, P y K en el tallo y la corteza incrementaron conforme se incrementó la altura del tallo.

De acuerdo a la revisión de trabajos relacionados a la fertilización de árboles de especies forestales, se hace evidente que la manera de llevar a cabo esta misma, no sigue un patrón fijo. Se distingue que, no en todos los casos se aplican los mismos nutrimentos, ya que algunos autores reportan fertilizaciones únicamente con nitrógeno, mientras que otros solamente con fósforo y algunos más con fósforo y potasio. Por otra parte, las dosis de fertilización utilizadas en cada caso son distintas. Ya que, por ejemplo, para el caso de fósforo las dosis aplicadas están en un intervalo de 20 a 96 kg ha⁻¹. Lo anterior hace suponer, que al momento de realizar la fertilización de una determinada especie, hay que considerar las características ambientales particulares y predominantes en cada sitio, las cuales no en todos los estudios se reportan; ya que esto, nos permitiría dilucidar mejor la dosis y los tipos de fertilizantes a emplear. Otro aspecto a considerar es, el tiempo de evaluación de la fertilización, dado que en ocasiones los periodos de evaluación son demasiados largos, por lo que es necesario implementar técnicas, métodos e incluso variables que permitan detectar los efectos de la fertilización en un lapso de tiempo corto. Así también, de ser posible, las evaluaciones de la fertilización, deberían realizarse en relación con la etapa de desarrollo del

árbol, ya que de esta manera, se podrían determinar los requerimientos nutrimentales por etapa, para las diferentes especies con las cuales se trabaje.

4.11 Análisis vegetal

El análisis vegetal se emplea para evaluar el estado nutrimental de las plantas e indirectamente la disponibilidad de nutrimentos en el suelo. Se puede medir la concentración total de un elemento en la planta o una fracción de ésta. El análisis de plantas se emplea, principalmente, para diagnosticar deficiencias nutrimentales y como base para formular recomendaciones de fertilización.

El órgano que se usa con mayor frecuencia con el propósito de diagnosticar el estado nutrimental de los cultivos es la hoja, de ahí que también se le llame análisis foliar (Etchevers, 1999). Segura *et al.*, (2006) mencionan que el análisis foliar, en conjunto con otras variables del sitio, ayuda a diagnosticar o a validar la presencia de síntomas visuales de deficiencias de nutrimentos, antes de que sean de importancia económica. Este tipo de análisis también se utiliza como una herramienta para determinar el progreso de programas de fertilización y nutrición en plantaciones forestales. El proceso de diagnóstico a través del análisis de tejidos puede hacerse (1) comparando las concentraciones de tejidos afectados y no afectados, (2) analizando la relación entre el estado nutricional (concentración en los tejidos) y el crecimiento de los árboles, (3) determinando el balance de nutrimentos en los tejidos, calculados a través de relaciones entre ellos y (4) mediante el desarrollo de técnicas que emplean reacciones bioquímicas en los tejidos.

4.12 Análisis de vectores

Solla-Gullón *et al.* (2004) mencionan que el estado nutricional de una planta es un parámetro crucial para conocer la calidad de la misma y esencial a la hora de plantearse posibles actuaciones de corrección de nutrimentos. A menudo es estudiado, tanto en masas forestales como en cultivos agrícolas y hortícolas, para identificar y corregir las posibles deficiencias o excesos de nutrimentos. Hasta la fecha se han desarrollado varios métodos que evalúan

el estado nutricional de las plantas, como el método de niveles críticos, técnicas basadas en equilibrios nutricionales, sistema DRIS y el análisis de vectores. Todos estos métodos difieren en su sensibilidad y utilidad, pero el análisis de vectores es una herramienta que enlaza el estado de nutrientes y el crecimiento de la planta como respuesta a un determinado tratamiento, ya sea experimental o de manejo.

El análisis de vectores involucra comparaciones de concentración de nutrientes, contenido de nutrientes y algunas medidas de crecimiento de las plantas en un formato gráfico conocido como un diagrama vector. Debido a que el análisis de vectores es comparativo, el o los diagramas generados pueden ser interpretados, independientemente de porcentajes o niveles críticos predeterminados, proporcionando por consiguiente muchas ventajas sobre otros métodos. Weetman (1989) señala que el análisis de vectores permite detectar y aislar el efecto de dilución, desbalance nutricional, interacción de elementos y ofrece información diagnóstica exacta.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del experimento

El trabajo se realizó de agosto de 2009 a octubre de 2010, en el Conjunto Predial Forestal, Fracción Rancho Chichicaxtla, en el predio Los Corrales, paraje La Tronconera, municipio de Aquixtla, Puebla, México; que se ubica a los 19° 43' 20.9" de Latitud Norte y 97° 59' 35.6" de Longitud Oeste, a 2,980 m de altitud.

5.2 Diseño experimental

Se utilizó un experimento factorial completo 3^3 con un diseño experimental completamente al azar. Los factores de variación que se probaron fueron nitrógeno, fósforo y potasio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Factores de variación del experimento.

Factores	Niveles (kg ha ⁻¹)		
	0	1	2
N	0	138	185
P	0	15	21
K	0	123	164

La combinación de los niveles de los tres factores produjo un total de 27 tratamientos (Cuadro 5), y se establecieron tres repeticiones, lo que originó un total de 81 unidades experimentales (parcelas). Cada una de 97.5 m² (15 m largo x 6.5 m ancho) con un espaciamiento de 2 m entre parcelas, y dentro de cada parcela se dejó 1 m de bordo, quedando un área útil de 58.3 m² (13 m largo x 4.5 m ancho).

Las dosis de los nutrientes que se reportan de los tratamientos de fertilización y de los análisis foliares, se citan como elemento solo, es decir, Nitrógeno (N), Fósforo (P), y Potasio (K).

Cuadro 5. Tratamientos de fertilización aplicados

Tratamientos	N	P	K
	kg ha ⁻¹		
T1	0	0	0
T2	0	0	123
T3	0	0	164
T4	0	15	0
T5	0	15	123
T6	0	15	164
T7	0	21	0
T8	0	21	123
T9	0	21	164
T10	138	0	0
T11	138	0	123
T12	138	0	164
T13	138	15	0
T14	138	15	123
T15	138	15	164
T16	138	21	0
T17	138	21	123
T18	138	21	164
T19	185	0	0
T20	185	0	123
T21	185	0	164
T22	185	15	0
T23	185	15	123
T24	185	15	164
T25	185	21	0
T26	185	21	123
T27	185	21	164

5.3 Generalidades experimentales

5.3.1 Dosis de fertilización

La determinación de la dosis de fertilización (Cuadro 5) se realizó con base a la determinación del análisis foliar y una estimación de producción de

biomasa anual de la especie. Para ello, se hizo un recorrido al lote experimental, con la finalidad de elegir diez sitios representativos. En cada sitio de muestreo se seleccionaron dos árboles de tamaño similar a todo el lote, en los cuales se obtuvo una muestra de follaje del crecimiento anual del ciclo anterior, es decir, del año 2009. Se conservó en hielo para su transporte al laboratorio. En el laboratorio se secó con papel absorbente y se metieron en bolsas de papel para secarse en una estufa a 80°C durante 72 horas. Posteriormente, se sacaron y se determinó el peso seco. Se obtuvo el promedio de peso seco de las 20 muestras, el cual fue de 2250 g.

Cuadro 6. Valores promedio del análisis foliar al inicio del experimento (antes de fertilizar) y de biomasa anual estimada para *Pinus patula*.

N	P	K	Biomasa estimada
	%		(g/año/árbol)
1.30	0.12	0.59	2250

5.3.2 Fertilización

La aplicación de los fertilizantes se realizó en forma líquida en una sola aplicación. Los fertilizantes se aplicaron en doce puntos distribuidos homogéneamente dentro de cada parcela (Figura 2). Se aplicaron el 25 de octubre de 2009 y esta fecha se consideró como el día uno del experimento.

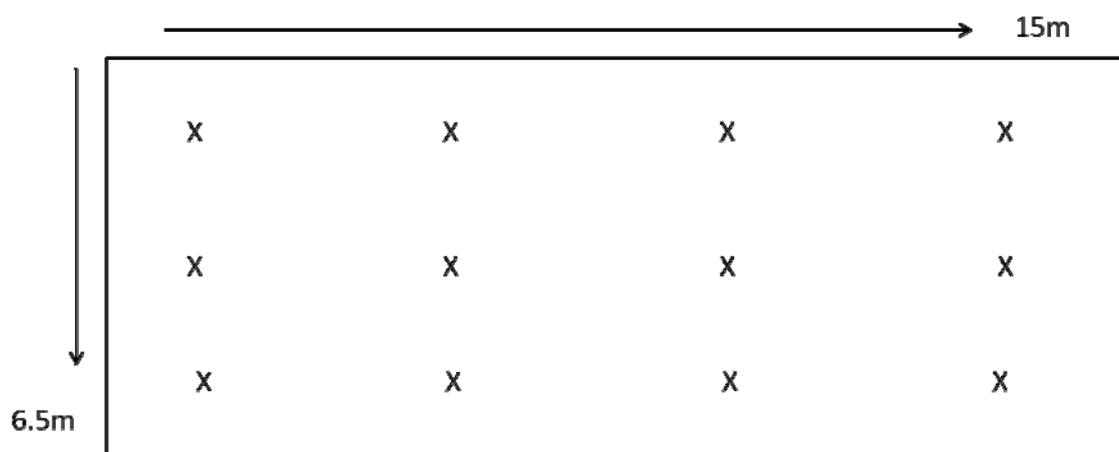


Figura 2. Arreglo de los puntos en los cuáles se aplicaron los fertilizantes dentro de cada parcela experimental.

5.3.3 Fuentes de Fertilizantes

La concentración nutrimental de los fertilizantes aplicados, se reportan en porciento de N, P₂O₅ y K₂O. Se utilizaron los siguientes fertilizantes: sulfato de potasio(0-0-50), fosfato monopotásico (0-52-34.5), nitrato de potasio (12-0-44), nitrato de magnesio (11-0-0+15 Mg), fosfonitrato (33-0-0), fosfato monoamónico (12-61-0), sulfato de amonio (20.5-0-0), sulfato de magnesio (0-0-0+9 Mg), ácido fosfórico (85%). Se aplicaron micronutrientes con base a la solución de micronutrientes de Hewitt y Smith (1975), al 100%.

5.4 Criterios de muestreo

Para la evaluación de volumen y peso seco de follaje nuevo, se realizaron cuatro muestreos. El primero se realizó a los 150 días después de la fertilización (DDF). Los siguientes muestreos se realizaron cada 30 días. En todos los muestreos se incluyeron dos repeticiones del experimento. Se seleccionó un árbol por repetición. De cada árbol se tomaron dos muestras de follaje del tercio superior de la copa, en ramas con exposición solar plena; solamente se colectó el follaje correspondiente al último flujo de crecimiento (2010). El follaje nuevo se identificó con base a la coloración clara que presentó el desarrollo de la yema apical de los puntos de crecimiento. El follaje del ciclo anterior se identificó fácilmente por el color café oscuro que se observó en la parte inferior a la yema del crecimiento nuevo que aún no brotaba (Figura 3).



Figura 3. Follaje o brote nuevo de árboles de *P. patula*

5.5 Procesamiento de muestras

Las muestras de follaje colectadas se colocaron en bolsas de polietileno, previamente etiquetadas para su identificación y se colocaron en una hielera (4°C). Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de Química de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, México, para la determinación cuantitativa; una vez ahí, se lavaron con agua destilada para su posterior secado.

5.6 Variables evaluadas

5.6.1 Área basal

Se obtuvo el diámetro normal (1.30 m altura) de los árboles por parcela experimental, mediante una cinta diamétrica. La medición del diámetro inicial se realizó a los 122 DDF y el registro del diámetro final se hizo a los 360 DDF. Con estos datos se calculó el área basal para cada individuo y mediante la suma de ésta de todos los individuos por unidad experimental, se calculó el área basal por parcela, con la siguiente fórmula:

$$\text{Área basal} = (\pi/4) \times \text{Dap}^2 = 0,7854 \times \text{Dap}^2$$

Donde:

π = Valor de Pi (3.1416)

Dap = Valor de diámetro normal (1.30 m) de cada árbol

Con los datos de área basal, se calculó la tasa relativa de crecimiento promedio (TRCP) para área basal, con la siguiente fórmula:

$$\text{TRCP} = \frac{\text{LnABF} - \text{LnABI}}{T_2 - T_1}$$

Donde:

LnABF = Logaritmo natural de área basal final

LnABI = Logaritmo natural de área basal inicial

T_2 y T_1 = Tiempo entre las mediciones del área basal ($T_2 - T_1 = 8$ meses)

$T_1 = 122$ DDF; $T_2 = 360$ DDF

5.6.2 Volumen

Al crecimiento nuevo del brote se le estimó el volumen con una probeta graduada, con una aproximación de 2 mL. El volumen se estimó mediante el método de Arquímedes (Tippens, 2001).

5.6.3 Peso seco

Para la obtención del peso seco, las muestras se colocaron en una estufa con convección de aire a 70 °C hasta obtener peso constante (48 h); posteriormente, las muestras se pesaron en una balanza digital con aproximación a 0.01 g.

5.7 Tasa Relativa de Crecimiento Instantánea (TRCI)

Con los datos de peso seco y volumen de follaje nuevo, de cada tratamiento, se calculó la Tasa Relativa de Crecimiento Instantánea (TRCI), con base a la siguiente ecuación de regresión lineal simple:

$$\text{LnVOLFN} = T$$

$$\text{LnPSFN} = T$$

Donde:

Ln = Logaritmo natural

PSFN= Peso seco de follaje nuevo (g)

VOLFN = Volumen de follaje nuevo (mL)

El análisis de varianza que se realiza para obtener la regresión proporciona el error estándar, por lo que se determinó el intervalo de confianza t-Student con un α de 0.05.

T = Tiempo (días) entre las mediciones de peso seco y volumen de follaje nuevo (150, 179, 208 y 236 DDF).

5.8 Análisis vegetal

El análisis vegetal se realizó solamente para follaje maduro (último flujo de crecimiento del año 2009). Para ello se colectaron muestras de follaje del tercio superior de la copa, en dos árboles por parcela experimental a los 150 DDF. De cada muestra se obtuvo el peso seco de 100 acículas representativas. Con esta muestra de acículas se realizó el análisis vegetal. Los nutrimentos que se analizaron fueron N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, B y Mn. En este análisis, la matriz orgánica se mineralizó mediante digestión húmeda con una mezcla de ácido sulfúrico-salicílico y posterior destilación, para nitrógeno por arrastre de vapor, por el procedimiento semimicrokjeldahl. El resto de los macronutrimentos y todos los micronutrimentos fueron determinados por espectrofotometría de emisión, previa digestión en una mezcla de ácido perclórico-nítrico (1:2) (SEMARNAP, 2002).

5.8.1 Estado nutricional de los árboles

La evaluación del estado nutricional de los árboles se realizó mediante el método gráfico de análisis de vectores (Timmer y Stone, 1978). En este método la concentración de nutrimentos, la extracción o contenido de éstos (concentración x peso) y el peso de las acículas se reportan en forma relativa al tratamiento testigo. Las variables mencionadas, se representan en una gráfica por separado para cada nutrimento, y la trayectoria que va del testigo al valor de la parcela fertilizada se emplea para determinar el estado de cada nutrimento. El peso seco de acículas se estimó a partir del peso de 100 acículas representativas de cada unidad experimental. Este método puede ser usado en el diagnóstico de deficiencias nutrimentales, consumos de lujo, toxicidades o diluciones de nutrimentos foliares por la producción de biomasa.

5.9 Análisis de datos

Los datos obtenidos se sistematizaron y posteriormente se realizó el análisis de varianza con el programa estadístico SAS (2002). El análisis de varianza para las variables volumen y peso seco de follaje nuevo, se realizó a los 236 DDF, es decir, en el último muestreo. El modelo estadístico empleado para analizar éstas variables fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + N_i + P_j + T_k + N_iP_j + N_iT_k + P_jT_k + N_iP_jT_k + \epsilon_{ijk}$$

En donde:

Y_{ijk} = observación tomada de la i-ésima dosis de nitrógeno, j-ésima dosis de fósforo y k-ésima dosis de potasio

μ = efecto de la media general

N_i = efecto de la i-ésima dosis de nitrógeno

P_j = efecto de la j-ésima dosis de fósforo

T_k = efecto de la k-ésima dosis de potasio

N_iP_j = efecto de la i-ésima dosis de nitrógeno y la j-ésima dosis de fósforo

N_iT_k = efecto de la i-ésima dosis de nitrógeno y la k-ésima dosis de potasio

P_jT_k = efecto de la j-ésima dosis de fósforo y la k-ésima dosis de potasio

$N_iP_jT_k$ = efecto de la i-ésima dosis de nitrógeno, la j-ésima dosis de fósforo y la k-ésima dosis de potasio

ϵ_{ijk} = efecto del error aleatorio

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis de varianza realizado para las variables volumen y peso seco de follaje nuevo de árboles de *Pinus patula*, no se determinó significancia estadística, llamando la atención el coeficiente de variación muy alto, que se presentó en cada una de las variables (Anexo 1 y 2). Por lo anterior, se procedió a estudiar los datos para detectar el motivo por el que se presentó una variación alta e impidió determinar significancia estadística. Para ello, el lote experimental, se dividió en bloques de tres hileras de parcelas cada uno y un bloque con dos hileras de parcelas únicamente, en forma perpendicular a la pendiente del terreno (Anexo 4). Las parcelas experimentales que se localizaban en cada bloque (Anexo 3), se sumaron y se calculó la media para la variable volumen de follaje nuevo (Cuadro 7). Se observó que los valores promedio para cada uno de los bloques fueron mayores en las parcelas localizadas en la parte media y baja del área experimental, más que en la parte alta. La diferencia de valores fue de aproximadamente el 36%. Así, también, fueron seleccionados algunos tratamientos cuyas repeticiones estuvieran localizadas en cada uno de los bloques, como por ejemplo los tratamientos 8 y 17 (Anexo 4). En el caso del tratamiento 17, sus repeticiones se localizaron dentro del mismo bloque (1), y pudo constatarse nuevamente que las parcelas localizadas en la parte baja del bloque presentaron valores mayores de volumen (37.5 y 52 mL), comparadas con la parcela localizada en la parte alta dentro del bloque (31.7mL). Por otra parte, las repeticiones del tratamiento 8 se encontraban distribuidas en los bloques uno, dos y tres respectivamente, y de igual manera se observó un valor de volumen mayor en la repetición localizada en el bloque de la parte media (73.7 mL) comparada con la repetición del bloque de la parte alta del lote experimental (21.2mL). Se observó que en el lote experimental existió un gradiente de norte a sur, donde el suelo más productivo fue el de la parte sur (baja)...De acuerdo a esto, se puede argumentar que la variación tan amplia, que se presentó en el análisis de varianza se debió a la pendiente y heterogeneidad de productividad del terreno. Por tanto, esta misma, se debió haber separado y al no hacerlo, no permitió identificar la respuesta en crecimiento del brote de los árboles a la fertilización.

Asimismo, a pesar de que en principio el área experimental se eligió por presentar una mayor homogeneidad en cuanto a edad y dimensiones de los árboles, estos resultados, señalan que el diseño experimental utilizado no fue el adecuado para detectar con precisión las posibles diferencias debidas a la aplicación de los tratamientos; por tanto, se puede inferir que el diseño experimental adecuado que corresponde sería bloques completos al azar o cuadro latino. El diseño apropiado permitiría separar la variación inherente al suelo de la variación causada por la aplicación de los tratamientos. No obstante, es pertinente describir y profundizar el conocimiento del proceso que se mostró con las variables medidas, como son volumen y peso seco de follaje nuevo.

Cuadro 7. Volumen de follaje nuevo en árboles de *P. patula* por bloque (perpendicular a la pendiente del terreno) experimental.

Bloques	Volumen Media (mL)	Orientación
1	41.38	Norte (alta)
2	50.17	Media
3	49.30	Media
4	56.43	Sur (baja)

6.1 Volumen

Desglosando el factor tratamiento del factorial, se determinó respuesta significativa al 9% en la variable volumen de follaje nuevo de árboles de *P. patula* (Anexo 1), para el efecto simple de P (Figura 4). Se observa que el nivel cero de P fue el que promovió un volumen de follaje nuevo mayor, a pesar que el nivel de P disponible en el suelo fue deficiente ($< 5 \text{ mg kg}^{-1}$ de P – Olsen). Se infiere que el P en el suelo no fue un factor limitante con relación a la proporción de crecimiento del árbol, por consiguiente la fertilización a niveles crecientes con este nutrimento, ocasionó solamente un incremento muy pequeño, que no se alcanzó a detectar en esta variable. Además, cabe señalar que entre las principales funciones del P se encuentran la división celular, la formación y transferencia de energía (ATP) (Binkley, 1993), lo cual

explica el poco efecto que este nutrimento ejerció en el aumento en volumen de follaje de los árboles. Posiblemente, el P presente en la planta, se canalizó a mantenimiento de raíz, de tal manera, que el efecto de este nutrimento no se manifestó en el aumento en volumen de follaje nuevo de árboles de *P. patula*.

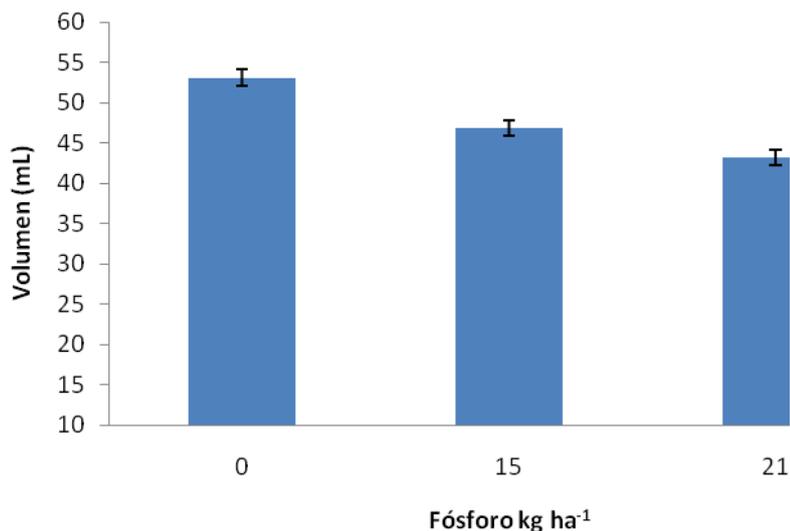


Figura 4. Efecto del fósforo en el volumen de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula*.

6.2 Peso seco

Desglosando el factor tratamiento del factorial, se detectaron diferencias estadísticas significativas al 8 y 12% de probabilidad en la variable peso seco de follaje nuevo de árboles de *P. patula*, (Anexo 2). Estas diferencias, se observaron para el efecto simple de N, así como para la interacción P*K (Figuras 5 y 6). En el caso de N, se aprecia que la respuesta obtenida con 138 kg ha⁻¹ de N fue mejor que con la aplicación de cero de N. Esto muestra que los árboles respondieron a la aplicación de este nutrimento de una manera positiva. No obstante, si se aplican cantidades de N por encima de 138 kg ha⁻¹, hay una reducción en el peso seco de crecimiento nuevo de los árboles. Este comportamiento refiere que el N aplicado a dosis mayores de 138 kg ha⁻¹ favoreció la síntesis y formación de nuevo protoplasma, pero no la síntesis de compuestos de N de elevado peso molecular (e.g. proteínas), mismos que hubieran causado un aumento de materia seca.

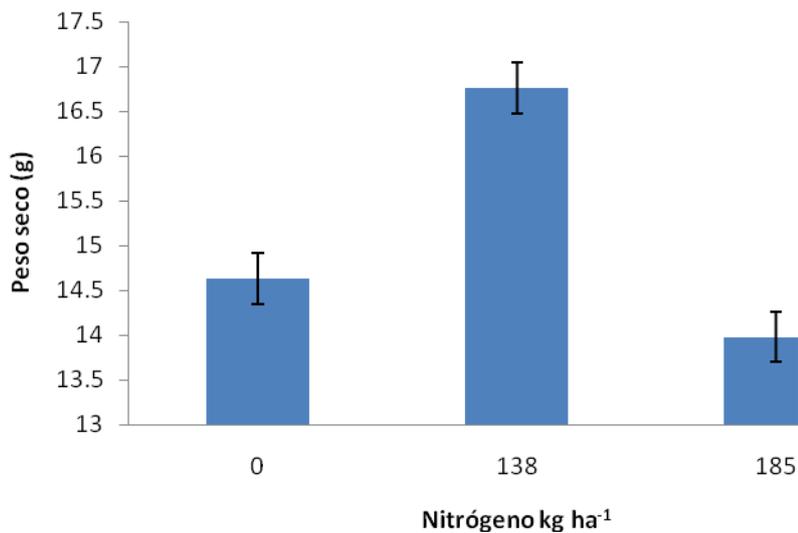


Figura 5. Efecto del nitrógeno en el peso seco de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula*

En la interacción P*K, se puede observar que el valor mayor de peso seco se presentó al combinar un nivel de 15 y 123 kg ha⁻¹ de PK, respectivamente (Figura 5). Esto enseña que hay un efecto de la aplicación de P en combinación con la aplicación de K, pero únicamente a los niveles antes mencionados. A niveles mayores tanto de P como de K, se observó una reducción en el peso seco de follaje nuevo. Este resultado, determina que los árboles son capaces de tolerar niveles altos de fertilizantes en el suelo. No obstante, al existir una alta disponibilidad de nutrientes, la planta no puede frenar la absorción de los mismos, por tanto la planta invierte energía metabólica para realizar la absorción. Esto a la vez reduce la cantidad de energía destinada al crecimiento de la planta; por lo tanto, aunque hay un exceso de nutrientes, esto no se refleja en un mayor aumento en peso seco de los árboles (Mengel y Kirkby, 2001). Sin embargo, dado que no se observaron síntomas de toxicidad en los árboles, se puede inferir que los mismos se encontraban en el intervalo de consumo de lujo.

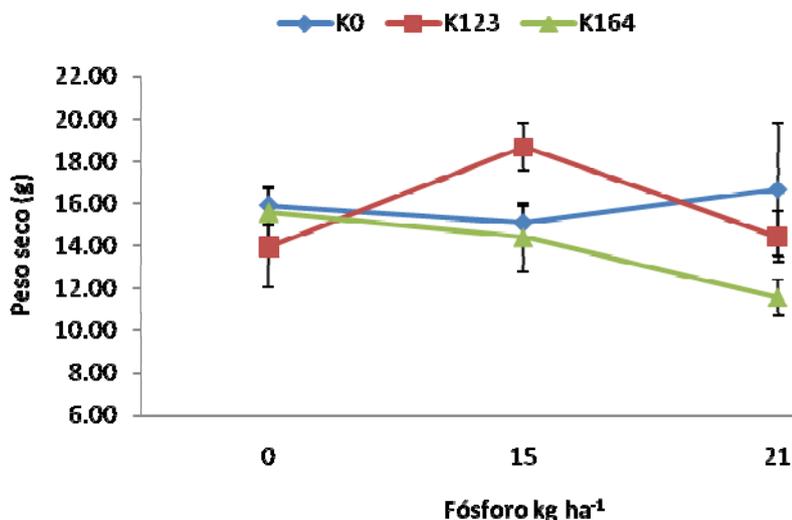


Figura 6. Efecto de la interacción fósforo*potasio en el peso seco de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula*

6.3 Tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI)

6.3.1 Volumen

La tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de volumen de follaje nuevo de árboles de *P. patula*, en cada uno de los 27 tratamientos aplicados se muestran en la Figura 7. Se aprecia que hubo efecto de la fertilización en el crecimiento en volumen de los árboles, ya que al comparar la tasa de crecimiento obtenida en el tratamiento testigo con 0-0-0 kg ha⁻¹ de NPK, se observó que ésta fue menor a la tasa obtenida con la dosis de 185-0-0 kg ha⁻¹ de NPK (Figura 8). Se estimó que el N ocasionó un incremento mayor del volumen del brote por la misma unidad de peso, indicando esto, que el incremento en volumen fue consecuencia de un mayor contenido de agua. Por consiguiente, se consideró que el N promovió un aumento en la succulencia del crecimiento nuevo de los árboles, lo cual se reflejó en un volumen mayor cuando se aplicó N (0.0255 mL mL⁻¹ día⁻¹), que sin la aplicación de este mismo (0.0224 mL mL⁻¹ día⁻¹). El efecto de succulencia se corroboró además con el volumen específico de follaje obtenido, el cual fue menor en el tratamiento testigo (10.04 mL g⁻¹) comparado con el de la dosis 185-0-0 kg ha⁻¹ de NPK (11.35 mL g⁻¹). Lo anterior demuestra que esta última dosis ocasionó que el follaje de crecimiento nuevo fuera menos denso. Ésta respuesta se explica, en parte, a que cuando el suministro de N es favorable para el crecimiento,

prevalece la tendencia a usar carbohidratos para formar más protoplasma y más células, más bien que para engrosar las paredes celulares, por lo que las células en tales condiciones serán grandes y de paredes delgadas. Dado que el protoplasma es en gran parte agua, en condiciones favorables para el crecimiento, las plantas con alto contenido de N contendrán una alta proporción de agua y poca materia seca, lo que genera más succulencia y por tanto un volumen mayor (Black, 1975), volumen específico mayor. Asimismo, cabe señalar que Kramer y Kozlowzki, (1979) mencionan que en bosques el nitrógeno constituye una de las diversas limitaciones para el crecimiento de los árboles. Otra posible causa en la respuesta observada, se puede atribuir a la acidez predominante en el lote experimental, la cual de acuerdo a un análisis de suelo preliminar (Anexo 5), se encuentra en pH 5.5 a 5.7, lo cual indica que es un suelo ácido. La acidez en suelos forestales, se da como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la capa de hojarasca y la consiguiente lixiviación de las bases del suelo mineral superficial (Pritchett, 1991) durante la estación de lluvias. A pH ácido, la población bacteriana se reduce y aunque aumenta la población de hongos, éstos no son tan eficaces en los procesos de degradación orgánica, lo cual explicaría la alta cantidad de materia orgánica que se cuantificó en el lote experimental, misma que de acuerdo al análisis de suelo fue del 20% (Anexo 5). Por consiguiente, al existir una lenta mineralización de la materia orgánica, es de esperarse que el N no estuviera en forma disponible para ser absorbido por los árboles (N orgánico). Por lo anterior, al suministrar al suelo una cantidad de N en forma inorgánica (N-NO₃), este nutrimento estuvo mayormente disponible para los árboles, y por ende promovió un aumento en la absorción de N-NO₃ y en el volumen de crecimiento nuevo. Esto señala, nuevamente, que la aplicación de los tratamientos de fertilización tuvo un efecto benéfico en los árboles.

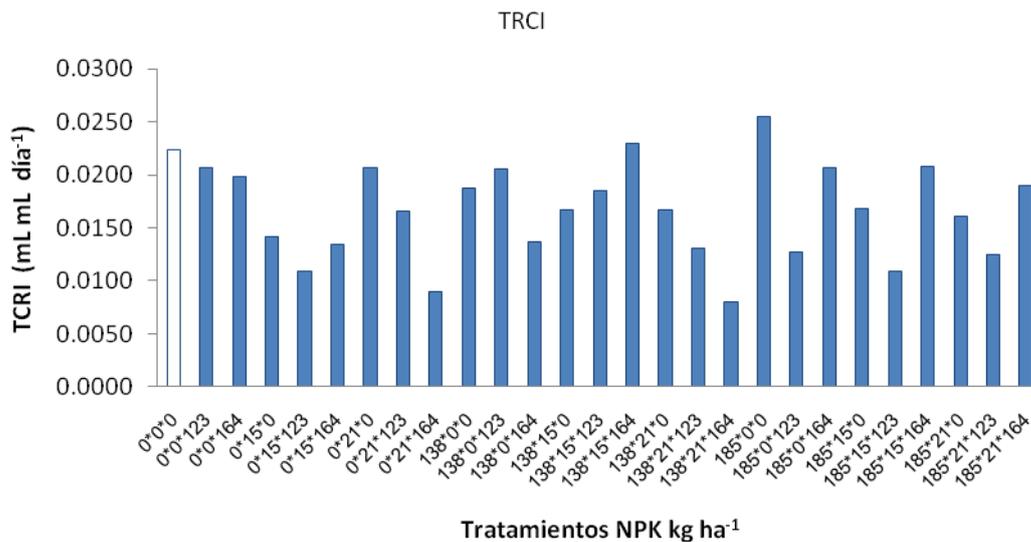


Figura 7. Tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de volumen de follaje nuevo en árboles de *P. patula* de 10 años. Aquixtla, Pue., México.

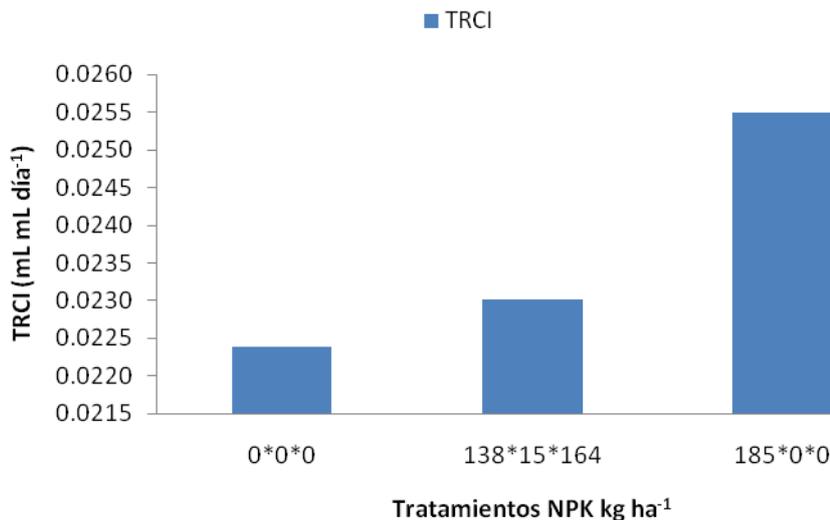


Figura 8. Mejores tratamientos de tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de volumen de follaje nuevo en árboles de *P. patula*.

6.3.2 Peso seco

En el caso de la tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) para peso seco de follaje nuevo de árboles de *P. patula* (Figura 9), se puede notar que las combinaciones que produjeron las mejores respuestas fueron 138-0-0 y 138-0-123 kg ha⁻¹ de NPK, respectivamente, comparadas con el tratamiento testigo con 0-0-0 kg ha⁻¹ de NPK (Figura 10). El N produjo nuevamente una

respuesta positiva en el crecimiento de los árboles, pero en un nivel ligeramente más bajo comparado con la TRCI para volumen. La respuesta fue mucho mejor al combinarse el N con el K. Este comportamiento se puede explicar por el hecho de que el N es convertido en compuestos orgánicos en las raíces de las plantas, principalmente amidas y aminoácidos, los cuales, posteriormente, son convertidos en proteínas, y finalmente en materia seca. Por otra parte, la translocación de carbohidratos a los sitios de crecimiento y por ende de mayor demanda se realiza principalmente por el potasio, por lo tanto al haber un buen suministro tanto de N como de K en la planta se favoreció el crecimiento de la misma. No olvidando también que un adecuado suministro de K en la planta favorece el metabolismo del N (Kramer y Kozlowski, 1979).

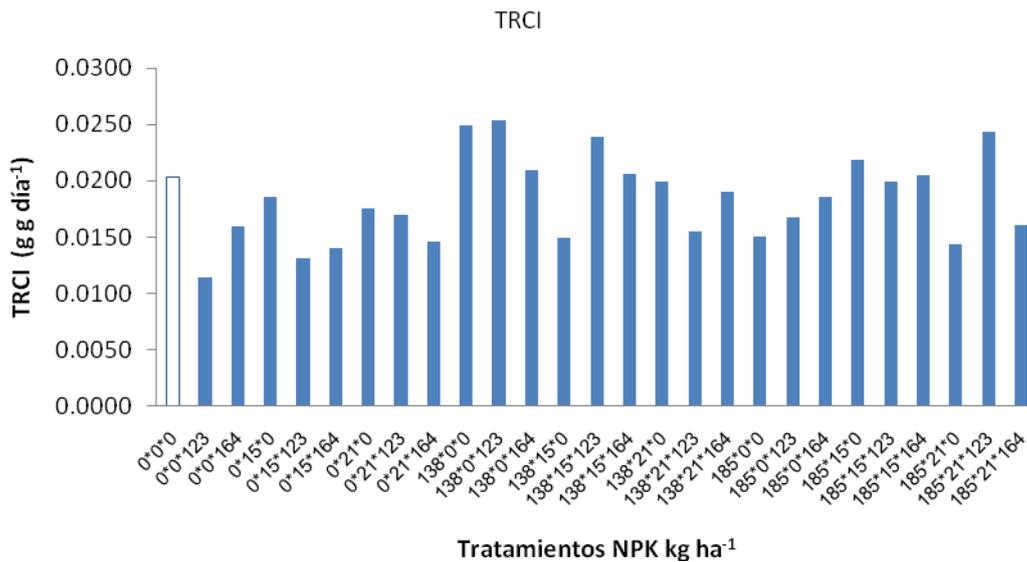


Figura 9. Tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de peso seco de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula* de 10 años. Aquixtla, Pue., México.

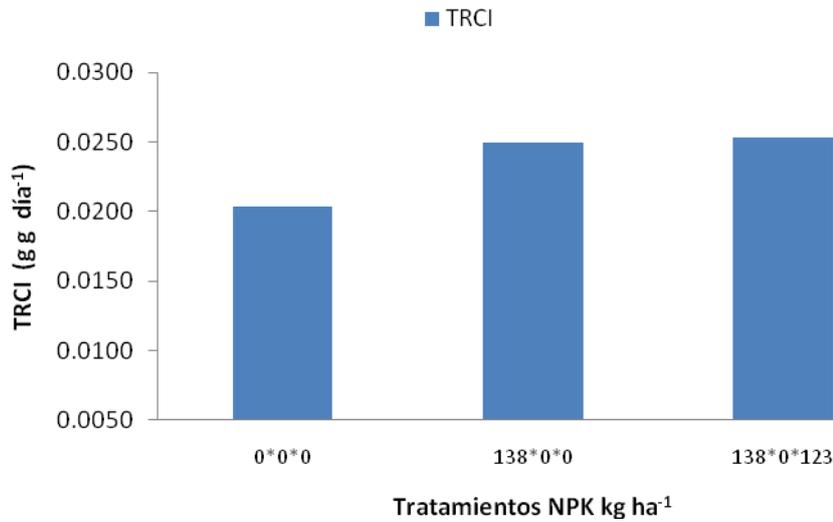


Figura 10. Mejores tratamientos de tasa relativa de crecimiento instantánea (TRCI) de peso seco de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula* de 10 años. Aquixtla, Pue., México.

6.4. Área basal

En el análisis de varianza que se realizó para la variable incremento de área basal (IAB) (ABF-ABI) de árboles de *P. patula*, se empleó el mismo modelo estadístico que para las variables volumen y peso seco. Además, se incluyó al área basal inicial de los árboles (ABI) como factor de variación, lo anterior con la finalidad de eliminar el efecto que esta última pudiera ejercer en el IAB. Los resultados del análisis de varianza indicaron que el ABI afectó significativamente ($p < .0001$) el IAB de los árboles (Anexo 6), de tal manera que este efecto no permitió detectar la respuesta de los tratamientos de fertilización aplicados. Sin embargo, cabe señalar, que la medición del ABI, se realizó a los 122 DDF, por lo que existe la posibilidad de que el ABI de los árboles, estuviera ya influenciada por los tratamientos de fertilización. Por otra parte, al realizar el análisis de varianza de tasa relativa de crecimiento promedio (TRCP) de IAB, aunque no se obtuvieron diferencias estadísticas significativas, se observó una tendencia de los árboles a incrementar su área basal con la aplicación del tratamiento 185-0-0 kg ha⁻¹ de NPK, comparado con el tratamiento testigo 0-0-0 kg ha⁻¹ de NPK (Figuras 11 y 112). Se puede inferir que el N promovió una mayor expansión de las células, lo cual ocasionó un aumento en el área basal de los árboles. Por otra parte, se observó un

efecto benéfico del P en combinación con N, el efecto del P en el aumento en área basal se explica por el hecho de que este propicia una mayor división celular, reflejándose entonces un aumento en el área basal de los árboles.

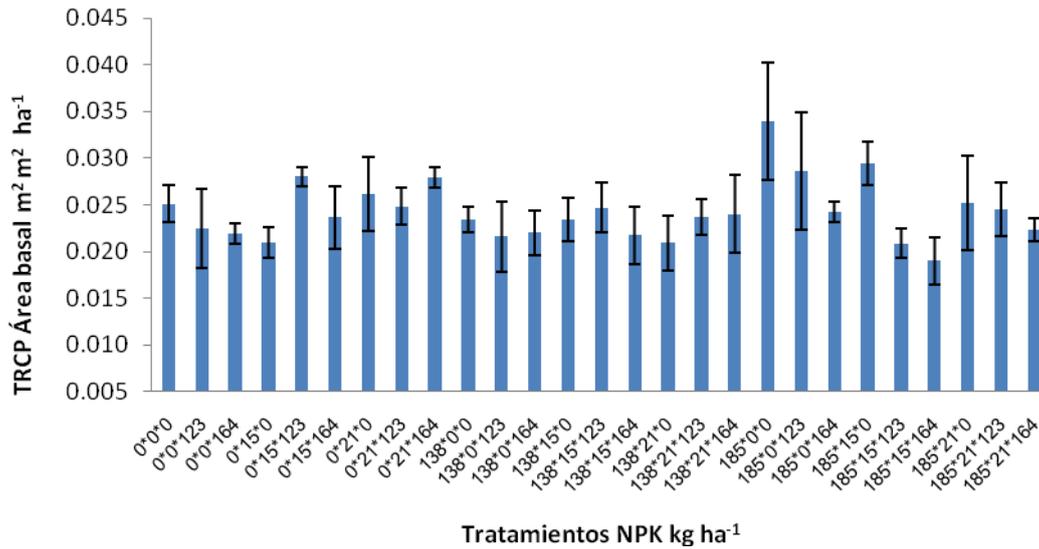


Figura 11. Tasa relativa de crecimiento promedio (TRCP) de árboles de *P. patula* de 10 años. Aquixtla, Pue., México.

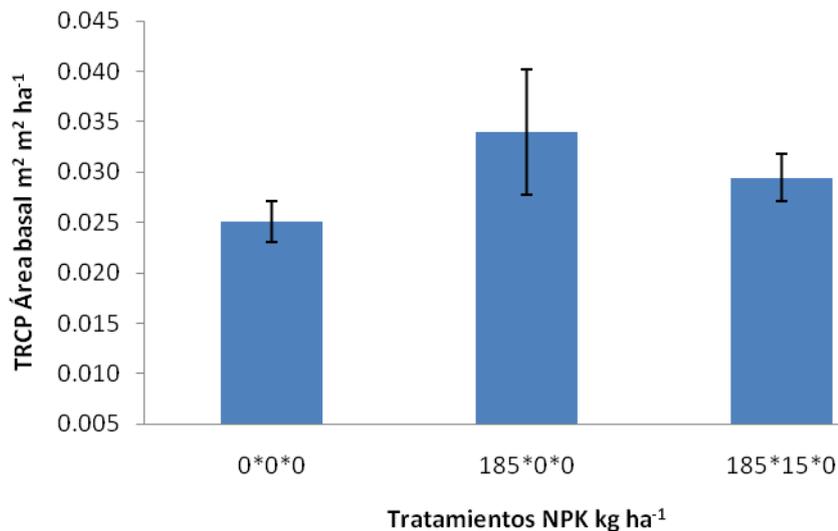


Figura 12. Mejores tratamientos para tasa relativa de crecimiento promedio (TRCP) de árboles de *P. patula*.

6.5 Estado nutricional de los árboles

Los resultados de la respuesta de los árboles a la fertilización, de acuerdo al método gráfico de vectores (Timmer y Stone, 1978; Haase y Rose, 1995; Solla-Gullón, *et al.*, 2004), se muestran en las figuras 13 y 14. De acuerdo a la dirección y magnitud que presentaron los vectores, se observó que para N, P, K, Ca y Mg los tratamientos que produjeron un mayor aumento relativo en el peso de acículas fueron 17 y 19 con 138-21-123 y 185-0-0 kg ha⁻¹ de NPK, respectivamente (Figura 13). Cabe señalar que la concentración y contenido fueron sensiblemente menores en el tratamiento 19 comparado con el 17, este comportamiento indicó que en este último caso, los nutrimentos eran deficientes, sin embargo con la aplicación de este tratamiento dicha deficiencia se subsanó y a la vez, ocurrió un consumo de lujo (López y Alvarado-López, 2010). Los resultados para el caso de Mn, B, Fe, Cu y Zn (Figura 14) indican también que los tratamientos que produjeron un aumento en el peso de acículas fueron 17 y 19. No obstante, para Mn y Zn, la concentración y contenido fueron menores en el tratamiento 19 comparado con el 17, mientras que para el caso de B, Fe, y Cu se observó que tanto la concentración como el contenido fueron ligeramente mayores en el tratamiento 17 comparado con el 19. Puede notarse que tanto para macro como para micronutrimentos, los árboles respondieron favorablemente a la aplicación predominantemente de N; ya que con la aplicación únicamente de este nutrimento, la respuesta de los árboles fue prácticamente igual que con la aplicación de un nivel tres y dos de P y K (21 y 123 kg ha⁻¹ de PK). Dado que lo que se espera es obtener un mayor aumento en peso, pero con una menor inversión en fertilizantes, el tratamiento que ofrece ambos beneficios es el 19, ya que con una menor concentración, promueve un aumento significativo en el peso de las acículas. Esto es un indicativo de que con la aplicación solamente de nitrógeno, se mejora la productividad de las árboles, sin necesidad de invertir en la aplicación tanto de P como de K, como en el caso del tratamiento 17, con el cual se obtiene casi la misma ganancia en peso, pero con una concentración mayor. De acuerdo a estos resultados, se hace evidente que existía una deficiencia predominantemente de N en el suelo, la cual se mejoró con la

aplicación de fertilizantes. Lo anterior se reflejó en el aumento en peso de las acículas de árboles de *P. patula*.

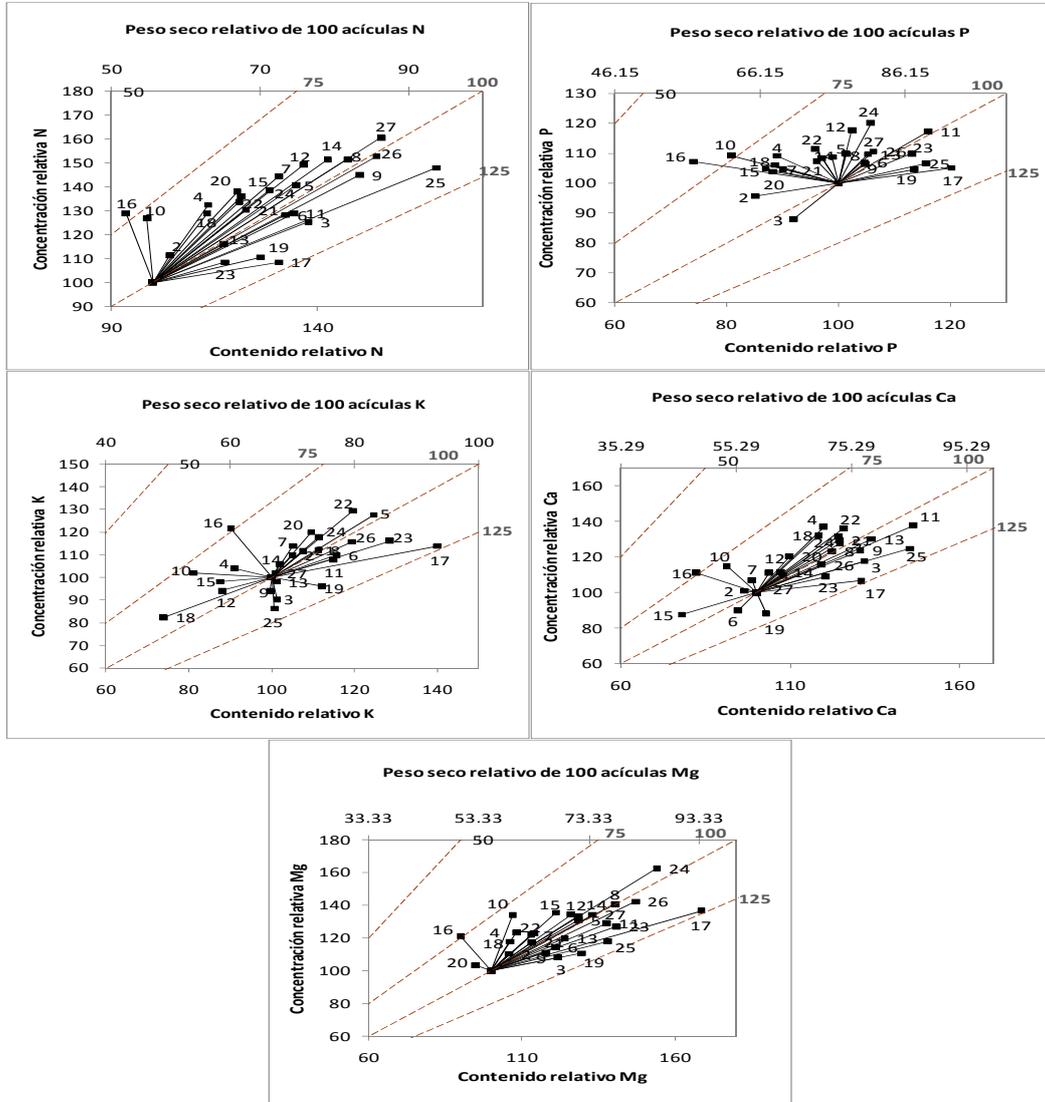


Figura 13. Respuesta foliar de macronutrientes a la aplicación de distintas dosis de fertilización NPK en árboles de *P. patula* de 10 años. Aquixtla, Pue., México.

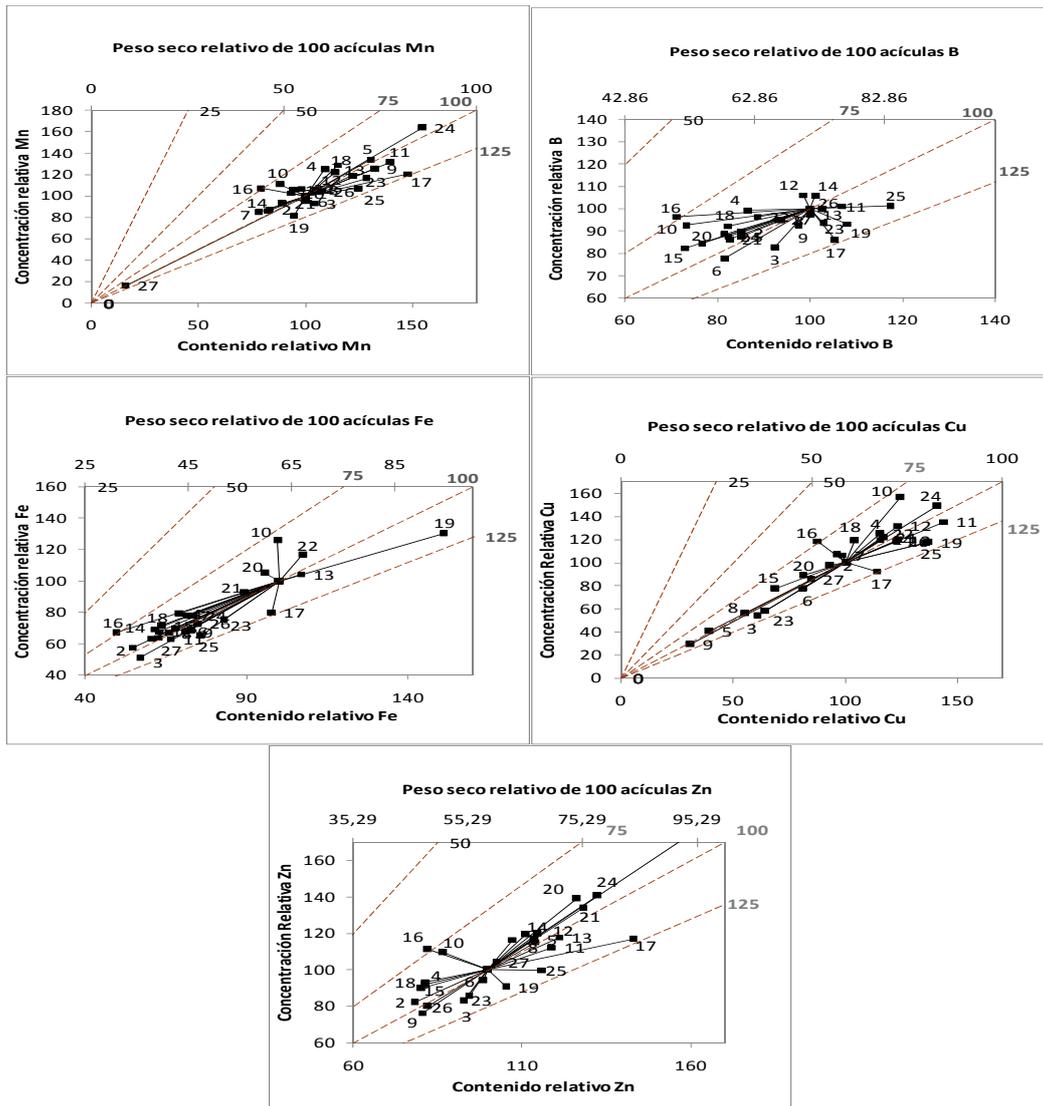


Figura 14. Respuesta foliar de micronutrientes a la aplicación de distintas dosis de fertilización NPK en árboles de *P. patula* de 10 años. Aquixtla, Pue., México.

6.6 Discusión general

Se determinó que la variación tan amplia que se presentó en el análisis de varianza, se debió principalmente a la pendiente y heterogeneidad de productividad del lote experimental. Ésta misma, no permitió identificar la respuesta de los árboles a la fertilización, con el diseño experimental que se aplicó. Con base a esto, se infirió que el diseño experimental adecuado que corresponde sería bloques completos al azar o cuadro latino. El diseño apropiado permitiría separar la variación inherente al suelo de la variación causada por la aplicación de los tratamientos. No obstante, al analizar el comportamiento de las variables medidas, se detectó una respuesta de los árboles de *P. patula* a la fertilización. Las respuestas, para el caso de volumen de follaje nuevo (VOLFN) se detectaron al 9% de probabilidad estadística y fue para el efecto simple de P. Para peso seco de follaje nuevo (PSFN) se detectaron respuestas al 8 y 12% de probabilidad, respectivamente, y fueron para el efecto simple de N y para la interacción P*K. Asimismo, los resultados de tasa relativa de crecimiento instantánea para volumen y peso seco (TRCIVOL y TRCIPS) indicaron una respuesta de los árboles a la aplicación de N. En la tasa relativa de crecimiento promedio de incremento de área basal (TRCPIAB), se apreció una respuesta de los árboles a la aplicación de N. Por otra parte, el diagnóstico nutrimental mediante el método gráfico de vectores mostró una respuesta de los árboles a la fertilización, de nueva cuenta con N. De acuerdo a los resultados de cada una de las variables, es evidente que los árboles respondieron favorablemente a la aplicación de fertilizantes nitrogenados y en menor grado a fertilizantes fosfóricos. Esto se reflejó, además, en la respuesta frecuente de los mejores tratamientos para cada variable (Cuadro 8). Se determinó que la respuesta a la fertilización estuvo estrechamente relacionada a las propiedades químicas del suelo, pues la acidez del suelo y el alto contenido de materia orgánica -debida a la lenta mineralización- predominantes en el terreno experimental, redujeron la disponibilidad de nutrimentos; entre ellos el N y P, que propició que estos fueran limitantes para el crecimiento adecuado de los árboles de *P. patula*. Sin embargo, a pesar de que se observaron respuestas tanto para N como para P,

el tratamiento que mostró mayor frecuencia en las variables analizadas fue el 19, con 185-0-0 kg ha⁻¹ de NPK respectivamente. Esto nos da pauta a sugerir la aplicación de esta dosis de fertilización NPK a los árboles de *P. patula* para mejorar el crecimiento en volumen e incremento de área basal. Dado que con la aplicación de esta dosis de fertilización NPK a los árboles de *P. patula* para mejorar el crecimiento en volumen e incremento de área basal. Dado que con la aplicación de este nivel de N, predominantemente en forma de N-NO₃⁻, se propicia una absorción alta por parte del árbol y al mismo tiempo se da la liberación de iones hidróxidos, los cuales producen un aumento en el pH (0.1 – 0.5) del suelo a nivel de la rizosfera y de esta manera, el P edáfico se hace disponible y entonces puede ser absorbido por los árboles. Por consiguiente, el crecimiento de los árboles se favorecería, ya que es evidente que tanto el N como el P fueron los nutrimentos que limitaron el crecimiento de los árboles bajo las condiciones edáficas predominantes del sitio experimental. Cabe hacer mención, sin embargo, que con la dosis 130-0-0 kg ha⁻¹ de NPK se propició un aumento en materia seca de los árboles. Por tanto la dosis que se decida emplear también podrá estar en función de la finalidad que se busque en la plantación. Además, dado que, de acuerdo al análisis de suelo, se observó, que una de los principales problemas que influyó en el efecto de los fertilizantes, fue la acidez, se recomienda hacer una corrección de ésta misma mediante la aplicación de cal.

Cuadro 8. Mejores tratamientos por variables en estudio

Variables	T r a t a m i e n t o s								
	1	4	7	8	10	11	15	17	19
VOLFN*	x	x	x						
PSFN*					x				x
TRCIAB									x
TRCIVOL							x		x
TRCIPS					x	x			
DN*								x	x
FRECUENCIA	1	2	1	1	2	1	1	1	4

*ANOVA Factorial 3³ completamente al azar DN= Diagnóstico nutrimental

7. CONCLUSIONES

Para las condiciones propias del sitio experimental, los latizales maduros de *P. patula* respondieron a dosis intermedias y altas de fertilización, con nitrógeno principalmente. La fórmula 185-0-0 kg ha⁻¹ de NPK promovió el mayor crecimiento de follaje nuevo en términos de tasa relativa de crecimiento instantáneo de volumen, así como del área basal; este efecto también se reflejó en el diagnóstico nutrimental de los brotes. La fórmula 138-0-0 kg ha⁻¹ de NPK promovió el mayor crecimiento de follaje nuevo en términos de tasa relativa de crecimiento instantáneo de peso seco.

8. LITERATURA CITADA

Alcántar, G.G. y L. Trejo-Tellez. 2007. Nutrición de Cultivos. Mundi Prensa. México. 438 p.

Arnon, D.I. and P.R. Stout. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol* 14:31-375.

Binkley, D. 1993. Nutrición Forestal. Prácticas de manejo. Limusa. México. 340 p.

Black, C.A. 1975. Relaciones Suelo-Planta. Tomo II. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 866 p.

Brække, F.H. and N. Salih. 2002. Reliability of foliar analyses of Norway spruce stands in a Nordic gradient. *Silva Fennica* 36(2): 489–504.

Crous, J.W., Morris, A. R. and M.C. Scholes. 2009. Effect of phosphorus and potassium fertilizer on tree growth and dry timber production of *Pinus patula* on gabbro-derived soils in Swaziland. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 71(3): 235-243.

Dominguez, V.A. 1997. Tratado de fertilización. Mundi-Prensa. España. 613 p.

Dovey, S.B. 2009. Estimating biomass and macronutrient content of some commercially important plantation species in South Africa. *Australian Forestry* 72 (2): 99-111.

Español, E., Zas, R. y G. Vega. 2000. Contenidos foliares en macro y micronutrientes en nueve especies de *Eucalyptus* en el noroeste español. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 9 (2): 209-217.

Etchevers, B., J.D. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana* 17(3): 209-219.

Finck, A. 1988. Fertilizantes y fertilización. Reverté. España. 434 p.

Fisher, R. and D. Binkley. 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. 3th Ed. John Wiley & Sons. USA. 489 p.

Fuentes, Y., J.L. 2002. Manual práctico sobre utilización de suelo y fertilizantes. Mundi Prensa. España. 159 p.

Gómez, C., M. 1993. Patrón de elongación del brote terminal en familias de *Pinus patula* Schl. et Cham. contrastantes en potencial de crecimiento en altura. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México.

Haase, D.L. and R. Rose. 1995. Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. *For. Sci.* 41(1):54- 66.

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

Hocker, W.H. 1984. *Introducción a la biología forestal*. AGT Editor. México. 446 p.

Hunt, R. 1981. *Plant Growth Analysis*. Edward Arnold. London. 67 p.

Instituto de la Potasa y el Fósforo. 1997. *Manual Internacional de Fertilidad de Suelos*. Potash & Phosphate Institute. USA.

Kramer, J.P. and T. Kozlowski. 1979. *Physiology of Wood Plants*. Academic Press. New York. 811 p.

Kozlowski, T.T. 1971. Growth and Development of Trees I. Seed Germination, Ontogeny and Shoot Growth. Academic Press. New York. 443 p.

Landis, T.D., R. W. Tinus, S.E. McDonald and P. Barnett. 1989. Manual de vivero para la producción de especies forestales en contenedor, Vol. 4 Fertilización y riego. Trad. D.A.R. Trejo. Dirección general del programa nacional de reforestación, México. 126 p.

Lira S., R.H. 2000. Fisiología vegetal. Trillas. México. 237 p.

López, L., M.A. y J. Alvarado-López. 2010. Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. Madera y Bosques 16(1):99-108.

Marschner, H. 1992. Mineral nutrition of Higher Plants. Academic Press. Inc. San Diego. 674 p.

Mayor, X., Belmonte, H., Rodrigo, A., Rodá, F. y J. Piñol. 1994. Crecimiento diametral de la encina (*Quercus ilex* L.) en un año de abundante precipitación estival: efecto de la irrigación previa y de la fertilización. Orsis 9: 13-23.

Mengel, K. and E. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. 5th Ed. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 849 p.

Millán, P.F. 1971. Efecto de fertilización y espaciamiento en dos especies de pino en Uruapán, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Bosques. México. 73 p.

Oliét, J., Robredo, E., Salazar, J.M. y R. Villar. 2008. Fertilización Otoñal de encina en vivero: efectos sobre la morfología, nutrientes, potencial de enraizamiento y respuesta postrasplante. Soc. Esp. Cienc. For. 28: 171-176.

Ortiz, V.B. 1984. Edafología. 4ta. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. México. 374 p.

Puértolas, J., Gil, L. and J.A. Pardos. 2003. Effects of nutritional status and seedling size on field performance of *Pinus halepensis* planted on former arable land in the Mediterranean basin. *Forestry* 76(2): 159-168.

Pritchett, W. 1991. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México. 634 p.

Rikala R. and T. Repo. 1997. The effect of late summer fertilization on the frost hardening of second-year Scots pine seedlings. *New Forests* 14:33–44.

Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1994. Fisiología Vegetal. Interamericana. México, 759 p.

Segura, M., Castillo, A., Alvarado, A. y F. Blanco. 2006. Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Alnus Acuminata*. *Agronomía Costarricense* 30(1): 53-63.

Solla-Gullón F., Taboada, M.P., Rodríguez-Soalleiro, R. y A. Merino. 2004. Respuesta inicial del aporte de cenizas de biomasa arbórea en el estado nutricional de una plantación joven de *Pinus radiata* D. Don. *Invest Agrar: Sist Recur For* 3 (2): 281-293.

Timmer, V.R. and E.L. Stone. 1978. Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorus, potassium, and lime. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.* 42:125-130.

Tippens, P. 2001. Física: conceptos y aplicaciones. 4ta. Ed. McGraw-Hill Interamericana. México. 943 p.

Turner, J., Mambert, M.J. and F.R. Humphreys. 2002. Continuing growth response to phosphate fertilizers by a *Pinus radiata* plantation over fifty years.

Forest Science a Quarterly Journal of Research Technical Progress 48(3):556-568.

Velázquez, M.A., Ángeles, P.G., Llandera. T., Román A.R. y V. Reyes. 2004. Monografía de *Pinus patula*. Colegio de Postgraduados. México. 124 p.

Vela, G., L. 1980. Contribución a la ecología de *Pinus patula* Schl. et Cham. Publicación especial No. 19. INIF/SARH. México. 109 p.

Villar-Salvador, P., Planelles, R., Enríquez, E. and J.L. Peñuelas. 2004. Nursery cultivation regimes, plant functional attributes, and field performance relationships in the Mediterranean oak *Quercus ilex* L. *Forest Ecol. Manage.* 196: 257-266.

Weetman, G.F. 1989. Graphical vector analysis technique for testing stand nutritional status. Pp. 93-109 *In: W.J. Dyck and C.A. Mees (ED.). Research Strategies for Long-term Site Productivity. Proceedings, IEA/BE A3 Workshop, Seattle, W.A., August 1988. IEA/BE A3 Report No. 8, Forest Research Institute, New Zealand, Bulletin 152.*

Zas, R. 2003. Interpretación de las concentraciones foliares en nutrientes en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* D. Don en tierras agrarias en Galicia. *Invest. Agrar.: Recur. For.* 12 (2): 3-13.

9. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de varianza de volumen de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula*.

FV	GL	CME	Pr > F
N	2	401.668	0.248
P	2	685.006	0.096
K	2	230.361	0.445
N*P	4	134.307	0.751
N*K	4	285.408	0.407
P*K	4	153.284	0.702
N*P*K	8	124.236	0.890

FV= Factor de variación GL= grados de libertad

CME= Cuadrado medio del error Pr > F= Probabilidad de F Coeficiente de variación = 35.11%

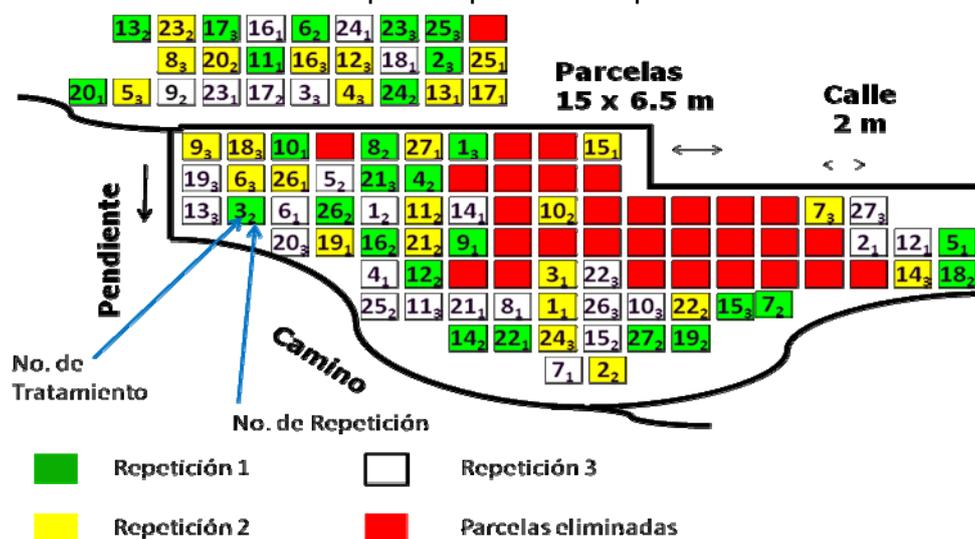
Anexo 2. Análisis de varianza de peso seco de crecimiento nuevo de árboles de *P. patula*.

FV	GL	CME	Pr > F
N	2	57.130	0.082
P	2	22.569	0.362
K	2	33.338	0.226
N*P	4	31.832	0.227
N*K	4	16.841	0.548
P*K	4	41.172	0.125
N*P*K	8	13.806	0.746

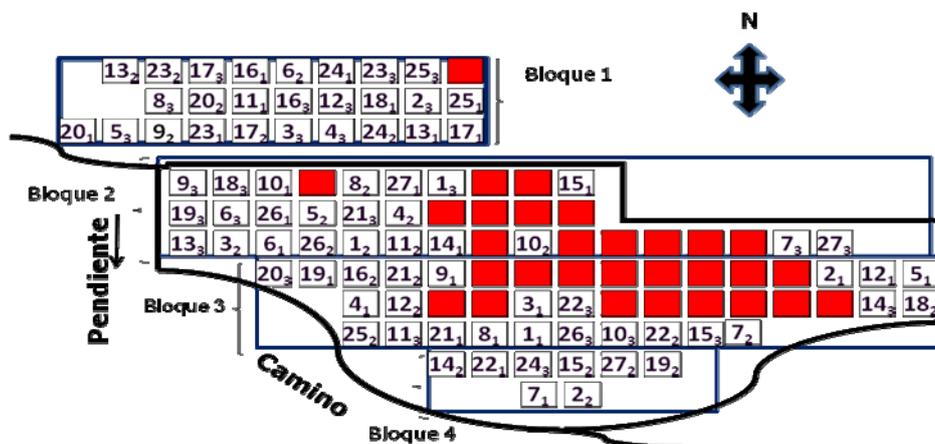
FV= Factor de variación GL= grados de libertad

CME= Cuadrado medio del error Pr > F= Probabilidad de F Coeficiente de variación = 30.88%

Anexo 3. Croquis de parcelas experimentales.



Anexo 4. Bloques de parcelas experimentales perpendiculares a la pendiente del terreno.



Anexo 5. Análisis de suelo, antes del inicio del experimento. Aquixtla, Puebla.

Predio	pH	M.O. (%)	N	P	K	Ca
	1:2 H ₂ O	Walkley - Black	kjeldhal (%)	Olsen ppm	NH ₄ OAc 1 N pH 7 meq/100g (cmoles + kg ⁻¹)	NH ₄ OAc 1 N pH 7 meq/100g (cmoles + kg ⁻¹)
Aquixtla, Pue	5,7	20,8	0,51	2	0,8	13,7
Aquixtla, Pue	5,7	14,1	0,40	3	0,1	12,9
Aquixtla, Pue	5,5	20,5	0,54	5	0,2	13,3

Anexo 6. Análisis de varianza de incremento de área basal de árboles de *P. patula*.

FV	GL	CM	Pr > F
ABI	1	31,9253429	<,0001
N	2	0,12679411	0,6069
P	2	0,00626246	0,9754
K	2	0,09057767	0,6993
N*P	4	0,30653468	0,3139
N*K	4	0,21746645	0,4913
P*K	4	0,15504785	0,6527
N*P*K	8	0,19802923	0,6158

FV= Factor de variación GL= grados de libertad

CME= Cuadrado medio del error Pr > F= Probabilidad de F Coeficiente de variación = 21.66%

Anexo 7. Análisis de varianza de tasa relativa de crecimiento promedio de incremento de área basal de árboles de *P. patula*.

FV	GL	CM	Pr > F
N	2	0,00004455	0,226
P	2	0,00001164	0,6727
K	2	0,00003984	0,2635
N*P	4	0,00005087	0,1534
N*K	4	0,00005029	0,1576
P*K	4	0,00002209	0,5571
N*P*K	8	0,00001489	0,8428

FV= Factor de variación **GL**= grados de libertad

CME= Cuadrado medio del error **Pr > F**= Probabilidad de F **Coefficiente de variación** = 22.26%