



Universidad Autónoma Chapingo



**DEPARTAMENTO DE SUELOS**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA  
EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**TESIS**

**FERTILIZACIÓN Y ACLAREOS EN EL CRECIMIENTO Y ESTADO  
NUTRIMENTAL DE *Pinus patula***

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

**PRESENTA**

**ING. MIRIAM OLVERA ESPAÑA**

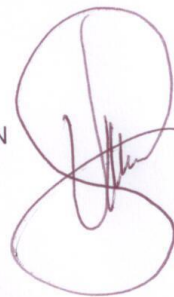
Chapingo, Texcoco, Edo de México, Junio del 2015



LA PRESENTE TESIS TITULADA FERTILIZACIÓN Y ACLAREOS EN EL  
CRECIMIENTO Y ESTADO NUTRIMENTAL DE *Pinus patula*, REALIZADA  
POR LA ALUMNA MIRIAM OLVERA ESPAÑA, HA SIDO REVISADA Y  
APROBADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE, BAJO LA DIRECCIÓN DEL SIGUIENTE COMITÉ:

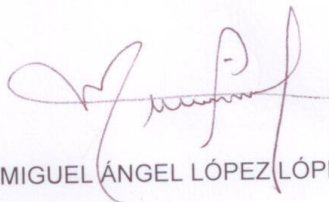
DIRECTOR

DR. ANTONIO VÁZQUEZ ALARCÓN



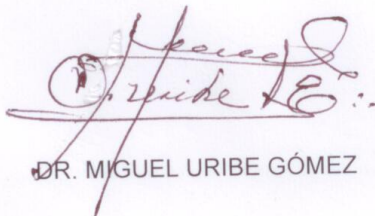
CODIRECTOR.

DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ



ASESOR.

DR. MIGUEL URIBE GÓMEZ



ASESOR

MC. PATRICIA FLORES NIEVES



## **DEDICATORIAS**

*A mis padres Sofía y Nabor con todo mi cariño, porque cuando de niña en el camino me tomaban de su mano, casi el doble que la mía y cuando ellos daban un paso yo tenía que dar dos, entonces me levantaban para abrazarme y desde arriba podía ver mejor...*

*A mi esposo Jesús Valentín con todo el cariño y amor que nació para formar nuestra pequeña familia y por su apoyo en cada día de desvelo.*

*Al pequeño pedacito de mí ser...mi hijo Ulises de Jesús porque su existencia es un milagro de Dios.*

*A mis hermanos Luis, Paulino, Teodora, Mary, Vero, Lilia, Nabor, Ely, y Gis, con el infinito amor familiar por compartir las tristezas y alegrías, pero sobre todo por el espíritu de mantenernos siempre unidos.*

*A la familia Gutiérrez García por todas las muestras de apoyo incondicional que nos han brindado, muchas gracias.*

*No te conformes con lo que necesitas, lucha por lo que mereces....*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ya que a través de su apoyo permite que muchos jóvenes con deseos de superación continúen sus estudios.

Al programa de la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sustentable por haberme permitido ingresar en él y lograr una meta más en mi vida.

Al Dr. Miguel Ángel López López por haberme hecho parte del proyecto, por transmitirme sus conocimientos sin objeción alguna, por su comprensión y apoyo incondicional, por las horas dedicadas a este trabajo, muchas gracias.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón por su valiosa participación en este trabajo.

A la M.C Patricia Flores Nieves por su apoyo en la fase de campo y su colaboración en las actividades que conllevaron a terminar la investigación.

Al Dr. Miguel Uribe por su colaboración.

Al Dr. Gil Vera Castillo, que aunque no formó parte del comité, me apoyó desde el inicio en este proyecto, por sus consejos y su amistad.

A los Ingenieros Salvador Castro Zavala y León Jorge Castaños Martínez, por su aportación financiera y sobre todo territorial, ya que sin ello este trabajo no hubiera sido posible.

A la Lic. Norma Martínez Ramírez por su apoyo durante mi estancia en la maestría.

## **DATOS BIOGRAFICOS**

La autora de este trabajo Nació en Zacualpan, Veracruz el 17 de septiembre de 1986, culminando en dicho lugar sus estudios de secundaria en el año 2001, el interés por los recursos naturales la motivó para ingresar a estudiar la preparatoria en la Universidad Autónoma Chapingo, logrando así permanecer hasta nivel licenciatura, graduándose en el año 2008 de la especialidad de Ingeniero en Restauración Forestal.

Ha participado activamente con la Asociación de Silvicultores en Zacualpan Veracruz, de igual manera en elaboración de proyectos productivos para grupos de personas de este mismo municipio, posteriormente en 2010 colaboró en la evaluación del programa de plantaciones comerciales (PRODEPLAN), perteneciente a la CONAFOR, cuyo trabajo estuvo a cargo de la División de Ciencias Forestales.

Concurrió para realizar estudios de postgrado en octubre del 2012, fue aceptada e ingresó en el programa de la Maestría en Agroforestería para el desarrollo sustentable en enero del 2013, concluyó sus estudios en diciembre del 2014 y ahora les presenta a ustedes este trabajo de investigación sobre Fertilización y aclareos para obtener el grado de Maestra, esperando sea de utilidad para la rama forestal y agroforestal.

## RESUMEN

### FERTILIZACIÓN Y ACLAREOS EN EL CRECIMIENTO Y ESTADO NUTRIMENTAL DE *Pinus patula*.

MIRIAM OLVERA ESPAÑA<sup>1</sup> y DR. ANTONÍO VÁSQUEZ ALARCÓN<sup>2</sup>

Además de los factores físicos y ambientales que intervienen en el desarrollo de las plantaciones forestales, existen dos factores muy importantes, los cuales pueden ser controlables por el hombre, la fertilización y los aclareos, de tal manera que en este estudio se trató de descubrir aún más la interacción de éstos con el crecimiento y estado nutrimental de árboles de *P. patula*. Para ello se estableció un diseño experimental completamente al azar de parcelas divididas, se tomaron sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup>, se usaron tres densidades de aclareo (600, 900 y 1200 árboles ha<sup>-1</sup>) y cuatro dosis de fertilización (testigo, N, P y K), se realizaron mediciones dasométricas, y análisis foliares. Las variables evaluadas fueron diámetro, altura, volumen, concentraciones críticas y análisis DRIS, biomasa y captura de carbono. Las diferencias significativas entre nutrimentos fueron nulas, sin embargo el elemento que tuvo mejor respuesta fue el K, la densidad con mayores efectos para la mayoría de las variables fue la de 600 árboles ha<sup>-1</sup>, excepto para biomasa y captura de carbono. De acuerdo al ANOVA se probó que existen efectos dados por la interacción de fertilización y aclareos.

Palabras clave: fertilización, densidad, aclareos, *Pinus patula*, nutrimentos, concentraciones críticas, normas DRIS

---

<sup>1</sup> Tesista

<sup>2</sup> Director

## ABSTRAC

### Fertilization and thinning on growth and nutritional status of *Pinus patula* schl.

In addition to the physical and environmental factors involved in the development of forest plantations, there are two very important factors, which can be controlled by man, fertilization and forest clearings; this study tried to find out further information about their interaction with the growth and nutritional status of trees of *Pine patula*. A completely random experimental design was established in split plots, circular sites of 1000m<sup>2</sup>were taken, three thinning densities (600, 900 and 1200) and four fertilization doses (witness, N, P and K) were used, dimension measurements and foliar analyses were performed. The evaluated variables were diameter, height, volume, critical concentrations, DRIS analysis, biomass and carbon capture. There were significant differences between nutriments; however, the item that had the best response was K, the density with a greater impact for most variables was 600 trees Ha<sup>-1</sup>, except for biomass and carbon sequestration. According to ANOVA it was proved that there exist effects given by fertilization and forest clearings interaction.

Keywords: fertilization, density, forest clearings, *Pinus patula*, nutriments, critical concentrations, DRIS norms.

## CONTENIDO

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| DEDICATORIAS .....                                | 3   |
| AGRADECIMIENTOS .....                             | 4   |
| DATOS BIOGRAFICOS .....                           | 5   |
| RESUMEN .....                                     | 6   |
| ABSTRAC.....                                      | vii |
| ÍNDICE DE CUADROS .....                           | x   |
| LISTA DE FIGURAS .....                            | xi  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                              | 1   |
| 2. OBJETIVO GENERAL.....                          | 3   |
| 2.1 Objetivos específicos .....                   | 3   |
| 3. HIPÓTESIS.....                                 | 4   |
| 4. REVISIÓN DE LITERATURA.....                    | 5   |
| 4.1 Fertilización de plantaciones forestales..... | 5   |
| 4.1.1 Importancia de la fertilización .....       | 9   |
| 4.2 Nutrimentos .....                             | 11  |
| 4.2.1 Nitrógeno .....                             | 11  |
| 4.2.2 Fosforo .....                               | 12  |
| 4.2.3 Potasio.....                                | 13  |
| 4.3 Análisis vegetal.....                         | 14  |
| 4.4 Aclareos.....                                 | 15  |
| 4.5 Estudios relacionados .....                   | 16  |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS .....                     | 18  |
| 5.1 Ubicación del área de estudio.....            | 18  |
| 5.2 Diseño experimental .....                     | 20  |
| 5.3 Modelo estadístico.....                       | 22  |
| 5.4 Densidades de aclareo .....                   | 23  |
| 5.5 Nutrimentos aplicados.....                    | 23  |
| 5.6 Variables evaluadas .....                     | 24  |

|       |                                                                                |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.6.1 | Altura.....                                                                    | 24 |
| 5.6.2 | Diámetro .....                                                                 | 24 |
| 5.6.3 | Volumen.....                                                                   | 25 |
| 5.6.4 | Peso seco de 100 acículas .....                                                | 25 |
| 5.6.5 | Concentraciones nutrimentales foliares.....                                    | 26 |
| 5.6.6 | Biomasa.....                                                                   | 27 |
| 5.6.7 | Captura de carbono .....                                                       | 27 |
| 6.    | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                   | 29 |
| 6.1   | Variables de Crecimiento .....                                                 | 29 |
| 6.1.1 | Crecimiento en relación a la Densidad .....                                    | 35 |
| 6.1.2 | Crecimiento en relación con los Nutrientos .....                               | 37 |
| 6.2   | Estado nutrimental .....                                                       | 39 |
| 6.2.1 | Análisis foliares .....                                                        | 39 |
| 6.3   | Producción de biomasa en relación con la interacción Densidad* Nutrientos..... | 42 |
| 6.4   | Captura de Carbono con relación a densidad y nutrientes. ....                  | 52 |
| 7.    | CONCLUSIONES.....                                                              | 61 |
| 8.    | LITERATURA CITADA .....                                                        | 63 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Tratamientos establecidos entre densidades de aclareo y fertilización. ....                                                                    | 22 |
| Cuadro 2. Análisis de varianza para Diámetro Normal de <i>P. patula</i> en 2014.....                                                                     | 29 |
| Cuadro 3. Análisis de varianza para Incremento de Diámetro Normal de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                                      | 30 |
| Cuadro 4. Análisis de varianza para altura de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                                                             | 30 |
| Cuadro 5. Análisis de varianza para incremento en altura de <i>P. patula</i> en 2014.....                                                                | 31 |
| Cuadro 6. Análisis de varianza para volumen de <i>P. patula</i> en 2014.....                                                                             | 32 |
| Cuadro 7. Análisis de varianza para Incremento en volumen de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                                              | 32 |
| Cuadro 8 Concentraciones críticas para <i>P. patula</i> .....                                                                                            | 39 |
| Cuadro 9. Normas DRIS para <i>P. patula</i> . ....                                                                                                       | 40 |
| El Cuadro 9 muestra las normas DRIS utilizadas para la comparación y obtención de índices DRIS para las muestras problema. ....                          | 40 |
| Cuadro 10. Índices DRIS de las muestras problema correspondientes a los tratamientos de fertilización y densidad de aclareo en <i>Pinus patula</i> ..... | 41 |
| Cuadro 11. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de fuste por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                          | 42 |
| Cuadro 12. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de fuste por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                       | 43 |
| Cuadro 13. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de Ramas por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                          | 43 |
| Cuadro 14. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de ramas por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                       | 44 |
| Cuadro 15. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de follaje por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                        | 44 |
| Cuadro 16. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de follaje por hectárea para <i>P. patula</i> en 2014. ....                                   | 45 |
| Cuadro 17. Análisis de varianza para Incremento de biomasa total por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                             | 45 |
| Cuadro 18. Análisis de varianza para Incremento de biomasa total por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                          | 46 |
| Cuadro 19. Análisis de varianza para Carbono capturado de fuste por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....                                              | 52 |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 20. Análisis de varianza para Carbono capturado en fuste por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. ....   | 52 |
| Cuadro 21. Análisis de varianza para Carbono capturado de ramas por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....      | 53 |
| Cuadro 22. Análisis de varianza para Carbono capturado de ramas por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. ....   | 53 |
| Cuadro 23. Análisis de varianza para Carbono capturado de follaje por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....    | 54 |
| Cuadro 24. Análisis de varianza para Carbono capturado de follaje por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. .... | 54 |
| Cuadro 25. Análisis de varianza para Carbono total capturado por árbol de <i>P. patula</i> en 2014. ....         | 55 |
| Cuadro 26. Análisis de varianza para Carbono total capturado por hectárea de <i>P. patula</i> en 2014. ....      | 55 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación de Aquixtla, Puebla. ....                                                                                          | 18 |
| Figura 2. Diseño experimental completamente al azar en parcelas divididas. ....                                                                | 21 |
| Figura 3. Peso seco de 100 acículas con relación a densidad de aclareos. ....                                                                  | 33 |
| Figura 4. Relación entre peso seco de 100 acículas con relación a la aplicación de nutrimentos. ....                                           | 34 |
| Figura 5. Incremento de diámetro, altura y volumen a diferentes densidades de aclareo. ....                                                    | 35 |
| Figura 6. Incremento de diámetro, altura y volumen como respuesta a la aplicación de nutrimentos. ....                                         | 37 |
| Figura 7. Incremento de biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol total por árbol con relación a densidad. ....                                 | 48 |
| Figura 8. Incremento en biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol total por hectárea a diferentes densidades de aclareo. ....                   | 49 |
| Figura 9. Incremento de biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol con aplicación de diferentes nutrimentos. ....                                | 50 |
| Figura 10. Incremento de biomasa por hectárea, de fuste, ramas, follaje y árbol como respuesta a la aplicación de diferentes nutrimentos. .... | 51 |

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 11. Captura de carbono en fuste, ramas, follaje y árbol total a diferentes densidades de aclareo.....                    | 56 |
| Figura 12. Captura de carbono en fuste total, ramas, follaje y árbol total a diferentes densidades de aclareo por hectárea..... | 57 |
| Figura 13. Comparación de Medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) de captura de carbono y nutrimentos..                               | 58 |
| Figura 14. Comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para carbono capturado y nutrimentos por hectárea.....              | 59 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde la década de los años 60 del Siglo XX, la aplicación de fertilizantes en plantaciones forestales ha ido incrementando apreciablemente.

De acuerdo con Dickens *et al.*, (2004) la fertilización puede incrementar el volumen de madera, la producción de agujas de pino (utilizadas para mulch y jardinería), la rentabilidad por ha, las tasas de captura de carbono atmosférico y puede mejorar la resistencia de los árboles al ataque de plagas y enfermedades (López y Estañol, 2006).

Para maximizar los beneficios de la aplicación de fertilizantes, las recomendaciones de fertilización deben ser específicas para cada sitio y se deben basar en el tipo de suelo, historia del lote, control de la vegetación competitiva, edad de la plantación, población (árboles ha<sup>-1</sup>) y el producto a obtenerse (pulpa, postes, agujas) (Dickens *et al.*, 2004).

La respuesta de las plantaciones forestales a la aplicación de fertilizantes se rige de acuerdo con la ley del mínimo de Liebig; es decir, sólo se producen respuestas positivas si el nutrimento aplicado corresponde al factor limitante del crecimiento en el sitio (Summer, 1977; López- López y Alvarado-López, 2010).

Aunque la mayoría de sitios forestales son deficientes en uno o más nutrimentos Pritchett, (1982), la enmienda de tales deficiencias no siempre se refleja en mayor crecimiento de los árboles debido a que con frecuencia, otros factores limitan el crecimiento. Entre tales factores se encuentra la disponibilidad de agua, la temperatura ambiente, la temperatura del suelo y, especialmente importante, es la limitación de luz en las copas de los árboles. Es el caso del ensayo de fertilización conducido por Sánchez (2013) en Huayacocotla, Ver., en el cual no se registraron respuestas a la aplicación de N,

P o K debido a que el factor limitante en el sitio fue la reducida radiación solar en las copas de los árboles como consecuencia de la elevada densidad de arbolado.

El factor luz limita con frecuencia el crecimiento en rodales con alta densidad de arbolado, en los cuales las copas de los árboles se entrelazan “sombreándose” unas ramas a otras, lo cual disminuye las tasas fotosintéticas y el crecimiento. Los rodales con alta densidad de arbolado están frecuentemente limitados por la falta de luz y difícilmente responden significativamente a la aplicación de los fertilizantes o de cualquier otro tratamiento aplicado para incrementar la productividad. De hecho, los rodales limitados por luz, reducen sus tasas de crecimiento hasta valores preocupantemente bajos (Vásquez y López, 2011).

Vásquez y López (2011) encontraron que la productividad primaria neta (PPN) en una plantación de *Pinus patula* establecida a un espaciamiento de 2.5 X 2.5 m incrementó hasta la edad de 12 años, pero a partir de esa edad, disminuyó marcadamente. La recuperación de la tasa de PPN en este tipo de plantaciones o bosques densos se logra solamente mediante el aclareo, pudiéndose incrementar incluso a tasas mayores que las registradas antes del cierre de copas, mediante tratamientos correctivos de factores limitantes tales como los nutrimentos.

El objetivo de la presente investigación es determinar los efectos de tratamientos de aclareo (o densidad residual), tratamientos de fertilización química con los macronutrimentos primarios y la interacción aclareo\*fertilización.

## 2. OBJETIVO GENERAL

Determinar los efectos de tratamientos de aclareo y dosis de fertilización química con macronutrientes primarios, así como sus interacciones, en el crecimiento, estado nutrimental, producción de biomasa y captura de carbono en *Pinus patula* en Aquixtla, Puebla.

### 2.1 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de diferentes tratamientos de aclareo en el crecimiento, captura de carbono y estado nutrimental de *Pinus patula*.
- Evaluar el efecto de dosis de fertilización de N, P y K en el crecimiento, captura de carbono y estado nutrimental de *Pinus patula*.
- Determinar los efectos de interacción entre el aclareo y tratamientos de fertilización sobre el crecimiento, captura de carbono y estado nutrimental en *Pinus patula*.

### **3. HIPÓTESIS**

La fertilización y aclareos tienen un efecto directo en el crecimiento, captura de carbono y estado nutrimental de *Pinus patula*.

Existe una interacción significativa entre la densidad de arbolado y el manejo nutrimental de *Pinus patula*.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Fertilización de plantaciones forestales

Según Speidel (1971); Barrera (2013) “La fertilización es una inversión. Invertir es transformar dinero en bienes de capital, los cuales deben contribuir al aumento de los rendimientos o a la disminución de los costos de producción durante un periodo largo de tiempo. Según el objetivo, se pueden distinguir varias formas de inversión: nuevas, de remplazo, de seguridad y de ampliación”. Si bien es cierto, cuando se desea incrementar los rendimientos en una plantación forestal, lo más recomendable antes de realizar una fertilización, es importante conocer el estado en el que se encuentran los nutrimentos, para ello se recomienda hacer un análisis en el sitio de interés, ya que de esta manera se podrá realizar una fertilización más adecuada de acuerdo a los nutrimentos que se encuentren limitando el crecimiento.

Las necesidades de fertilización de una plantación pueden obtenerse por diferentes métodos:

**Análisis del suelo:** En explotaciones forestales donde las áreas son extensas no es la forma más práctica para diseñar un plan de fertilización, ya que corregir el suelo y hacerlo óptimo para que abastezca de nutrientes a la planta es desde el punto de vista económico poco viable.

**Análisis químico de tejidos vegetales:** Se trata de evaluar el estado nutricional de la planta y conocer que elementos faltan o sobran a la planta. Para este tipo de análisis se debe tener muy clara la forma en que se toma la

muestra, ya que los valores se alteran considerablemente por la época en que se toma la muestra, el sitio del árbol del que se toma el tejido.

**Diagnóstico de deficiencias por síntomas visuales:** Este método tiene como desventaja que cuando los síntomas visuales de deficiencias aparecen ya se ha comprometido el crecimiento de la planta.

**Ensayos de campo:** Se considera el método ideal de evaluación de fertilidad. Es evaluada la respuesta a la fertilización para la especie de interés y medida en el campo en pequeñas parcelas con comportamiento similar a las áreas en que se extiende el cultivo. Se evalúa la respuesta en altura, producción, resistencia a enfermedades, con diferentes dosis de nutrientes y se concluye cual es la mejor respuesta desde el punto de vista producción VS costo (Barrera, 2013).

Por otro lado la temperatura, la humedad y la fertilidad son tres factores esenciales del ambiente y del hábitat que determinan el crecimiento de los árboles en los montes. Existen también otros factores, pero éstos son los tres principales. Los forestales, tradicionalmente, han considerado que todos estos factores sólo están sujetos, en el mejor de los casos, a un control muy débil y principalmente indirecto. La naturaleza y magnitud de su influencia, por supuesto, han sido reconocidas desde hace mucho tiempo como controlables hasta cierto grado mediante manipulaciones silvícolas capaces de modificar la densidad, la estructura o la composición de las masas. Sin embargo, a una determinada latitud o altitud, la productividad de la tierra forestal ha sido aceptada por los especialistas, en gran parte, como un don del ambiente local, es decir, el clima, la fisiografía, el suelo, etc. En gran medida, estos factores determinan el probable alejamiento de los niveles de temperatura, humedad y nutrientes respecto del óptimo para el crecimiento de una especie dada. En cualquier caso, se ha supuesto que la productividad de la tierra forestal

permanece esencialmente estable, o es susceptible sólo de un cambio de menor cuantía, durante una simple rotación (FAO, 1966).

Se cree que la aplicación de fertilizantes a las plántulas en el momento en que se ponen en el terreno ofrece una clara ventaja económica, por eliminar la necesidad de una nueva visita al lugar de la plantación. Sin embargo, la mayor parte de la opinión y las pruebas recogidas se pronuncian en contra de la fertilización como parte de la operación de plantación (Wakeley, 1954; Zehetmayr, 1960).

Las objeciones tienen en parte una base biológica. La necesidad crítica de las plántulas en el momento de la plantación es de humedad y no de sales. Durante este período, cuando la planta está luchando por recuperarse del *shock* del trasplante, la fertilización apenas podrá hacer más que estimular el vigoroso crecimiento de la hierba y las malezas adyacentes, que reducen las provisiones de humedad y pueden sobrepujar rápidamente la plántula, particularmente si se trata de una especie de arranque lento en su crecimiento. Las objeciones surgen en parte debido a que los aspectos económicos parecen discutibles. Los gastos de fertilización, aunque aparezcan modestos al principio, se van acumulando durante muchos años, incluso decenios. Aun en las mejores circunstancias, la respuesta observada, particularmente con la mayor parte de las coníferas, no suele ser amplia.

La fertilización de las plantaciones de pino puede ser económicamente atractiva si el bosque/sitio tiene las siguientes condiciones: 1) deficiencia en uno o más nutrientes, 2) responde al nutriente(s) añadido y 3) es lo suficientemente grande para manejarse operacionalmente (>15 ha) (Dikens, 2004).

Generalmente existen tres épocas apropiadas para la fertilización: 1) a la siembra o inmediatamente después de esta labor, 2) al cerrarse la parte aérea del bosque (5 a 10 años de edad) cuando la demanda de nutrientes puede ser

mayor que la capacidad del suelo para suplirlos y 3) después del raleo (Dikens, 2004).

Basándose en investigación preliminar, se está también recomendando fertilizar en periodos de 3 a 5 años después del cierre de la parte área para mejorar la producción de agujas y mantener el vigor de la plantación (Dikens, 2004).

No hace más de 25 años, apenas se discutía que algún día el abonado de masas establecidas con el objetivo principal de estimular el incremento en volumen constituiría una práctica silvícola aceptable. Hoy se practica en algunos países en escala comercial, con la firme creencia de que es beneficiosa. Una compañía de Suecia, por ejemplo, fertilizó unas 15.000 ha (37.000 acres) en 1965, y proyecta fertilizar casi otras 40.000 (100.000 acres) en 1966 (FAO, 1966). La práctica corriente del abonado en la Europa septentrional en estaciones de tierras altas se limita principalmente a las masas bien pobladas que ocupan estaciones de calidad media y que alcanzan un tamaño adecuado para hacer claras lucrativas o para una corta de aprovechamiento final. El abonado se realiza usualmente no más de 10 años antes de las claras o de la corta. El nitrógeno sólo parece bastar para producir un incremento anual de volumen de 1,4 a 2,1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (20-30 pies<sup>3</sup> por acre) respecto de las zonas testigo de igual calidad. Por ejemplo, dos aplicaciones de urea, a distancia de cinco años, cada una a razón de 75 a 115 kg de N por ha (65 a 100 lb por acre) han producido un incremento extra durante el período de 10 años. Los altos precios de la madera en pie hacen más atractivo el abonado, especialmente en Europa septentrional, y las dosis relativamente ligeras exigidas hacen más factible la aplicación aérea. Evidentemente, el corto período anterior a claras intensas o a una corta final mantienen bajos los gastos. En los Estados Unidos, a pesar de ser inferior el valor de la madera en pie, está aumentando definitivamente el interés por el abonado de masas establecidas. Como ejemplo, Curtís (1964) citado por FAO, (1966) citó un costo de sólo 18,25 dólares ha<sup>-1</sup> (7,25 dólares por acre) para la aplicación aérea de fosfatos a razón

de 230 kg ha<sup>-1</sup> (200 lb acre<sup>-1</sup>) para una plantación de pino antillano de 250 ha (630 acres); estimó que esta iniciativa daba la posibilidad de un beneficio del 12 por ciento de la inversión.

#### **4.1.1 Importancia de la fertilización**

En todo el mundo se ha empobrecido mucha tierra para el aprovechamiento agrícola debido a la ignorancia u omisión de la ordenación del suelo y a la falta de prudentes principios agronómicos. En dichas circunstancias, la plantación de árboles se ha considerado con frecuencia como la medida mejor y más lógica de restauración. Muy a menudo, en el pasado, los forestales han emprendido estas tareas, incluidas las medidas urgentes de estabilización rápida inicial del suelo, en la creencia obstinada de que los árboles, por sí solos, plantados en la tierra desnuda de un lugar juzgado económicamente conveniente, estabilizarían el suelo, mejorarían la estación y, al mismo tiempo, crecerían hasta un tamaño aprovechable sin necesidad de cobertera muerta, labores de desfonde, fertilización u otras medidas de mejoramiento. El hecho es que la tierra frecuentemente esquilhada y abandonada ha degenerado tanto en su condición física y en su fertilidad que no tiene ya capacidad de producir masas arbóreas comercializables sin la ayuda de medidas especiales (FAO, 1966).

Con una selección prudente de las estaciones para el tratamiento, el abonado estimula invariablemente el incremento del área basal, pero el efecto de este aumento del incremento no se ha comprendido aun completamente. Depende con toda probabilidad de la especie, el clima, la fisiografía u otros factores afines. FAO (1966) halló que el nitrógeno estimula en forma significativa el crecimiento en volumen del pino americano (*Pinus taeda*) en una estación de tierras altas de Piedmont en Carolina del Norte, pero la madera formada después del abonado fue de peso específico inferior, con membranas celulares más delgadas y traqueidas más cortas. Ni Tamm (1962) en Suecia ni Jensen et al., (1964) citados por FAO (1966) en Finlandia han observado ningún efecto

adverso en las propiedades de la madera atribuibles al repentino incremento del crecimiento, y Jensen no ha encontrado que la pasta al sulfato sea afectada contrariamente por la madera de dichos árboles.

La finalidad de la fertilización es ayudar a la planta a desarrollarse rápidamente en los dos primeros años, tanto en su parte aérea como en la radicular, lo que le permitiría aprovechar la preparación del suelo y competir ventajosamente por los nutrientes con respecto al matorral o malas hierbas.

La aplicación de fertilizantes tiene por objetivo entregar a las plantas el complemento nutricional necesario para que éstas se desarrollen apropiadamente y logren tasas de crecimiento que satisfagan los requerimientos de los propietarios de las plantaciones (Rubilar, 1998; Segovia, 2011).

Para ello, es preciso considerar las características físicas y químicas de los suelos, las dosis y época de aplicación de nutrientes, y las características de la especie, como también, el clima local que predomina en un sitio determinado. Esto permite emplear la combinación óptima de factores, de suelo, planta y clima.

La respuesta a un fertilizante será mayor donde la presencia de otros factores decrecimiento sea beneficiosa para el cultivo, proposición conocida como “ley del óptimo” (Segovia, 2011).

La fertilización en muchos casos ha permitido acelerar el crecimiento del rodal, disminuyendo el tiempo que tarda en alcanzar el límite de máximo tamaño, produciéndose además una reducción de las limitaciones del sitio (Binkley, 1993).

## **4.2 Nutrimentos**

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

Según Etchevers (1999); Lázaro (2011) menciona que la demanda de muchos de los nutrimentos 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 nutrimentos, específicamente de los macronutrimentos 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.

### **4.2.1 Nitrógeno**

A pesar de que el  $N_2$  comprende el 78% de la atmósfera, dicho elemento no es asimilable en su forma química por las plantas, salvo aquellas que poseen la capacidad de realizar la fijación en simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno. Las fuentes primarias de este elemento para los ecosistemas terrestres son los iones amonio ( $NH_4^+$ ) y nitrato ( $NO_3^-$ ), los cuales están disueltos en el agua de lluvia y la fijación biológica del N realizada por algunos microorganismos. Además es el nutrimento que las plantas requieren en mayor cantidad.

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, ocurriendo

una hidrólisis de proteínas y que el nitrógeno soluble es translocado de estos tejidos al meristemo en desarrollo según Koslowski (1971) ; Lázaro (2011).

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, tiene menos de 0.5% de este elemento (Binkley, 1993).

Los síntomas de deficiencia de nitrógeno (N), incluyen clorosis y reducción del crecimiento, comúnmente llamado “achaparramiento”; la clorosis aparece primero sobre las hojas o acículas inferiores, pues el N es un elemento móvil dentro de la planta, y es transferido hacia el follaje nuevo. El “achaparramiento” por deficiencia de N, comúnmente es fácil de diagnosticar, y fácil de corregir, porque las plantas con deficiencia responden rápidamente a las aplicaciones de fertilizante nitrogenado (Landis, 1989)

#### **4.2.2 Fosforo**

Las plantas absorben el P en forma de fosfatos inorgánicos, principalmente, como aniones  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

El P se encuentra presente en los minerales primarios (básicamente apatitas), el absorbido o labil se encuentra en las arcillas.

Dentro de las funciones del fósforo algunas son participar en la división y alargamiento celular, transferencia de características hereditarias, formación de semillas y raíces, resistencia a bajas temperaturas, constituye moléculas que transportan y almacenan energía, es constituyente de membranas celulares, forman fosfolípidos y azúcares.

Los síntomas de deficiencia son extremadamente variables entre especies y, por tanto, se dificulta la diagnosis de deficiencia de sólo este nutriente. Debido a que el fósforo (P) es requerido relativamente temprano en el desarrollo de las

plantas, uno de los síntomas clásicos de deficiencia de P es el "corazón púrpura", en el que las nuevas acículas se tornan de un color morado. Los síntomas de deficiencia de P en el follaje, varían desde ningún cambio en el color, hasta una tonalidad gris oscuro, rosa, o púrpura, clorosis general, quemadura del margen, moteado clorótico entre las nervaduras, y clorosis de las hojas inferiores. Swan (1971) citado por Landis (1989); encontró que los síntomas de deficiencia de P varían entre dos especies diferentes de picea: *Picea glauca* (white spruce) muestra los síntomas característicos foliares de "achaparramiento" y coloración púrpura, mientras que *Picea Rubens* (red spruce) no muestra la tonalidad púrpura en las hojas, aunque también se aprecia la reducción del crecimiento. Obviamente los síntomas de deficiencia en el follaje por si solos no deben ser considerados para diagnosticar deficiencia de P.

#### **4.2.3 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. Además parte del potasio se incorpora también a los ecosistemas en forma de sales disueltas en la precipitación pluvial ( Fisher y Binkley, 2000; Lázaro 2011)

Los árboles requieren potasio en grandes cantidades. El potasio cataliza reacciones celulares y una deficiencia de este impide el metabolismo del nitrógeno y la translocación de carbohidratos.

El potasio no forma compuestos en las planta, sino que permanece libre para regular procesos; es importante para la activación de enzimas, fotosíntesis, el transporte de azúcares y síntesis de almidón. Es indispensable en la regulación hídrica y movimiento de nutrientes, contribuye al aumento en la resistencia de enfermedades, interactúa con casi todos los nutrientes, regula el estado hídrico de la planta, existe mayor tolerancia a temperaturas extremas, hay menores

daños causados por el viento, regula desórdenes nutrimentales y ayuda a una mayor resistencia a plagas y enfermedades.

Es muy móvil en la planta y la deficiencia se muestra en hojas viejas. Se presenta clorosis en las puntas y margen de las hojas, luego se secan y necrosan. La deficiencia de potasio en pino, se caracteriza porque las acículas situadas en la parte inferior de la planta muestran un amarillamiento hacia el ápice, el cual se torna posteriormente rojizo. La clorosis puede progresar hasta cubrir la mitad distal de las acículas, permaneciendo la región basal de color verde. A medida que progresa la deficiencia, la clorosis se extiende hacia las acículas más jóvenes. Los síntomas agudos de esta deficiencia se caracterizan por un mosaico necrótico en las acículas que rodean el meristema apical del tallo principal, formando una roseta de acículas con pérdidas de la dominancia apical (Barrera, 2013).

#### **4.3 Análisis vegetal**

El análisis químico de un vegetal no dice si los elementos hallados son necesarios o esenciales para el crecimiento, desarrollo y maduración del mismo. Un vegetal carece de la capacidad para discriminar. Así de todos los elementos que pueden ser extraídos de un suelo, solo unos pocos, son considerados como necesarios e imprescindibles (Valenzuela *et al.*, 1993).

La utilización del análisis químico foliar de la planta como método de diagnóstico no es nuevo. Fue usado por el químico alemán Liebig hace más de un siglo, para evaluar la fertilidad del suelo. Desde entonces, se ha venido usando ampliamente para evaluar el estado nutricional de los vegetales. En general, en la práctica no se hace el análisis de la planta entera para diagnosticar deficiencias minerales, casi siempre se recurre al análisis foliar, cuando se pretende identificar una eventual deficiencia, ya que éste órgano refleja bien el estado nutricional de la planta.

Aunque los investigadores pioneros, utilizaban la planta completa para realizar sus análisis, los investigadores actuales prefieren, generalmente, partes de la planta para obtener información de su actividad metabólica, tomadas como muestras en determinadas y concretas etapas del crecimiento, y estableciendo escalas o niveles de actividad y concentración de iones en dichas partes de las plantas (Malavolta, 1982).

Algunos investigadores determinan, solamente, fracciones de nutrientes que son solubles en ácidos débiles o en soluciones tamponadas o en tejido conductor. Generalmente, los nutrientes solubles suelen ser empleados para el diagnóstico de plantas anuales, mientras que los iones totales se usan para el análisis foliar de plantas pluriánuales. El uso de análisis foliar tiene su fundamento en el hecho de que faltando un elemento en el suelo, su contenido en las hojas de plantas allí cultivadas será bajo, es decir el contenido foliar de un elemento en hojas deficientes es menor que el que puede encontrarse en plantas cultivadas en condiciones normales (Galiano, 1972).

#### **4.4 Aclareos**

El aclareo es la principal herramienta mediante la cual se controla la densidad del rodal y se modifican los patrones de partición de biomasa. El efecto más evidente es el incremento de diámetro, sobre todo cuando se cortan árboles dominantes (Leak, 2007).

Lo mismo observó Youngblood (2010); Rodríguez (2011) en bosques secos de coníferas, donde el aclareo aumentó el diámetro medio y originó un cambio significativo en la variación del diámetro del rodal. Así, el aclareo aplicado a árboles de diámetro pequeño permite obtener mayor volumen de madera comercial, que cuando se aplica a árboles de diámetro medio y grande. Los sitios no intervenidos pueden mostrar tasas mayores de crecimiento en biomasa que los aclareos realizados en árboles de diámetro medio y pequeño, ya que en espacios de crecimiento plenamente ocupados la reducción en número de

individuos implicará un aumento en volumen de los árboles; sin embargo, el volumen por unidad de superficie se mantendrá sin cambios (Rodríguez *et al.*, 2011). Hubo efectos del aclareo al aplicar altas intensidades de corta a rodales viejos de *Picea abies* en Finlandia, pues la tasa de crecimiento en DN aumentó entre 31 y 34 % con respecto a las intensidades bajas (Jaakkola *et al.*, 2005). Aclareos intensivos (espaciamiento residual de 2.13×2.13 m) en *Pinus banksiana* causaron aumentos de amplitud de copa, diámetro de ramas, ahusamiento y altura (13.1%), DN (20%) y volumen comercial del fuste (75%) respecto al testigo (Zhang *et al.*, 2006).

La realización de raleos, incrementa las demandas nutritivas. Por otro lado, el fuste (madera + corteza) aumenta en forma continua su proporción en la composición de la biomasa. En este sentido, se incrementa la demanda de bioelementos, en particular de los elementos que más disminuyen en sus reservas del suelo, lo cual señala la necesidad de un monitoreo de la evolución en el ciclo biogeoquímico (Aparicio *et al.*, 2001).

#### **4.5 Estudios relacionados**

Dentro de los trabajos realizados en México, se puede mencionar el realizado por Millan (1971), quien evaluó el efecto de distintas densidades de plantación y la aplicación de nitrato de amonio en plantaciones de *Pinus patula* y *Pinus leiophylla* en Uruapan, Michoacan. El fertilizante fue aplicado al momento del establecimiento de la plantación, a razón de 30 y 60 kg ha<sup>-1</sup> 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 espaciamento de 75 por 75 cm; la respuesta fue la misma en ambas especies, con las dosis de 30 y 60 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno.

Por su parte Lázaro (2011), probó diferentes dosis de fertilización NPK con relación al crecimiento de follaje e incremento de área basal en una plantación

de *Pinus patula*. Determinó la tasa relativa de crecimiento instantáneo en volumen y peso seco de follaje nuevo y la tasa relativa de crecimiento promedio de incremento de área basal. En sus resultados mostró deficiencia de N, lo que atribuyó a la acidez del suelo y a las tasas lentas de mineralización de la materia orgánica, predominantes en el sitio experimental.

Al respecto Sánchez (2013) generó concentraciones y críticas y normas DRIS para *Pinus patula*, probando diferentes dosis de fertilización en dos plantaciones; una en Veracruz y otra en Puebla. Los resultados obtenidos indicaron que K fue el nutrimento limitante en la plantación ubicada en Veracruz y, N y P fueron los elementos limitantes en la plantación de Puebla.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Ubicación del área de estudio

Se localizó una plantación joven de *Pinus patula* en predios del Conjunto Predial Forestal (CPF) de Aquixtla, Puebla, propiedad de los Ing. León J. Castaños y Salvador Castro Zavala.

El municipio de Aquixtla se localiza en el norte del estado de Puebla, cerca del límite entre Puebla y Tlaxcala. Limita al norte con el municipio de Zacatlán; al oriente, con Tetela de Ocampo; al sur, con Ixtacamaxtitlán; y al poniente, con Chignahuapan.



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Aquixtla>

Figura 1. Mapa de ubicación de Aquixtla, Puebla.

El territorio se encuentra completamente sobre las estribaciones de la Sierra Norte de Puebla, que constituye el extremo meridional de la Sierra Madre Oriental. La Sierra Norte de Puebla se caracteriza por su escarpado relieve,

donde las altas montañas se suceden en cadenas separadas por pequeñas mesetas. El municipio de Aquixtla es surcado por cinco cadenas montañosas que forman parte del sistema de la Sierra Norte, estas altas montañas alcanzan alturas superiores a los 2900 msnm, de modo que, desde el punto más bajo del municipio en Pachuquilla (1940 msnm) hasta la máxima elevación en los cerros El Mirador, Viejo y El Muerto, las montañas se levantan alrededor de mil metros sobre el nivel de Pachuquilla.<sup>3</sup>

El municipio forma parte de la cuenca del río Tecolutla, de gran caudal que desemboca en la costa del Golfo de México en el estado de Veracruz. Específicamente, Aquixtla se encuentra ubicada en la subcuenca del río Zempoala, que tributa sus aguas en el río Ajajalpa, uno de los principales afluentes del curso alto del Tecolutla. Entre los ríos que nacen en el territorio Aquixteco se encuentran el Cuautolonico, el Texocoapan y el Xaltatempa.

## Clima

La posición geográfica del municipio condiciona el clima de la zona. Aquixtla goza de un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. Las temperaturas oscilan entre los 3 y 18 °C, con una media anual de 12 °C. En el invierno, las partes altas de las montañas suelen recibir nevadas, especialmente cuando hay presencia de humedad en el aire y sopla el viento norte. La orografía del territorio ha impedido el avance de la agricultura, por lo que en las laderas más escarpadas de las montañas se conserva la vegetación original, consistente en bosques de pino y encino, que hospedan otras especies arbóreas como el ocote, Tepozán y el tascate. En algunas zonas existen pastizales inducidos para la cría de ganado, aunque esta no es una actividad de primera importancia en la economía aquixteca. Predominan los suelos volcánicos como el litosol,

---

<sup>3</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Aquixtla>

cuyas características no lo hacen apto para el desarrollo de la agricultura intensiva.<sup>4</sup>

## **5.2 Diseño experimental**

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar en parcelas divididas. Las parcelas principales estuvieron constituidas por los sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup>, con diferentes niveles de densidad. A su vez, las parcelas secundarias se ubicaron dentro de los sitios circulares y corresponden a las áreas de goteo de árboles individuales, todos ellos de dimensiones similares, los cuales constituyeron la unidad experimental. Las parcelas principales se replicaron tres veces (Figura 2).

El diseño experimental planteado permitió determinar el efecto de los niveles de aclareo y de los fertilizantes aplicados, así como los efectos de las interacciones entre los nutrimentos y los niveles de aclareo.

---

<sup>4</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Aquixtla>

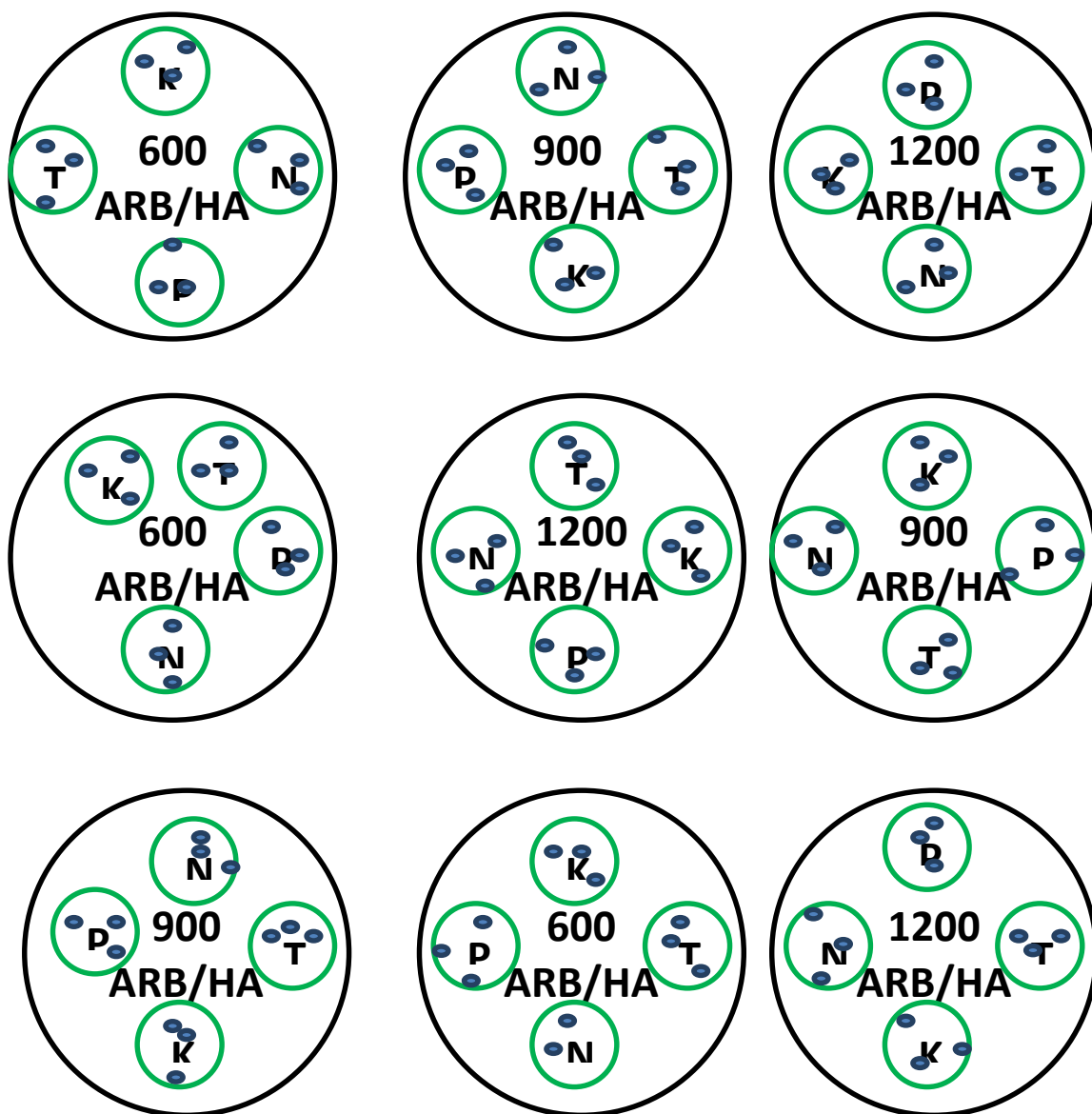


Figura 2. Diseño experimental completamente al azar en parcelas divididas.

Las parcelas principales son sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup> con diferente densidad. Las parcelas secundarias son árboles individuales que recibieron tratamientos de N (nitrógeno), P (fósforo), K (potasio) ó T (testigo sin fertilización). Los árboles individuales tratados constituyeron la unidad experimental y cada parcela principal se replicó tres veces (Figura 2).

Cuadro 1. Tratamientos establecidos entre densidades de aclareo y fertilización.

| T  | DENS | FERT |
|----|------|------|
| 1  | 1200 | 0    |
| 2  | 1200 | 1    |
| 3  | 1200 | 2    |
| 4  | 1200 | 3    |
| 5  | 900  | 0    |
| 6  | 900  | 1    |
| 7  | 900  | 2    |
| 8  | 900  | 3    |
| 9  | 600  | 0    |
| 10 | 600  | 1    |
| 11 | 600  | 2    |
| 12 | 600  | 3    |

Para analizar el efecto entre los nutrimentos evaluados (N, P Y K) se utilizó el Cuadro 1, la columna de DENS. Corresponde a las densidades de aclareo utilizadas (600,900 y 1200 árboles ha<sup>-1</sup>), por su parte la columna de FERT. Indica los nutrimentos aplicados 0=testigo, 1= Nitrógeno (250 g de urea árbol<sup>-1</sup>), 2= Fosforo (220 g de superfosfato simple de calcio árbol<sup>-1</sup>) y 3= Potasio (140 g de sulfato de potasio árbol<sup>-1</sup>).

### 5.3 Modelo estadístico

Como el análisis estadístico debe tomar en cuenta la presencia de dos tipos o tamaños diferentes de unidades experimentales en el experimento, los efectos del factor A se estimaron a partir de las parcelas completas, mientras que los efectos del factor B y de la interacción AB se estimaron a partir de las subparcelas para el factor B. Se tuvieron así mismo, dos errores experimentales, uno asociado a las parcelas principales y otro a las subparcelas, esto es consecuencia del hecho de que las observaciones de distintas subparcelas en la misma parcela pueden tener una correlación

positiva. La correlación refleja la naturaleza de las unidades experimentales que responden de manera similar cuando son adyacentes.

$$Y = \mu + \alpha_i + \epsilon_{iu} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{jt(iu)}$$

$\mu$  = Media general

$\alpha_i$  = efecto de aclareo

$\epsilon_{iu}$  = Error de parcela grandes dado por diferencias entre rodales

$\beta_j$  = nutrimentos aplicados

$(\alpha\beta)_{ij}$  = efecto de interacción nutrimento\*aclareos

$\epsilon_{jt(iu)}$  = Error de parcelas chicas dado por la variabilidad entre observaciones en un mismo rodal.

#### **5.4 Densidades de aclareo**

Como parte de los trabajos de investigación que se llevan a cabo en el Conjunto Predial Forestal (CPF) se establecieron sitios circulares de 1000 m<sup>2</sup> con diferentes niveles de densidad de arbolado, controlada a través de cortas de aclareo. Como resultado de los experimentos de aclareo, actualmente se tienen varios sitios con 600, 900 y 1200 árboles ha<sup>-1</sup>, los cuales fueron aprovechados para probar los efectos de tratamientos de fertilización y su interacción con los niveles de aclareo. En total para efectos del experimento, se utilizaron 9 sitios, 3 por cada densidad de aclareo.

#### **5.5 Nutrimentos aplicados**

La aplicación de los fertilizantes se realizó en septiembre del 2012. Los materiales fertilizantes se aplicaron al voleo en el área de goteo de árboles seleccionados, utilizando materiales fertilizantes de adecuada solubilidad. Para el caso de N se usó urea, para P se usó superfosfato triple de calcio y para K se utilizó sulfato de potasio.

La dosis aplicada se calculó en función de la biomasa foliar promedio de los árboles, misma que se estimó a partir del DAP promedio de los árboles a fertilizar (17.5 cm), utilizando el modelo desarrollado por Castellanos *et al.*, (1996) para *Pinus patula* ( $\text{Ln}(\text{Biomasa foliar}) = -3.75 + 1.738 \text{ LnDAP}$ ). La dosis de N determinada fue de 250 g de urea/árbol y se dividió en dos aplicaciones para evitar pérdidas sustantivas del elemento. La dosis de P fue de 220 g de superfosfato simple de calcio por árbol y la de K es de 140 g de sulfato de potasio por árbol. La unidad experimental son los árboles individuales. Cada tratamiento de fertilización dentro de una parcela pequeña se replicó tres veces, de modo que en cada densidad de aclareo, el total de árboles incluidos fue de 36.

## **5.6 Variables evaluadas**

Para llevar a cabo los objetivos específicos planteados y de esta manera cumplir con el objetivo general de esta investigación, se consideraron las siguientes variables a evaluar:

### **5.6.1 Altura**

Convenientemente esta variable se mide anualmente como parte de las actividades de control del conjunto predial de los Ing. Castro y Castaños. Se utiliza clinómetro SUUNTO y se mide altura total, es decir desde la base a la punta del árbol, de tal manera que para el estudio estos datos fueron proporcionados por dichos Ingenieros.

### **5.6.2 Diámetro**

De igual manera para esta variable se tomaron los 108 árboles elegidos para el experimento y se les midió el diámetro normal a la altura del pecho (DAP=1.30 m). Las mediciones se realizaron en septiembre del 2012, al inicio del estudio de investigación. Posteriormente se llevaron a cabo reediciones en septiembre del 2013, febrero del 2014 y septiembre del mismo año. Para estimar los

incrementos de diámetro se utilizaron únicamente los datos del diámetro inicial en 2012 y diámetro final en 2014.

### **5.6.3 Volumen**

Una vez que se obtuvieron las medidas en campo de las variables dasométricas (altura y diámetro), y con el apoyo de tablas de volúmenes ya establecidas para *P. patula*, en una hoja de cálculo del programa Excel se calculó el volumen por árbol para el año 2012 y 2014 con la siguiente fórmula:

$$VOL=EXP(-9.6214586+1.86021863)*LOG(DN)+0.9605345*LOG(ALT)$$

Una vez realizado esto, por medio de una sustracción, se calculó el incremento en volumen por cada árbol utilizando los cálculos obtenidos para los años 2012 y 2014, después se extrapolo a incremento de volumen por hectárea. Para ello, los datos obtenidos de incremento por árbol se multiplicaron por la densidad correspondiente a cada dato y se dividió entre dos, puesto que son los años que duró el experimento.

### **5.6.4 Peso seco de 100 acículas**

Una vez obtenidas las muestras foliares en campo, y después de haber pasado por el proceso de secado antes mencionado, se contaron 100 acículas de tamaño uniforme, sanas, provenientes de la parte media de las ramillas y se mantuvo la etiqueta correspondiente al sitio y número de árbol. Posteriormente se pesaron en una balanza marca Ohaus con precisión de milésimas de gramo, para obtener su peso seco.

### 5.6.5 Concentraciones nutrimentales foliares

Para evaluar el efecto de aplicación de fertilizantes se tomaron muestras foliares. De acuerdo al diseño se tomó una muestra (follaje de árbol) por cada unidad experimental, recolectándose un total de 36 muestras. La metodología para la recolecta de muestras fue la establecida por Wells y Allen (1985), quienes recomiendan coleccionar en época de invierno. La cantidad de muestra fue de 100-200 g de material fresco o un peso de 10-20 g de muestra seca (aproximadamente 100 hojas). La colecta se realizó de la rama dominante o codominante una ramilla lateral primaria, de la parte superior del árbol (de la mitad hacía arriba), se tomaron ramas sanas, se etiquetaron de acuerdo al registro correspondiente de cada árbol. Posteriormente se guardaron en bolsas de papel (evitar incidencia de rayos solares). Se trasladaron al laboratorio. Se secaron a 60 - 70 °C durante 24 a 28 horas, transcurrido este tiempo, de cada muestra se contaron 100 acículas y se pesaron, para posteriormente calcular el peso seco. Una vez realizado esto, las acículas se metieron nuevamente a la estufa para secar en su totalidad todas las muestras, y de esta manera enviarlas al laboratorio para realizar los análisis correspondientes. El muestreo de follaje en campo se realizó en febrero del 2014.

Las muestras foliares se enviaron para su análisis químico al laboratorio Salvador Alcalde Blanco del postgrado en edafología del colegio de postgraduados. En cada muestra se determinó la concentración de N, P Y K.

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio se estimó el contenido (en gramos) de cada macronutriente, a partir de las concentraciones (ppm). Para obtener el contenido y estandarizar las unidades a gramos se multiplicó las concentraciones de N, P Y K por el peso de 100 acículas y se dividió entre 100. Una vez obtenidas las medias de cada tratamiento se compararon con las concentraciones críticas para *P. patula* y las normas DRIS establecidas por (Sánchez, 2013).

### 5.6.6 Biomasa

FAO (1998) considera que la biomasa es un elemento principal para determinar la cantidad de carbono almacenado en el bosque. La biomasa forestal permite elaborar previsiones sobre el ciclo mundial del carbono, que es un elemento de importancia en los estudios sobre el cambio climático. Además, para una parte de la población humana que vive en las zonas rurales de los países en desarrollo, la biomasa es una fuente primordial de combustible para cocinar y para calefacción.

Con ayuda de los datos de diámetro normal y las ecuaciones alométricas para estimar biomasa de *P. patula* de Castellanos *et al.*, (1996) se calculó las biomásas de fuste limpio, ramas, follaje y árbol total por individuo y por ha. Para ello se utilizó una hoja de cálculo del programa Excel, se ingresaron las fórmulas correspondientes a fuste limpio, ramas, follaje y árbol total y, se calculó biomasa tanto para el año 2012 como para 2014. Posteriormente se obtuvo el incremento de biomasa para cada componente en kg por árbol, después se extrapoló a  $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ .

Las ecuaciones utilizadas fueron las siguientes (Castellanos *et al.*, 1996):

Biomasa de fuste total con corteza  $\ln Y = -2.06082 + 2.30026 \ln(DN)$

Biomasa de ramas  $\ln Y = -4.45555 + 2.33251 \ln(DN)$

Follaje total  $\ln Y = -3.74989 + 1.73807 \ln(DN)$

Árbol total  $\ln Y = -1.86210 + 2.27675 \ln(DN)$

### 5.6.7 Captura de carbono

Con base en los resultados obtenidos en términos de incrementos de biomasa divididos entre 2 se obtuvo el carbono capturado en ramas, follaje, fuste y árbol total, así para cada árbol utilizado en el estudio, los cuales se multiplicaron por la densidad de cada sitio de muestreo (600, 900 y 1200 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ) para obtener carbono capturado por ha.

Una vez que se obtuvo la hoja de cálculos completa para todas las variables, estas fueron analizadas por medio del programa SAS para obtener el ANOVA y la comparación de medias de Tukey.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Variables de Crecimiento

Cuadro 2. Análisis de varianza para Diámetro Normal de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C    | C.M  | Pr>f   |
|---------------------|-----|--------|------|--------|
| Modelo              | 11  | 66.02  | 6.00 | 0.116  |
| Densidad            | 2   | 9.87   | 4.93 | 0.2765 |
| Nutrientes          | 3   | 4.08   | 1.36 | 0.7825 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 52.06  | 8.67 | 0.0416 |
| Error               | 95  | 360.09 | 3.79 |        |

El Cuadro 2 indica que con un nivel de confiabilidad de 89 % es posible afirmar que los factores probados en el presente experimento (densidad de arbolado y aplicación de nutrientes) tuvieron efecto sobre el diámetro normal de los árboles en 2014. El mismo Cuadro; sin embargo muestra que, a diferencia de la interacción densidad\*fertilización, la cual resultó significativa ( $p=0.04$ ), ni la densidad ni la aplicación de nutrientes por sí solas tuvieron efectos significativos.

La falta de efectos significativos de los factores probados en este estudio (densidad de arbolado y fertilización), probablemente se deben a una elevada variación entre unidades experimentales, aun cuando al momento de la selección de los árboles experimentales se procuró uniformizar el diámetro a la altura del pecho. Cabe mencionar que el experimento es de campo, lo que implica que existe una gran cantidad de factores (posición sociológica de los árboles, efectos de micrositio, competencia intra e interespecífica, posición en la pendiente, etc. Pérez *et al.*, (2013) que alteran tasas de crecimiento individual y generan alta variabilidad de la población de *Pinus patula*.

Cuadro 3. Análisis de varianza para Incremento de Diámetro Normal de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C   | C.M  | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------|------|--------|
| Modelo              | 11  | 7.88  | 0.71 | 0.0091 |
| Densidad            | 2   | 2.29  | 1.14 | 0.0224 |
| Nutrientes          | 3   | 1.62  | 0.54 | 0.1406 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 3.96  | 0.66 | 0.0426 |
| Error               | 95  | 27.57 | 0.29 |        |

El Cuadro 3 muestra que con una confiabilidad del 99% los tratamientos probados tuvieron efectos sobre el incremento de diámetro normal. El mismo Cuadro muestra además, que la densidad tuvo mayor efecto en el incremento en diámetro comparado con el efecto de la aplicación de nutrientes, aunado al efecto de la interacción de ambos factores ( $p = 0.04$ ).

En el caso del incremento de diámetro, el efecto de la densidad fue más contundente, puesto que los valores de esta variable (incremento de DAP) corresponden estrictamente al período experimental e indican más fielmente que el DAP, los efectos de los factores estudiados.

Cuadro 4. Análisis de varianza para altura de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C    | C.M  | Pr>f   |
|---------------------|-----|--------|------|--------|
| Modelo              | 11  | 45.02  | 4.09 | 0.8516 |
| Densidad            | 2   | 8.64   | 4.32 | 0.556  |
| Nutrientes          | 3   | 11.21  | 3.73 | 0.6751 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 11.21  | 3.73 | 0.7482 |
| Error               | 58  | 422.78 | 7.28 |        |

El Cuadro 4 muestra el análisis de varianza para la variable altura e indica que no hubo efectos significativos de ninguno de los factores analizados en el presente estudio (densidad de arbolado y aplicación de nutrientes) y tampoco de la interacción de los mismos. De hecho, la altura de los árboles en rodales naturales como los estudiados en la presente investigación, es una variable

muy heterogénea, lo que frecuentemente impide encontrar diferencias significativas entre tratamientos experimentales (López, 2007).

Klepac (1983) opina, parece ser que de los factores externos, la calidad del suelo influye bastante en el crecimiento e incremento en altura. Por lo anterior ha surgido la idea de clasificar al suelo con base en la altura y edad del árbol. Por otra parte la altura del árbol frecuentemente se toma como un indicador de la calidad de estación.

Cuadro 5. Análisis de varianza para incremento en altura de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación  | G.L | S.C   | C.M  | Pr>f   |
|----------------------|-----|-------|------|--------|
| Modelo               | 11  | 1.08  | 0.09 | 0.8865 |
| Densidad             | 2   | 0.37  | 0.18 | 0.384  |
| Nutrimentos          | 3   | 0.17  | 0.05 | 0.8212 |
| Densidad*Nutrimentos | 6   | 0.53  | 0.08 | 0.8319 |
| Error                | 58  | 11.13 | 0.19 |        |

El Cuadro 5 indica que para incremento en altura no hubo efectos significativos de los tratamientos, (ni de la densidad de aclareos, ni de los nutrimentos aplicados), como tampoco los hubo de parte de la interacción entre estos factores. Esto puede ser resultado de algunos otros factores que tienen mayor influencia en esta variable. Por su parte Klepac (1983) dice que para el incremento en altura es de gran importancia la cantidad de reservas materiales que acumula el árbol durante el último año, de ahí que sea comprensible que las raíces exhiben al principio un gran desarrollo. La culminación del incremento en altura ocurre más pronto en brotes de cepa que en los árboles provenientes de semilla, y la altura es más grande en brotes de cepa que en individuos producidos por semilla. Sin embargo el ritmo de incremento en brotes de cepa comienza a decrecer más pronto y disminuye de manera más rápida que el que sufren los provenientes de semilla.

Cuadro 6. Análisis de varianza para volumen de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C   | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 0.03  | 0.002 | 0.6258 |
| Densidad            | 2   | 0.005 | 0.002 | 0.452  |
| Nutrientes          | 3   | 0.009 | 0.003 | 0.4382 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 0.016 | 0.002 | 0.5998 |
| Error               | 57  | 0.19  | 0.003 |        |

Como para el caso del incremento de altura de los árboles, el Cuadro 6 muestra que para la variable volumen no se apreciaron efectos estadísticamente significativos causados por los tratamientos aplicados (densidad, nutrientes aplicados e interacción entre ellos). Probablemente la falta de efectos está determinada por la elevada variabilidad entre unidades experimentales. Si la variabilidad natural entre unidades experimentales es una causal importante de la falta de diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, se recomienda, en futuros trabajos de campo similares al presente, incrementar el número de repeticiones de los tratamientos.

Cuadro 7. Análisis de varianza para Incremento en volumen de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C   | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 1120  | 101.8 | 0.2065 |
| Densidad            | 2   | 866   | 433   | 0.0047 |
| Nutrientes          | 3   | 37.13 | 12.37 | 0.9177 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 216.3 | 36.05 | 0.8141 |
| Error               | 59  | 4352  | 73.75 |        |

El Cuadro 7 muestra para los factores probados; densidad resultante de aclareos y aplicación de nutrientes. Se puede observar que estadísticamente solo la densidad ( $p=0.0047$ ) tuvo efecto sobre la variable de incremento en volumen para la especie estudiada. Sin embargo Klepac (1983) opina, que el volumen del árbol aumenta paralelamente con la altura y el diámetro desde su

nacimiento hasta su muerte. Bajo condiciones diferentes al incremento en volumen siempre culmina después del incremento en altura, diámetro y área basal. Es característica del incremento del volumen no decrecer tan rápidamente como el incremento en altura y diámetro, ya que persiste durante más tiempo en el mismo nivel. Esta característica del incremento en volumen se explica por el hecho de que el incremento en diámetro interviene al cuadrado en el incremento en volumen; de tal manera que al disminuir el incremento en diámetro no necesariamente disminuye el incremento en volumen.

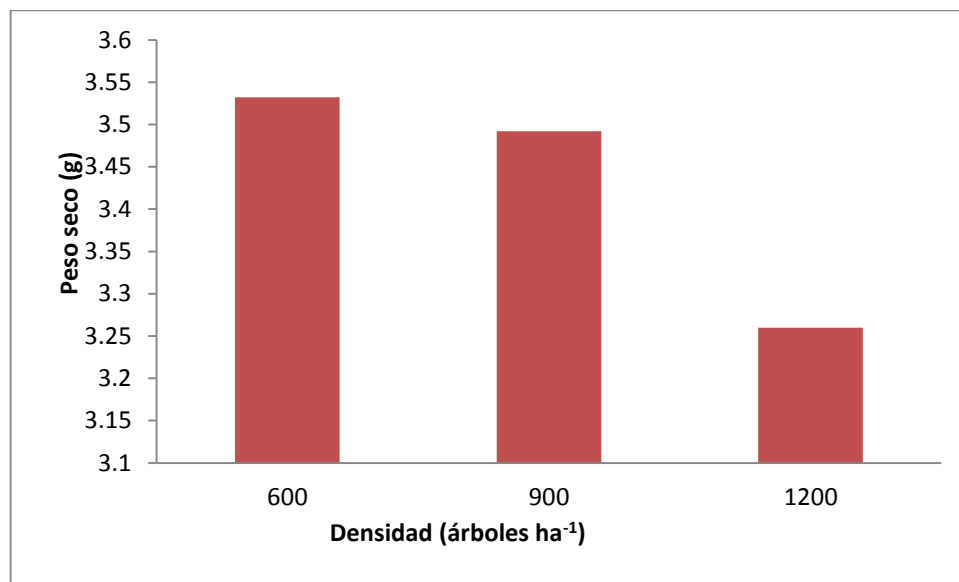


Figura 3. Peso seco de 100 acículas con relación a densidad de aclareos.

Con relación al peso seco de 100 acículas de la Figura 3, no hubo diferencias significativas, sin embargo, marcadamente la media más alta fue para la densidad de 600 árboles ha<sup>-1</sup>, seguida de la densidad de 900 árboles ha<sup>-1</sup> y 1200 árboles ha<sup>-1</sup> con; lo que significa que a menor densidad se generó mayor peso seco de 100 acículas; es decir, acículas más vigorosas.

Timmer y Stone (1978) y López-López y Alvarado-López (2010) mencionan que el peso seco de 100 acículas se correlaciona estrechamente con el vigor de los árboles y sus tasas de crecimiento. Con esta base se puede afirmar que los

árboles que crecieron en poblaciones de 600 árboles ha<sup>-1</sup> son más vigorosos y presentan mayores tasas de crecimiento individual, lo cual queda confirmado en la Figura 3.

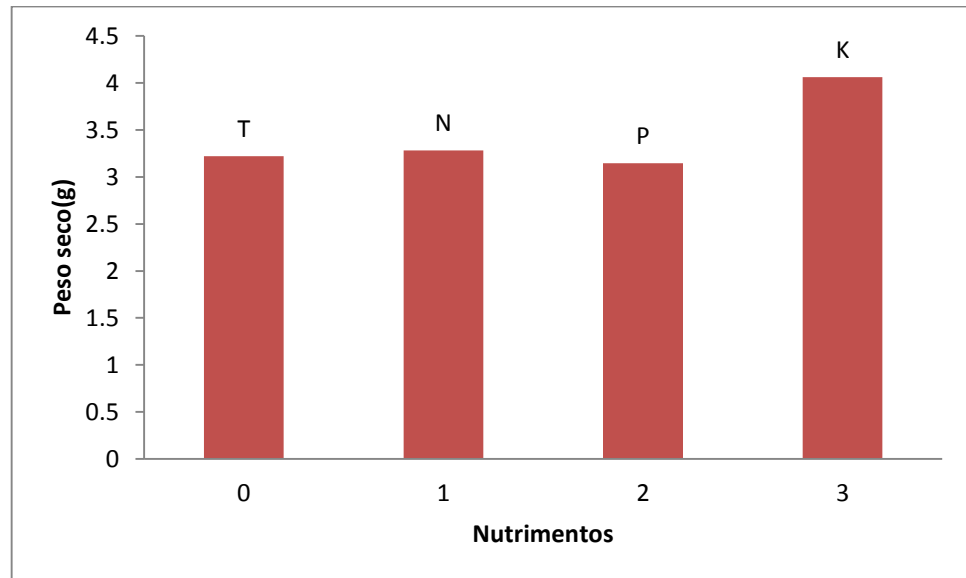


Figura 4. Relación entre peso seco de 100 acículas con relación a la aplicación de nutrimentos.

La Figura 4 muestra la comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para peso seco de 100 acículas con relación a los tratamientos de fertilización. La mejor respuesta fue para K, seguida por el N, después el T y finalmente el P, aunque las diferencias no resultaron significativas estadísticamente. Se puede decir a mayor concentración de potasio el peso seco de las acículas de *P. patula* aumenta. Al parecer, el potasio promovió el vigor de las acículas y los árboles (Timmer y Stone, 1978; López-López y Alvarado-López 2010).

### 6.1.1 Crecimiento en relación a la Densidad

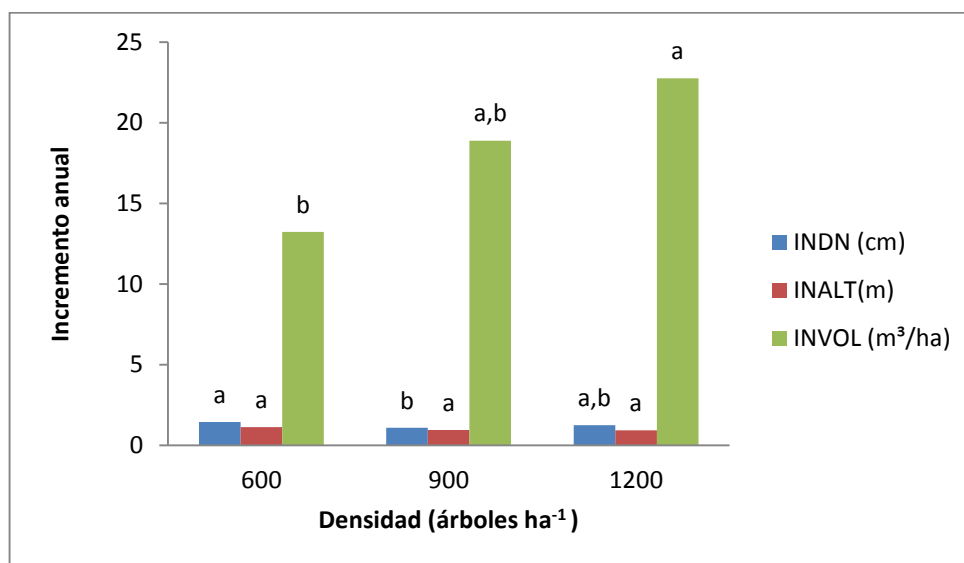


Figura 5. Incremento de diámetro, altura y volumen a diferentes densidades de aclareo.

Con respecto a la respuesta del incremento en diámetro para las densidades de aclareo aplicadas (600, 900 y 1200 árboles ha<sup>-1</sup>), de acuerdo a la comparación de medias de Tukey hubo diferencias significativas en el incremento en volumen entre la densidad de 600 y 900 árboles ha<sup>-1</sup>. Esto sugiere que la densidad de 900 árboles ha<sup>-1</sup> promueve la competencia intraespecífica en pinus patula en los sitios estudiados (árboles de aproximadamente 17 años de edad), y que una densidad inferior a 600 árboles ha<sup>-1</sup> pudiera promover aún mayores incrementos de diámetro como se muestra en la figura 5.

Para el incremento en volumen la densidad de 1200 árboles ha<sup>-1</sup> produjo la media más alta (22.75m³ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). De acuerdo a la comparación de medias de Tukey, hubo diferencias significativas entre densidades de 1200 y 600 árboles ha<sup>-1</sup> lo cual implica que el volumen se ve incrementado cuando las densidades son altas, sin embargo esto no significa que los árboles incrementen considerablemente a nivel individual.

En lo que respecta al incremento en altura no hubo diferencias significativas, la media más alta fue para la densidad de 600 árboles  $\text{ha}^{-1}$ . De tal manera que al igual que el incremento en diámetro, el incremento en altura se relaciona altamente con la densidad, lo cual indica que mientras menor sea la densidad de árboles en un sitio esto ayudará a incrementar tanto el diámetro como la altura como lo muestra la Figura 5. El IDN y el INALT son promovidos por las bajas densidades de arbolado, mientras que el INVOL es mejorado por la alta densidad del mismo. Esta aparente contradicción se debe a que el incremento de volumen es aditivo a diferencia de los incrementos de DAP y altura; es decir, en el caso del volumen, la estimación del incremento se hizo sumando los incrementos de todos los árboles mientras que los IDN e INALT corresponden a valores medios (promedios) del sitio experimental.

El elevado INVOL con la alta densidad de arbolado implica que bajo esa densidad, se acumula anualmente un mayor volumen de madera que en bajas densidades, aunque tal volumen se encuentra en árboles de menores diámetros y alturas Kerr y Haufe (2011), aspecto importante al momento de considerar el tipo de productos a obtener del arbolado de cada densidad. Evidentemente, en el sistema de 1200 árboles  $\text{ha}^{-1}$  se obtendrá mayor volumen de madera  $\text{ha}^{-1}$  pero solamente se podrá derivar productos de cortas dimensiones. Si se requiere obtener productos de mayores dimensiones, la densidad de 600 o menos árboles  $\text{ha}^{-1}$  sería la recomendable. Al respecto Díaz (2008) recomienda, cuando se desea un mayor incremento en crecimiento diamétrico, los espaciamientos mayores son preferibles, como lo demuestra la comparación de las parcelas de 886 y 621 árboles  $\text{ha}^{-1}$ . Cuando se compara la masa forestal total sin tomar en cuenta el diámetro, una densidad de 886 árboles  $\text{ha}^{-1}$ , muestra mejores condiciones así como la densidad de 651 árboles  $\text{ha}^{-1}$  presentan mayores valores en volumen y área basal. La parcela de 629 árboles  $\text{ha}^{-1}$ , intervenida en un 19%, muestra un mayor volumen en metros cúbicos lo cual sugiere una mejor calidad de sitio. El bosque reacciona bien a aclareos fuertes como es el caso de la parcela de 612 árboles  $\text{ha}^{-1}$ , donde se extrajo el 65% de la masa a la edad de 12 años, mostrando además, un mayor

crecimiento en diámetro. Esta intensidad de aclareo fuerte sería conveniente en parcelas que han sido expuestas a daños, enfermedades o en aquellas donde se realiza un aclareo tardío.

### 6.1.2 Crecimiento en relación con los Nutrientos

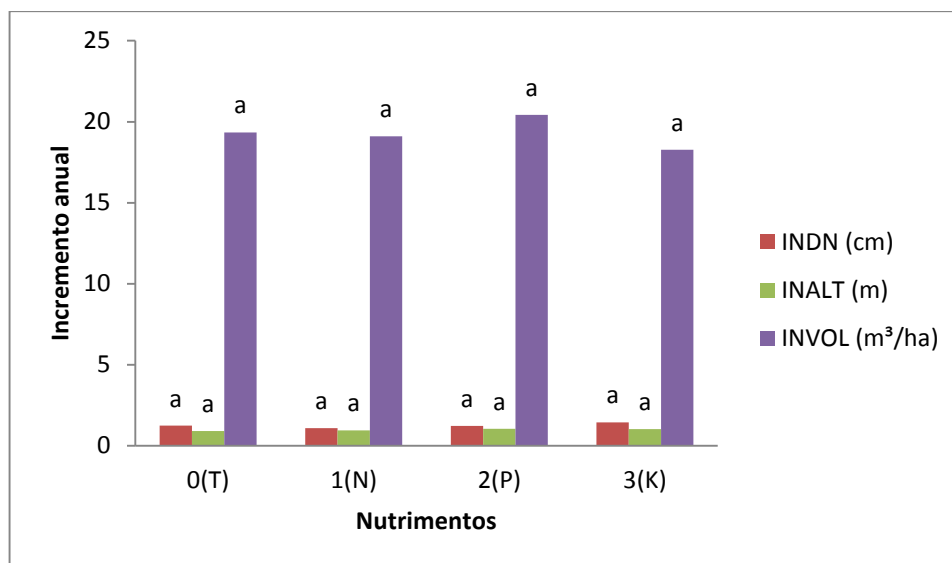


Figura 6. Incremento de diámetro, altura y volumen como respuesta a la aplicación de nutrientes.

De acuerdo con la Figura 6, para el IDN la media más alta fue la de K (1.44cm año<sup>-1</sup>), seguida por el testigo, después P y finalmente N. Sin embargo estadísticamente no hubo diferencias significativas. Aparentemente el K fue el nutriente que tuvo mayores efectos en el incremento en diámetro. Por su parte Sumner (1977); Pritchett (1986) y Turner *et al.*, (2002) opinan que cuando existe deficiencia de K significa que al aplicar este nutriente a los árboles debe lograrse un incremento en diámetro. Esto coincide con lo encontrado por Sánchez (2013), donde al aplicar diferentes dosis de fertilización y compararlas con las concentraciones críticas el K resultó ser el más deficiente, de igual manera lo comprobó en los tratamientos donde aplicó mayor dosis de K, esto se vio reflejado en un ligero incremento del diámetro. Por lo tanto aunque en este

estudio el K haya reflejado mejores efectos se puede decir que probablemente es el que se encontraba deficiente en el área de estudio.

En los resultados para el incremento en altura tampoco hubo efectos significativos de los nutrimentos. De tal manera que el nutrimento que mejor se expresó o que tuvo mayores efectos fue el P como se observa en la Figura 6.

En lo que respecta al incremento en volumen, de igual manera que las variables anteriores, no hubo diferencias significativas entre los árboles que recibieron diferentes nutrimentos.

Tanto para el incremento en altura como el de volumen, el nutrimento con la media más alta fue el P, por lo que se puede suponer que probablemente éste ayudo al crecimiento en altura de los árboles lo mismo que al incremento en volumen.

El hecho de que no existan diferencias significativas en la aplicación de nutrimentos para los incrementos de altura diámetro y volumen, puede deberse a que las dosis utilizadas fueron bajas y no cubrieron los requerimientos ideales para los árboles aunque por otro lado los nutrimentos se pueden acumular en los árboles provocando toxicidad y disminución del crecimiento.

Se puede decir que los nutrimentos deficientes son P y K, pero sus efectos no se manifestaron de manera significativa probablemente debido a que existe otra limitación del crecimiento: la elevada densidad existente para las dimensiones del arbolado actual, la presencia de esta limitación al crecimiento se demuestra por los mayores incrementos de diámetro encontrados en los árboles creciendo a una menor densidad (600 árboles ha<sup>-1</sup>; Figura 6). De acuerdo con López y Estañol (2007) y Sánchez (2013), los árboles solamente responden a las enmiendas de los factores limitantes. En el caso del presente estudio, si la escases de radiación en las copas de los árboles, debido a la competencia entre copas, constituye el principal factor limitante del crecimiento, es de esperarse que las respuestas a la enmienda de limitaciones secundarias, como pueden ser las de P y K, sean sutil

## 6.2 Estado nutrimental

### 6.2.1 Análisis foliares

Cuadro 8 Concentraciones críticas para *P. patula*

| Trat   | Concentraciones foliares en las muestras problema |       |       | Concentraciones críticas |                      |                      |
|--------|---------------------------------------------------|-------|-------|--------------------------|----------------------|----------------------|
|        | N(g)                                              | P(g)  | K(g)  | N(1.49) <sup>z</sup>     | P(0.13) <sup>z</sup> | K(0.63) <sup>z</sup> |
| 1200,T | 1.618                                             | 0.084 | 0.187 | S                        | D                    | D                    |
| 1200,N | 1.692                                             | 0.084 | 0.2   | S                        | D                    | D                    |
| 1200,P | 1.645                                             | 0.089 | 0.215 | S                        | D                    | D                    |
| 1200,K | 1.552                                             | 0.081 | 0.17  | S                        | D                    | D                    |
| 900,T  | 1.493                                             | 0.092 | 0.204 | S                        | D                    | D                    |
| 900,N  | 1.598                                             | 0.09  | 0.227 | S                        | D                    | D                    |
| 900,P  | 1.668                                             | 0.103 | 0.224 | S                        | D                    | D                    |
| 900,K  | 1.633                                             | 0.098 | 0.214 | S                        | D                    | D                    |
| 600,T  | 1.762                                             | 0.083 | 0.23  | S                        | D                    | D                    |
| 600,N  | 1.707                                             | 0.085 | 0.2   | S                        | D                    | D                    |
| 600,P  | 1.633                                             | 0.089 | 0.251 | S                        | D                    | D                    |
| 600,K  | 1.668                                             | 0.087 | 0.199 | S                        | D                    | D                    |

Z=Concentraciones críticas establecidas por Sánchez (2013)

S=SUFICIENTE, D=DEFICIENTE

Zas (2003) indica que el nivel crítico es aquella concentración foliar por debajo de la cual el crecimiento está limitado por ese elemento. Por encima del nivel crítico no se espera una respuesta positiva en crecimiento ante el aporte extra del nutrimento en cuestión.

El Cuadro 8 muestra la concentración de cada nutrimento en las muestras problema correspondientes a cada uno de los tratamientos. En el mismo Cuadro se contrastan las mencionadas concentraciones con las concentraciones críticas para definir si los nutrimentos se encuentran en niveles

de suficiencia o deficiencia dentro del árbol. Haciendo el mencionado contraste Se puede observar que en todos los tratamientos el P y el K fueron deficientes aun cuando algunos de estos tratamientos recibieron tales nutrimentos, es decir, estos nutrimentos son deficientes en la zona de estudio y al parecer, las dosis probadas en el presente experimento fueron insuficientes para subsanar las deficiencias, lo que indica que tales deficiencias probablemente son graves.

Pudo haber sucedido que las dosis aplicadas de nutrimentos hayan sido las correctas y que no hayan sido debidamente aprovechadas por los árboles, lo cual es frecuente cuando se aplican fertilizantes sin acompañar esa actividad con la aplicación de limpias para disminuir la competencia por los nutrimentos proporcionados, entre las malezas y los árboles de interés (Funderburg, e. r. s/f).

Cuadro 9. Normas DRIS para *P. patula*.

| Normas DRIS |       |
|-------------|-------|
| C.V         | MEDIA |
| N/P         | 11.4  |
| N/K         | 2.38  |
| P/K         | 0.21  |

Fuente: Sánchez, 2013

El Cuadro 9 muestra las normas DRIS utilizadas para la comparación y obtención de índices DRIS para las muestras problema.

Cuadro 10. Índices DRIS de las muestras problema correspondientes a los tratamientos de fertilización y densidad de aclareo en *Pinus patula*.

| T      | INDICES DRIS <i>P. patula</i> |      |        |                  |
|--------|-------------------------------|------|--------|------------------|
|        | N(g)                          | P(g) | K(g)   | IDN <sup>2</sup> |
| 1200,T | 111.7                         | 25.9 | -137.6 | 275              |
| 1200,N | 110.9                         | 18.5 | -129.3 | 259              |
| 1200,P | 95                            | 21.2 | -116.2 | 232              |
| 1200,K | 118.6                         | 31.2 | -149.7 | 299              |
| 900,T  | 84.8                          | 33.3 | -118.1 | 236              |
| 900,N  | 84.2                          | 19.7 | -103.8 | 208              |
| 900,P  | 86.6                          | 35   | -121.6 | 243              |
| 900,K  | 90.4                          | 33.5 | -124   | 248              |
| 600,T  | 101.5                         | 5    | -106.5 | 213              |
| 600,N  | 111.9                         | 19.5 | -131.4 | 263              |
| 600,P  | 77.6                          | 10.6 | -88.2  | 176              |
| 600,K  | 107.5                         | 23.9 | -131.4 | 263              |

Z=Índice de Desbalance Nutricional

El análisis DRIS consiste en un conjunto de normas de diagnóstico, las cuales representan calibraciones de la composición de tejidos, la composición del suelo, parámetros ambientales y prácticas de manejo en función del rendimiento de un cultivo específico (Rodríguez *et al.*,2000).

Utilizando las Normas DRIS generadas por Sánchez, (2013) para *P. patula*, los resultados en el Cuadro 9 muestran que, el nutrimento más deficiente en todos los tratamientos fue el potasio, seguido por el N. Probablemente el K no tuvo el efecto esperado, debido a que la aplicación se realizó sin remover el mantillo, de tal manera que parte del fertilizante pudo haber quedado en esa capa de mantillo, evitándose su absorción por parte de las raíces.

Al respecto, Vásquez (2011) encontró que después de fertilizar parcelas experimentales de *Pinus patula* en Huayacocotla, Ver., los análisis de mantillo

mostraron haber retenido parte de los nutrientes aplicados sin que éstos llegaran al suelo mineral donde se encuentra la mayor cantidad de raíces finas.

### 6.3 Producción de biomasa en relación con la interacción Densidad\* Nutrientes

Cuadro 11. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de fuste por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C     | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|---------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 471.54  | 42.86 | 0.0098 |
| Densidad            | 2   | 129.3   | 64.65 | 0.0286 |
| Nutrientes          | 3   | 71.8    | 23.93 | 0.2576 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 270.43  | 45.07 | 0.0236 |
| Error               | 95  | 1663.56 | 17.51 |        |

El Cuadro 11 muestra los efectos de los tratamientos aplicados sobre la de biomasa de fuste por árbol, con una confiabilidad del 99%, sin embargo estadísticamente se observa que la densidad y la interacción entre factores que se probaron; son los que presentan mayor efecto comparado con los nutrientes, en los cuales se aprecia un efecto menor.

Al respecto se puede decir que la aplicación de fertilizantes no se encuentra directamente relacionada con el incremento de biomasa de fuste, pero al combinar densidad de aclareos y fertilización, de alguna manera tienen efectos sobre esta variable.

Cuadro 12. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de fuste por hectárea de *P.patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C         | C.M        | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------------|------------|--------|
| Modelo              | 11  | 507038137   | 46094376   | 0.0008 |
| Densidad            | 2   | 297884660   | 148942330  | <.0001 |
| Nutrientes          | 3   | 52289225.2  | 17429741.7 | 0.3015 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 156864252.2 | 26144042   | 0.0972 |
| Error               | 95  | 1341074667  | 14116575   |        |

El Cuadro 12 muestra que con una confiabilidad superior a 99% se puede afirmar que los factores probados tienen efecto sobre el incremento de biomasa de fuste por hectárea. Cabe señalar que ni los nutrientes ni la interacción densidad\*nutrientes tuvieron efectos significativos, sin embargo la densidad si los tuvo.

Cuadro 13. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de Ramas por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C   | C.M  | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------|------|--------|
| Modelo              | 11  | 4.9   | 0.44 | 0.01   |
| Densidad            | 2   | 1.34  | 0.67 | 0.0289 |
| Nutrientes          | 3   | 0.74  | 0.24 | 0.2608 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 2.81  | 0.46 | 0.0237 |
| Error               | 95  | 17.33 | 0.18 |        |

En el Cuadro 13 se puede observar que con una confiabilidad del 99% se afirma que la densidad post- aclareo tuvo efectos sobre el incremento de biomasa en ramas por árbol. Cabe mencionar que tanto la densidad como la interacción entre ambos factores estadísticamente mostraron efectos, contrario a los nutrientes, los cuales no muestran efectos significativos.

Cuadro 14. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de ramas por hectárea de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C         | C.M        | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------------|------------|--------|
| Modelo              | 11  | 5237110.31  | 476100.94  | 0.0009 |
| Densidad            | 2   | 3065091.91  | 1532545.95 | <.0001 |
| Nutrientes          | 3   | 538940.97   | 179646.99  | 0.3064 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 1633077.43  | 272179.57  | 0.0976 |
| Error               | 95  | 13978014.31 | 147136.99  |        |

Con una confiabilidad del 99% se puede afirmar que hubo efectos de los factores (densidad de arbolado y nutrientes aplicados) en el incremento de biomasa de ramas por hectárea. Con una alta confiabilidad (99%) se observa que la densidad es la que tuvo mayor efecto; contrariamente, la aplicación de nutrientes tuvo un efecto bajo, como también lo tuvo la interacción entre los factores probados como se muestra en el Cuadro 14).

Cuadro 15. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de follaje por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C  | C.M  | Pr>f   |
|---------------------|-----|------|------|--------|
| Modelo              | 11  | 0.29 | 0.02 | 0.0113 |
| Densidad            | 2   | 0.08 | 0.04 | 0.0278 |
| Nutrientes          | 3   | 0.05 | 0.01 | 0.2167 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 0.15 | 0.02 | 0.033  |
| Error               | 95  | 1.04 | 0.01 |        |

El Cuadro 15 indica que con una confiabilidad del 98% los factores de densidad y aplicación de nutrientes tuvieron efectos en el incremento de biomasa de follaje por árbol, observándose que los factores que muestran efectos son la densidad y la interacción entre ambos factores, puesto que estadísticamente la aplicación de nutriente no tuvo efectos.

Cuadro 16. Análisis de varianza para Incremento de biomasa de follaje por hectárea para *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C        | C.M       | Pr>f   |
|---------------------|-----|------------|-----------|--------|
| Modelo              | 11  | 370376.72  | 33670.61  | 0.0001 |
| Densidad            | 2   | 231150.66  | 115575.33 | <.0001 |
| Nutrientes          | 3   | 39772.92   | 13257.64  | 0.2159 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 99453.12   | 16575.52  | 0.0899 |
| Error               | 95  | 831903.931 | 8756.883  |        |

El Cuadro 16 indica que con una confiabilidad del 99% se puede afirmar que si hubo efectos en el incremento de follaje por hectárea, dados por los factores probados, sin embargo también se observa que ni los nutrientes, ni la interacción tuvieron efectos, contrariamente a lo que ocurrió con la densidad de arbolado, la cual mostró efectos ( $p<.0001$ ).

Cuadro 17. Análisis de varianza para Incremento de biomasa total por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C     | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|---------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 595.09  | 54.09 | 0.0098 |
| Densidad            | 2   | 163.51  | 81.75 | 0.0284 |
| Nutrientes          | 3   | 90.9    | 30.3  | 0.2564 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 340.67  | 56.77 | 0.0238 |
| Error               | 95  | 2099.99 | 22.1  |        |

El Cuadro 17 indica, que con una confiabilidad del 99% se afirma que hubo efectos de los factores utilizados en el incremento de biomasa total por árbol, se puede apreciar que los factores densidad e interacción (densidad\*nutrientes) muestran efectos, sin embargo el factor nutrientes por sí solo no tuvo efectos.

Cuadro 18. Análisis de varianza para Incremento de biomasa total por hectárea de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C        | C.M       | Pr>f   |
|---------------------|-----|------------|-----------|--------|
| Modelo              | 11  | 1297642079 | 117967462 | <.0001 |
| Densidad            | 2   | 1117754903 | 558877452 | <.0001 |
| Nutrientes          | 3   | 41861903   | 13953968  | 0.3933 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 138025273  | 23004212  | 0.1393 |
| Error               | 95  | 1316518806 | 13858093  |        |

El Cuadro 18 muestra que con una confiabilidad de 99% se puede afirmar que los factores utilizados tuvieron efectos sobre el incremento de biomasa total por hectárea, se puede apreciar que el factor con efectos notables fue la densidad, a diferencia de los factores nutrientes e interacción, los cuales no tuvieron efectos, cabe señalar que los efectos de la interacción (densidad\*aplicación de nutrientes) para las variables de incremento en biomasa han sido más notorios por individuo, sin embargo no por hectárea.

Es importante mencionar que para la variable de incremento en biomasa de fuste, follaje, ramas y árbol total los efectos de aplicación de nutrientes no han sido notorios estadísticamente, es decir la aplicación de fertilizantes no se encuentra relacionada con la biomasa, al menos no en este estudio, existen diversos factores que pueden estar influyendo con estos resultados, la muestra utilizada pudo haber sido pequeña, de igual manera, las dosis de fertilizantes usadas pudieron haber sido bajas con respecto a los requerimientos, por ello los efectos no se hicieron notar.

El hecho de que la densidad haya mostrado efectos sobre incremento en biomasa puede estar relacionado con la definición que se le da a este concepto López *et ál.* (2003) la define como el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que se derive de vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material vegetal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales.

Por otro lado, aunque existen diferentes estudios sobre biomasa, la mayoría de ellos relacionan esta variable directamente con diámetro y altura, como es el caso de González (2008) quien generó modelos alométricos para la estimación de biomasa en componentes de *Pinus oocarpa*, los cuales se modelaron a partir de un rango de diámetro de 5.5 a 62.7 cm. Las variables que estuvieron más correlacionadas para la estimación de la biomasa del fuste fueron la edad, diámetro y altura. Para ramas y follaje se emplearon otras variables como el diámetro de copa y la longitud de copa. De las ecuaciones seleccionadas, la variable diámetro fue el que mejor predijo la biomasa en los diferentes componentes, a pesar de que el uso de otras variables adicionales mejoró un poco el desempeño de los modelos.

Otro estudio realizado por Sanquetta *et ál.* (2001); González (2008) para estimar biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda*, en el sur de Paraná Brasil, estimaron la biomasa de 18 árboles apeados con edades de 17 a 21 años mediante modelos alométricos. Los resultados mostraron que los modelos que mejor ajustaron son aquellos que presentaban variables de fácil medición (dap y ht), pues estiman mejor la biomasa (área y subterránea).

Por su parte Ugalde *et ál.*, (1997) para la estimación de biomasa y carbono para diez especies nativas en Costa Rica, concluyeron que el incremento de la biomasa y carbono está influenciado por las condiciones del sitio y edad de la masa arbolada y que ésta influencia directamente con el crecimiento tanto en diámetro (dap) como en altura total (htp). Además, en la correlación de los modelos para estimar biomasa en los diferentes componentes el dap y htp fueron las variables que mejor explicaron el contenido de biomasa en cada componente para las diez especies estudiadas.

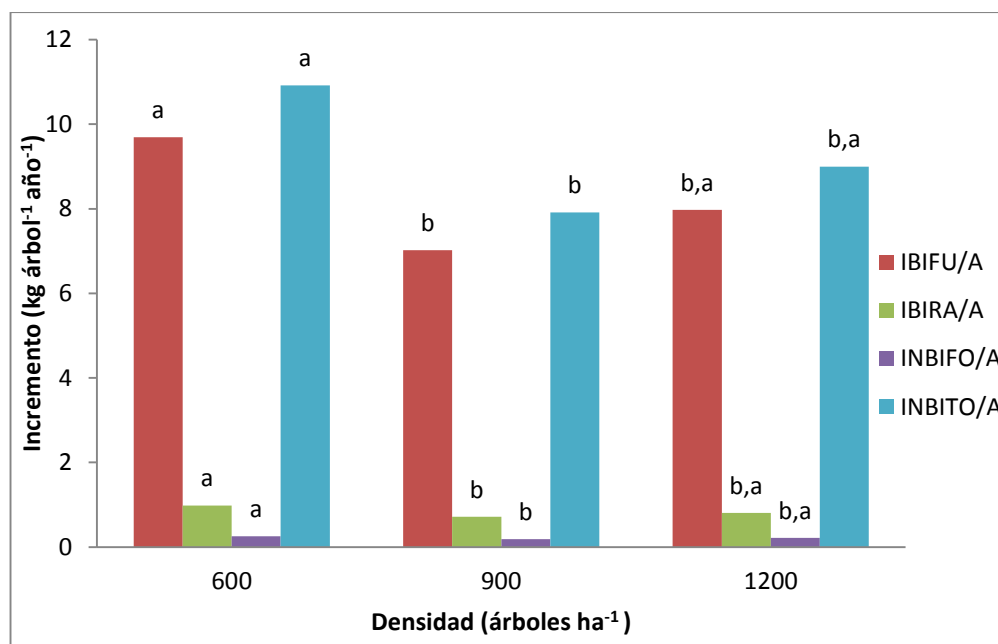


Figura 7. Incremento de biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol total por árbol con relación a densidad.

Al respecto se observa que la densidad de 600 árboles ha<sup>-1</sup> fue con la que se obtuvieron mejores resultados en el incremento de fuste total, ramas, follaje y árbol total, puesto que el incremento de biomasa se vio favorecido al aplicar esta densidad de aclareo. Las diferencias significativas para dichas variables fueron entre 600 y 900 árboles ha<sup>-1</sup>. Lo anterior significa que las densidades superiores a 600 árboles por hectárea están limitando el crecimiento de los árboles, lo que a su vez sugiere que tal vez, densidades incluso inferiores a 600 árboles por hectárea, puedan mejorar aún más las tasas de acumulación individual de biomasa.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, el manejo de densidades inferiores a 600 árboles por hectárea para arbolado de 15 a 17 años de edad es recomendable, especialmente si el producto final es la madera aserrada de largas dimensiones.

Por otro lado en forma general, los diferentes componentes de biomasa, fuste, ramas y follaje, contribuyen de forma diferente a la cantidad de biomasa total, debido a la propia alometría de las especies arbóreas. En el caso de la acumulación de biomasa del fuste, ésta se da en un período más largo y de forma continua en los primeros años, seguido por un periodo con una tasa de acumulación más lenta, hasta la fase de la madurez (Ewel, 1981).

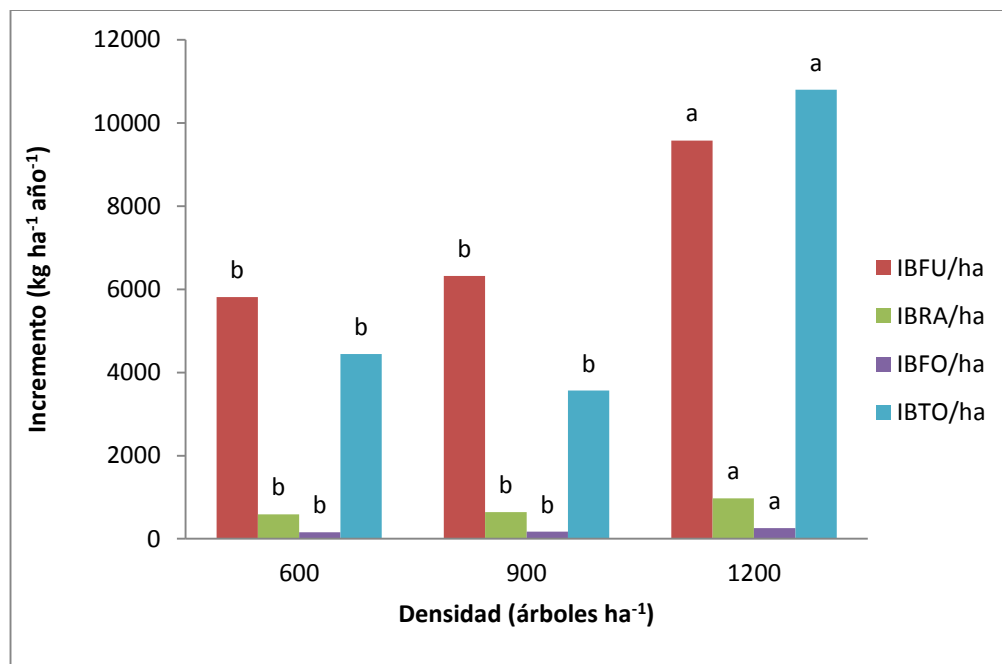


Figura 8. Incremento en biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol total por hectárea a diferentes densidades de aclareo.

En este caso, para los incrementos de Biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol total por hectárea, las diferencias significativas fueron: la densidad de 1200 árboles ha<sup>-1</sup> diferente a las densidades de 600 y 900 árboles ha<sup>-1</sup>, a su vez éstas iguales entre ellas. Además en todos los casos, la media más alta correspondió a la densidad de 1200 árboles ha<sup>-1</sup>, es decir, a mayor densidad de árboles mayor incremento de biomasa como se muestra en la Figura 8.

Por su parte Figueroa (2010) encontró que la mayor parte de la biomasa del árbol se concentró en el fuste o fuste principal (36 a 85%) variando de acuerdo al tamaño del árbol. En los árboles menores de 15 cm de diámetro, el porcentaje de biomasa acumulada aumenta conforme aumenta el diámetro normal, alcanzando un valor máximo cercano al 80%.

La Figura 8 indica que si el objetivo del manejo es la producción de madera aserrada de cortas dimensiones o bien la producción de pulpa para papel o incluso la captura de carbono, la densidad de 1200 árboles  $\text{ha}^{-1}$  sería la más recomendada. No obstante, en el caso de la captura de carbono, en general, productos como la pulpa para papel son de corto tiempo medio de residencia; es decir, el papel, por lo general en corto tiempo se descompone y regresa a la atmósfera como  $\text{CO}_2$ , por lo que la captura de carbono para producción de este tipo de bienes (papel) no representa un beneficio sustancial para el medio ambiente.

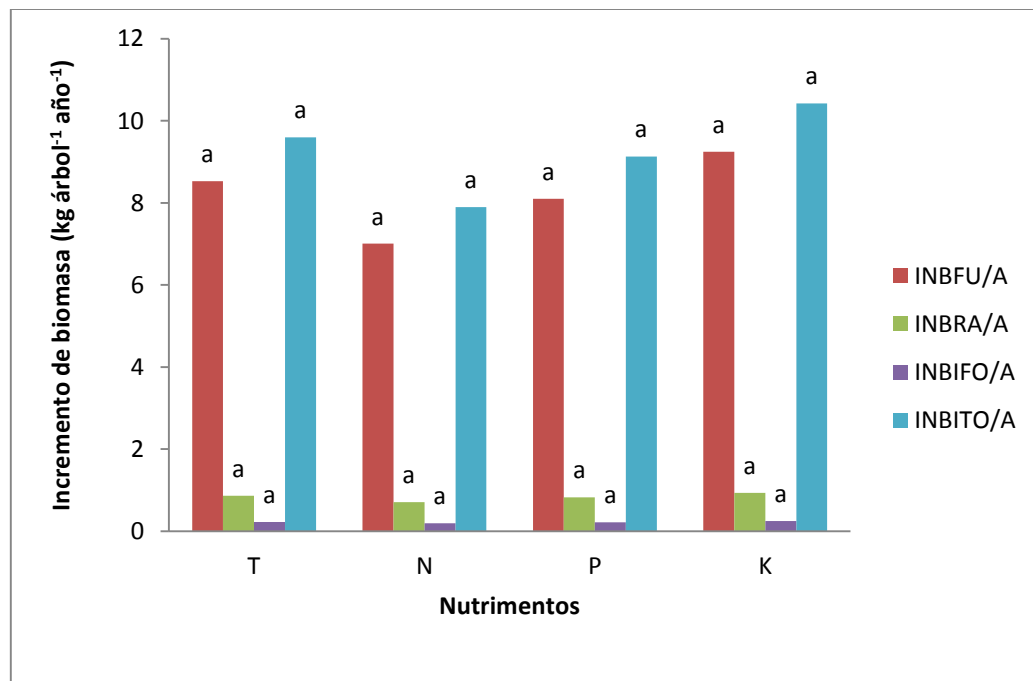


Figura 9. Incremento de biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol con aplicación de diferentes nutrientes. ( $\text{kg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )

Es importante mencionar que no hubo diferencias significativas entre ninguno de los tratamientos con nutrientes para ninguna de las variables como se observa en la figura 9 sin embargo en todas ellas la media más alta fue la de K y la más baja la de N, por lo que es probable que la aplicación de K haya repercutido en el incremento de biomasa por árbol tanto en fuste, ramas, follaje y árbol total.

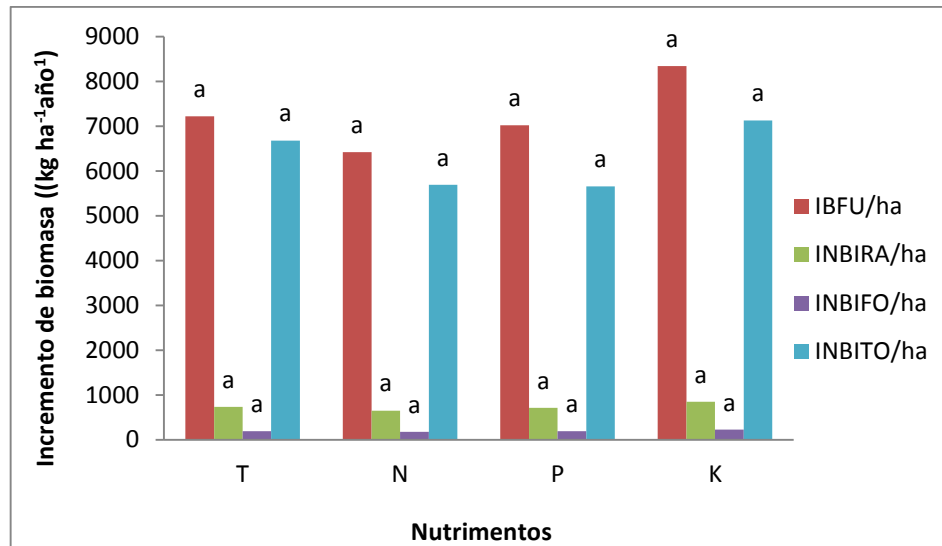


Figura 10. Incremento de biomasa por hectárea, de fuste, ramas, follaje y árbol como respuesta a la aplicación de diferentes nutrientes.

Los resultados de la comparación de medias de Tukey para incremento de biomasa de fuste, ramas, follaje y árbol total por hectárea, fueron muy similares, ya que para ninguna de las variables hubo diferencias significativas. La media más alta en todos los casos la obtuvo el K, seguida por el testigo, después el P y por último el N. Lo anterior sugiere que el K es el nutriente más requerido en el área de estudio y coincide con lo encontrado en relación al estado nutricional de los árboles mediante DRIS y concentraciones críticas que se muestran en los Cuadros 8 y 10.

#### 6.4 Captura de Carbono con relación a densidad y nutrientes.

Cuadro 19. Análisis de varianza para Carbono capturado de fuste por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C    | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|--------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 117.8  | 10.7  | 0.0098 |
| Densidad            | 2   | 32.32  | 16.16 | 0.0286 |
| Nutrientos          | 3   | 17.91  | 5.97  | 0.2585 |
| Densidad*Nutrientos | 6   | 67.56  | 11.26 | 0.0237 |
| Error               | 95  | 415.95 | 4.37  |        |

El Cuadro 19 indica que para la variable de carbono capturado de fuste por árbol, si hubo efectos, dados por los factores aplicados. Se puede apreciar que tanto la interacción como la densidad tuvieron efectos, sin embargo los nutrientes no los tuvieron.

Cuadro 20. Análisis de varianza para Carbono capturado en fuste por hectárea de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C         | C.M         | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------------|-------------|--------|
| Modelo              | 11  | 126759435.1 | 11523585    | 0.0008 |
| Densidad            | 2   | 74471129.49 | 37235564.75 | <.0001 |
| Nutrientos          | 3   | 13072268.84 | 4357422.95  | 0.3015 |
| Densidad*Nutrientos | 6   | 39216036.74 | 6536006.12  | 0.0972 |
| Error               | 95  | 335268547.4 | 3529142.6   |        |

El cuadro 20 indica que con una confiabilidad del 99% se puede asegurar que hubo efectos de los factores probados sobre el carbono capturado por hectárea. De igual manera el cuadro muestra que la densidad ejerció efectos, pero no la aplicación de nutrientes ni la interacción entre ambos factores.

Cuadro 21. Análisis de varianza para Carbono capturado de ramas por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C  | C.M  | Pr>f   |
|---------------------|-----|------|------|--------|
| Modelo              | 11  | 1.23 | 0.11 | 0.0091 |
| Densidad            | 2   | 0.33 | 0.16 | 0.0284 |
| Nutrientos          | 3   | 0.18 | 0.06 | 0.2557 |
| Densidad*Nutrientos | 6   | 0.71 | 0.11 | 0.0219 |
| Error               | 95  | 4.33 | 0.04 |        |

Similarmente al caso de carbono en fustes que se muestra en el Cuadro 20, en el caso de ramas de árboles individuales, el Cuadro 21 muestra que sólo la densidad de arbolado tuvo efectos significativos ( $p > 0.0284$ ) sobre la cantidad de carbono capturado en este componente del árbol. El mismo cuadro (21) indica que aunque los nutrientes no presentaron un efecto significativo sobre el carbono en ramas, sí alteran el efecto de la densidad, lo cual es evidenciado por el nivel de significancia de la interacción densidad\*nutrientos del Cuadro 21.

Cuadro 22. Análisis de varianza para Carbono capturado de ramas por hectárea de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C        | C.M      | Pr>f   |
|---------------------|-----|------------|----------|--------|
| Modelo              | 11  | 1309281.6  | 119025.6 | 0.0009 |
| Densidad            | 2   | 766272.2   | 383136.1 | <.0001 |
| Nutrientos          | 3   | 134738.4   | 44912.8  | 0.3064 |
| Densidad*Nutrientos | 6   | 408270.99  | 68045.16 | 0.0976 |
| Error               | 95  | 3494493.62 | 36784.14 |        |

El Cuadro 22 muestra los efectos dados por los factores densidad y nutrientes en el carbono capturado por ramas por hectárea. Con una confiabilidad del 99% se afirma que hubo dichos efectos, sin embargo solo la densidad tuvo efectos, ya que nutrientes e interacción no los tuvieron.

Cuadro 23. Análisis de varianza para Carbono capturado de follaje por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C   | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 0.07  | 0.006 | 0.0087 |
| Densidad            | 2   | 0.019 | 0.009 | 0.03   |
| Nutrientos          | 3   | 0.013 | 0.004 | 0.1909 |
| Densidad*Nutrientos | 6   | 0.04  | 0.006 | 0.0253 |
| Error               | 95  | 0.26  | 0.003 |        |

Según el Cuadro 23, con un alto porcentaje de confiabilidad (99%), se demuestra que existieron efectos sobre el carbono capturado de follaje total por árbol. Se aprecia que la densidad junto con la interacción tuvieron efectos, lo cual no ocurrió en el caso de los nutrientes

Cuadro 24. Análisis de varianza para Carbono capturado de follaje por hectárea de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C       | C.M      | Pr>f   |
|---------------------|-----|-----------|----------|--------|
| Modelo              | 11  | 92592.67  | 8417.51  | 0.0001 |
| Densidad            | 2   | 57785.29  | 28892.64 | <.0001 |
| Nutrientos          | 3   | 9943.26   | 3314.42  | 0.2159 |
| Densidad*Nutrientos | 6   | 24864.12  | 4144.02  | 0.0899 |
| Error               | 95  | 207971.85 | 2189.17  |        |

El Cuadro 24 muestra los efectos sobre el carbono capturado de follaje por hectárea, con una confiabilidad del 99% se asevera que existen tales efectos principalmente dados por la densidad, sin embargo ni los nutrientes ni la interacción muestran efectos estadísticamente significativos.

Cuadro 25. Análisis de varianza para Carbono total capturado por árbol de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C    | C.M   | Pr>f   |
|---------------------|-----|--------|-------|--------|
| Modelo              | 11  | 148.85 | 13.53 | 0.0097 |
| Densidad            | 2   | 40.84  | 20.42 | 0.0285 |
| Nutrientes          | 3   | 22.75  | 7.58  | 0.2559 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 85.25  | 14.2  | 0.0237 |
| Error               | 95  | 524.9  | 5.52  |        |

De acuerdo con el Cuadro 25 tanto la densidad como la interacción (densidad\*nutrientes) tuvieron efectos sobre el carbono total capturado por árbol, por otro lado la aplicación de nutrientes no mostró efectos.

Cuadro 26. Análisis de varianza para Carbono total capturado por hectárea de *P. patula* en 2014.

| Fuente de variación | G.L | S.C         | C.M         | Pr>f   |
|---------------------|-----|-------------|-------------|--------|
| Modelo              | 11  | 161028980.9 | 14638998.3  | 0.0008 |
| Densidad            | 2   | 94865760.31 | 47432880.16 | <.0001 |
| Nutrientes          | 3   | 16632329.46 | 5544109.82  | 0.2979 |
| Densidad*Nutrientes | 6   | 49530891.08 | 8255148.51  | 0.0969 |
| Error               | 95  | 423090873.4 | 4453588.1   |        |

Con respecto al Cuadro 26 hubo efectos en carbono total capturado por hectárea, principalmente dados por la densidad, a diferencia de los nutrientes y la interacción, los cuales no mostraron efectos.

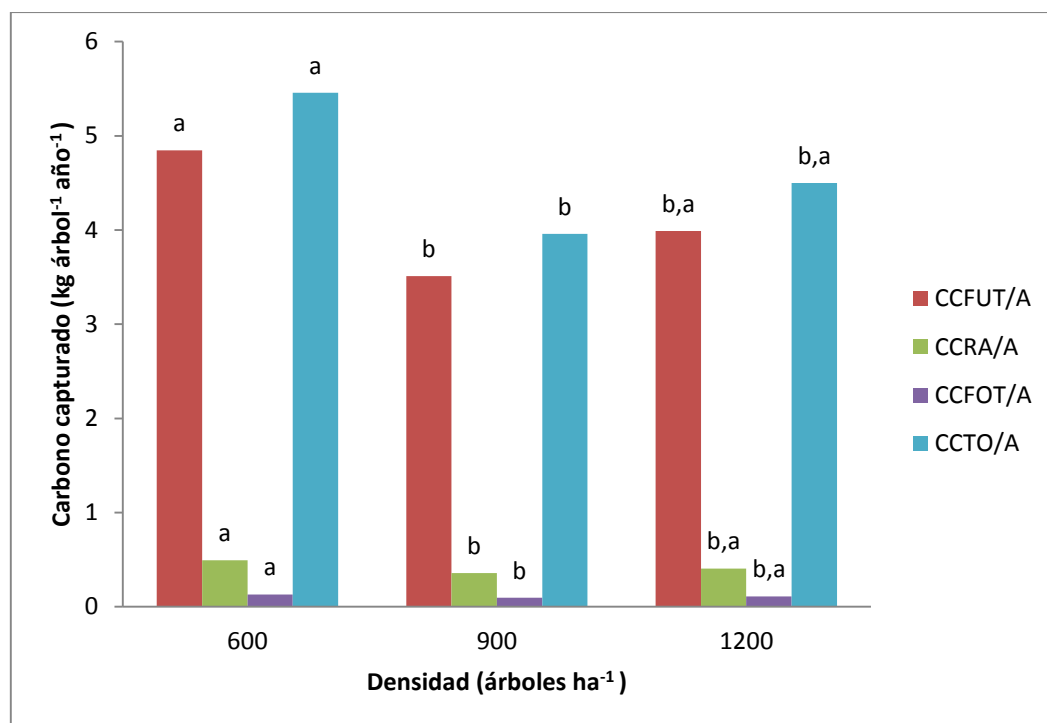


Figura 11. Captura de carbono en fuste, ramas, follaje y árbol total a diferentes densidades de aclareo.

De acuerdo con la Figura 11 la media más alta en todos los casos se obtuvo con la densidad de 600 árboles ha<sup>-1</sup> y las diferencias significativas siempre fueron entre las densidades de 600 y 900 árboles ha<sup>-1</sup>. Por lo tanto a menor densidad de árboles mayor cantidad de carbono es capturado-a nivel individual. Sin embargo, la relación entre densidad y captura de carbono a nivel individual no necesariamente es lineal puesto que, en el caso del presente estudio, en todos los incrementos de biomasa la segunda media más alta fue la de 1200 árboles ha<sup>-1</sup>, esto puede explicarse por la intervención de diferentes factores ambientales y físicos (pendiente, elevación, exposición, temperatura, etc.) que en campo no se pueden controlar en forma precisa, de tal manera que pudieron ocasionar estos efectos entre tratamientos.

En los suelos forestales que son más ricos en materia orgánica presentan mejores características fisiológicas de crecimiento de las plantas reflejadas por

su rápido crecimiento y transformación a biomasa (Harold y Hocker 1984 citado por González, 2008)

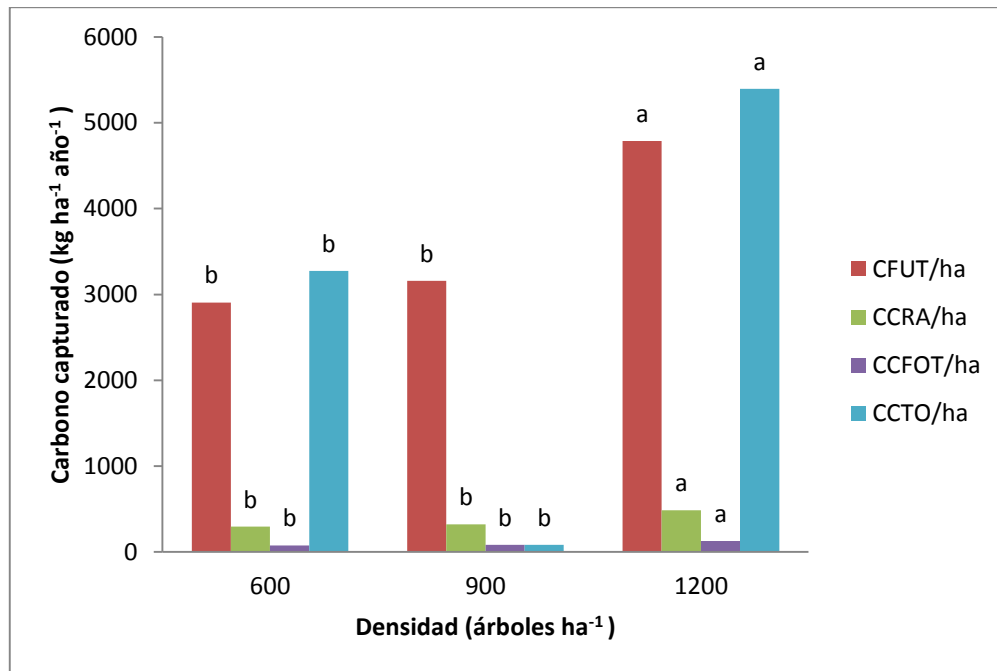


Figura 12. Captura de carbono en fuste total, ramas, follaje y árbol total a diferentes densidades de aclareo por hectárea.

En el caso de carbono capturado en fuste, ramas, follaje y árbol total por hectárea, la media más alta fue para la densidad de 1200 árboles ha<sup>-1</sup>. De igual manera las diferencias significativas fueron 1200 árboles ha<sup>-1</sup> diferente a 600 y 900 árboles ha<sup>-1</sup>.

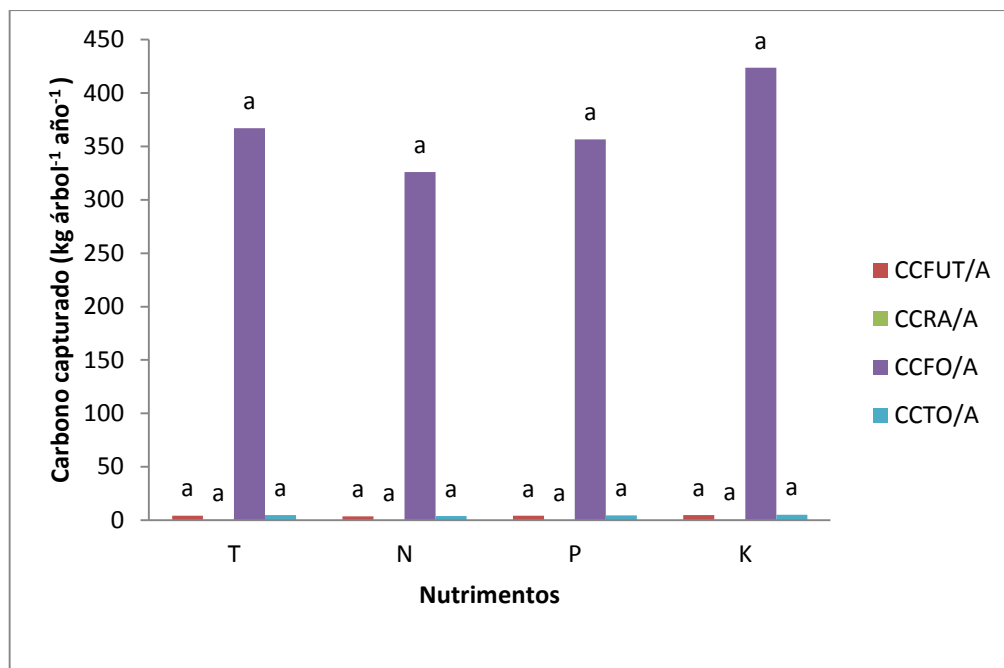


Figura 13. Comparación de Medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) de captura de carbono y nutrimentos.

La comparación de medias mediante la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para incremento de carbono capturado en fuste, ramas, follaje y árbol total, fueron muy similares, puesto que para ninguna de las variables hubo diferencias significativas. La media más alta en todos los casos se obtuvo con la aplicación de K, seguida por el testigo, posteriormente el P y por último el N como se observa en la Figura 13.

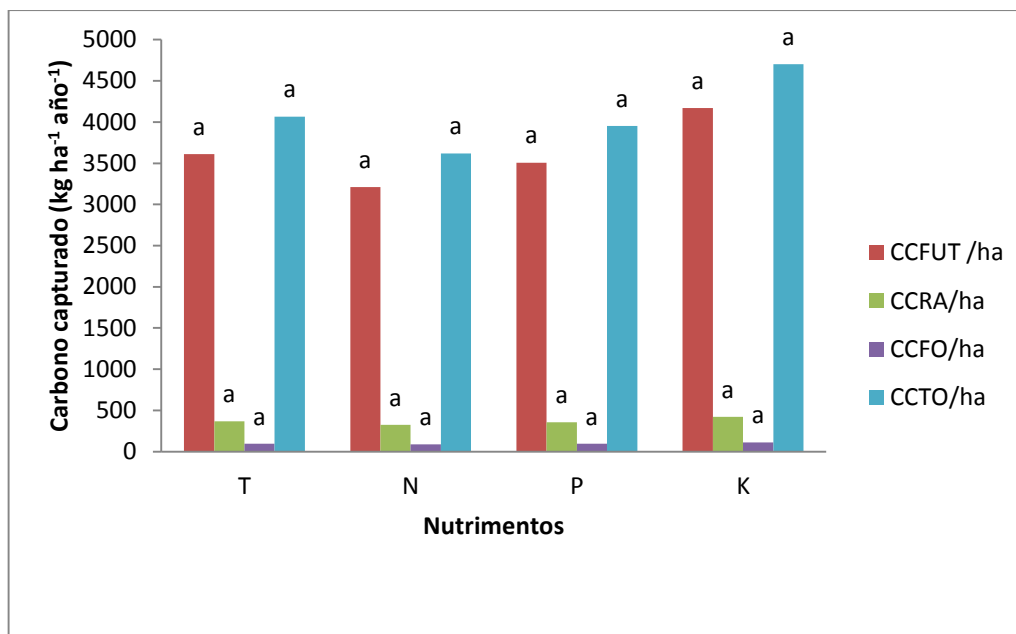


Figura 14. Comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para carbono capturado y nutrientes por hectárea.

De acuerdo a la Figura 14 en todos los compartimientos del arbolado, la media más alta siempre fue para K, seguida por el testigo, posteriormente el P y al final se encontró siempre el N. En ninguna variable hubo diferencias significativas y la mayor cantidad de carbono capturado fue para fuste total.

En la mayoría de los estudios sobre biomasa aérea muestran que el fuste es el que tiene más biomasa, y por lo tanto mayor contenido de carbono en la madera en relación con los restantes componentes, esta relación puede deberse a un menor contenido de minerales y mayor contenido de lignina en la madera que en hojas y ramas (Gayoso y Guerra, 2005). Sin embargo, estudios en Australia sobre *Eucalyptus sp.* y *Pinus radiata* mostraron relación contraria, es decir, los contenidos de carbono fueron mayores en hojas que en ramas leñosas, mientras el duramen presentó mayor contenido de carbono que en la madera de albura (Gifford, 2000). Por otra parte, Segura (1997) no encontró diferencias en el contenido de carbono en cortes a diferentes alturas de fuste

respecto a la albura y el duramen, es decir que el contenido de carbono no depende de la altura del fuste ni de la sección donde se tome la muestra, y no hay relación entre el contenido de carbono del fuste, ramas ni raíces en *Quercus*

## 7. CONCLUSIONES

Hubo efectos de densidad para incremento en diámetro e incremento en volumen pero no los hubo para incremento en altura.

La densidad de 600 árboles  $\text{ha}^{-1}$  aumenta los incrementos de biomasa y captura de carbono a nivel de árboles individuales, mientras que la densidad de 1200  $\text{ha}^{-1}$  genera la mayor cantidad de biomasa por unidad de superficie de terreno.

La menor densidad (600 árboles  $\text{ha}^{-1}$ ) puede ser la adecuada si el objetivo del sistema de producción es la obtención de productos forestales de largas dimensiones. La densidad de 1200 árboles  $\text{ha}^{-1}$  se puede utilizar si el objeto es la producción de bienes forestales de cortas dimensiones, pulpa para papel o captura de carbono, siempre y cuando el carbono así capturado se utilice en productos de larga vida (muebles, u otros).

Las altas densidades incrementan la biomasa, por ende aumenta la captura de carbono.

La mayor respuesta con respecto a la aplicación de fertilización se observó con la aplicación de K, lo cual indica que este es el elemento más deficiente en la zona.

Ninguna de las variables evaluadas respondió a la aplicación de N, lo que significa que dicho elemento no se encuentra deficiente en el lugar, este hallazgo es corroborado por los análisis foliares interpretados tanto por concentraciones críticas como por DRIS.

Existen efectos por la interacción entre densidad de aclareo y aplicación de fertilización en incremento de biomasa, los cuáles son notables a nivel individuo, sin embargo no a nivel de hectárea.

La diversa variabilidad factores físicos y ambientales presentes en los sitios de muestreo provocan menores diferencias estadísticamente significativas en el estudio.

## 8. LITERATURA CITADA

- Aparicio, J., V. Gerding., J. Schlatter. y R. Grez. 2001. Dinámica de elementos nutritivos en la biomasa de *Eucalyptus nitens* al cuarto año de crecimiento, en un suelo rojo arcilloso del sur de Chile. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 12p.
- Barrera, S. 2013. Fertilización de plantaciones forestales en el trópico. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, disponible en <http://ecosistemas-sa.com/ecosistemas/wp-content/uploads/2013/09/fertilizacion.pdf>
- Binkley, D. 1993. Nutrición Forestal. Prácticas de Manejo. Limusa. México. 340p.
- Castellanos, J. F., A. Velázquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Agrociencia 30:123-128.
- Díaz, S. E. 2008. Régimen de aclareos en plantaciones de Pino caribe. Sabana de raya, Venezuela. Universidad Nacional experimental de Guyana. 32 p.
- Dickens, D., D. Moorhead y B. McEvany. 2004 Fertilización de plantaciones de pino. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/F1D6DEA22F9E5610852579A30074B9E3/\\$FILE/Fertilizaci%C3%B3n%20de%20Plantaciones%20de%20Pino.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/F1D6DEA22F9E5610852579A30074B9E3/$FILE/Fertilizaci%C3%B3n%20de%20Plantaciones%20de%20Pino.pdf)
- Ewel, J. 1971. Biomass changes in early tropical sucesion. Turrialba 21:110-112.
- Fao, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1998. Terms and Definitions. FAO Forest Resources Assessment Programme, Working Paper 1. Roma, Italia. 45 p.
- Fao, 1966. Necesidad de fertilizantes en la producción maderera. Revista Unasylva 20(3) 6p Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/44279s/44279s09.htm>
- Figuerola, C. M. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el ejido La Mojonera, Zacualtipan, Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo de México. 61 p.
- Funderburg, E.R. S/F. Fertilizing pine forests in Louisiana. Louisiana State unicertity agricultural centre. 4 p. Disponible en: <http://essmextension.tamu.edu/pinestraw/pdfs/pub2691.pdf>
- Galiano, F. 1972. El análisis foliar como técnica de diagnóstico de las necesidades nutritivas de las plantas. En: Segundo Coloquio de Suelos. El uso de nitrógeno en el trópico. Suelos Ecuatoriales. S.C. C.S. 4 (I): 421-433.

- Giffor, R. 2000. Carbon contents of above-ground tissues of forest and woodland trees. Canberra: Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System, Technical Report N° 22. 17 p.
- Gayoso, A. J. y C. Guerra, J. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33 – 38. Disponible en: [http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0717-92002005000200005&script=sci\\_arttext](http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0717-92002005000200005&script=sci_arttext)
- González, Z. M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *Ochoterenai* Mtz y *Quercus* sp. En el norte del estado de Chiapas, México. CATIE. Costa Rica. 97 p.
- Jaakkola, T., H. Mäkinen M., P. Sarén and P. Saranpää. 2005. Does thinning affect the tracheid dimension of Norway spruce? *Can. J. For. Res.* 35: 2685-2698.
- Kerr, G. y J. Haufe. 2011. U.K Forestry Comission. Disponible en: [http://www.forestry.gov.uk/pdf/Silviculture\\_Thinning\\_Guide\\_v1\\_Jan2011.pdf/\\$FILE/Silviculture\\_Thinning\\_Guide\\_v1\\_Jan2011.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/Silviculture_Thinning_Guide_v1_Jan2011.pdf/$FILE/Silviculture_Thinning_Guide_v1_Jan2011.pdf)
- Klepac, D. 1983. Crecimiento e Incremento de árboles y masas forestales. Departamento de enseñanza, investigación y servicio en bosques. Universidad Autónoma Chpaingo. 297 p.
- Landis, T. D. 1989. Mineral nutrients and fertilization. In: Landis, T.D.; Tinus R.W.; McDonald, S.E.; Barnett, J.P. *The Container Tree Nursery Manual*, Volume 4. Agric. Handbbk. 674. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 1-67.
- Lázaro, D. M. O. 2011. Fertilización NPK en árboles de *Pinus patula* Schl. Et Cham. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 54 p.
- Leak, W. B. 2007. Thinning northern hardwoods in New England by dominant-tree removal-early results. *North J. Appl. For.* 24: 312-313
- López, L. M. A. 2007. Un procedimiento alternativo al tradicional para la medición de alturas con clinómetro. *Madera y Bosques*, 11(2):69-77.
- López-López, M. A. y E. Estañol B. 2006. Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana* 25(1):9-15
- López-López, 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.
- López, D., Soto, L., G. Jiménez. y S. Hernández. 2003. Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia*

- en dos comunidades del norte de Chiapas, México. *Interciencia* 28(006):334-339 p. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0378-18442003000600005&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0378-18442003000600005&script=sci_abstract)
- Malavolta, E., J. Guedes de Carvalho E., A. Pauletto y J.R. Freyfes. 1982. Nutrición mineral e adubação. Instituto da potassa e fosfato. Boletín técnico 5. 3ra. ed. pp 118-1-22.
- Mengel, K., E. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition. Third edition. International Potash Institute. Worblaufen-Bern, Switzerland. 655 p.
- Millan, P. F. 1971. Efecto de fertilización y espaciamiento en dos especies de pino en Uruapan, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Bosques, México. 73 p.
- Pérez, C. M., L. M. López., A. Cetina., A. Equihua M. y J. T. Montiel R. 2013. Relationships between site factors and bark beetle attack on pine trees. *Journal of Biological Sciences*, 13(7):621-627.
- Pritchett, W. L. 1982. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Traducción del inglés por Jose Hurtado Vega. Limusa. México. 634 p.
- Rodríguez, O. y V. Rodríguez. 2000. Desarrollo, determinación e interpretación de normas DRIS para el diagnóstico nutrimental en plantas. *Rev. Fac. Agron. LUZ*. 17: 449-470.
- Rodríguez-Ortiz, G. A., A. Aldrete., V. A. González-Hernández., H. M. de los Santos-Posadas., A. Gómez- Guerrero y A. M. Fierros-González. 2011. ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula* *Agrociencia* 45(6). 14 p.
- Sánchez, P. A. 2013. Desarrollo y verificación de concentraciones críticas y normas DRIS para brinzales y latizales de *Pinus patula* Schl.et Cham. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 47 p
- Segovia, 2011. Rendimiento de *Pinus radiata* de cuatro años de edad con fertilización de liberación controlada al establecimiento en un suelo rojo arcilloso, Valdivia. Universidad Austral de Chile. 28 p. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/fifs454r/doc/fifs454r.pdf>
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis*, en un bosque de altura en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis. UNA, Heredia, Costa Rica. 147 p.
- Timmer, V.R. y 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

- Ugalde, A. L. 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto MADELEÑA en Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico no. 287. Disponible en: CATIE, Turrialba, Costa Rica. 162 p.  
<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2922E/A2922E.PDF>
- Valenzuela, J.L., A. Sánchez. y L. Romero. 1993. Análisis Nutricional. 38 p. Disponible en:  
[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/eeymar/default\\_archivos/Documentacionrelacionnutricionproduccion0910.pdf](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/eeymar/default_archivos/Documentacionrelacionnutricionproduccion0910.pdf)
- Vásquez, G. I. y M. A. López L. 2011. Evolución de la productividad primaria neta aérea en dos plantaciones de *Pinus patula* en Huayacocotla, Ver. XX Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Pachuca, Hgo.
- Wells, C., L. Allen. 1985. When and where to apply fertilizer. United States Department of agriculture forest Service. Southeastern forest Experiment Station. 32 p
- Zhang, S. Y., G. Chauret, D. E. Swift and I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. Can. J. For. Res. 36:945-953.
- Zehetmayr, J. W. L. 1960. Forestry Commission, London. *Bulletin* 32. 145 p.
- Zas, R. 2003. Interpretación de las concentraciones foliares en nutrimentos en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* D. Don en tierras agrarias en Galicia. Investigaciones Agrarias: Sistemas de recursos forestales. 12:4 p.