



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTADO NUTRIMENTAL Y MÉTODOS DE  
DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN ÁRBOLES DE  
NAVIDAD DE *Pseudotsuga menziesii***

RAFAEL RICARDO HERNÁNDEZ VALERA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

## INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

### CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, “**Ing. Rafael Ricardo Hernández Valera**”, Alumno de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor “**Dr. Miguel Ángel López López**”, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “**Estado nutrimental y métodos de diagnóstico nutrimental en árboles de navidad de *Pseudotsuga menziesii***”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Campus Montecillo, a 07 de mayo de 2019

Ing. Rafael Ricardo Hernández Valera

Dr. Miguel Ángel López López

La presente tesis titulada: “**Estado nutrimental y métodos de diagnóstico nutrimental en árboles de navidad de *Pseudotsuga menziesii***” realizada por el alumno: “**Rafael Ricardo Hernández Valera**” bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR



DR. VÍCTOR MANUEL CETINA ALCALÁ

ASESOR



DRA. LIBIA IRIS TREJO TÉLLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2019

# ESTADO NUTRIMENTAL Y MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN ÁRBOLES DE NAVIDAD DE *Pseudotsuga menziesii*

Rafael Ricardo Hernández Valera, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2019

## RESUMEN

Las plantaciones forestales comerciales en México representan una actividad prioritaria para el incremento de la producción forestal y al mismo tiempo generan nuevas alternativas de desarrollo forestal sustentable en las regiones rurales del país. Las plantaciones de árboles de navidad tienen muchos problemas, uno de ellos es la baja productividad de los suelos, mismo que se puede remediar con un adecuado manejo de fertilización, para obtener efectos positivos en el crecimiento de las plantas. Con el propósito de incrementar las tasas de crecimiento en árboles de navidad se realizó la presente investigación en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Veracruz, para estudiar los efectos de N, P, K y micronutrientos, en el crecimiento de brinzales de *P. menziesii*, a cuatro años de su establecimiento, así como la comparación de cuatro métodos de diagnóstico nutrimental. Se tuvo un experimento completamente al azar con un arreglo factorial  $2^4$ , con 16 tratamientos y cinco repeticiones. En el ensayo de fertilización el N y los micronutrientos no tuvieron ningún efecto, el P incrementó el diámetro basal, aunque no en forma significativas, en cambio el K generó un incremento en la biomasa de acículas. Los métodos de diagnóstico que mayormente coincidieron en el diagnóstico son Concentraciones críticas, análisis gráfico de vectores y análisis de suelos. El método de tendencias de concentraciones coincidió con los demás métodos, solo en dos posibles deficiencias; la de P y la de Cu; sin embargo, al parecer falló al indicar deficiencia de Fe, ya que los demás métodos no indican deficiencia de este nutriente. Los nutrientes deficientes de acuerdo al ensayo de fertilización son el K, P y N, aunque la deficiencia de N fue mínima. Los nutrientes deficientes con base a los métodos de diagnóstico nutrimental fueron N, P, K, Cu, Zn y B. No todos los métodos de diagnostican por igual las deficiencias nutrimentales.

**Palabras clave:** Plantación forestal, métodos de diagnóstico nutrimental, ensayo de fertilización, análisis foliares.

**NUTRIENT STATUS AND NUTRIENT DIAGNOSIS METHODS IN *Pseudotsuga menziesii* CHRISTMAS TREES.**

**Rafael Ricardo Hernández Valera, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2019**

**ABSTRACT**

Commercial forest plantations in Mexico represent a priority activity for increasing forest production, while generating new alternatives for sustainable forest development in rural regions of the country. Plantations of Christmas trees face several many problems, one of them is the low productivity of the soils, this can be remediated with an adequate fertilization program, for trees to respond properly. In order to increase the growth rates in Christmas trees, the present research was carried out at ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Veracruz, to study the effects of N, P, K and micronutrients on the growth of seedlings of *P. menziesii*, four years after its establishment, as well as to compare four nutrient diagnosis methods. We used a completely randomized experiment with a factorial arrangement  $2^4$ , with 16 treatments and five replicates. showed no effects on growth P increased basal diameter, although such increment was not significant, K increased biomass of needles. The nutrient diagnosis methods coinciding in their diagnosis were critical concentrations, vectors analysis, and soil analysis; however, the concentrations trends method got right to indicate probable deficiencies of P and Cu, although it apparently failed while detecting Fe deficiency; a nutrient that is unlikely to be deficient. The deficient nutrients according to the fertilization test are K, P and N, although the deficiency of N was light. Deficient nutrients based on nutrient diagnosis methods were N, P, K, Cu, Zn and B. Not all methods diagnose the same nutrient deficiencies.

**Keywords:** Forest plantation, nutrient diagnosis methods, fertilization test, foliar analysis.

## DEDICATORIA

A mi querida madre que siempre me apoya en todas mis metas.

A mi padre que me enseñó a no rendirme nunca.

A mi hermano Javier que siempre me apoya en todo y nunca ha dejado de creer en mí.

A mis queridos hermanos:

María del Carmen, Miguel Ángel, Ernesto, Leticia, Martín, Rogelio, Leoncio, Ángela Yareli.

A todos mis sobrinos.

A mí mismo, por ser una de mis varias metas a cumplir.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haber financiado mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados por su excelencia académica, especialmente al Postgrado Forestal por haberme dado la oportunidad de continuar mi preparación.

Al Dr. Miguel Ángel López, por ser el mejor profesor que he conocido y por su amistad brindada durante mi periodo de maestría, le agradezco profundamente todas las enseñanzas aprendidas de usted, todo lo que me enseñó lo pondré en práctica en mi vida profesional, le agradezco de verdad todo lo que hizo por mí.

Al Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá, por su excelencia como profesor y asesor, por todas sus enseñanzas y consejos que me brindó, así por la amistad que me brindó.

A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez, por ser parte de mi comité y bríndame su apoyo y amistad durante mi trabajo de investigación.

Al Dr. Antonio Trinidad Santos, por sus recomendaciones para enriquecer mi trabajo, así como su amistad brindada, aunque ya no está con nosotros siempre lo recordaré como uno de mis mejores profesores.

A la Ing. Araceli Márquez Méndez, por haber estado conmigo en momentos difíciles y haberme apoyado y motivarme para concluir mis estudios.

A mis amigos que estuvieron conmigo en la maestría: Iván, Angy, Margarita, Elí, Ricardo, Laura, Rodolfo, Anita, Fátima, Eduardo y Ramiro.

A mis amigos que no estuvieron conmigo pero que siempre recibí su apoyo.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE CUADROS.....	xiii
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO I. RESPUESTA DE <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco A LA APLICACIÓN DE N, P, K Y MICRONUTRIMENTOS.....	3
RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.2. OBJETIVOS .....	7
1.2.1 Objetivo general .....	7
1.2.2 Objetivos específicos .....	7
1.3. HIPÓTESIS.....	8
1.4. REVISIÓN DE LITERATURA .....	9
1.4.1 Descripción de <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	9
1.4.2 Distribución de <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	10
1.4.3 Distribución geográfica de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en México.....	11
1.4.4 Árboles de Navidad en México .....	12
1.4.5 Plantaciones de árboles de navidad.....	15
1.4.6 Diseños de plantaciones de árboles de navidad.....	15
1.4.7 Parámetros de la calidad de árboles de navidad.....	16
1.4.8 Fertilización de los árboles de navidad .....	17
1.4.9 Nutrientes requeridos.....	17
1.4.10 Síntomas de deficiencia de nutrientes.....	19
1.5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	23

1.5.1 Localización del área de estudio .....	23
1.5.2 Orografía .....	23
1.5.3 Clima .....	24
1.5.4 Principales ecosistemas.....	24
1.5.5 Edafología .....	24
1.5.6 Área de estudio.....	24
1.5.7 Diseño experimental.....	25
1.5.8 Metodología .....	25
1.5.9 Variables a evaluar .....	27
1.5.10 Análisis de datos.....	28
<b>1.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>29</b>
1.6.1 Variables morfológicas .....	29
1.6.2 Variables fisiológicas .....	39
<b>1.7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>CAPITULO II. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN UNA PLANTACIÓN DE <i>Pseudotsuga menziesii</i> (MIRB.) Franco .....</b>	<b>48</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>48</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>49</b>
<b>2.1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>50</b>
<b>2.2. OBJETIVOS .....</b>	<b>52</b>
2.2.1 Objetivo general .....	52
2.2.2 Objetivo específico .....	52
<b>2.3. HIPÓTESIS.....</b>	<b>53</b>
<b>2.4. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
2.4.1 Diagnóstico nutrimental .....	54
2.4.2 Concentraciones críticas.....	55
2.4.3 Método gráfico de vectores de Timmer y Stone.....	56
2.4.4 Tendencia de concentraciones .....	59
2.4.5 Análisis de suelos.....	59

<b>2.5. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>62</b>
<b>2.5.1 Zona de estudio .....</b>	<b>62</b>
<b>2.5.2 Muestreos foliares .....</b>	<b>62</b>
<b>2.5.3 Análisis nutrimental.....</b>	<b>63</b>
<b>2.5.4 Muestreo y análisis de suelo .....</b>	<b>63</b>
<b>2.5.5 Interpretación de los análisis foliares y de suelo .....</b>	<b>63</b>
<b>2.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>65</b>
<b>2.6.1 Concentraciones críticas.....</b>	<b>65</b>
<b>2.6.2 Análisis de vectores para macronutrientes y micronutrientes .....</b>	<b>67</b>
<b>2.6.3 Tendencias de concentraciones .....</b>	<b>70</b>
<b>2.6.4 Análisis de suelos.....</b>	<b>73</b>
<b>2.7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>78</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución natural de <i>Pseudotsuga menziesii</i> . .....	10
Figura 1.2 Distribución geográfica en México de <i>Pseudotsuga menziesii</i> .....	12
Figura 1.3 Deficiencia de nitrógeno en <i>Pseudotsuga menziesii</i> . .....	20
Figura 1.4 Deficiencia de fósforo en <i>Pseudotsuga menziesii</i> . .....	20
Figura 1.5 Deficiencia de potasio en <i>Pseudotsuga menziesii</i> . .....	21
Figura 1.6 Localización del municipio de Huayacocotla, Veracruz.....	23
Figura 1.7 Localización del área de estudio.....	25
Figura 1.8 Efectos de los factores probados en el experimento (dosis aplicadas de N, P, K y micronutrientos) de fertilización de árboles de <i>Pseudotsuga menziesii</i> sobre a) el diámetro basal alcanzado en 2018 y b) el incremento en diámetro basal. ....	31
Figura 1.9 Pruebas de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para las variables longitud del brote principal (a) y diámetro del brote principal (b) en el experimento de fertilización de la plantación de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en Ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	35
Figura 1.10 Prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para peso seco de 100 acículas en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	39
Figura 1.11 Retención de acículas en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	40
Figura 1.12 Diagrama de Timmer para el análisis de N en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	41
Figura 1.13 Diagrama de Timmer para el análisis de P en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	43
Figura 1.14 Diagrama de Timmer para el análisis de K en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	44
Figura 1.15 Diagrama de Timmer para el análisis de micronutrientos en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	45
Figura 2.1 Curva de concentración nutrimental de Macy .....	56
Figura 2.2 Gráfico de análisis de vectores.....	58
Figura 2.3 Localización del área de estudio del experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	62
Figura 2.4 Diagramas de Timmer para el análisis de macronutrientos en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. (2015). ....	68

Figura 2.5 Diagramas de Timmer para el análisis de micronutrientes en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. (2015). .....	70
Figura 2.6 Tendencia de las concentraciones de macronutrientes en <i>Pseudotsuga menziesii</i> en función del diámetro basal de los árboles. ....	71
Figura 2.7 Tendencia de las concentraciones de macronutrientes en <i>Pseudotsuga menziesii</i> en función del diámetro basal de los árboles. ....	72
Figura 2.8 Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de los nutrientes. ....	75

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 Principales estados productores de árboles de navidad en México. ....	14
Cuadro 1.2. Funciones de los micronutrientes .....	19
Cuadro 1.3 Síntomas de deficiencia en micronutrientes para <i>Pseudotsuga menziesii</i> . ....	22
Cuadro 1.4 Tratamientos de N, P, K y micronutrientes (dosis/árbol) probados en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en Huayacocotla, Ver. ....	26
Cuadro 1.5 Niveles de N, P, K y micronutrientes (dosis de material fertilizante por árbol) probados en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en Huayacocotla, Ver.....	27
Cuadro 1.6 Análisis de covarianza para el diámetro basal 2018 en el experimento de fertilización de una plantación de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	30
Cuadro 1.7 Análisis de covarianza para el incremento en diámetro basal en el experimento de fertilización de una plantación de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ...	32
Cuadro 1.8 Análisis de covarianza para longitud de brote principal en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	34
Cuadro 1.9 Análisis de covarianza para el diámetro del brote principal en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	36
Cuadro 1.10 Análisis de covarianza para el peso seco de acículas (PS) en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	38
Cuadro 1.11 Análisis de varianza para la retención de acículas en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	39
Cuadro 1.12 Análisis de suelos del sitio experimental, interpretados de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 .....	42
Cuadro 2.1 Interpretación de los gráficos de vectores de Timmer y Stone (1978) .....	58
Cuadro 2.2 Concentraciones foliares de los nutrientes en los 16 tratamientos.....	67
Cuadro 2.3 Análisis de suelos en el experimento de fertilización de <i>Pseudotsuga menziesii</i> en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. ....	74

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Las plantaciones forestales comerciales (PFC) constituyen, a nivel nacional, una actividad prioritaria para incrementar la producción forestal en México y contribuir a reducir el déficit del abasto del consumo aparente de materias primas forestales, al mismo tiempo generar alternativas de desarrollo sustentable en las regiones rurales del país. Por estas razones se ha favorecido la implementación de diversas estrategias que fomentan su desarrollo, por ejemplo, el apoyo económico y la integración de alianzas entre plantadores y los gobiernos federal y estatal (CONAFOR, 2017; Zamora, 2015).

El establecimiento de PFC juega un papel preponderante en la solución de problemas de deforestación y baja producción forestal que actualmente enfrenta el país, ya que permite restaurar la cobertura arbórea y detener el avance de la agricultura y ganadería extensiva, así como la provisión a la sociedad de servicios ambientales, que a su vez, coadyuvan a mitigar los efectos del cambio climático; además son generadoras de alternativas económicas rentables y competitivas para los productores (CONAFOR, 2017). La producción de árboles de navidad, ha llegado a ser hoy día en muchos países, una industria forestal generadora de gran de empleos y divisas (Torres y Carvajal, 2012). Las PFC de árboles de Navidad se presentan como una alternativa para producir los árboles que demanda el mercado nacional, sin afectar los bosques naturales y contribuyen a mejorar el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales (CONAFOR, 2011).

Para el establecimiento de las plantaciones dedicadas a este fin no se necesita de grandes superficies, ya que se pueden establecer hasta 7,000 árboles  $\text{ha}^{-1}$  (Álvarez *et al.*, 2009). Las principales especies utilizadas en México son: *Pinus ayacahuite*, *P. menziesii*, *Pinus greggii*, *Pinus cembroides*, *Abies religiosa* y *Picea* sp (Zamora, 2015). El manejo de una PFC de árboles de Navidad implica una serie de prácticas agronómicas, silvícolas y fitosanitarias que requieren de un conocimiento interdisciplinario de ramas como la biología, edafología, climatología, entomología, economía y mercadotecnia (CONAFOR, 2011).

Para la producción de árboles de Navidad, después de establecer la plantación, es necesario dar el manejo necesario y adecuado. Éste incluye protección a la plantación, control de la vegetación competitiva y fertilización. Cuando la calidad del sitio de plantación no es adecuada, se debe fertilizar para proveer los nutrientes necesarios y en cantidades pertinentes para que la plantación tenga un buen desarrollo y se produzcan árboles de calidad (CONAFOR, 2011), la disponibilidad

de los nutrimentos se debe modificar en forma directa mediante tratamientos de fertilización (Binkley, 1993). Con un buen manejo de fertilización se obtienen efectos positivos, ya que al mejorar la nutrición de las plantas se incrementan el crecimiento y el rendimiento (Kozłowski y Pallardi, 1997; Lambers *et al.*, 1998). Las posibles limitaciones nutrimentales siempre estarán relacionadas con la tasa de crecimiento potencial del cultivo y las limitantes climáticas de un sitio (Espinosa *et al.*, 2017). La característica más importante de un programa de manejo nutrimental en bosques es la recomendación de prácticas adecuadas para cada unidad de manejo (Binkley, 1993). Para un buen diagnóstico nutrimental es necesario realizar análisis químicos como análisis de suelo y foliares. Al obtener dichos análisis se han propuestos diversos métodos de diagnóstico que permiten utilizar la concentración mineral como indicador nutrimental (Alcántar *et al.*, 2016).

La presente investigación se realizó en el municipio de Huayacocotla Veracruz, en una plantación de árboles de navidad, con el fin de determinar el estado nutrimental de la plantación de *P. menziesii* y comparar la capacidad predictiva de cuatro métodos de diagnóstico nutrimental.

## CAPÍTULO I. RESPUESTA DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco A LA APLICACIÓN DE N, P, K Y MICRONUTRIMENTOS

### RESUMEN

La demanda de árboles de navidad ha tenido un incremento considerable en México; donde anualmente se comercializa entre 1.6 y 2.0 millones. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco es una especie con alto potencial comercial como árbol de navidad y como especie maderable, que además está en peligro de extinción en México. La investigación se realizó en Huayacocotla Veracruz, en una plantación con bajas tasas de crecimiento, en la cual se estudiaron los efectos de N, P, K y micronutrientes, en el crecimiento de brinzales de *P. menziesii*, a cuatro años de su establecimiento. Las fuentes de los fertilizantes fueron urea (0-16), superfosfato de calcio triple (0-16.5-0), y sulfato de potasio (0-17-0) gramos árbol<sup>-1</sup>, respectivamente. La fuente de micronutrientes fue el producto comercial Sagaquel combi<sup>®</sup> (0-3) mL árbol<sup>-1</sup>. Se condujo a un experimento factorial completamente al azar 2<sup>4</sup>, con un total de 16 tratamientos y cinco repeticiones. Se determinó que el N y los micronutrientes no tienen efectos significativos en las variables respuesta dado que no son poco deficientes. Por otra parte, la nutrición con P incrementó en diámetro basal, sin embargo, dicho incremento no fue significativo. El K incrementó la biomasa de acículas. Los tratamientos que propiciaron mayor retención de acículas fueron aquellos que recibieron N, P y K o una combinación de ellos. Los análisis de suelo en laboratorio son probablemente más eficientes que los ensayos de fertilización para detectar deficiencias nutrimentales. Los nutrientes deficientes en la plantación son el K, P y N, aunque la deficiencia de este último es mínima.

Palabras Clave: análisis de suelo, análisis de vectores, árbol de navidad, estado nutrimental, fertilización, retención de follaje.

## ABSTRACT

The demand for Christmas trees has had a considerable increase in Mexico; where between 1.6 and 2.0 million Christmas trees are sold annually. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco is a species with high commercial potential, due to the quality of its wood and its preference as a Christmas tree. This research was carried out in Huayacocotla Veracruz, in order to study the effects of N, P, K and micronutrients on the growth of seedlings of *P. menziesii*, four years after its establishment. The sources of the fertilizers were urea (0-16), triple calcium superphosphate (0-16.5-0), and potassium sulfate (0-17-0) tree grams<sup>-1</sup>, respectively. The source of micronutrients was the commercial product Sagaquel combi® (0-3) mL tree<sup>-1</sup>. We conducted a completely randomized factorial experiment 2<sup>4</sup>, with a total of 16 treatments and five replicates. It was determined that N and micronutrients have no significant effects on the response variables provided that they were slightly deficient. On the other hand, nutrition with P increased basal diameter, however, this increase was not significant. K increased the biomass of needles. The treatments promoting greater retention of needles were those that received N, P and K or a combination of them. Soil analyses in the laboratory are probably more efficient than fertilization tests to detect nutritional deficiencies. The deficient nutrients in the plantation are K, P and N, although the deficiency of the latter is slight in the plantation.

Keywords: soil analysis, vector analysis, christmas tree, nutrient status, fertilization, foliage retention.

## 1.1. INTRODUCCIÓN

*Pseudotsuga menziesii*, es una especie con alto potencial comercial, debido a la calidad de su madera, producción de taninos, así como a su preferencia como árbol de navidad (Arteaga y Zenil, 2005). En la norma 059-SEMARNAT (SEMARNAT, 2010); se incluye a esta especie con un estatus de protección especial. Por esta razón, es indispensable ayudar al bosque natural a regenerarse mediante reforestaciones, así como incrementar plantaciones forestales con esta especie de alto valor comercial (Arteaga y Zenil, 2005).

De acuerdo con Martínez (1963); *P. menziesii* es un árbol de porte grande, con altura entre 12 y 40 m y diámetro normal entre 35 y 70 cm y hasta 3 m .

La especie de *P. menziesii* es endémica del continente Americano, y crece de manera natural desde los 55° 00' en Columbia Británica en Canadá, hasta los 16° 13' de latitud Norte, en las montañas del sur de México (Del Castillo *et al.*, 2004).

El consumo de árboles de navidad ha tenido un incremento en México, anualmente se comercializan entre 1.6 y 2.0 millones de árboles de Navidad (CONAFOR, 2017).

Al fertilizar los árboles de navidad se puede aumentar la tasa de crecimiento el vigor del árbol, el color del follaje, la densidad del follaje y la retención de acículas; esto último, aún después de que el árbol ha sido cortado (CONAFOR, 2011).

La capacidad productiva del sitio está determinada por la disponibilidad de recursos y la eficiencia de una especie, procedencia o genotipo forestal en hacer uso o aprovechamiento de los recursos disponibles (Allen y Albaugh, 1999). Los recursos que determinan la productividad del sitio corresponden a los elementos que controlan procesos básicos de crecimiento de la planta a nivel fisiológico, estos factores corresponden a: luz o radiación fotosintéticamente activa incidente, agua disponible, nutrientes disponibles, CO<sub>2</sub> atmosférico, oxígeno (a nivel radicular) y temperatura (Espinosa *et al.*, 2017). Para un buen crecimiento y desarrollo de la planta se deben suministrar los nutrientes necesarios e indispensables. Las posibles limitaciones nutrimentales siempre estarán relacionadas a la tasa de crecimiento potencial del cultivo y las limitaciones climáticas de un sitio (Espinosa *et al.*, 2017).

En Huayacocotla, existe una plantación de *P. menziesii* con fines de producción de árboles de navidad; sin embargo, el desempeño de esta especie en el área parece inadecuado

y se presume que el lento crecimiento de los árboles en el sitio puede deberse a problemas de fertilidad del suelo u otros factores que afecten su crecimiento, aun cuando las especies nativas como *Pinus patula*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus* y *P. leiophylla* presentan tasas de crecimiento aparentemente normales. Se realizó esta investigación con el fin de determinar si la reducida tasa de crecimiento de los brinzales de *P. menziesii*, a cuatro años de establecida la plantación, se puede enmendar mediante fertilización química. Así como también determinar los efectos del N, P, K y micronutrientes en el crecimiento en diámetro basal e identificar el o los nutrientes limitantes del crecimiento.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo general

- Estudiar el estado nutrimental de una plantación de *Pseudotsuga menziesii* mediante un estudio de fertilización.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los efectos del nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes en el crecimiento en diámetro basal y longitud de brote principal *Pseudotsuga menziesii*.
- Determinar los efectos del nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes en la biomasa de acículas y retención de follaje de *Pseudotsuga menziesii*.

### 1.3. HIPÓTESIS

**H<sub>0</sub>:** La baja tasa de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en la plantación en estudio no tiene su origen en la deficiencia de uno o más nutrimentos.

**H<sub>a</sub>:** La baja tasa de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* en la plantación en estudio tiene su origen en la deficiencia de uno o más nutrimentos.

## 1.4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.4.1 Descripción de *Pseudotsuga menziesii*

De acuerdo con Martínez (1963), *Pseudotsuga menziesii* es un árbol de porte grande, con altura entre 12 y 40 m y diámetro normal entre 35 y 70 cm y hasta 3 metros. La copa es compacta de forma piramidal en árboles viejos y cónica en arbolado joven. Las ramas están dispuestas irregularmente o en forma subverticilada, extendidas y algo levantadas. La corteza es de color pardo-grisáceo por fuera y rojizo anaranjado por dentro, de 15 a 25 mm de espesor, áspera y hendida, dividida en pequeñas placas irregulares.

En el norte del país, particularmente en los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila y Nuevo León se le conoce como: pinabete, hallarín, guayamé colorado, hallarín colorado, acahuite y guáyame (Martínez, 1979); en la zona centro de México, en los estados de Hidalgo, Tlaxcala y Puebla se le conoce como abeto rojo, pinabete, oyamel chino o romerillo (Mapula, 1995).

Las acículas son delgadas, las inferiores subdisticas, y las superiores están orientadas en todas direcciones; son rectas o levemente falcadas, lineares, por lo general de 15 a 25 mm de largo por 1.25 a 1.40 mm de ancho, de color verde claro, a veces amarillento y glauco en la cara inferior.

El ápice es obtuso o agudo y en algunas ocasiones redondeado, y la base algo torcida; tiene una hendidura longitudinal en la cara superior llegando hasta la extremidad, y una cresta poco saliente en la cara inferior. Los estomas se encuentran formando de 7 a 12 hileras a cada lado de la cresta. Las acículas son persistentes y permanecen en el árbol de 5 a 8 años. Las ramillas secundarias son colgantes, extendidas y frágiles, su color es moreno ceniciento tendiendo a rojizo. Las últimas ramillas más o menos extendidas, de color moreno ceniciento abajo y rojizo anaranjado hacia la punta. La superficie es hirsuta, con los pelillos esparcidos y cortos.

Los estróbilos son de color rojo-anaranjado arreglados en conitos axilares, cilíndrico oblongos, caedizos, de aproximadamente 10 mm de largo y protegidos por brácteas translúcidas de color castaño. Los estróbilos femeninos están colocados en conillos terminales o axilares de color verde-rojizo y protegidos por escamas provistas de grandes brácteas; en la base de cada escama hay dos óvulos.

Las yemas son largamente ovoides acuminadas, protegidas por brácteas de color castaño claro hacia el ápice y miden de 8 a 12 mm de largo. Las brácteas miden de 27 a 30 mm de largo por 5 mm de ancho, con la punta central sobresaliendo unos 5 mm y las laterales no salientes o apenas salientes, con el borde rasgado hacia la parte superior; por lo general son derechas, pero en ocasiones y sobre todo en ejemplares viejos, se observan reflejadas hacia la base del cono.

La madera de *P. menziesii* se ha difundido por el mundo por sus excelentes propiedades (Hermann y Lavender, 1999). A edad adulta la madera de esta especie es dura y de textura fina, con una gran resistencia mecánica, fácil de trabajar y una vez aserrada muestra un grano muy apreciable (Celis, 1996).

#### 1.4.2 Distribución de *Pseudotsuga menziesii*

La distribución de *P. menziesii* es endémica del continente americano (Figura 1.1), y crece de manera natural desde los 55° 00' en Columbia Británica en Canadá, hasta los 16° 13' de latitud Norte, en las montañas del sur de México (García *et al.*, 2004).

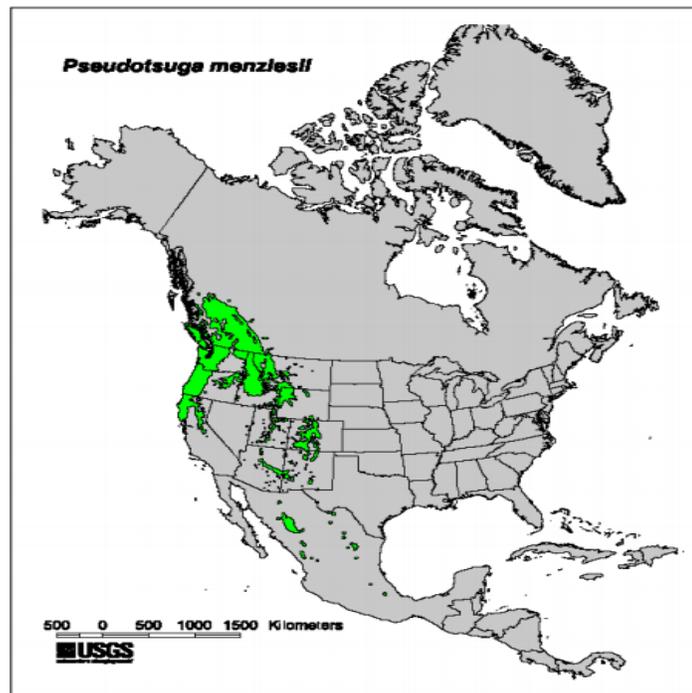


Figura 0.1. Distribución natural de *Pseudotsuga menziesii*.

Fuente: U.S. Geological Survey, 1999, Digital representation of "Atlas of United States Trees" by Elbert L. Little, Jr. <http://climchange.cr.usgs.gov/data/atlas/little/>, accessed 27-Nov-2001.

### 1.4.3 Distribución geográfica de *Pseudotsuga menziesii* en México

En el territorio mexicano las poblaciones de esta especie se encuentran fragmentadas, encontrándose rodales o manchones aislados la mayoría de las veces mezclados y dominados por otras especies (Domínguez *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2006; García *et al.*, 2004). La distribución natural de *P. menziesii* en México incluye la porción norte de la sierra Madre Occidental, en los estados de Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Zacatecas, donde ocupa la mayor extensión de su área de distribución natural, y en la sierra Madre Oriental, en los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas (Figura 1.2). En la región centro del país se encuentra en los estados de Querétaro, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Domínguez, 1986; Vásquez, 2004). Se reportaron dos nuevas localidades para el género *Pseudotsuga* en la región de Huayacocotla, Ver., Domínguez (1986), y en Pinal de Amoles, Qro., (Domínguez *et al.*, 2004). En el sur de México se le ha encontrado en el estado de Oaxaca, donde se localizan dos poblaciones, una en la sierra Norte Debreczy y Rácz (1995) y otra en la sierra Madre del Sur, la que es límite natural austral de la especie (Acevedo, 1998). Cabe mencionar que Debreczy y Rácz (1995); García *et al.* (2004) reportan a la comunidad de *P. menziesii*, en el norte del estado de Oaxaca, a 17° 10' 50", en un lugar denominado "Peña Prieta" del municipio de Santa Catarina Ixtepeji. En esta localidad la especie habita en un área no mayor de 6 a 8 ha en donde se encuentran alrededor de 200 individuos maduros (Acevedo, 1998).

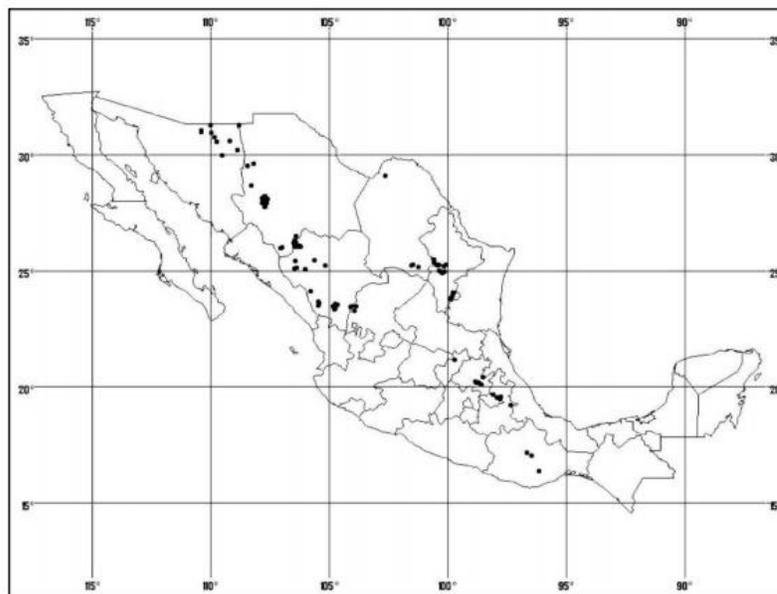


Figura 0.2 Distribución geográfica en México de *Pseudotsuga menziesii*.

Fuente Ventura *et al.* (2009).

En el centro del país *P. menziesii*, se distribuye en los estados de Hidalgo, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Veracruz. En Hidalgo se encuentra en los municipios de Mineral del Chico, Pachuca, Mineral del Monte, Omitlán de Juárez y Singuilucan; en el estado de Tlaxcala en los municipios de Tlaxco, Emiliano Zapata, Terrenate y Alzayanca; y en Puebla en Ixtacamaxtitlán y Tlachichuca. Se desconoce la superficie total que ocupa la especie en nuestro país, especialmente en aquellas entidades que poseen mayor superficie (Chihuahua y Durango); sólo se conoce la superficie de algunas poblaciones en el norte y centro-sur, en donde se han efectuado estudios para determinar el tamaño y estructura de los rodales (Acevedo, 1998; Domínguez, 1994; García *et al.*, 2004; Domínguez *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2007; Velasco *et al.*, 2007; Torres V, 2006). En la búsqueda de semilla para estudios de investigación realizados por el Colegio de Postgraduados se han encontrado otras localidades naturales de *Pseudotsuga*, particularmente en la zona centro de México (Martínez *et al.*, 2007; Velasco *et al.*, 2007; Mápula *et al.*, 2008).

#### 1.4.4 Árboles de Navidad en México

Anualmente, en México se compran entre 1.6 y 2.0 millones de árboles de navidad, de los cuales, 40% son producidos en el país y el resto se importa de Estados Unidos de América

y Canadá. La demanda se presenta en los meses de noviembre y diciembre. Del consumo total, el 60% corresponde a la ciudad de México y su área metropolitana (CONAFOR, 2011).

Las plantaciones forestales comerciales de árboles de Navidad se presentan como una alternativa para producir los árboles que demanda el mercado nacional, sin afectar los bosques naturales y contribuyen a mejorar el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales. En este tipo de plantaciones, los poseedores de las parcelas realizan un aprovechamiento continuo del recurso forestal, al momento en que se aprovecha un árbol, en la siguiente temporada de lluvia, se planta otro o se utilizan los rebrotes para formar un nuevo árbol. Desde este punto de vista, se trata de un recurso que se aprovecha en forma sustentable (CONAFOR, 2011). Las ventajas de las plantaciones de árboles de navidad son de tipo ambiental y económico (CONAFOR, 2017).

#### Ambientales:

- Las plantaciones se establecen en terrenos sin cobertura forestal o de reconversión productiva (de usos agropecuarios a forestal).
- Las superficies que se han incorporado a la producción de árboles de navidad se mantienen como cobertura forestal, resultando una actividad sustentable.
- Desalientan la extracción clandestina de árboles pequeños de los bosques naturales.
- Generan servicios ambientales.
- Se reciclan para producir abono orgánico o sustrato para producir más árboles. No contamina.
- La producción de árboles de navidad artificiales consume gran cantidad de recursos naturales (renovables y no renovables) y genera contaminación atmosférica. En comparación, el cultivo de los árboles de navidad naturales, tiene menor impacto en el ambiente.

#### Económicos:

- Contribuyen a reactivar la economía en las áreas rurales.
- Generan empleo permanente y mano de obra calificada.
- Son productos de alto valor agregado y aceptación en el mercado.

De acuerdo con la Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos de la SEMARNAT, a nivel nacional están registradas 11,335 ha de plantaciones de árboles de Navidad, de las cuales 2,023 ha se han registrado en el período 2013-2017 ante la SEMARNAT, la principal especie utilizada es *Pinus ayacahuite* (57%), un tipo de pino altamente apreciado en el centro de México por su conformación, color y aroma; sin embargo, debido a la demanda en el mercado nacional, el uso del género *Pseudotsuga* sp. (abetos), comienza a formar parte importante de las estadísticas, con 10 % de la superficie establecida en el período 2013-2017 (CONAFOR, 2017). En el Cuadro 1.1 se muestran los principales estados productores de árboles de navidad.

Cuadro 0.1 Principales estados productores de árboles de navidad en México.

<b>Entidades</b>	<b>Superficie Plantada (ha<sup>-1</sup>) período 2002-2017</b>	<b>Beneficiarios</b>
México	1,324	222
Guanajuato	1,291	62
Puebla	477	30
Michoacán	377	16
Veracruz	304	11
Tlaxcala	256	12
CDMX	234	17
Coahuila	228	3
Durango	131	8
Hidalgo	100	8
Querétaro	74	15
Tamaulipas	72	3
Jalisco	64	9
Oaxaca	62	3
Zacatecas	58	4
Nuevo León	57	2
Chihuahua	8	1
Aguascalientes	5	1
Morelos	4	1
<b>Total general</b>	<b>5,127</b>	<b>428</b>

El ciclo de producción es de cinco a ocho años (Cibrián, 2009), dependiendo de la especie; las especies que comúnmente se cultivan en México, en plantaciones especializadas son:

- *Pinus ayacahuite* (pino blanco o pino vikingo)
- *P. menziesii* (pinabete)
- *Pinus greggii* (pino prieto).
- *Pinus cembroides* (pino piñonero).
- *Abies religiosa* (oyamel)
- *Picea* sp. (picea)
- *Cupressus lindleyii* (cedro blanco)
- **Otros:** *Chamaecyparis* (Ciprés de Lawson), *Thuja* (tuyas).

#### **1.4.5 Plantaciones de árboles de navidad**

La plantación se define como un cultivo forestal o rodal establecido artificialmente, ya sea por siembra o plantación. Puede parecer simple, pero las palabras "artificial" o "hecho por humanos" necesita más definición. Por ejemplo, cuando un nuevo bosque se establece en pastizal, dicha forestación es claramente artificial y se le puede llamar plantación. Pero, en un bosque existente que es regenerado por enriquecimiento, aunque se planten árboles, el aspecto general no suele ser muy parecido a una plantación, por lo menos por muchos años (Evans, 1992).

Las plantaciones forestales comerciales se consideran una alternativa para disminuir la presión que se ha ejercido sobre los bosques. Para *P. menziesii* su aprovechamiento se encuentra limitado por ubicarse en la lista de especies bajo protección especial en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, que protege a este género desde 1994, protección que fue ratificada en el 2002 (SEMARNAT, 2010).

#### **1.4.6 Diseños de plantaciones de árboles de navidad**

Nepamuceno y Camacho (1994) mencionan que el espaciamiento entre plantas puede definirse después de considerar algunos factores como: fertilidad del sitio, pendiente del terreno y el objetivo de la plantación. Además, menciona que los mejores índices de supervivencia y crecimiento se han obtenido con una densidad inicial de 2,500 plantas-ha<sup>-1</sup> es decir 2x2 m, también puede plantarse a 3x3 m. Se deben preferir los espaciamientos que permitan el paso de maquinaria para limpiar malezas y que facilite la extracción de materia prima, producto de los aclareos que se realicen

CONAFOR (2011) indica que un apropiado espaciamiento entre individuos en una plantación facilita las diferentes labores de protección y mantenimiento. Para esto se puede aplicar algún diseño de plantación que se adecúan a las condiciones del terreno. Entre los más utilizados está el marco real, en donde la distancia entre hileras de plantaciones y las filas de plantación es la misma. Otro diseño es en triángulo, pie de rey o tres bolillo, en donde la distancia entre hileras y entre filas es la misma, aunque se alterna la proyección del espacio en cada fila subsecuente, con lo que se aprovecha mejor el lugar de crecimiento y el rendimiento por hectárea.

Cuando la pendiente del terreno es superior a 20% es preferible plantar siguiendo las curvas de nivel. La distancia entre plantas debe establecerse en función de las especies, del nivel de producción que se requiera y de la capacidad operativa disponible, de tal forma que existan los siguientes espaciamientos:

1 x 1 m

1.25 x 1.25 m

1.5 x 1.5 m

1.5 x 3 m

#### **1.4.7 Parámetros de la calidad de árboles de navidad**

CONAFOR (2011) menciona que existen ciertos parámetros de calidad para el árbol de navidad.

##### **Forma de la copa**

Para que un árbol sea considerado de calidad, se debe guardar una proporción entre su base y la altura. La base debe ser dos tercios de la altura para lograr una forma cónica. También debe haber calidad en la poda y se define al momento de la comercialización.

##### **Coloración del follaje**

El follaje debe ser de un color verde. Existe una amplia gama de tonalidades de verde, aun tratándose de la misma especie. Cuando hay baja calidad por la coloración del follaje, las acículas presentan amarillamiento, necrosis, puntos negros o cualquier otro tipo de coloración diferente a verde.

##### **Densidad del follaje**

Un árbol de calidad debe tener una densidad del follaje de entre 90 y 100%, esto quiere decir que no debe haber huecos en ninguna cara del árbol.

### **Equilibrio del árbol**

Fuste principal recto y que se encuentre en el centro de la circunferencia del árbol.

### **Flexibilidad de las ramas**

Las ramas adultas deben ser flexibles para facilitar el empaquetado y evitar su resquebrajamiento. Las ramas más jóvenes deben soportar el peso de los adornos navideños.

### **Permanencia de la hoja**

Una vez cortado el árbol, las hojas deben permanecer adheridas, aunque su permanencia varía, dependiendo de la especie, el vigor y la acumulación de horas frío.

### **Olor**

Esta característica es una de las más relevantes para el cliente, depende mucho de la especie.

## **1.4.8 Fertilización de los árboles de navidad**

Los nutrimentos son de suma importancia para el buen crecimiento de los árboles en todas sus etapas. Cuando la calidad del sitio de plantación no es adecuada, se debe fertilizar para proveer los nutrimentos necesarios y en cantidades pertinentes para que la plantación tenga un buen desarrollo y se produzcan árboles de calidad (CONAFOR, 2011)

Al fertilizar los árboles de Navidad se puede aumentar la tasa de crecimiento, el vigor del árbol, el color, la densidad del follaje y la retención de acículas, aún después de que el árbol ha sido cortado. Para determinar el tipo y cantidad de fertilizante a utilizar, es necesario realizar un estudio del suelo donde se establecerá la plantación o un análisis foliar cuando ésta ya exista (CONAFOR, 2011).

## **1.4.9 Nutrimentos requeridos**

Los elementos esenciales son el nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), y cantidades pequeñas de manganeso (Mn), hierro (Fe), cloro (Cl), cobre (Cu), cinc (Zn), Boro (B) y molibdeno (Mo) (Alcántar *et al.*, 2016). Cada uno de ellos presenta un patrón único de origen, transformaciones y disponibilidad para las plantas en diferentes condiciones ambientales (Binkley, 1993). Los nutrimentos como el nitrógeno, el fósforo y el potasio son consumidos en cantidades relativamente grandes por las plantas.

## **Nitrógeno**

El N es uno de los elementos constituyentes más importantes y complejos en la planta, formando parte de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, aminos, amidas, nucleoproteínas y clorofila (Zérega y Hernández, 1998). A pesar de que el  $N_2$  comprende el 78% de la atmósfera, las plantas no lo pueden utilizar directamente porque la mayoría de ellas no tienen la capacidad de llevar a cabo la fijación biológica de este elemento. De esta manera el N es uno de los nutrimentos más limitantes para las plantas. Las formas disponibles de N que son asimiladas por las plantas son el nitrato ( $NO_3^-$ ) y amonio ( $NH_4^+$ ), provenientes de la materia orgánica del suelo (Zérega y Hernández, 1998).

## **Fósforo**

Las formas absorbidas del P son los iones monofosfato ( $H_2PO_4^-$ ) y bibásico ( $HPO_4^{2-}$ ). La temperatura y el pH influyen en la absorción del P. Su deficiencia ocasiona un desarrollo débil, tanto de la parte aérea como del sistema radicular (Ruano, 2003).

Binkley (1993) indica que la forma del P en los ecosistemas es el anión fosfato. En las plantas, éste permanece en forma libre o unido a los azúcares y lípidos, y desempeña una función importante en las transformaciones de energía de las células en forma de adenosín trifosfato (ATP).

## **Potasio**

El K es un elemento que permanece en estado iónico en la planta, equilibrando aniones y es muy móvil dentro de ésta. Las plantas lo absorben bajo la forma  $K^+$ . No es parte fundamental de las plantas (glúcidos, lípidos y próticos) y sin embargo es absorbido en grandes cantidades por ellas (Ruano, 2003). Interviene entre otros procesos en la fotosíntesis, en la formación de próticos, en el buen aprovechamiento del agua por la planta al mantener la turgencia celular. Según Ruano (2003) la deficiencia del K en el suelo se reconoce por un lento crecimiento de la planta, cuando este falta aparecen en las hojas manchas cloróticas seguidas de necrosis en las puntas y bordes.

De acuerdo con Binkley (1993) los minerales de potasio (feldespatos) comúnmente se encuentran en las rocas y en limos y arcillas del suelo, y la intemperización de estos minerales constituye una importante fuente de K para los bosques. El mismo autor menciona que las concentraciones de K en el follaje de las plantas son de 50 al 75% de las concentraciones de

N. En los árboles el requerimiento de este elemento puede ser mayor a los porcentajes mencionados.

### **Micronutrientos**

Los micronutrientos son requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, pero son indispensables para su desarrollo ya que tienen un papel fundamental (Cuadro 1.2).

Cuadro 0.2. Funciones de los micronutrientos

Nutriente	Funciones
Cu	Componente y activador de muchas enzimas, principalmente superóxido dismutasa (SOD) y constituyente de la plastocianina (PC).
Zn	Componente esencial y activador de numerosas. Es necesario para la biosíntesis de la clorofila y ácido indolacético.
Mn	Es importante en la asimilación de nitrógeno, como constituyente de las enzimas nitrato reductasa y nitrogenasa.
B	Participa en el metabolismo y transporte de carbohidratos y en la síntesis de la pared celular.
Fe	Es componente de muchas enzimas y juega un papel muy importante en la transferencia de electrones (reacciones redox), como en los citocromos, en las cadenas de transporte electrónico.

Fuente: Alcántar *et al.* (2016).

#### **1.4.10 Síntomas de deficiencia de nutrientes**

##### **Nitrógeno**

Hernández (2001) nos dice que la deficiencia de nitrógeno en pinos se caracteriza por un amarillamiento simultáneo y generalizado en toda la planta (Figura 1.3). La clorosis se observa en las acículas simples, extendiéndose luego a los fascículos. Las acículas inferiores presentan una coloración que varía de rojo tenue a intenso y las superiores con desecamiento apical. Las plantas son raquílicas y achaparradas.



Figura 0.3 Deficiencia de nitrógeno en *Pseudotsuga menziesii*.  
Fuente: Van den Driessche (1989).

### Fósforo

Las deficiencias de fósforo se parecen mucho a las de nitrógeno, pero la deficiencia de fósforo en pinos se presenta como amarillamiento tenue de las acículas de la parte inferior del tallo (Figura 1.4), que pueden disponerse en forma de mosaico o extenderse homogéneamente, posteriormente, las acículas adquieren coloraciones violáceas, grisáceas hasta alcanzar una coloración morada (Canizal, 2006). A medida que continúa el crecimiento de la planta, la coloración progresa apicalmente afectando las acículas situadas en las partes superiores. Así mismo, un considerable número de las acículas de la parte inferior y media se vuelven rojizas y se secan manteniendo esa coloración. El tallo adquiere también una coloración roja a morada. Se observan defectos en el despliegue de las acículas en fascículo, presentándose los fascículos enrollados y semejando la cabeza de un ave (Hernández, 2001).



Figura 0.4 Deficiencia de fósforo en *Pseudotsuga menziesii*.  
Fuente Van den Driessche (1989).

## Potasio

La deficiencia de potasio se caracteriza debido a que las acículas situadas en la parte inferior de la planta muestran un amarillamiento hacia el ápice, el cual se torna posteriormente rojizo (Figura 1.5). 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 meristemo apical del tallo principal, formando una roseta de acículas con pérdidas de la dominancia apical (Hernández, 2001).



Figura 0.5 Deficiencia de potasio en *Pseudotsuga menziesii*.  
Fuente Van den Driessche (1989).

## Micronutrientos

Los síntomas de deficiencias de los micronutrientos se presentan en el Cuadro 1.3.

Cuadro 0.3 Síntomas de deficiencia en micronutrientos para *Pseudotsuga menziesii*.

Nutrimiento	Síntoma de deficiencia
Cu	Amarilleamiento o clorosis de las agujas, en las plántulas más viejas puede haber un contraste entre el follaje más viejo y el nuevo follaje pálido. Acículas a menudo torcidas con espiral terminal.
Zn	Acículas terminales en forma de espiral, pálidas en etapas tempranas. Crecimiento marcado con expansión anormal de la acícula. Acículas apicales retorcidas juntas, ocasionalmente cloróticas o muertas, follaje de color normal
Mn	Crecimiento reducido, color normal.
B	Crecimiento retardado, pocas ramas, brote terminal pequeño o ausente. Acículas cerca del ápice reducidas o ausentes
Fe	Acículas terminales de color verde pálido a blanco, acículas apicales ocasionalmente en forma de espiral. Color verde pálido amarillo

Fuente; Van den Driessche (1989).

## 1.5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 1.5.1 Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Huayacocotla, Veracruz. El municipio se localiza en la zona norte del Estado de Veracruz, en las coordenadas  $20^{\circ} 32'$  de latitud norte y los  $98^{\circ} 29'$  de longitud oeste (Figura 1.6), a una altitud de 2,140 m. Limita al norte con Llamatlan y Zontecomatlan; al este con Texcatepec y Zacualpan; al sur y oeste con el estado de Hidalgo. Su distancia aproximada a la capital del estado por carretera es de 330 km (INAFED, 2010).



Figura 0.6 Localización del municipio de Huayacocotla, Veracruz.

Fuente: elaboración propia (2018).

### 1.5.2 Orografía

El municipio de Huayacocotla se encuentra ubicado en la zona norte del estado de Veracruz, siendo el espolón más occidental del mismo y sobre la parte más abrupta de la

Huasteca, en el ramal de la Sierra Madre que recibe el nombre local de Sierra de Huayacocotla o de Chicontepec, destacando los cerros del Zapote, el Pílon, Encinal, que forman las cumbres de Huayacocotla; de igual forma sirven de límite con el estado de Hidalgo, los cerros Tepolo y Jabalí; otros como el Corcovado, la Cumbre, Poxtetle, contrastan con las profundas barrancas que lo surcan, como las de la Caldera y Huayacocotla (INAFED, 2010).

### **1.5.3 Clima**

Su clima es templado húmedo con abundantes lluvias en verano con una temperatura promedio 12- 22 ° -C. Su precipitación pluvial media anual va desde 500 a 2600 mm (INEGI, 2009).

### **1.5.4 Principales ecosistemas**

Los ecosistemas que coexisten en el municipio son el de bosque caducifolio con poblaciones de álamos, pinos, encinos, alamillos y jonotes (INAFED, 2010).

### **1.5.5 Edafología**

Los principales suelos que dominan toda esta región de Huayacocotla son los siguientes: Cambisol (30%), Regosol (21%), Luvisol (17%), Leptosol (9%), Acrisol (8%), Umbrisol (5%), Phaeozem (4%), Kastañozem (3%) y Vertisol (2%) (INEGI, 2009).

### **1.5.6 Área de estudio**

El área de estudio se ubica en la localidad de Palo Bendito (Figura 1.7), perteneciente al municipio de Huayacocotla, Veracruz, México, que se ubica en la posición 20° 27' 19.59'' N, 98° 29' 30.59'' O a 2460 m de altitud.

## Ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Veracruz

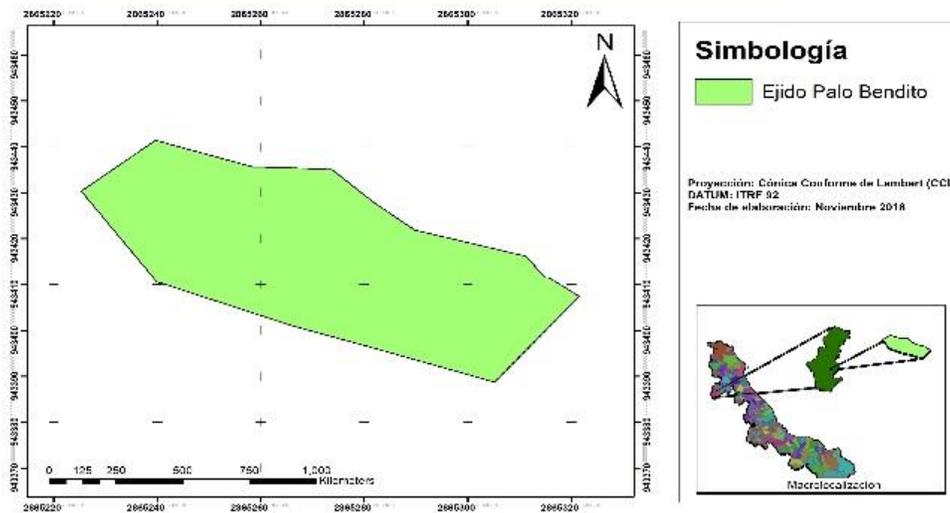


Figura 0.7 Localización del área de estudio.

Fuente: elaboración propia (2018).

### 1.5.7 Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar, el cual establece que la asignación de tratamientos a las unidades experimentales debe ser totalmente aleatoria, de manera que cada brinjal de *P. menziesii* tenga la misma oportunidad de recibir cualquier combinación de los cuatro factores (N, P, K y micronutrientes).

### 1.5.8 Metodología

Los tratamientos corresponden a un arreglo factorial  $2^4$ . La combinación de los niveles de los cuatro factores probados produjo un total de 16 tratamientos los cuales se replicaron cinco veces. La unidad experimental fue un árbol. Los factores de estudio fueron: nitrógeno (N), Fósforo (P), potasio (K) y micronutrientes (Mi), cada factor fue evaluado en dos niveles (dosis/árbol) y éstos se muestran en el Cuadro 1.5. Las fuentes de N, P y K fueron urea (46-00-00), superfosfato de calcio triple (00-46-00, 21CaO), y sulfato de potasio (00-00-50), respectivamente; mientras que la fuente de micronutrientes fue el producto comercial Sagaquel comb<sup>i</sup>® (93 mg Fe, 121.5 mg Zn, B 1.5 mg, Cu 1.2 mg, Mn 7,5 mg y Mo 0.15 mg).

La determinación de las dosis adecuadas a aplicar de (N, P y K) se hizo basándose de las Concentraciones Críticas de *P. menziesii* publicadas por (Zas, 2003) y utilizando el principio del método racional de Rodríguez Suppo, adaptado para tejido vegetal.

Cuadro 0.4 Tratamientos de N, P, K y micronutrientos (dosis/árbol) probados en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en Huayacocotla, Ver.

<b>Tratamiento</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Potasio</b>	<b>Micronutrientos</b>	<b>Repetición</b>
1	0	0	0	0	1 al 5
2	0	0	0	1	1 al 5
3	0	0	1	0	1 al 5
4	0	1	0	0	1 al 5
5	1	0	0	0	1 al 5
6	0	0	1	1	1 al 5
7	0	1	1	0	1 al 5
8	1	1	0	0	1 al 5
9	1	0	1	0	1 al 5
10	1	0	0	1	1 al 5
11	0	1	0	1	1 al 5
12	0	1	1	1	1 al 5
13	1	1	1	0	1 al 5
14	1	1	0	1	1 al 5
15	1	0	1	1	1 al 5
16	1	1	1	1	1 al 5

Los micronutrientos se aplicaron de manera foliar debido a que su absorción es más rápida. De esta manera se acelera el proceso de absorción de los micronutrientos en *P. menziesii*. Para calcular la dosis se siguieron las instrucciones que indica el producto comercial (Sagaquel Combi) fertilizante líquido foliar.

Cuadro 0.5 Niveles de N, P, K y micronutrientos (dosis de material fertilizante por árbol) probados en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en Huayacocotla, Ver.

Factor de estudio	Niveles del factor		Unidades
N	0	16	g árbol <sup>-1</sup>
P	0	16.5	g árbol <sup>-1</sup>
K	0	17	g árbol <sup>-1</sup>
Micronutrientos	0	3	ml árbol <sup>-1</sup>

N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio

La aplicación de los materiales fertilizantes de presentación granulada, se realizó en forma localizada sobre el suelo de la zona de goteo de los brinzales, mientras que los micronutrientos se aplicaron de manera foliar, estas aplicaciones se realizaron en agosto de 2015 y en septiembre de 2017.

#### 1.5.9 Variables a evaluar

Las variables evaluadas fueron: diámetro basal, incremento en diámetro basal, longitud y diámetro basal del brote principal, peso seco de 100 acículas y retención de follaje. El diámetro basal se midió en la base del tallo de los árboles, sobre una marca hecha utilizando un marcador indeleble al momento de establecer el experimento, utilizando un vernier digital Truper. A partir esta variable se estimó el incremento en diámetro basal. La longitud del brote principal se midió con un flexómetro graduado marcar Truper, desde la base del brote hasta la punta. El diámetro del brote principal se midió en la base del brote con un vernier digital Truper. El peso seco de 100 acículas se determinó separando 100 acículas provenientes de la parte media de las ramillas de cada muestra recolectadas el 29 de enero de 2018 conforme o sugieren (Wells y Allen, 1985). Las muestras estuvieron compuestas de tres ramillas, de cada una de las cuales se obtuvo de 33 ó 34 acículas de la parte media para obtener las 100 acículas, con tres repeticiones por tratamiento. Los grupos de 100 acículas fueron secados en una estufa de circulación forzada marca *FELISA*, a 70 °C por 48 h.

Para la retención del follaje, de tres unidades experimentales de cada tratamiento se tomaron tres muestras o ramas; una de la parte baja, una de la parte media y una más de la porción alta de la copa del árbol. Las muestras se tomaron en 2018 y posteriormente se colocaron en lugar ventilando durante un mes, para después recolectar el follaje caído y el

no caído para secarlo hasta tener un peso constante. Con los datos obtenidos se calculó la proporción de follaje retenido.

Para estudiar el estado nutrimental de los brinzales, en respuesta a los tratamientos, se utilizó la técnica de análisis gráfico de vectores (Timmer y Stone, 1978). Para ello se hizo uso del dato de peso seco de 100 acículas, mismas que posteriormente fueron preparadas para su procesamiento en laboratorio.

Las muestras de 100 acículas se enviaron al laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados, para determinar el nitrógeno (N) por el método *micro-Kjeldahl*; el fósforo (P) y el potasio (K) a partir de una digestión diácida y un espectrofotómetro de plasma inductivamente acoplado (ICP). También se determinó los micronutrientes Fe, Cu, Zn, Mn, B.

#### **1.5.10 Análisis de datos**

Las variables diámetro basal, el incremento en diámetro basal, la longitud y diámetro del interverticilo principal y el peso seco de 100 acículas se analizaron mediante un análisis de covarianza (ANCOVA) empleando como covariable el diámetro inicial (diámetro basal 2015). Los análisis de covarianza fueron seguidos por pruebas de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). Para la variable de retención de follaje se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey.

Las concentraciones foliares de nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes se interpretaron mediante la técnica de análisis de vectores (Timmer y Stone, 1978).

## 1.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1.6.1 Variables morfológicas

El análisis de covarianza (ANCOVA) mostró interacciones significativas para N\*Mi y N\*P\*Mi (Cuadro 1.6). Así mismo la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), indicó que no existen efectos significativos de la aplicación de N, P, K y Mi en el diámetro basal 2018 (Figura 1.8a). Estos resultados muestran que no cualquier tratamiento de fertilización produce incrementos de diámetro de los árboles, aspecto que debe tenerse presente al momento de implementar un programa de fertilización en plantaciones forestales (Vásquez *et al.*, 2015).

Cuadro 0.6 Análisis de covarianza para el diámetro basal 2018 en el experimento de fertilización de una plantación de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Modelo	16	4802.36	300.15	11.33	<.0001
N	1	8.44	8.44	0.32	0.57
P	1	92.84	92.84	3.50	0.07
N*P	1	0.68	0.68	0.03	0.87
K	1	11.67	11.67	0.44	0.51
N*K	1	4.05	4.05	0.15	0.70
P*K	1	30.85	30.85	1.16	0.28
N*P*K	1	5.62	5.62	0.21	0.65
Mi	1	6.56	6.56	0.25	0.62
N*Mi	1	110.78	110.78	4.18	0.05
P*Mi	1	1.60	1.60	0.06	0.81
N*P*Mi	1	139.55	139.55	5.27	0.03
K*Mi	1	1.56	1.56	0.06	0.81
N*K*Mi	1	29.14	29.14	1.10	0.30
P*K*Mi	1	27.85	27.85	1.05	0.31
N*P*K*Mi	1	0.25	0.25	0.01	0.92
DM15	1	4330.94	4330.94	163.42	<.0001
Error	63	1669.64	26.50		
Total corregido	79	6472			

Donde: N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Mi=micronutrientes, DM15=diámetro basal 2015, GL=grados de libertad.

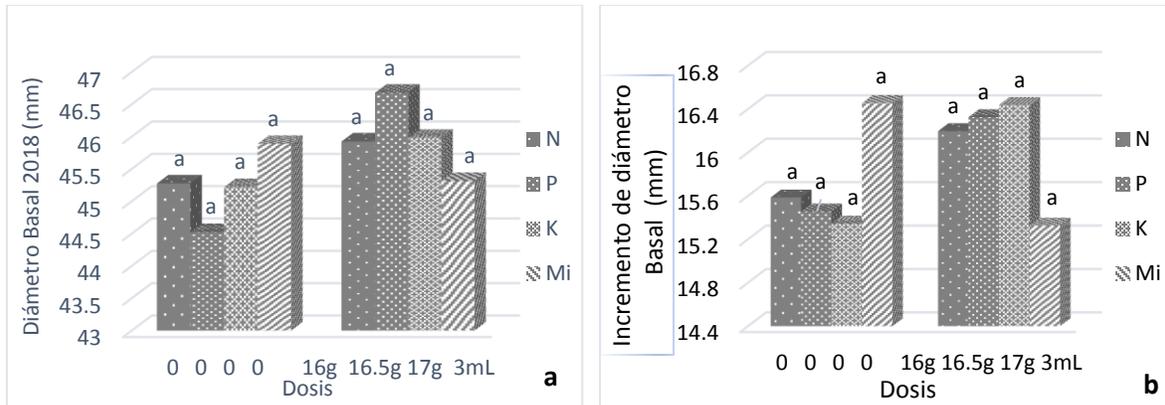


Figura 0.8 Efectos de los factores probados en el experimento (dosis aplicadas de N, P, K y micronutrientes) de fertilización de árboles de *Pseudotsuga menziesii* sobre a) el diámetro basal alcanzado en 2018 y b) el incremento en diámetro basal.

Para el caso del incremento en diámetro basal el análisis de covarianza muestra que no hubo efectos significativos de los factores probados (Cuadro 1.7; Figura 1.8b). Esto se puede deber a la alta variabilidad entre unidades experimentales en el diámetro basal de los brinzales al inicio del experimento, dado que la selección de las unidades experimentales se basó en la altura de los brinzales y no en el diámetro basal. El incremento de diámetro basal de brinzales solo fue influenciado de manera significativa por la interacción N\*P\*Mi (Cuadro 1.7). En la Figura 1.8b, se puede identificar que no hay efectos significativos de los niveles de los nutrientes probados, aunque las tendencias de N, P y K indican que la aplicación de cualquiera de los nutrientes, excepto micronutrientes, generó mayor incremento en diámetro basal que los correspondientes tratamientos sin fertilización. Con base en los efectos de los fertilizantes aplicados (Figura 1.8b), el N es levemente deficiente en el sitio de estudio; en cambio, el P y K, al parecer son más deficientes ya que con su aplicación los brinzales respondieron de manera más categórica en cuanto al incremento en diámetro basal, aunque sin diferencias estadísticamente significativas. La falta de efectos más pronunciados ante la aplicación de los nutrientes se puede deber a que las dosis fueron bajas con respecto a los niveles de demanda y condiciones de fertilidad de la plantación. En efecto, el sitio experimental parece ser de baja fertilidad dado que, en la región, la principal arcilla que conforma el suelo es la caolinita; material típicamente de baja capacidad de intercambio catiónico (Hernández, 2017). Por otro lado, las concentraciones nutrimentales en el tejido vegetal de *P. menziesii*, especialmente las relativas a K son elevadas (0.80%; (Weetman *et*

al., 1992), si se comparan con los de *Pinus patula* (0.63%; (Sánchez, 2013), que es una de las coníferas naturales del sitio de estudio. Esto significa que probablemente, las dosis aplicadas de K fueron insuficientes para promover mayores respuestas a la aplicación.

Cuadro 0.7 Análisis de covarianza para el incremento en diámetro basal en el experimento de fertilización de una plantación de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Modelo	16	556.71	34.79	1.31	0.2179
N	1	7.46	7.46	0.28	0.60
P	1	15.13	15.13	0.57	0.45
N*P	1	6.64	6.64	0.25	0.62
K	1	23.93	23.93	0.90	0.35
N*K	1	2.43	2.43	0.09	0.76
P*K	1	87.63	87.63	3.31	0.07
N*P*K	1	7.68	7.68	0.29	0.59
Mi	1	25.53	25.53	0.96	0.33
N*Mi	1	10.33	10.33	0.39	0.53
P*Mi	1	3.31	3.31	0.12	0.73
N*P*Mi	1	136.06	136.06	5.13	0.03
K*Mi	1	12.05	12.05	0.45	0.50
N*K*Mi	1	15.27	15.27	0.58	0.45
P*K*Mi	1	7.12	7.12	0.27	0.61
N*P*K*Mi	1	29.25	29.25	1.10	0.30
DM15	1	166.89	166.89	6.30	0.0147
Error	63	1669.64	26.50		
Total corregido	79	2226.35			

Donde: N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Mi=micronutrientos, DM15=diámetro basal 2015, GL=grados de libertad.

Por otra parte, el ANCOVA realizado con los datos de la longitud de brote principal ( $p=0.267$ ), indica que no existen diferencias estadísticamente significativas (Cuadro 1.8). No hubo efectos significativos ni de los factores probados ni de sus interacciones. La prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), indica que no existen diferencias significativas entre los niveles cero y uno de N, P, K y Mi (Figura 1.9a); no obstante, y a pesar de la gran variabilidad que normalmente presentan las variables relacionadas con la altura de árboles incluyendo la longitud de brote central, se observó una tendencia a incrementar la longitud del brote cuando se fertilizó con K. Esto puede significar que dicho nutrimento presente mayor deficiencia en el sitio de estudio, aunque Vázquez *et al.* (2018) encontraron que el K favoreció el crecimiento de los brinzales en *Pinus greggii*, aun cuando este nutrimento no fue deficiente en el sitio experimental. Los autores proponen que este efecto se debió a que probablemente promueve un uso más eficiente del agua (Perez *et al.*, 2016).

Cuadro 0.8 Análisis de covarianza para longitud de brote principal en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Modelo	16	2603.12	162.70	1.24	0.2670
N	1	5.53	5.53	0.04	0.84
P	1	44.39	44.39	0.34	0.56
N*P	1	6.22	6.22	0.05	0.83
K	1	4.29	4.29	0.03	0.86
N*K	1	48.29	48.29	0.37	0.55
P*K	1	351.47	351.47	2.68	0.11
N*P*K	1	415.83	415.83	3.17	0.08
Mi	1	27.19	27.19	0.21	0.65
N*Mi	1	44.85	44.85	0.34	0.56
P*Mi	1	346.85	346.85	2.64	0.11
N*P*Mi	1	301.95	301.95	2.30	0.13
K*Mi	1	159.35	159.35	1.21	0.28
N*K*Mi	1	40.24	40.24	0.31	0.58
P*K*Mi	1	12.29	12.29	0.09	0.76
N*P*K*Mi	1	28.33	28.33	0.22	0.64
DM15	1	766.06	766.06	5.84	0.0188
Error	59	7743.61	131.25		
Total corregido	75	10346.73			

Donde: N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Mi=micronutrientes, DM15=diámetro basal 2015, GL=grados de libertad.

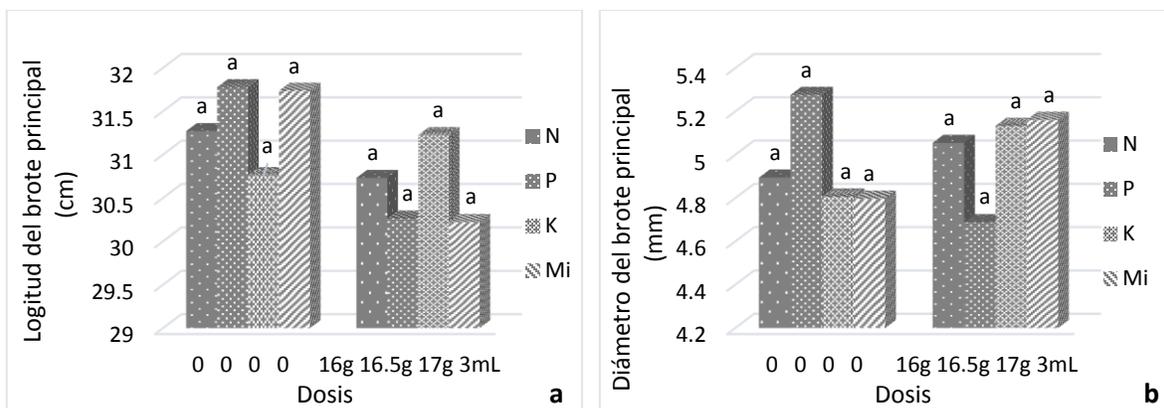


Figura 0.9 Pruebas de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para las variables longitud del brote principal (a) y diámetro del brote principal (b) en el experimento de fertilización de la plantación de *Pseudotsuga menziesii* en Ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

Como en el caso de diámetro del brote principal, el ANCOVA mostró que no existen efectos significativos de los factores probados ( $p=0.2121$ ) sobre el diámetro del brote principal (Cuadro 1.9). Se encontraron efectos significativos en esta variable de la interacción P\*K. La prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) confirmó que no existen diferencias entre las dosis aplicadas de los nutrientes (Figura 1.9b). Por otra parte, si bien los efectos del K no fueron significativos, se observó que su aplicación tendió a incrementar el diámetro de brote respecto al tratamiento sin K. En coincidencia con el comportamiento de otras variables como diámetro basal e incremento en diámetro basal, existen incrementos del crecimiento, aunque éstos no son significativos. Este tipo de tendencias, puede indicar deficiencia de K en el sitio, de modo que su aplicación tiende a incrementar el diámetro del brote (Figura 1.9b), aunque no de manera significativa, probablemente debido a retraso en los efectos de fertilizante, causados por posible retención de los nutrientes en el xilema de los brinzales, como lo explican López y Flores (2016); también, puede deberse a que la deficiencia del nutriente en el sitio es demasiado aguda al tiempo que la demanda de nutriente por el árbol es muy alta, como se sustentó anteriormente, aunado a la elevada variabilidad de las unidades experimentales al inicio del experimento, según lo demuestra el efecto del DM15 (Cuadro 1.9).

Cuadro 0.9 Análisis de covarianza para el diámetro del brote principal en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Modelo	16	67.98	4.25	1.33	0.2121
N	1	0.49	0.49	0.15	0.70
P	1	6.48	6.48	2.02	0.16
N*P	1	1.31	1.31	0.41	0.53
K	1	1.98	1.98	0.62	0.44
N*K	1	0.42	0.42	0.13	0.72
P*K	1	12.97	12.97	4.05	0.05
N*P*K	1	1.70	1.70	0.53	0.47
Mi	1	2.92	2.92	0.91	0.34
N*Mi	1	5.05	5.05	1.58	0.21
P*Mi	1	11.53	11.53	3.6	0.06
N*P*Mi	1	1.34	1.34	0.42	0.52
K*Mi	1	2.17	2.17	0.68	0.41
N*K*Mi	1	0.98	0.98	0.31	0.58
P*K*Mi	1	3.35	3.35	1.05	0.31
N*P*K*Mi	1	0.01	0.01	0	0.96
DM15	1	15.30	15.30	4.78	0.0328
Error	59	188.92	3.20		
Total corregido	75	256.89			

Donde: N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Mi=micronutrientes, DM15=diámetro basal 2015, GL=grados de libertad.

En cuanto al peso seco de 100 acículas (PS), al utilizar el diámetro basal de 2015 como covariable, se identifica que éste no influyó en el comportamiento del peso seco de 100

acículas, de acuerdo con el ANCOVA (Cuadro 1.10). Esto sugiere que dicha característica probablemente no es afectada por el tamaño de los árboles, lo que la hace ser una variable quizá más confiable que otras para evaluar los efectos de fertilización en *P. menziesii*. Los efectos significativos encontrados son ejercidos por el K y también las interacciones P\*Mi y P\*K\*Mi. La prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) confirma lo anterior (Figura 1.10). De acuerdo con este resultado, es posible afirmar que el K es un elemento deficiente en el área de estudio. (Weetman, 1989) menciona que los árboles con una buena nutrición tienden a crecer más rápidamente que los árboles con deficiencias nutrimentales y que por lo regular, el crecimiento se presenta en altura y diámetro basal o a la altura del pecho, pero también se presenta un crecimiento en el tamaño de las acículas.

Cuadro 0.10 Análisis de covarianza para el peso seco de acículas (PS) en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado de la media</b>	<b>F-Valor</b>	<b>Pr &gt; F</b>
Modelo	16	0.30	0.02	2.17	0.0317
N	1	0.01	0.01	0.69	0.41
P	1	0.02	0.02	2.59	0.12
N*P	1	0.00	0.00	0.22	0.64
K	1	0.06	0.06	7.33	0.01
N*K	1	0.00	0.00	0.55	0.46
P*K	1	0.01	0.01	1.45	0.24
N*P*K	1	0.02	0.02	2.66	0.11
Mi	1	0.00	0.00	0.12	0.73
N*Mi	1	0.01	0.01	1.71	0.20
P*Mi	1	0.06	0.06	7	0.01
N*P*Mi	1	0.00	0.00	0.21	0.65
K*Mi	1	0.01	0.01	1.5	0.23
N*K*Mi	1	0.00	0.00	0.07	0.80
P*K*Mi	1	0.04	0.04	4.71	0.04
N*P*K*Mi	1	0.02	0.02	2.81	0.10
DM15	1	0.01	0.01	1.04	0.3155
Error	31	0.27	0.01		
Total corregido	47	0.56			

Donde: N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Mi=micronutrientes, DM15=diámetro basal 2015, GL=grados de libertad.

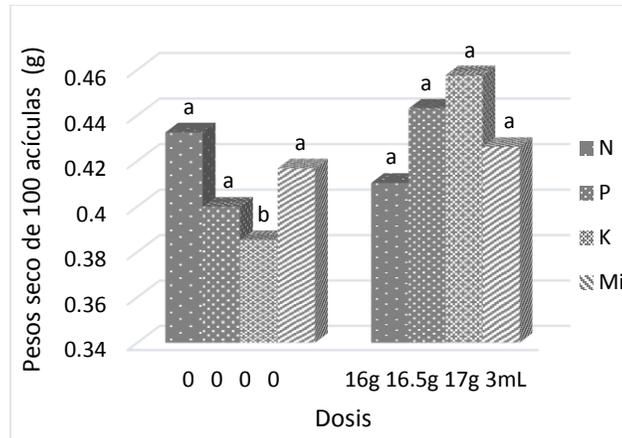


Figura 0.10 Prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) para peso seco de 100 acículas en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

## 1.6.2 Variables fisiológicas

### Retención de follaje

El análisis de varianza (ANOVA) realizado para la retención de acículas indica que hay efectos significativos entre los tratamientos probados (Cuadro 1.11; Figura 1.11). El tratamiento cuatro, que es la aplicación de P y el tratamiento uno, que es el tratamiento testigo (sin fertilizante) fueron los tratamientos que menor proporción de follaje retuvieron. Se esperaba que el tratamiento testigo fuera uno de los que menor cantidad de follaje retuvieran debido a que no recibió ninguno de los nutrientes probados en este estudio. Los resultados indican que el P por sí solo no ayuda a la retención de follaje, pero en combinación con el K, constituye el mejor tratamiento que ayuda a retener mayor proporción de follaje. El N y el K por si solos si ayudan a retener una mayor cantidad de follaje, ya que son estadísticamente iguales al tratamiento siete, el cual fue el que más follaje retuvo.

Cuadro 0.11 Análisis de varianza para la retención de acículas en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	15	3796.87	253.12	5.37	<.0001
Error	32	1508.83	47.15		
Total corregido	47	5305.71			

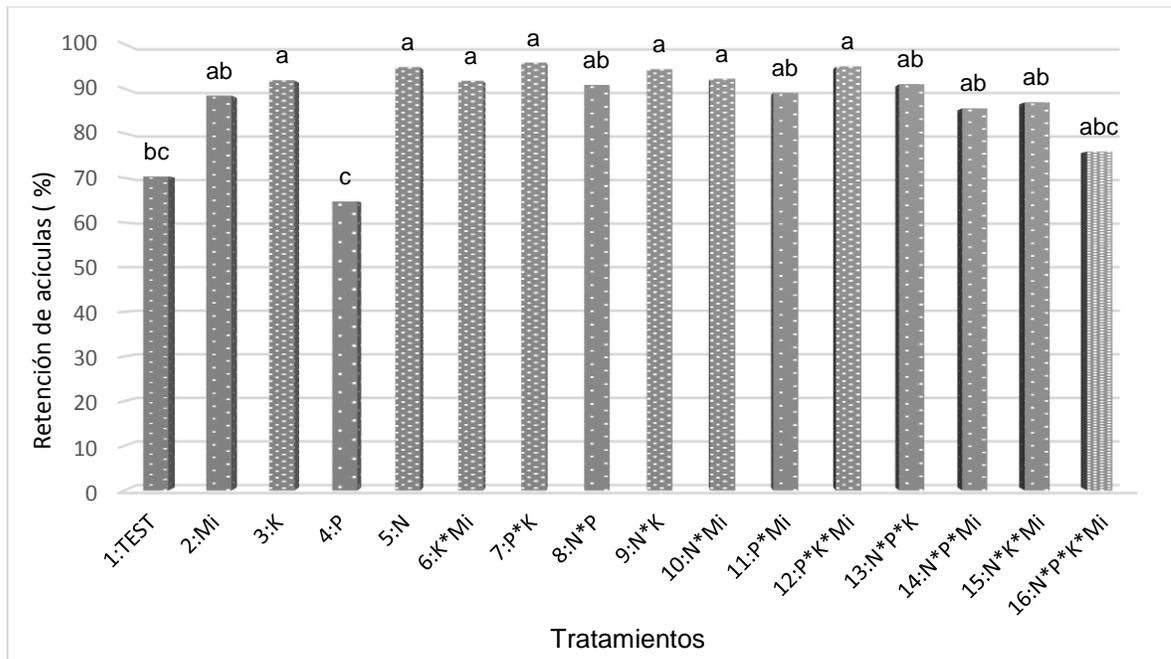


Figura 0.11 Retención de acículas en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

Este resultado es importante debido a que, en el caso de árboles de navidad, la retención de follaje es una característica altamente deseable desde el punto de vista comercial (Chastagner y Riley, 2003), ya que los compradores prefieren que los árboles retengan el follaje por tres semanas o más. De acuerdo con esta variable, se recomienda aplicar en el sitio materiales fosfatados y potásicos para mejorar la retención de follaje. Este resultado es congruente con lo indicado por la mayoría de variables morfológicas, las cuales, aunque no mostraron efectos significativos (excepto el peso seco de acículas) de los tratamientos, las tendencias de crecimiento sí indicaron posibles deficiencias de K y P.

### Estado nutrimental

Todos los tratamientos generaron un mayor peso seco de acículas que el tratamiento testigo (Figura 1.12). Así mismo casi todos los tratamientos excepto uno tuvieron concentraciones de N bajas de acuerdo con las concentraciones críticas (1.45 %) establecidas para *P. menziesii* por Ballard y Carter (1986).

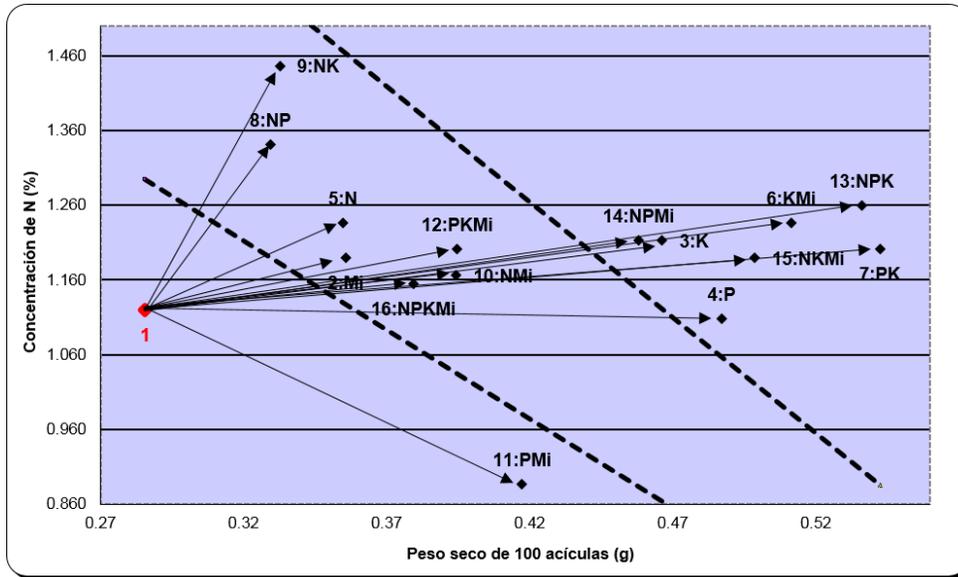


Figura 0.12 Diagrama de Timmer para el análisis de N en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

En los análisis de suelos (Cuadro 1.12) se observa que la concentración de N es muy baja, comparada con el valor adecuado según la norma 021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). Dado que la concentración foliar de N en casi todos los tratamientos es inferior a la concentración crítica, es probable que exista una deficiencia de este nutrimento en el sitio de estudio, aun cuando la aplicación del mismo no mostró valores significativamente superiores en las variables morfológicas.

Cuadro 0.12 Análisis de suelos del sitio experimental, interpretados de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000

<b>Parámetro</b>	<b>Muestra</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>	<b>Diagnóstico</b>
CE (dS/m)	0.39	2	1.1	Bajo
pH	4.10	6.5	5.1	Bajo
CIC (meq/100 g)	22.19	25	15	Adecuado
N (%)	0.08	0.8	0.3	Bajo
P (ppm)	0.53	30	15	Bajo
K (meq/100 g)	0.001	0.6	0.3	Bajo
Ca (meq/100 g)	3.00	10	5	Bajo
Mg (meq/100 g)	1.50	3	1.3	Adecuado
Fe (ppm)	13.26	4.5	4.5	Elevado
Cu (ppm)	0.11	0.2	0.2	Bajo
Zn (ppm)	0.18	1	1	Bajo
Mn (ppm)	3.95	1	1	Elevado
B (ppm)	0.00	1	1	Bajo

Donde: CE=conductividad eléctrica, dS/m= decisiemens por metro, pH=potencial hidrogeno, CIC=capacidad de intercambio catiónico, meq/100 g= mili equivalentes por 100 gramos N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Ca=calcio, Mg=magnesio, Fe=hierro, Cu=cobre, Zn=zinc, Mn=manganeso, B=boro.

La falta de respuestas a la aplicación de N se debió, de acuerdo con la Figura 1.12, a que las deficiencias de P y K son más agudas que las de N en el sitio experimental. En efecto, los tratamientos con N, ya sea solo o combinado con P (N\*P) o K (N\*K), generaron las mayores concentraciones de N, lo que indica que internamente, el N es excesivo con respecto a los otros nutrientes (López y Alvarado, 2010). La Figura 1.12 muestra también que los cuatro tratamientos que generaron las mayores biomásas de acículas incluyeron la aplicación de K, mientras que los dos más productivos incluyeron P, lo que confirma que estos nutrientes (K y P) son los nutrientes más deficientes en el área experimental.

Con respecto al fósforo (Figura 1.13), todas las concentraciones foliares de los tratamientos aplicados fueron bajas en comparación con las concentraciones críticas (0.15 %) para esta especie (Ballard y Carter, 1986). Esto concuerda con lo indicado por los análisis de suelos (Cuadro 1.12), mismos que muestran que existe deficiencia de P, de acuerdo con la norma 021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

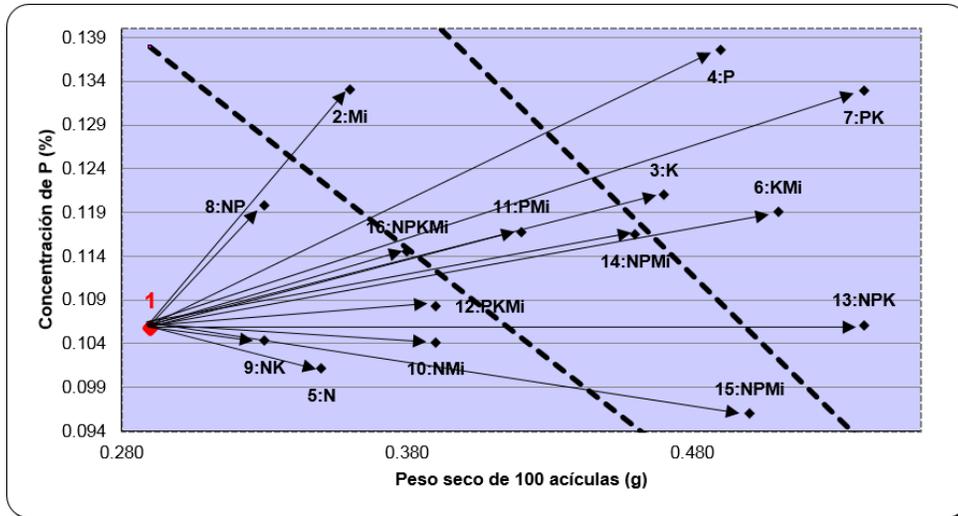


Figura 0.13 Diagrama de Timmer para el análisis de P en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

De acuerdo con la Figura 1.13, el hecho de que el tratamiento con solo suministro de P, haya generado mayor biomasa foliar y concentraciones más altas de este nutrimento en los tejidos, en comparación con el tratamiento testigo, indica que el nutrimento es deficiente en el sitio, pero la dosis utilizada de P fue suficiente, mientras que otro u otros factores limitaron el crecimiento (López y Alvarado, 2010). En este caso, probablemente ese factor fue el K. Lo anterior se confirma porque de los siete tratamientos que generaron mayor peso seco de acículas, cinco de ellos recibieron alguna dosis de P (Figura 1.13), lo que de acuerdo con (López y Alvarado, 2010) corresponde a vectores de Timmer (Timmer y Stone, 1978), del tipo +,+,+ o bien, +,-,+ (López y Alvarado, 2010), mismos que indican deficiencia del nutrimento antes de su aplicación.

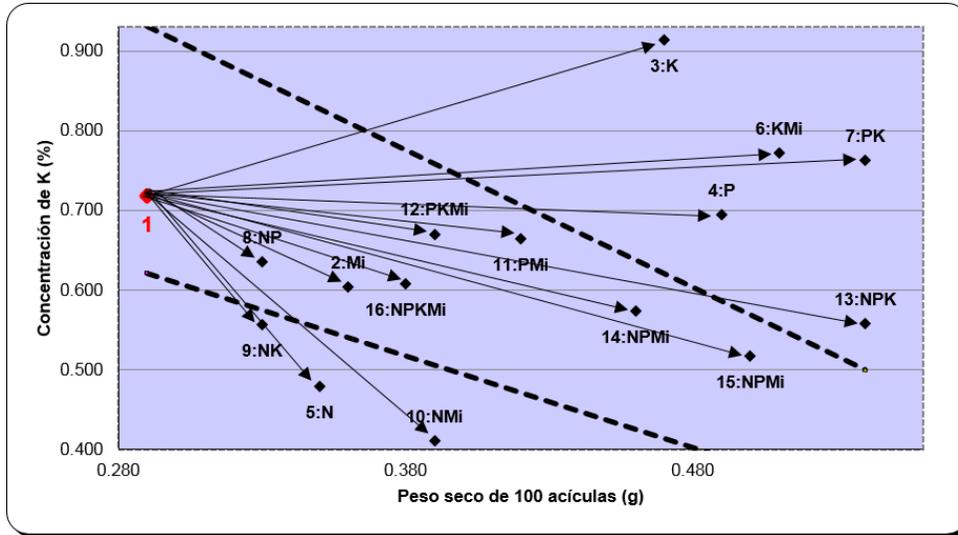


Figura 0.14 Diagrama de Timmer para el análisis de K en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

Para el caso del K todos los tratamientos que lo recibieron, excepto cuando se suministró como nutrimento único, generaron concentraciones más bajas que las concentraciones críticas (0.80 %) de esta especie (Ballard y Carter, 1986; Van den Driessche, 1991). En el caso de K (Figura 1.14), en la mayoría de tratamientos se generó dilución del K foliar por crecimiento [vectores tipo +++ o bien, +- -, López y Alvarado (2010)], pero se identifica fácilmente que la aplicación de N limitó la absorción (menores contenidos) de K (Tratamientos 5, 8, 9 y 10).

En todos los tratamientos con K, excepto cuando fue el único nutrimento suministrado, las concentraciones de este elemento fueron más bajas que las concentraciones críticas (0.80 %) para esta especie (Ballard y Carter, 1986; Van den Driessche, 1991), lo que confirma que se trata de un nutrimento deficiente. La concentración foliar alta de K en el tratamiento con solo adición de K se debió a que dicho tratamiento no recibió N, esto se puede deber a que la fertilización de N en bosques causa que K se vuelva deficiente en los sitios donde el suministro de K es limitado (Mika y Moore, 1991). Por tal motivo y al no generarse competencia con N, se produjo una alta concentración y un mayor crecimiento en biomasa. De acuerdo con Van den Driessche (1991), este vector corresponde al vector de Timmer (Timmer y Morrow, 1984) del tipo +,+,+, el cual indica que este nutrimento es muy poco abundante (Ballard y Carter, 1986) en el área de estudio. Por otro lado, cuatro de los 16

tratamientos generaron mayor biomasa de acículas y dichos tratamientos recibieron K, lo que nuevamente indica posible deficiencia de K en el sitio. Esta deficiencia se confirma con la prueba de Tukey para el peso seco de 100 acículas (Figura 1.10) que muestra los efectos positivos del potasio. Los análisis de suelo indicaron que el K es un nutrimento deficiente en el área de estudio de acuerdo con la norma 021-RECNAT-2000. Cabe mencionar que en una de las tres muestras de suelo enviadas al laboratorio no fue detectado el K, y en las dos restantes la concentración determinada fue muy baja (Cuadro 1.12).

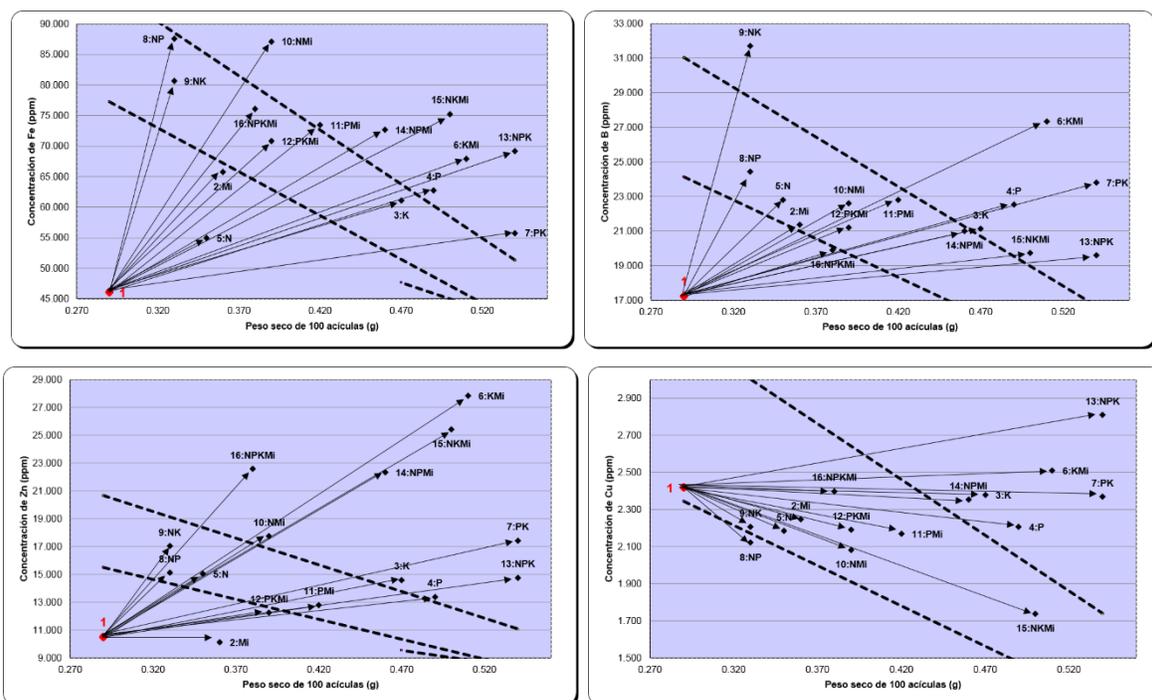


Figura 0.15 Diagrama de Timmer para el análisis de micronutrientes en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

Para el caso del Fe y B todos los tratamientos tienen una mayor concentración que el tratamiento testigo (Figura 1.15), aunque los micronutrientes no ocasionaron un crecimiento en acículas. De acuerdo con las concentraciones críticas de ( $Fe > 50ppm$ ,  $B > 20ppm$ ) establecidas por (Ballard y Carter, 1986; Van den Driessche, 1991); estos nutrimentos no son deficientes en el área de estudio. De acuerdo con los análisis de suelos, el Fe no es deficiente en el sitio, lo cual concuerda con las concentraciones foliares encontradas en este estudio. En el caso de B si existe una deficiencia de acuerdo con los análisis de suelos (Cuadro 1.12). Para el caso del Zn todos los tratamientos (excepto uno)

generaron una mayor concentración que el tratamiento testigo. Las concentraciones críticas de Zn (15 ppm) establecidas por (Ballard y Carter, 1986; Van den Driessche, 1991), indican que este nutriente posiblemente es deficiente, ya que cinco de los 16 tratamientos son menores a 15 ppm. De hecho, los análisis de suelos, el Zn es deficiente en el sitio experimental. El Cu tiene una posible deficiencia de acuerdo a las concentraciones críticas ( $Cu > 3 \text{ ppm}$ ) de (Ballard y Carter, 1986) ya que todos los tratamientos tienen menos de tres partes por millón, mientras que los análisis de suelo también indican deficiencia de este nutriente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede recomendar la aplicación de dosis iguales o mayores que las proporcionadas de P y K en este estudio, ya que estos nutrientes son claramente deficientes en el sitio. También se recomendaría aplicar una dosis media de N, pues su deficiencia es menos aguda que las de P y K. Se recomienda una dosis de micronutrientes igual o mayor que la utilizada en este estudio. Esto, en razón de que, aunque no tuvieron efecto positivo en el crecimiento, sí propiciaron un aumento de sus concentraciones foliares, por lo que al remediarse las deficiencias de macronutrientes, se evitará el desarrollo de deficiencias de estos elementos menores.

Se rechaza la hipótesis nula debido a que la baja tasa de crecimiento de *P. menziesii* en la plantación en estudio tiene su origen en la deficiencia de uno o más nutrientes.

## 1.7. CONCLUSIONES

El P es un nutrimento deficiente en el sitio experimental y por tanto tiende a aumentar el diámetro basal de los brinzales de *P. menziesii*. El K es el nutrimento más deficiente en el sitio y genera incrementos incluso significativos de algunas variables morfológicas. El N es un nutrimento ligeramente deficiente en relación con los demás macronutrientes en el área de estudio. El hecho de que los análisis de suelo y foliares, estos últimos interpretados mediante concentraciones críticas; determinen la deficiencia de N aun cuando las variables morfológicas no respondieron significativamente a la aplicación de N, significa que tales análisis de suelo en laboratorio son probablemente más eficientes que los ensayos de fertilización para detectar deficiencias nutrimentales en la especie estudiada. Los micronutrientes no tuvieron efectos positivos en las variables evaluadas. Los nutrimentos deficientes en la plantación son el potasio, fósforo y nitrógeno, aunque la deficiencia de este último es menor. Los tratamientos con una mezcla de N, P y K promovieron mayor retención de acículas en el área experimental. Las tasas de crecimiento de los árboles responden positivamente a la fertilización química siempre y cuando se apliquen los nutrimentos deficientes en el sitio. La retención de follaje postcosecha de brinzales de *P. menziesii* se puede mejorar significativamente mediante el manejo nutrimental de las plantaciones. En el sitio estudiado, la aplicación de una combinación de los nutrimentos más deficientes (P y K) mejora significativamente la retención de acículas de *P. menziesii*.

**CAPITULO II. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO  
NUTRIMENTAL EN UNA PLANTACIÓN DE *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.)  
Franco**

**RESUMEN**

Para verificar el estado nutrimental de un cultivo se cuenta con herramientas analíticas químicas que sirven para medir las concentraciones nutrimentales en los tejidos vegetales y en el suelo. Los análisis foliares y de suelo realizados de forma oportuna e interpretados adecuadamente, son una herramienta útil para corregir deficiencias nutrimentales en los cultivos. La comparación de cuatro métodos de diagnóstico nutrimental para determinar deficiencias nutrimentales se llevó a cabo utilizando un experimento de fertilización química en una plantación de árboles de navidad de *P. menziesii* con bajas tasas de crecimiento, fertilizada con N, P, K y micronutrientes en la localidad de Palo Bendito, Huayacocotla, Veracruz. Los métodos de diagnóstico utilizados fueron las concentraciones críticas, método gráfico de vectores, tendencias de concentraciones y análisis de suelos. Se determinó que existen deficiencias de N, P, K, Cu y Zn de acuerdo con las concentraciones críticas. Los análisis de vectores indicaron deficiencias leves de N, fuertes de P y mayores de K y Cu. El método de tendencias de concentraciones fue el único método que indicó que existen deficiencias de Fe. Los análisis de suelos muestran deficiencias de N, P, K, Cu, Zn y B. El método más confiable en este estudio fue el análisis de suelo debido a que diagnosticó seis nutrientes, seguido por las concentraciones críticas, ya que éstas diagnosticaron cinco nutrientes deficientes en la plantación. El método gráfico de vectores indicó deficiencias de cuatro nutrientes. El método de tendencias indicó deficiencias de hierro. Cada método de diagnóstico nutrimental genera resultados distintos, pero algunos de los métodos coinciden en indicar las mismas deficiencias.

Palabras Clave: Nutriente limitante, concentraciones críticas, análisis de vectores, tendencia de concentraciones, análisis de suelos.

## ABSTRACT

To verify the nutrient status of a crop, chemical analytical tools are available to determine nutrient concentrations in plant tissues and soil. Foliar and soil analyzes performed in a timely manner and properly interpreted, are a good tool to correct nutritional deficiencies in crops. The comparison of four methods of nutrient diagnosis to determine nutritional deficiencies was carried out by using a chemical fertilization experiment in a Christmas tree plantation of *P. menziesii* with low growth rates, fertilized with N, P, K and micronutrients in the locality of Palo Bendito, Huayacocotla, Veracruz. The diagnostic methods were critical concentrations, graphical vectors analysis, concentration trends method and soil analysis. It was determined that there are deficiencies of N, P, K, Cu and Zn according to the critical concentrations. Vector analyzes showed slight deficiencies of N, strong deficiencies of P and greater deficiencies of K and Cu. The concentration trends method was the only one indicating deficiencies of Fe. Soil analyzes showed deficiencies of N, P, K, Cu, Zn and B. The most reliable methods in this study are soil analyzes provided that they diagnosed six nutrient deficiencies followed by the critical concentrations, since this method diagnosed five deficient nutrients in the plantation, the graphical vectors analysis showed deficiencies of four nutrients. The concentration trends method indicated Fe deficiency. Each nutrient diagnosis method gives rise to its own diagnosis; however, some methods coincide to indicate the same nutrient deficiencies.

Keywords: Limiting nutrient, critical concentrations, vector analysis, concentration trends method, soil analysis.

## 2.1. INTRODUCCIÓN

Para incrementar la productividad de los cultivos de interés es necesario maximizar su potencial genético durante su desarrollo (Alcántar *et al.*, 2016). Aunque el rendimiento máximo de un cultivo está predeterminado genéticamente, algunos factores abióticos (edáficos, climáticos y de manejo agrotécnico del cultivo) pueden modificarlo (Alcántar *et al.*, 2016). Comprender los factores que regulan la disponibilidad de nutrientes en plantaciones forestales y predecir su dinámica es una tarea muy compleja (Espinosa *et al.*, 2017). La investigación sobre fertilización forestal ha proporcionado a los silvicultores algunas herramientas o directrices precisas para diagnosticar deficiencias de nutrientes y predecir las respuestas al tratamiento (Carter *et al.*, 1998). Para verificar que el estado nutricional de un cultivo sea el ideal en cada momento de su ciclo de desarrollo, se cuenta con herramientas analíticas químicas que sirven para medir concentraciones nutrimentales en los tejidos vegetales y en el suelo (Etchevers, 1999). La investigación diagnóstica se ha centrado en el análisis foliar (Carter *et al.*, 1998), ya que se considera que la hoja es el órgano de la planta que refleja mejor el estado nutricional (Malavolta, 1997), la cual es recolectada con características precisas de edad, orientación, altura, posición dentro del árbol y hora del día (Jones Jr *et al.*, 1991). La evaluación del estado nutricional de un cultivo se realiza comparando los resultados obtenidos en una muestra foliar con otra denominada patrón de referencia; esta última es el producto de los resultados de investigación relacionados con el rendimiento (Rodríguez y Rodríguez, 2000). La interpretación de los resultados de los análisis foliares permite identificar el nivel nutricional de las plantas (Puentes *et al.*, 2016). Una planta se considera ideal cuando sus tejidos contienen los elementos en cantidades y proporciones adecuadas, es capaz de tener alta productividad y exhibir un buen aspecto visual (Malavolta, 1997). Estos análisis realizados de forma oportuna e interpretados adecuadamente, son una herramienta apropiada para corregir limitantes nutricionales del cultivo, y para determinar la concentración óptima de los nutrientes en una determinada época del ciclo del cultivo, que asegure los mejores rendimientos en este sentido, los resultados de los análisis foliares se pueden interpretar de varias formas (Etchevers, 1999). Algunas de ellas son las concentraciones críticas, análisis de vectores de Timmer y Stone (1978) y tendencia de concentraciones. Las concentraciones críticas se definen como la

concentración más baja asociada al crecimiento máximo, o bien, como la concentración de un nutrimento en el tejido, con la cual se logra entre el 90 y 95% del máximo crecimiento o también puede ser sinónimo de la concentración por debajo de la cual aparecen los síntomas visuales (Van den Driessche, 1991). Los análisis de vectores son una herramienta que enlaza el estado de nutrimentos y el crecimiento de la planta como respuesta a un determinado tratamiento (Timmer y Stone, 1978). El método de tendencias de concentraciones está basado en los procesos de concentración y dilución nutrimental que tienen lugar en los tejidos vegetales y en la ley de Liebig (López y Estañol, 2007). En cuanto a los análisis de suelos, éstos son útiles especialmente cuando la vegetación de interés no está presente. Los análisis de suelos son una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización (Molina, 2007).

En Huayacocotla, Veracruz existe una plantación de *P. menziesii* con fines de producción de árboles de navidad, en la cual se estableció el presente experimento de fertilización en el 2015, con el fin de diagnosticar el estado nutrimental y mejorar las tasas de crecimiento del arbolado, con el propósito de determinar la capacidad predictiva del estado nutrimental de cuatro métodos de diagnóstico nutrimental.

## **2.2. OBJETIVOS**

### **2.2.1 Objetivo general**

- Determinar la capacidad predictiva de cuatro métodos de diagnóstico nutrimental para determinar el estado nutrimental de árboles de *Pseudotsuga menziesii*.

### **2.2.2 Objetivo específico**

- Determinar los nutrimentos deficientes mediante cuatro métodos de diagnóstico nutrimental en una plantación de *P. menziesii* en Huayacocotla, Veracruz.

### 2.3. HIPÓTESIS

**H<sub>01</sub>:** Todos los métodos de diagnóstico nutricional probados, diagnostican por igual el estado nutricional de *Pseudostuga menziesii*.

**H<sub>a1</sub>:** Existe diferencia en el diagnóstico nutricional dependiendo del método de diagnóstico empleado.

## 2.4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.4.1 Diagnóstico nutrimental

El fundamento teórico del diagnóstico nutrimental se basa en la “Teoría de la nutrición mineral de las plantas”, propuesta por los científicos Carl Sprengel y Justus von Liebig en 1840, la cual consiste en preguntar al cultivo sobre su estado nutrimental, mediante algunas técnicas del diagnóstico nutrimental (Alcántar *et al.*, 2016).

Los métodos de diagnóstico en la nutrición de cultivos se dividen en dos grupos: edáficos y vegetales (diagnóstico visual, el diagnóstico químico y el diagnóstico funcional).

El diagnóstico edáfico se refiere a los análisis químicos de suelos. Éstos se ocupan para recabar información del potencial que posee un suelo para abastecer en tiempo y forma los nutrimentos que requiere un cultivo (Alcántar *et al.*, 2016).

El diagnóstico visual es un método muy sencillo y rápido que permite evaluar las alteraciones nutrimentales de los cultivos, directamente en campo. Consiste en comparar el aspecto de una muestra vegetal afectada con una muestra patrón (normal o sin síntomas aparentes). En la mayoría de los casos se comparan las hojas (órgano indicador), aunque en ocasiones también se puede comparar raíces, frutos, tallos y otros órganos de la planta (Alcántar *et al.*, 2016).

El diagnóstico químico comúnmente denominado análisis foliar, se refiere al análisis cuantitativo de los nutrimentos minerales en el tejido vegetal y se basa en el hecho que la hoja es el órgano metabólicamente más activo en la planta, por lo que las alteraciones nutricionales afectan más a la hoja que a otros órganos (Kenworthy, 1967). Es una técnica que permite utilizar la concentración mineral de las plantas como indicador de su situación nutrimental, asociada a logros de altos rendimientos y mejores características de calidad del producto cosechado, en relación con el grado de abastecimiento y disponibilidad nutrimental en el suelo, el sustrato, el medio de cultivo o la solución nutritiva (Alcántar *et al.*, 2016).

Dada la naturaleza dinámica de la composición de la hoja, que es fuertemente influenciada por su edad, así como por la interacción entre los nutrimentos, el diagnóstico foliar ha sido una práctica difícil de entender y usar (Walworth y Sumner, 1987). Para comprender el estado nutrimental de una planta se debe de realizar una comparación entre una muestra de la planta y un patrón o estándar de comparación, el cual se le denomina

“norma”. Estas normas son definidas como las concentraciones de nutrimentos en la planta o conjunto de ellas “normales” desde el punto de vista nutricional. Se definen plantas “normales” a aquellas que tienen en sus tejidos todos los elementos en cantidades y proporciones adecuadas, son de alta producción y presentan una apariencia externa sana (Kühl y Rodríguez, 2011).

Marschner (1995) señala que se requieren estándares nutrimentales para regiones y localidades, ya que existirían diferentes niveles óptimos para cada elemento, dependiendo de la situación en que se encuentre el cultivo. Juárez (2018) encontró requerimientos nutrimentales de plántulas de *Pinus patula* muy elevados comparados con los encontrados por (López, 1990) para la misma especie, y atribuyó las diferencias en los requerimientos, a las diferencias de la temperatura, fundamentalmente.

La interpretación de los resultados en los análisis foliares se puede realizar por medio de una simple comparación entre la concentración de un elemento y su norma, métodos denominados estáticos. Entre ellos se encuentran el Sistema del Nivel Crítico, el Sistema del Rango de Suficiencia (SRA), el Sistema de Desviación del Óptimo Porcentual (DOP), el Sistema del Balance del Nutriente Evolutivo (BNE), el Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS), el Diagnóstico Nutrimental Compuesto (CND) y el Diagnóstico Diferencial Integrado (DDI), (Alcántar *et al.*, 2016; Kühl y Rodríguez, 2011). Existen otros métodos para el diagnóstico nutrimental.

#### **2.4.2 Concentraciones críticas**

Alcántar *et al.* (2016) lo define como el nivel (valor o concentración) crítico de deficiencia de la parte especificada a la concentración de un nutrimento en particular, determinada en condiciones experimentales, donde todos los factores de crecimiento se encuentran en un nivel óptimo, que se asocia con el rendimiento máximo. Este valor predeterminado corresponde al 90 o 95% del rendimiento máximo. El nivel crítico puede considerarse la concentración más baja asociada al crecimiento máximo, o el nivel de un nutrimento, asociado al 90 o 95% del máximo crecimiento, o punto de inflexión de la curva, o el punto medio de la zona de transición. También puede ser sinónimo de la concentración por debajo de la cual aparecen los síntomas visuales (Van den Driessche, 1991).

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 nutriente en cuestión. Cuando un nutriente se encuentra en concentración suficiente para la planta, ésta tiene un crecimiento con un comportamiento constante (Figura 2.1). La relación entre el crecimiento de las plantas y los niveles de nutrientes en los tejidos de la planta siguen un patrón característico hasta cierto punto, donde por más fertilizante que se aplique, los niveles de los nutrientes ya no influyen en un mayor crecimiento. Más allá de este punto los nutrientes se pueden acumular en la planta provocando toxicidad y el crecimiento de la planta puede disminuir. A la zona donde se da el mayor aprovechamiento de nutrientes por parte de la planta se le conoce como nivel crítico (Landis, 1989). Para el caso de *P. menziesii* se han determinado las concentraciones críticas por parte de Ballard y Carter (1986); Van den Driessche (1991).

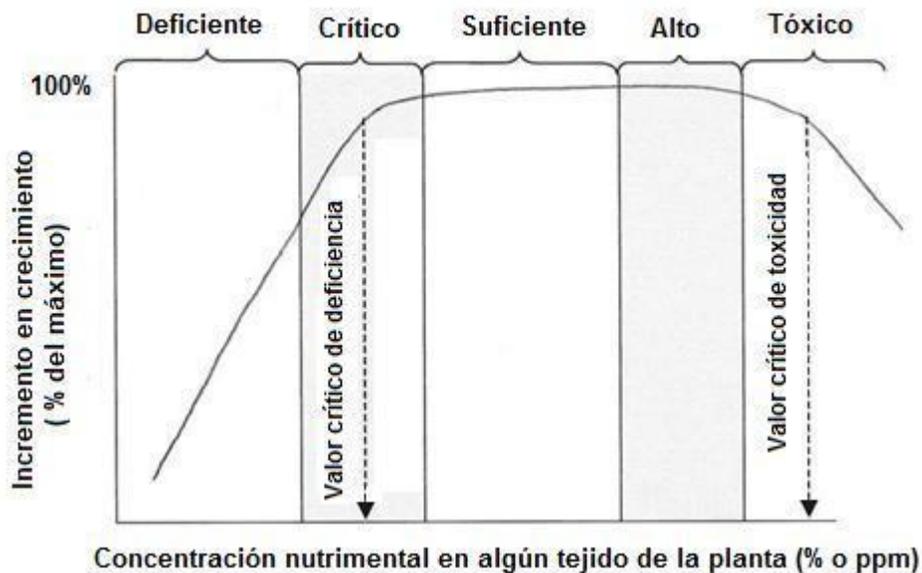


Figura 0.1 Curva de concentración nutricional de Macy

Fuente: Modificado de Landis (1989).

### 2.4.3 Método gráfico de vectores de Timmer y Stone

El análisis de vectores, desarrollado por Timmer y Stone (1978), es una herramienta que enlaza el estado de nutrientes y el crecimiento de la planta como respuesta a un determinado tratamiento. Este método se usa para determinar la limitación de los nutrientes. Su

desarrollo reconoció la debilidad del diagnóstico basado solo en las medidas de concentración de nutrimentos, particularmente para detectar los efectos de dilución y el equilibrio de nutrimentos. Como la concentración de un nutrimento en el tejido vegetal es el resultado de dos procesos dinámicos, la absorción de nutrimentos y la producción de materia seca y dado que la absorción y acumulación de un nutrimento, afecta el estado de otros nutrimentos, la intención fue desarrollar un sistema cuantitativo para evaluar los multinutrimentos e interrelaciones en términos de combinar la concentración de un nutrimento, la absorción de nutrimentos (contenido) y el crecimiento de la planta. Debido a la naturaleza dinámica de los procesos involucrados, se adoptó un enfoque gráfico en lugar de numérico. El formato de presentación se basó en el modo de Heinsdorf's de describir la respuesta foliar en concentración, contenido y peso seco unitario en un solo nomograma para cada nutrimento (Van den Driessche, 1991). Binkley (1993) menciona que para la utilización de este método se debe fertilizar en la primavera, aplicando los nutrimentos que limitan el crecimiento y los árboles testigos permanecen sin fertilizar. Las acículas se deben coleccionar en verano para ser analizadas en laboratorio. La concentración de nutrimentos, el contenido de éstos (concentración  $\times$  peso) y el peso de las acículas se representan en una gráfica (Figura 2.2) por separado para cada nutrimento. El método de Timmer ha demostrado que es una herramienta relativamente eficaz que permite determinar las limitaciones de mayor importancia de los nutrimentos (Cuadro 2.1) de una gran variedad de situaciones (Weetman y Fournier, 1982; Timmer y Morrow, 1984). Este método es una buena alternativa para determinar que nutrimentos (o alguno de ellos) limitan el crecimiento de los árboles en lugares o regiones donde se han llevado a cabo pocas investigaciones al respecto (Binkley, 1993).

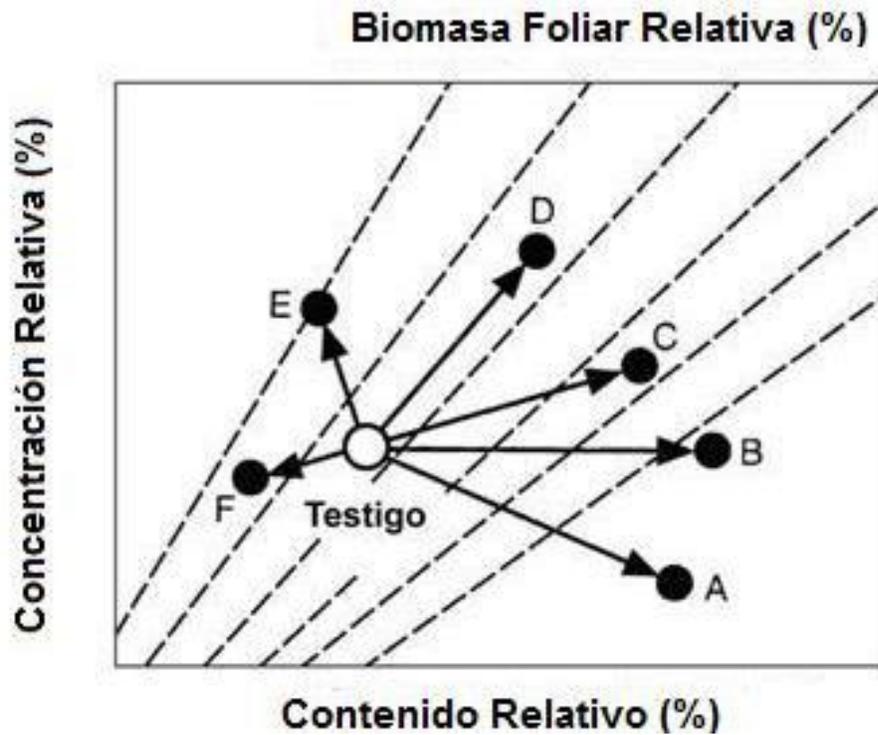


Figura 0.2 Gráfico de análisis de vectores.

Fuente: Modificado de Timmer y Stone (1978) y Timmer y Morrow (1984).

Cuadro 0.1 Interpretación de los gráficos de vectores de Timmer y Stone (1978)

Dirección del cambio	Respuesta observada				Interpretación	Diagnostico probable
	Peso de las acículas	Nutrimiento				
		Concentración	Contenido			
A	+	-	+	En dilución	No limitante	
B	+	0	+	Abundante	No limitante	
C	+	+	+	Poco abundante Consumo	Limitante	
D	0	+	+	abundante	No tóxico	
E	-	++	±	En exceso	Tóxico	
F	-	-	-	En exceso	Antagónico	

Fuente: Binkley (1993)

López y Alvarado (2010) presentaron una guía para la interpretación de los diagramas de Timmer, que incluye un mayor número de vectores y para cada uno de ellos propone una interpretación inicial y una posterior a la aplicación de tratamientos.

#### **2.4.4 Tendencia de concentraciones**

Debido a que son pocas las especies forestales mexicanas que cuentan con los valores de Concentraciones Críticas o Normas DRIS, existen dificultades para hacer la interpretación de los resultados de análisis foliares y diagnósticos nutrimentales, por lo que López y Estañol (2007) generaron una metodología para la detección de deficiencias nutrimentales, que está basada en los procesos de concentración y dilución nutrimental que tienen lugar en los tejidos vegetales y en la ley de Liebig. Estos mismos autores indican que el método de tendencias de concentraciones consiste en definir la tendencia que sigue cada uno de los nutrimentos con el cambio de dimensiones de los árboles. Para este caso, la dimensión que se selecciona es el incremento de diámetro normal del fuste, el cual se relaciona estrechamente con la biomasa aérea de los mismos (Waring y Schelesinger, 1985).

Para detectar la tendencia de la concentración de cada nutrimento, el procedimiento plantea estandarizar las escalas de todos los nutrimentos para hacerlas comparables estadísticamente ( $\text{media}=1$  y  $\text{varianza}=0$ ); posteriormente, graficar cada uno de los nutrimentos en función del diámetro de los árboles y estimar la pendiente de la curva que resulta en cada caso. Después se comparan las pendientes correspondientes a los diferentes nutrimentos para seleccionar aquella que indique mayor dilución (la de menor valor). El nutrimento cuya tendencia de su concentración en el tejido presente el menor valor negativo para su pendiente será el nutrimento que más limite el crecimiento. Una pendiente de cero indica suficiencia o deficiencia secundaria. Las pendientes positivas, indican suficiencia del nutrimento, toda vez que su concentración se incrementa al aumentar la biomasa del tejido analizado (López y Estañol, 2007).

#### **2.4.5 Análisis de suelos**

Molina (2007) Indica que el análisis de suelos es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización. Con el análisis de suelos se pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrimentos del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los

cultivos, tales como la acidez excesiva, la salinidad, y la toxicidad de algunos elementos. El análisis de suelo permite determinar el grado de fertilidad del suelo. La fertilidad es vital para que un suelo sea productivo, aunque un suelo fértil no necesariamente es productivo, debido a que pueden existir otros factores de tipo físico como el mal drenaje, escasa profundidad, piedra superficial, déficit de humedad, etc., que pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo sea adecuada. El grado de potencial productivo de un suelo está determinado por sus características químicas y físicas (Molina, 2007).

Etchevers (1999) menciona que los análisis de suelo se emplean para estimar la disponibilidad de un elemento particular. Los análisis de suelos son índices de disponibilidad y no verdaderas cantidades disponibles de un elemento (Westerman, 1990).

Los análisis químicos de suelos que se emplean para el diagnóstico del estado nutrimental de los suelos son de dos tipos.

Los primeros miden una característica que se asocia con la fertilidad de los suelos (pH, CE, materia orgánica, capacidad de intercambio de cationes, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de carbonato de calcio, relación de adsorción de sodio, porcentaje de sodio intercambiable, acidez y aluminio intercambiable). La interpretación de estos análisis es directa, esto es, se cuentan con tablas que tienen una validez casi universal (Etchevers, 1999).

Los segundos miden lo un índice de la disponibilidad de un nutrimento en el suelo. Estos índices de disponibilidad pueden ser la fracción soluble, intercambiable, extraíble, fijada o mineralizable. Ejemplos de determinaciones de fracciones son: el N-nítrico, que es esencialmente una fracción soluble, el P soluble o extractable, la concentración de K, Ca, Mg, Na solubles, intercambiables o extractables, la concentración de Fe, Mn, Zn, Cu y Mo extractable, y el B soluble en agua. Para la interpretación de estos resultados es preciso contar con calibraciones que, en estricto rigor, deberían ser hechas para cada cultivo y tipo de suelo (Etchevers, 1999).

Etchevers (1999) indica que para la interpretación de estos análisis químicos de suelos requieren de un necesario conocimiento de la teoría que los soportan, base del éxito de la misma.

Cada una de las técnicas de diagnóstico nutrimental tiene sus propios principios, por lo que no es poco frecuente que unas técnicas arrojen resultados diferentes a otras. Por esta

razón, es aconsejable utilizar en la medida de lo posible, varias técnicas de diagnóstico en cada situación. El hacerlo de esa manera generalmente redundaría en un conocimiento más profundo del ecosistema bajo estudio, con lo que incrementa la probabilidad de tomar mejores decisiones de manejo nutrimental. En consecuencia, el objetivo central de este estudio fue comparar varias de las técnicas de diagnóstico nutrimental frecuentemente utilizadas en el sector forestal.

## 2.5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.5.1 Zona de estudio

El estudio se desarrolló en la localidad de Palo Bendito, Huayacocotla, Ver., en una plantación de árboles de navidad de *P. menziesii* (Figura 2.3), la cual se encuentra entre las coordenadas geográficas 20° 7' 19.59" N, 98° 29' 30.59" O. En esta área predomina un clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano con una temperatura media anual de 8 a 12 °C y precipitación anual de 1,379.7 mm (INEGI, 2009). Los suelos se clasifican mayormente como cambisol y regosol (INEGI, 2009). En dicha plantación se realizó el presente experimento de fertilización, con un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 2<sup>4</sup> (Cuadro 1.4) el cual se estableció en agosto del 2015 (Capítulo 1).

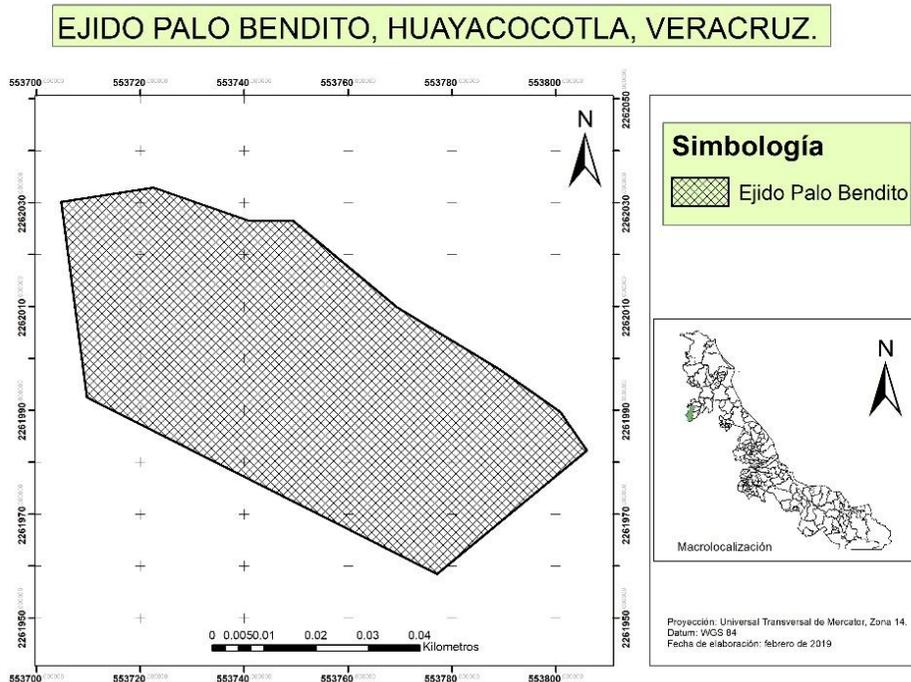


Figura 0.3 Localización del área de estudio del experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

### 2.5.2 Muestras foliares

Los muestreos foliares se realizaron como lo indican (Wells y Allen, 1985). Se recolectaron tres ramillas con acículas totalmente maduras, no senescentes, localizadas en el tercio superior de la copa de los brinzales. De la parte media de las ramillas se separaron 100 acículas de cada muestra recolectada. En total se recolectaron tres muestras por cada

tratamiento, provenientes de tres unidades experimentales previamente seleccionadas. Las muestras se guardaron en bolsas de papel etiquetadas y se transportaron al laboratorio para su preparación y posterior análisis químico.

### **2.5.3 Análisis nutrimental**

Las muestras se lavaron con agua corriente y se enjuagaron con agua destilada. Posteriormente, se secaron a 70 °C por 48 h en una estufa de circulación forzada de aire, las muestras se molieron en un mortero y se llevaron al laboratorio Salvador Alcalde Blanco del Colegio de Postgraduados, para determinar N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, B y Cu.

### **2.5.4 Muestreo y análisis de suelo**

Para el análisis de suelo se realizó un muestreo de suelo en forma de zig zag en el área experimental. Se tomaron nueve muestras simples de suelo a una profundidad de 30 cm. Para las muestras simples de suelo primero se limpió la superficie eliminando la capa herbácea y la materia orgánica presente sobre el suelo; después se cavó un hoyo de forma cuadrada de aproximadamente 30 cm por lado, con una profundidad de 30 cm. Después se limpió el hoyo sacando toda la tierra caída al momento de cavar. Posteriormente se tomó la muestra simple de suelo desde la superficie hasta 30 cm de profundidad. De las nueve muestras simples que se tomaron se hicieron grupos de tres muestras compuestas. En el laboratorio se determinó pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg y micronutrientes.

### **2.5.5 Interpretación de los análisis foliares y de suelo**

Los resultados obtenidos en el laboratorio se interpretaron empleando cuatro métodos de diagnóstico nutrimental. La interpretación por el método de Concentraciones críticas, se realizó por comparación simple de los valores obtenidos de las muestras respecto a valores de referencia establecidos por Ballard y Carter (1986) para la especie de interés (Jones Jr *et al.*, 1991). Para el método gráfico de vectores de Timmer, se utilizó el peso seco de 100 acículas y la concentración foliar de cada muestra foliar, valores que se graficaron para su interpretación.

El método de tendencias de concentraciones fue desarrollado por López y Estañol (2007) y ha sido utilizado exitosamente en el estudio desarrollado por Mendoza *et al.* (2012). El método consiste en estandarizar los valores de todos los nutrientes a medias=0 y

varianzas=1. Los valores estandarizados se grafican en el eje Y para cada uno de los nutrientes analizados de 10 árboles fuera del experimento, contra el diámetro (en este caso el diámetro basal; eje X) y se realiza un proceso de regresión lineal simple para obtener una línea y su respectiva ecuación, que representa la tendencia de la concentración de cada uno de los nutrientes con respecto al tamaño del árbol (DB=diámetro basal). Pendientes negativas implican un efecto de dilución por crecimiento, cuya ocurrencia está asociado a un abastecimiento deficiente de ese nutriente, mientras que las pendientes positivas son indicativas de suficiencia de nutriente.

Los análisis de suelo se interpretaron mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

## 2.6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.6.1 Concentraciones críticas

Las concentraciones foliares de nutrimentos de los 16 tratamientos se presentan en el Cuadro 2.2. Para el caso del nitrógeno sólo un tratamiento (T9), tuvo la concentración adecuada, los demás tratamientos tuvieron una concentración baja en comparación con la concentración crítica propuesta por Ballard y Carter (1986). El tratamiento cinco al cual sólo se le aplicó N no fue el tratamiento con la mayor concentración. Las concentraciones de N indican deficiencias de este nutrimento en el sitio de estudio debido a que están por debajo del nivel crítico (Ballard y Carter, 1986). El N se considera en general como el nutrimento que más comúnmente limita crecimiento más común en los ecosistemas terrestres de todo el mundo, especialmente en los bosques templados (LeBauer y Treseder, 2008). La deficiencia más notable se observa en el P, ya que todos los tratamientos tienen una concentración muy baja en comparación con la concentración crítica. El tratamiento cuatro al cual sólo se le aplicó P tuvo la concentración más alta de todos los tratamientos, aunque no fue lo suficientemente alta para superar a concentración establecida por Ballard y Carter (1986), por tal motivo este nutrimento también se encuentra deficiente. La teoría biogeoquímica predice que a medida que el N se acumula y el material geológico principal se empaña (afectado por el clima), el P puede agotarse de las formas disponibles y limitar el crecimiento de las plantas (Walker y Syers, 1976; Vitousek, 2004). Las concentraciones de N y P fueron menores que aquellas consideradas por (Bonneau, 1988) como niveles óptimos. Se piensa que el P es co-limitante con N en muchos ecosistemas de todo el mundo (Elser *et al.*, 2007); en el noreste del pacífico las adiciones de P pueden mejorar el crecimiento de las plántulas de *P. menziesii*, cuando se agrega sólo P (Heilman y Ekuan, 1980; Porada, 1987) y de árboles jóvenes cuando se agrega en combinación con N (Gessel *et al.*, 1979). Por otra parte, el K también presentó problemas de deficiencias nutrimentales en el sitio, dado que, todos los tratamientos están por debajo de la concentración crítica (Ballard y Carter, 1986). La fertilización del N en bosques de *P. menziesii* causa que K se vuelva deficiente en los sitios donde el suministro de K es limitado, lo que puede resultar en una mortalidad significativa (Mika y Moore, 1991). El tratamiento cinco el cual sólo recibió N tuvo una concentración muy baja de K ( $4.8 \text{ g kg}^{-1}$ ), en cambio el tratamiento tres, el cual se le aplicó solamente K y

fue el tratamiento con la mayor concentración de K. Esto concuerda con los ensayos regionales de Estados Unidos de América en *P. menziesii* que han inducido el desequilibrio de K a través de la fertilización con solo N (Intermountain Forest Tree Nutrition Cooperative, 1987). De acuerdo con lo anterior, es posible decir que este nutrimento está deficiente en el sitio de estudio.

Los micronutrientes son muy importantes en el desarrollo de las plantas, aun cuando su concentración en el tejido es muy baja. El Fe presenta 15 concentraciones superiores a las críticas, excepto el tratamiento uno que es el tratamiento testigo, el cual tiene su concentración baja en comparación a la crítica. Esto se puede deber al alto contenido de N que promueve la nitrificación y la lixiviación de nitratos en los bosques de *P. menziesii* que a la vez disminuye el pH del suelo (Perakis y Sinkhorn, 2011), lo que puede conducir a la formación de fosfatos de hierro susceptibles a ser lixiviados, pero mejora la absorción en óxidos de hierro (Haynes, 1982). El Cu presentó problemas de deficiencias debido a que es el único micronutriente que tiene concentraciones bajas en todos los tratamientos. Al parecer existe un problema de toxicidad para el caso del Mn, ya que se registró concentraciones demasiado altas en comparación con la concentración crítica de este nutriente; éstas son superiores en 13 a 22 veces, a las propuestas por Ballard y Carter (1986) y por Van den Driessche (1991). La mayoría de los tratamientos (excepto los tratamientos T1, T13, T15 y T16) tienen una alta concentración de B. En el caso del Zn, se presentó que ocho de los 16 tratamientos contienen concentraciones mayores a las críticas y siete tratamientos con concentraciones bajas y solo una concentración tiene la misma cantidad que la indicada por Ballard y Carter (1986). En resumen, de acuerdo con las concentraciones críticas de la especie, en el sitio de estudio existen deficiencias de N, P, K, Cu y Zn.

Cuadro 0.2 Concentraciones foliares de los nutrimentos en los 16 tratamientos

Tratamiento	N	P	K	Fe	Cu	Mn	B	Zn
	(g kg <sup>-1</sup> )			(mg kg <sup>-1</sup> )				
Concentración Crítica	14.5	1.50	8.00	50	4	25	20	15
T1	11.2	1.06	7.2	46.1	2.4	322.5	17.2	10.5
T2	11.9	1.33	6.0	65.8	2.2	380.1	21.4	10.1
T3	12.1	1.21	9.1	61.1	2.4	354.5	21.1	14.6
T4	11.1	1.38	6.9	62.8	2.2	564.7	22.5	13.4
T5	12.4	1.01	4.8	55.0	2.2	347.4	22.8	15.0
T6	12.4	1.19	7.7	67.9	2.5	447.6	27.4	27.9
T7	12.0	1.33	7.6	55.8	2.4	471.8	23.8	17.4
T8	13.4	1.20	6.4	87.6	2.1	386.5	24.5	15.1
T9	14.5	1.04	5.6	80.7	2.2	585.5	31.7	17.0
T10	11.7	1.04	4.1	87.2	2.1	374.0	22.6	17.8
T11	8.9	1.17	6.6	73.5	2.2	431.2	22.8	12.8
T12	12.0	1.08	6.7	70.9	2.2	414.7	21.2	12.3
T13	12.6	1.06	5.6	69.2	2.8	294.8	19.6	14.8
T14	12.1	1.16	5.7	72.7	2.4	443.0	21.0	22.4
T15	11.9	0.96	5.2	75.3	1.7	435.7	19.7	25.4
T16	11.6	1.15	6.1	76.1	2.4	567.1	19.9	22.6

Concentración crítica establecida por Ballard y Carter (1989) para *Pseudotsuga menziesii*.

### 2.6.2 Análisis de vectores para macronutrimentos y micronutrimentos

En la Figura 2.4 se observa que todos los tratamientos tienen un mayor peso seco de acículas que el tratamiento testigo. Esto aplica para N, P y K el N no tuvo efectos positivos en el crecimiento de las acículas ya que la mayoría de los tratamientos con N están muy cercanos al tratamiento testigo que es el tratamiento con el menor crecimiento en biomasa. De acuerdo con López y Alvarado (2010) y con Van den Driessche (1991), lo anterior corresponde a vectores de Timmer (Timmer y Stone, 1978), del tipo -,-,- que corresponden a efectos antagónicos, ya que en el tratamiento cinco sólo se aplicó N y tuvo una concentración superior a la del tratamiento testigo pero un peso muy similar. El P tuvo efectos positivos en el peso seco, dado que el tratamiento cuatro al cual sólo se le aplicó P tuvo una alta concentración y un peso seco superior al tratamiento testigo. Hernández *et al.* (2018) en un estudio similar de fertilización en *Pinus cooperi* encontraron deficiencias de P en el sitio de estudio; las concentraciones de este elemento indican que es deficiente debido a que cinco de los 16 tratamientos respondieron positivamente al incremento en biomasa de acículas.

López y Alvarado (2010) indican que este tipo de vectores de Timmer (Timmer y Stone, 1978), del tipo +,+,+ o bien, +,-,+, corresponden a deficiencia del nutriente. La fertilización con fósforo puede ser eficaz para aumentar el crecimiento de las masas de *P. menziesii* con una baja concentración foliar de P(<0.18%) en suelos con un pH mayor que 5 (Mainwaring *et al.*, 2014).

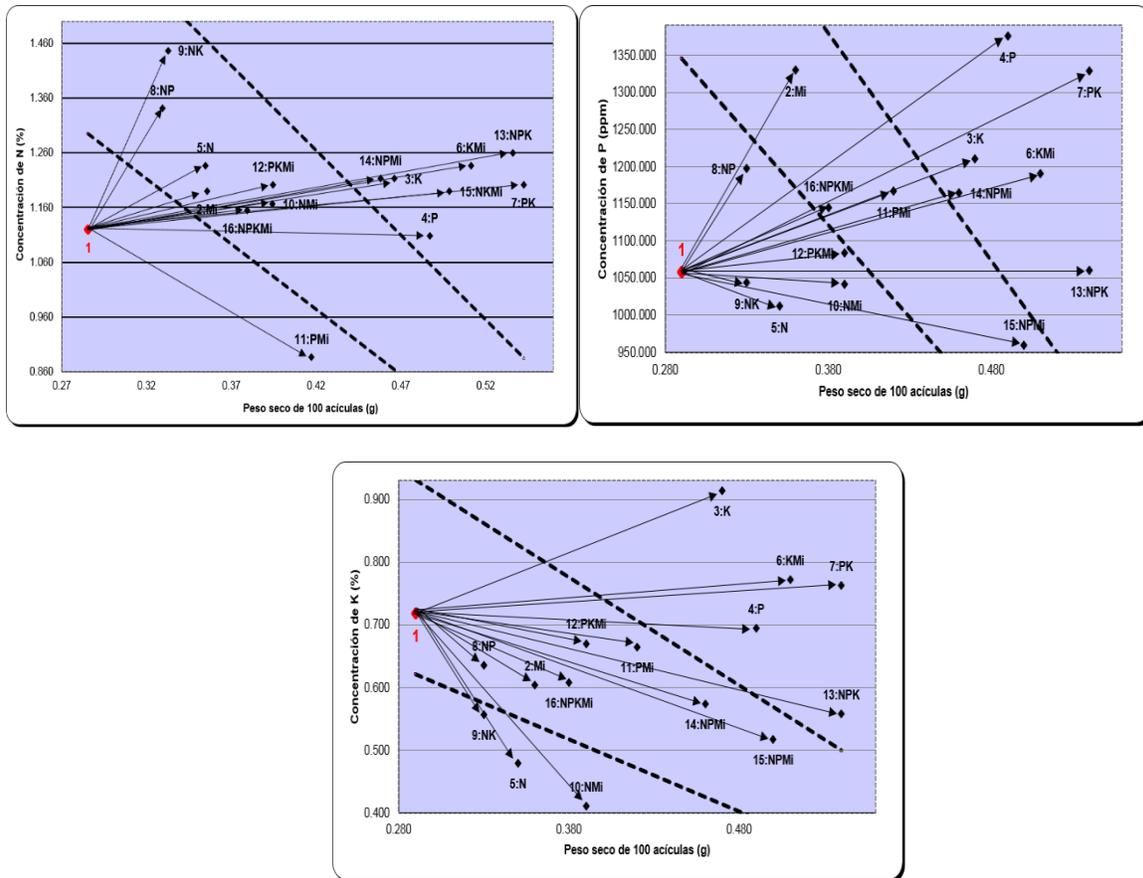
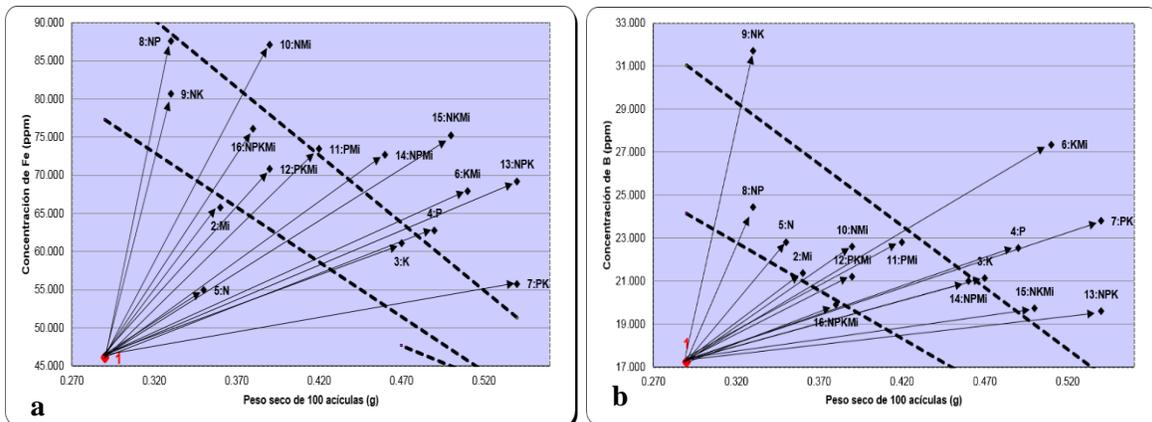


Figura 0.4 Diagramas de Timmer para el análisis de macronutrientes en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. (2015).

Para el caso del K, los tratamientos T6, T7, T13 y T15 generaron mayor biomasa que el resto de los tratamientos. El tratamiento tres fue el tratamiento en el que solo se aplicó K. asimismo, este tratamiento tuvo la más alta concentración foliar de K y un peso seco mayor al tratamiento testigo. Al analizar las gráficas de los tres nutrientes se observa que los tratamientos que generaron mayor peso seco de acículas fueron aquellos tratamientos que tienen P y K principalmente, aunque también está el N en tres de ellos; por tal razón se puede decir que los macronutrientes que limitan el crecimiento de *P. menziesii* son el P y K

principalmente, aunque el N también limita el crecimiento pero no con la misma contundencia con que lo hacen el P y el K. Esto se puede deber a que el N tiene una deficiencia moderada. Los análisis de vectores tienen la capacidad de establecer una respuesta de crecimiento potencial y ofrece información de diagnóstico precisa, lo que los convierte en una herramienta útil para predecir la respuesta de nutrientes en las coníferas (Gregoire y Fisher, 2004).

En el caso de los micronutrientes, la Figura 2.5 indica que cualquiera de los tratamientos presenta mayor peso seco, mayor concentración y mayor contenido de Fe, B, Mn y Zn que el tratamiento testigo (con excepción del tratamiento 2 en el caso del análisis de Zn y del tratamiento 13 en el caso de Mn, cuyos vectores indican concentraciones ligeramente menores de estos micronutrientes, comparadas con el testigo, Figuras 2.5c y 2.5e). Todos los vectores de las Figuras 2.5a, 2.5b, 2.5c y 2.5e son de tipo +,+,+, es decir, indican que después de la aplicación de los tratamientos, las concentraciones foliares de Fe, B, Mn y Zn aumentaron, lo que significa que si bien pudieron haber sido deficientes antes de los tratamientos, después de éstos, alcanzaron niveles de suficiencia (López y Alvarado, 2010).



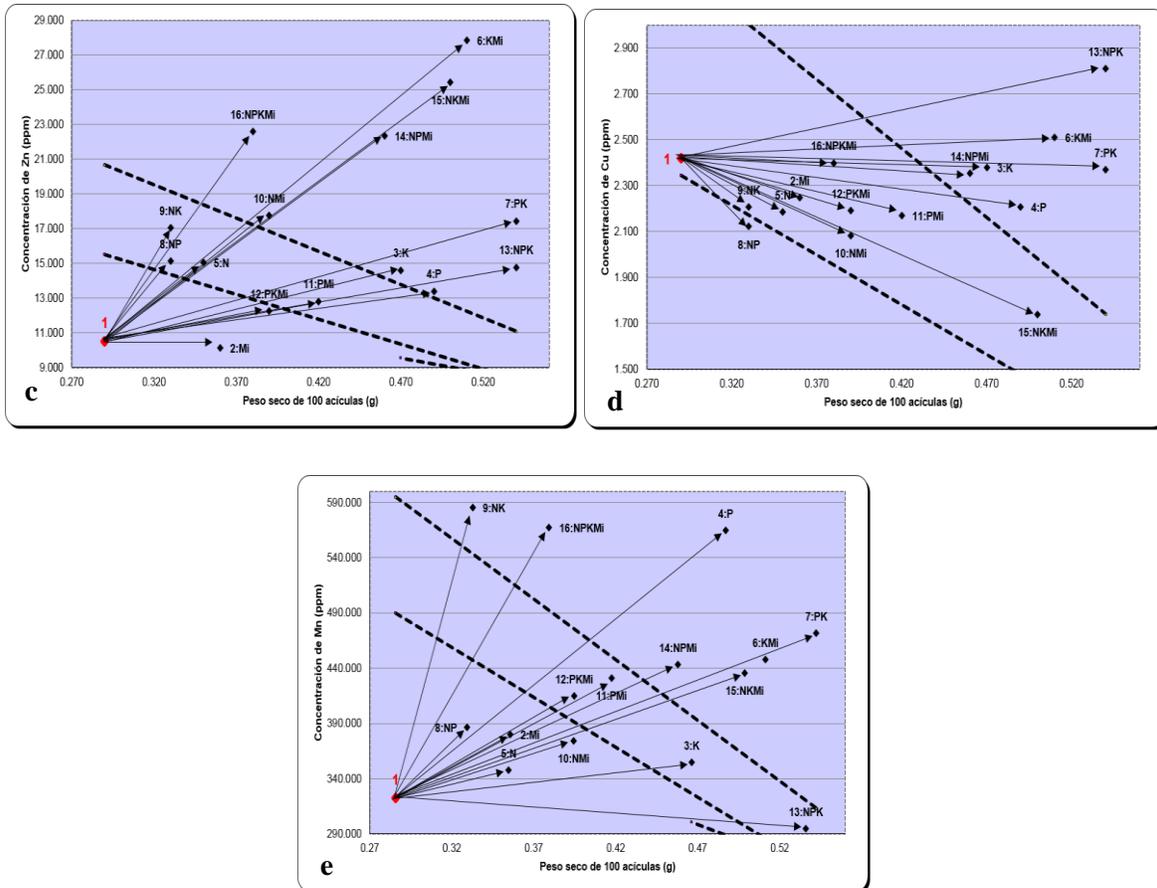


Figura 0.5 Diagramas de Timmer para el análisis de micronutrientes en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver. (2015).

En el caso del Cu, (Figura 2.5d) se observa que la mayoría de vectores son de tipo +,-,+; es decir, presentan mayor peso seco de acículas, menor concentración y mayor contenido, comparados con el tratamiento testigo. Esto indica que la mayoría de tratamientos mejoró el crecimiento, pero hubo un efecto de dilución de Cu; a la vez, este tipo de vectores señala deficiencia de este nutriente dentro del tejido foliar, después de aplicados los tratamientos (López y Alvarado, 2010). Los resultados del análisis de vectores, indican que existen deficiencias leves de N, fuertes de P y mayores de K y Cu.

### 2.6.3 Tendencias de concentraciones

Se observa que el N es un nutriente no deficiente en el área de estudio debido a que el valor de su pendiente fue el más positivo (Figura 2.6), lo que indica suficiencia del nutriente, toda vez que su concentración se incrementa al aumentar la biomasa del tejido analizado (López y Estañol, 2007).

El P es el único nutriente que muestra una pendiente cercana a cero, lo cual indica suficiencia o una deficiencia secundaria de este nutriente (López y Estañol, 2007). Es posible que este nutriente sea limitante del crecimiento de *P. menziesii* en la plantación estudiada.

El análisis por tendencias de concentraciones indicó que el K es un nutriente no deficiente en el área de estudio ya que el valor de la pendiente de su curva es positiva.

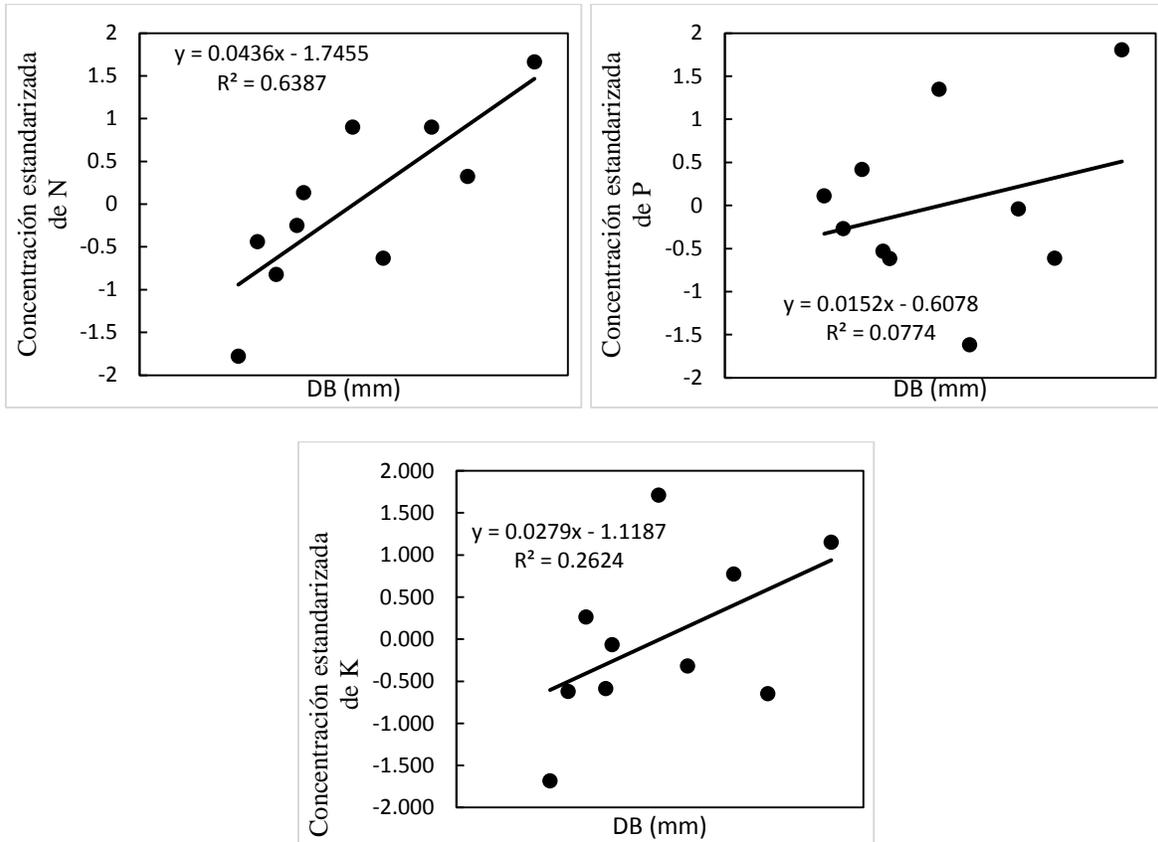


Figura 0.6 Tendencia de las concentraciones de macronutrientos en *Pseudostuga menziesii* en función del diámetro basal de los árboles.

El Fe es el único micronutriente que mostró una pendiente con un valor negativo (Figura 2.7), lo que indica dilución de dicho elemento al incrementar el crecimiento (López y Estañol, 2007). El B, Zn, Mn tienen pendientes positivas, lo que indica que estos micronutrientos no limitan el crecimiento de *P. menziesii* debido a que se encuentran disponibles en el sitio. El Cu al igual que el P tuvo una pendiente cercana a cero. Los análisis de tendencias de concentraciones indican que estos nutrientes son suficientes, solo si

presentaron las menores pendientes como el Fe; es decir, son los más deficientes entre los nutrimentos estudiados.

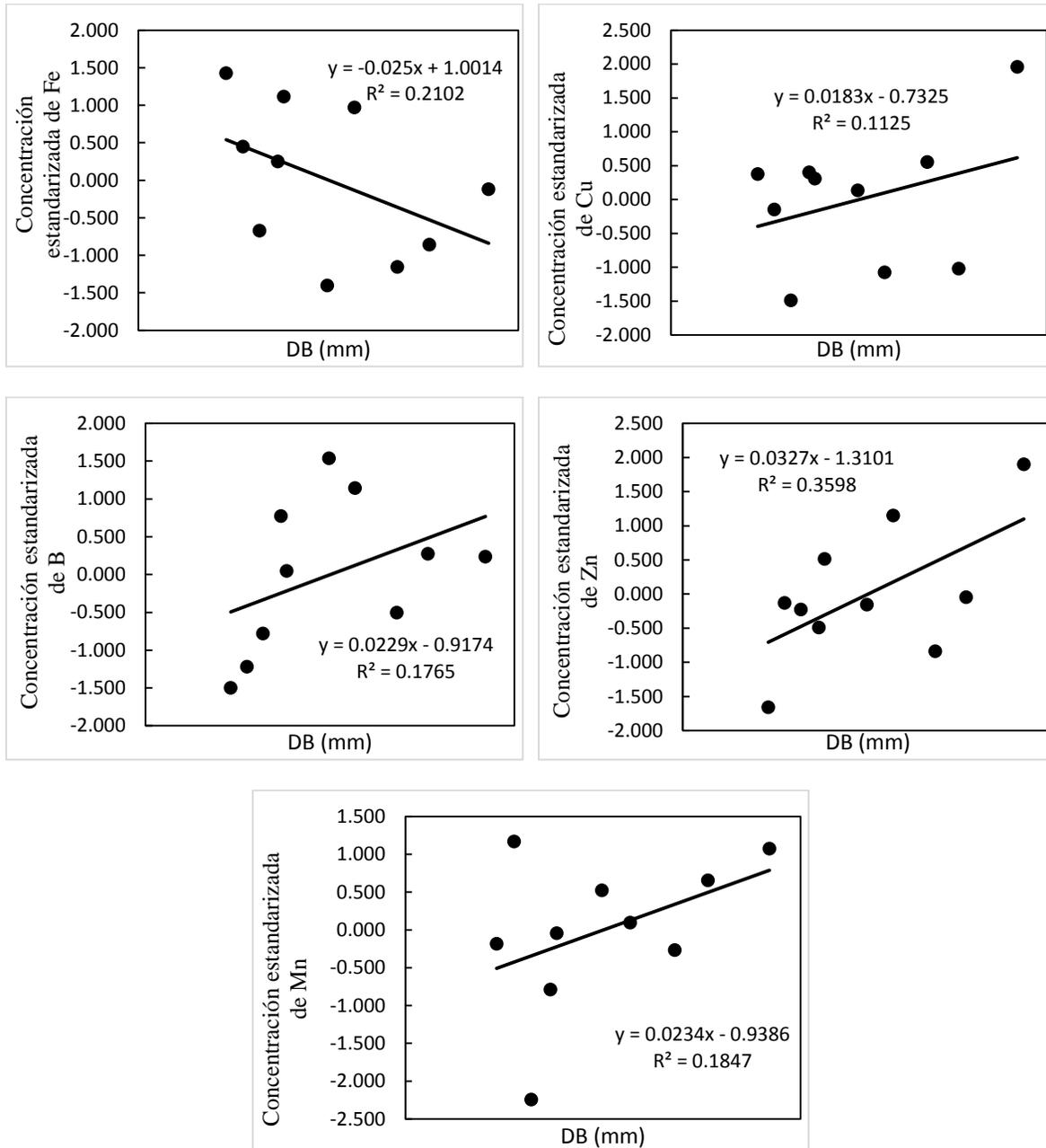


Figura 0.7 Tendencia de las concentraciones de macronutrimentos en *Pseudostuga menziesii* en función del diámetro basal de los árboles.

En resumen, el análisis de tendencias de concentraciones indica deficiencia franca de Fe, pero es posible que exista deficiencias de P, y Cu; nutrimentos que presentan pendientes

cercanas a cero y una fuerte dispersión de las observaciones, que impidió probablemente, que la tendencia de las concentraciones se estableciera con claridad.

De lo anterior se desprende que, si se utiliza como criterio de selección de los nutrientes deficientes las tendencias de concentraciones con pendientes cercanas a cero, entonces el método de tendencias de concentraciones, en este caso coincidió con los métodos de concentraciones críticas, análisis gráfico de vectores y análisis de suelos, en diagnosticar deficiencia de P y Cu. Sin embargo, falló al determinar deficiencia de Fe, ya que es poco probable que esta deficiencia exista en el sitio, de acuerdo con los demás métodos de diagnóstico.

#### **2.6.4 Análisis de suelos**

Los valores de las propiedades fisicoquímicas del suelo obtenidas para las tres muestras son coherentes en todos los aspectos (Cuadro 2.3). El suelo del sitio experimental tiene una conductividad eléctrica baja (efectos despreciables en la salinidad, NOM-021-RECNAT-2000). Según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000), niveles de CE menores a  $1.0 \text{ dS m}^{-1}$  no tienen implicaciones negativas; sin embargo, valores muy bajos de CE también son indicativos de niveles bajos de sales, entre ellas, nutrientes y radicales, y pueden contribuir a disminuir la productividad (Ezrin *et al.*, 2010). Es probable que la baja conductividad eléctrica del suelo del sitio experimental ( $< 2 \text{ dSm}^{-1}$ ) haya contribuido al bajo crecimiento de los árboles.

Las tres muestras corresponden a un suelo volcánico o no volcánico con uso forestal, por el alto contenido de materia orgánica ( $>9\%$ , considerado de alto a muy alto respectivamente). La materia orgánica en el suelo, aumenta aún más la capacidad de intercambio de catiónico (Aprile y Lorandi, 2012). Durante los diferentes estados de descomposición de la materia orgánica se producen ácidos húmicos y fúlvicos que son los responsables junto con las arcillas de propiciar acidez del suelo, tal como se observa en los resultados de laboratorio (valores de pH entre 3.95-4.36 considerado como fuertemente ácido). La pérdida de materia orgánica del suelo, como en los sistemas agrícolas intensivos, puede dar lugar a deficiencias de P que se producen a través de la interrupción del ciclo orgánico de P (Coleman *et al.*, 2014).

Cuadro 0.3 Análisis de suelos en el experimento de fertilización de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido Palo Bendito, Huayacocotla, Ver.

Parámetro	Muestra	Muestra	Muestra	Nom-21	Nom-21
	1	2	3	Bajo	Alto
CE (dS/m)	0.5	0.46	0.2	2	2
M.O (%)	15.84	13.7	16.14	6.5	6.5
pH	3.95	4	4.36	6.5	6.5
CIC (meq/100 g)	20	24.32	22.24	25	25
N (%)	0.08	0.08	0.08	0.8	0.8
P (ppm)	0.53	0.53	0.53	30	30
K (meq/100 g)	0.001	0.002	ND	0.6	0.6
Fe (ppm)	13.98	11.92	13.87	4.5	4.5
Cu (ppm)	0.12	0.14	0.08	0.2	0.2
Zn (ppm)	0.18	0.2	0.17	1	1
Mn (ppm)	4.26	5.4	2.18	1	1
B (ppm)	ND	ND	ND	1	1

CE=conductividad eléctrica, M.O.= Materia orgánica pH=potencial hidrogeno, CIC=capacidad de intercambio catiónico, N=nitrógeno, P=fósforo, K=potasio, Fe=hierro, Cu=cobre, Zn=zinc, Mn=manganeso, B=boro, ND= No detectado.

Ante un pH bajo, la disponibilidad de la mayoría de los macro y micronutrientes del suelo se ve limitada (Lambers *et al.*, 1998). Aunque esto no sucede con el manganeso (Mn) y menos en el caso del Fe, los cuales se encuentran disponibles en altas cantidades a un pH fuertemente ácido. Esto se puede deber a que existen efectos acidificantes de las coníferas en el suelo, a menudo observados en las regiones templadas, rara vez pueden exhibirse en las regiones tropicales (Cornforth, 1970; Hamilton, 1965; Robinson, 1967). La menor producción de ácidos húmicos dentro de las plantaciones de pinos debido a la inhibición de la descomposición de la caída de hojarasca ha sido sugerida como una posible causa de la acidificación (Lundgren, 1978). La alta nitrificación y el agotamiento de los cationes básicos que disminuyen el pH del suelo también aumentan la solubilidad de elementos potencialmente tóxicos como el Al y Mn (Perakis *et al.*, 2013). Estos procesos pueden dificultar la distinción entre la deficiencia de cationes de base y la toxicidad por metales como

factores que limitan el crecimiento del árbol (Rengel, 1992; Cronan *et al.*, 1989; Shortle y Smith, 1988).

Los procesos tales como la nitrificación, la fijación de nitrógeno y la descomposición de la materia orgánica se inhiben en suelos con valores de pH bajos (Soares y Alleoni, 2008). Algunos efectos de la acidez del suelo en el contenido de carbono orgánico de suelo están relacionados con la solubilidad reducida de los compuestos orgánicos y con los cambios en las interacciones organominerales en los suelos de carga variable tropical (Coleman *et al.*, 1989; Yagi *et al.*, 2005).

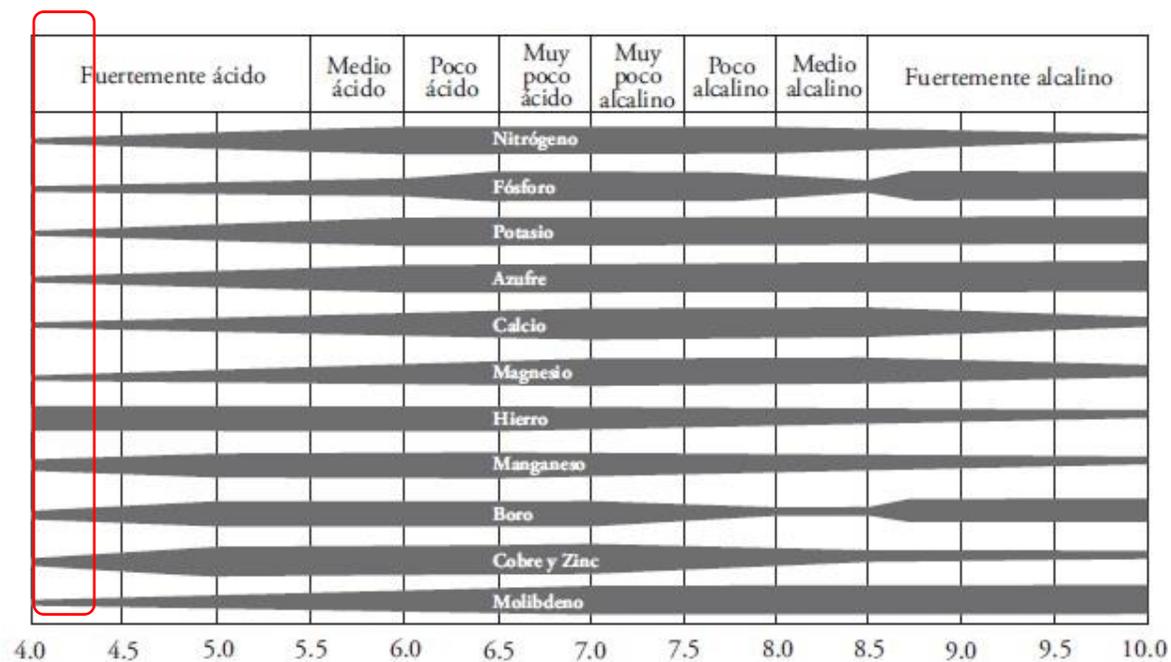


Figura 0.8 Efecto del pH del suelo en la disponibilidad de los nutrientes.

(adaptado de Lambers *et al.* (1998)

Los principales determinantes de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) son la arcilla y la materia orgánica. Esto se debe a que ambos tienen una carga eléctrica negativa lo suficientemente fuerte como para atraer los elementos catiónicos cargados positivamente (Aprile y Lorandi, 2012). La CIC observada en los resultados se considera de clase media (15-25 meq/100 gr) y está relacionada con la textura del suelo, en donde predomina la arcilla caolinita (3-15 meq/100 gr), más que debido al contenido de materia orgánica, ya que en este caso se esperarían valores superiores a los 200 meq/100 gr. La CIC puede influir directamente en los cambios en el pH del suelo, ya que cada vez que las partículas de arcilla capturan los

cationes liberan iones  $H^+$  y  $Al^{3+}$ , que en altas concentraciones acidifican el suelo (Aprile y Lorandi, 2012).

Los nutrimentos N, P y K se encuentran en concentraciones muy bajas de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). Cabe mencionar que en la muestra tres no se detectó K, y que en general se observaron valores de N, P y K muy bajos en el suelo (Cuadro 2.3), cuando la necesidad para la planta corresponde a valores relativamente altos (Ballard y Carter, 1986; Zas, 2003), por lo que es necesario corregir la deficiencia en el suelo de estos elementos. Se sabe ampliamente que la disponibilidad del P disminuye a medida que se reduce el pH del suelo (Brady *et al.*, 1990). Para el caso de micronutrimentos el Fe y el Mn tienen una alta concentración en el suelo, sus valores son elevados. Lo contrario sucede para el caso del Zn, Cu y B, estos micronutrimentos se encuentran en el suelo en muy bajas cantidades de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). En general se puede observar que el factor limitante de la disponibilidad y presencia de nutrimentos en las tres muestras de suelo es el pH.

El método de concentraciones críticas indicó que existen deficiencias de N, P, K, Cu y Zn. Para el caso de análisis de vectores también mostró deficiencias de N, P, K y Cu. El método de tendencias de concentraciones indicó deficiencias fuertes de un nutrimento en particular que es el Fe, así como posibles deficiencias, al menos secundarias, de P y Cu. Los análisis de suelos mostraron deficiencias fuertes de N, P, K, Zn, Cu y B. Los nutrimentos deficientes en la plantación son el N, P, K, Zn y Cu, debido a que tres métodos de diagnóstico indicaron la deficiencia de estos nutrimentos, mientras que el método de tendencia de concentraciones indicó posibles deficiencias de P y Cu. De acuerdo con los resultados del presente estudio, se sugiere basar el diagnóstico nutrimental, en tantos métodos de diagnóstico como sea posible. Esto conducirá a una toma de decisiones más acertada en cuanto a las acciones de manejo nutrimental a implementar.

Se rechaza la hipótesis nula debido a que existen diferencias en los métodos de diagnóstico nutrimental.

## 2.7. CONCLUSIONES

El nitrógeno, fósforo, potasio y cobre son nutrimentos deficientes en el sitio de estudio de acuerdo con las concentraciones críticas. El manganeso y el hierro mostraron concentraciones altas. Los análisis de vectores indican deficiencia principalmente de fósforo y potasio, aunque también existen evidencias de que el nitrógeno tenga una deficiencia más moderada. El análisis de suelo indica que el nitrógeno, fósforo y potasio se encuentran deficientes al igual que micronutrimentos como el cobre, zinc y boro. El manganeso y el hierro tienen concentraciones elevadas en el suelo.

Tres de los cuatro métodos diagnosticaron deficiencias de nitrógeno, fósforo y potasio. Dos métodos indicaron toxicidad de manganeso y hierro en el sitio de estudio.

El método de tendencia de concentración fue el único en diagnosticar deficiencia de hierro, probables deficiencias de P y Cu. y suficiencia de los demás nutrimentos.

Los métodos de diagnóstico que más coincidieron en este estudio son las concentraciones críticas, análisis de vectores y análisis de suelos. pero el análisis de tendencias de concentraciones coincidió con los demás en diagnosticar posibles deficiencias de P y Cu.

Existen diferencias entre las predicciones de los diversos métodos de diagnóstico, pero también existen coincidencias entre ellos; por esta razón cada método tiene ventajas y desventajas que deben ser tomadas en cuenta si se desea hacer un correcto diagnóstico nutrimental.

## **CONCLUSIONES GENERALES**

Los nutrimentos más deficientes en la plantación de estudio son el P y el K principalmente. El nitrógeno se encuentra con deficiencias moderadas. Los micronutrimentos deficientes en la plantación son el Zn y el Cu.

No todos los métodos de diagnóstico nutrimental diagnostican por igual las deficiencias nutrimentales, pero existen coincidencias entre ellos.

Los análisis de suelo, las concentraciones críticas y el método gráfico de vectores son los métodos que presentan mayor similitud en su diagnóstico, pero el método de tendencias de concentraciones coincide con aquellos en diagnosticar algunas deficiencias.

Para realizar un buen diagnóstico nutrimental se deben tomar en consideración varios factores como la época de recolección de las muestras a analizar, cantidades adecuadas de los fertilizantes entre otras que son de suma importancia.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo, R. R. 1998. Estudio sinicológico del bosque de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *oaxacana* Debreczy & Rácz, en la zona de Santa Catarina Ixtepeji Oaxaca, México. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Mexico. 105 pp.
- Alcántar, G. G., Trejo, T. L. I. & Gómez, M. F. C. 2016. Nutrición de cultivos, 2 ed, Mundi Prensas. México. 443 pp.
- Allen, H. & Albaugh, T. 1999. Ecophysiological basis for plantation production: a loblolly pine case study. *Bosque*, Vol. 20, 3-8 pp.
- Álvarez, M. J. G., Colinas, L. M. T., Sahagún, C. J. & Peña, L. A. 2009. Tratamientos de poscosecha en árboles de navidad de *Pinus ayacahuite* Ehren y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México*, Vol. 34, 171-190 pp.
- Aprile, F. & Lorandi, R. 2012. Evaluation of cation exchange capacity (CEC) in tropical soils using four different analytical methods. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, 278-279 pp.
- Arteaga, M. B. & Zenil, R. J. 2005. Fertilización en vivero de *Pseudotsuga macrolepis* Flous. *Foresta veracruzana*, Vol. 7, 41-45 pp.
- Ballard, T. & Carter, R. 1986. Evaluating forest stand nutrient status, Ministry of Forests, British Columbia. Land Management Report No. 20, Ministry of Forests, Victoria. British Columbia. 60 pp.
- Binkley, D. 1993. Nutrición forestal: prácticas de manejo, México. Limusa. 340 pp.
- Bonneau, M. 1988. Le diagnostic foliaire. *Revue forestière française*, Vol. 40 (Especial), 19-28 pp.
- Brady, N. C., Weil, R. R. & Weil, R. R. 1990. The nature and properties of soils. Macmillan Publishing Company, Cranbury. 621 pp.
- Canizal, M. M. A. 2006. Evaluación de la fertilidad del terreno y la nutrición de los árboles de navidad (*Pseudotsuga macrolepis*) en la región de Valle de Bravo. Tesis Profesional. Departamento de suelos, Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, Texcoco, México. 69 pp.
- Carter, R., McWilliams, E. & Klinka, K. 1998. Predicting response of coastal Douglas-fir to fertilizer treatments. *Forest Ecology and Management*, Vol. 107, 275-289 pp.
- Celis, M. 1996. Modelo de crecimiento en altura y curvas de índice de sitio para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 91 pp.
- Chastagner, G. A. & Riley, K. L. 2003. Postharvest quality of noble and Nordmann fir Christmas trees. *HortScience*, Vol. 38, 419-421 pp.
- Cibrián, T. D. 2009. CONAFOR. Manual para la identificación de plagas y enfermedades en plantaciones de árboles de navidad. 79 pp.

- Coleman, D. C., Oades, J. M. & Uehara, G. 1989. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems, Honolulu. University of Hawaii Press. 249 pp.
- Coleman, M. D., Shaw, T. M., Kimsey, M. J. & Moore, J. A. 2014. Nutrition of Douglas-fir in the Inland Northwest. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 78, S11-S22 pp.
- CONAFOR. 2011. Comisión Nacional Forestal. Manual para la producción de árboles de Navidad [En línea]. Disponible: <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/ver.aspx?articulo=507> [Fecha de consulta 12 de enero 2019].
- CONAFOR. 2017. Comisión Nacional Forestal. Programas Específicos de Intervención Institucional. Programa de Plantaciones Forestales 2014-2018 [En línea]. Disponible: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/251747/Programa\\_especifico\\_de\\_intervencion\\_institucional\\_Plantaciones\\_Forestales\\_Comerciales\\_2014-2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/251747/Programa_especifico_de_intervencion_institucional_Plantaciones_Forestales_Comerciales_2014-2018.pdf) [Fecha de consulta 20 de febrero 2019].
- Cornforth, I. 1970. Reafforestation and nutrient reserves in the humid tropics. *Journal of Applied Ecology*, Vol. 7, 609-615 pp.
- Cronan, C. S., April, R., Bartlett, R. J., Bloom, P. R., Driscoll, C. T., Gherini, S. A., Henderson, G. S., Joslin, J., Kelly, J. & Parnell, R. A. 1989. Aluminum toxicity in forests exposed to acidic deposition: the ALBIOS results. *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 48, 181-192 pp.
- Debreczy, Z. & Rácz, I. 1995. New species and varieties of conifers from Mexico. *Phytologia*, Vol. 78, 217-243 pp.
- Del Castillo, R. F., Pérez, D. L. R. J. A., Vargas, A. G. & Rivera, G. R. 2004. Coníferas. En: Biodiversidad de Oaxaca. A.J García-Mendoza, M de Jesús Ordóñez y M. Briones-Salas (Eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la conservación de la naturaleza-World Wildlife Foundation. 1441-158 pp.
- Domínguez, A. F. A. 1986. Estudio ecológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco en la región de Huayacocotla, Ver. Tesis profesional División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco Edo, de México. 266 pp.
- Domínguez, A. F. A. 1994. Análisis histórico ecológico de los bosques de *Pseudotsuga* en México, INIFAPCIR Golfo centro. Folleto Técnico. N° 23. 43 pp.
- Domínguez, Á. F. A., Vargas, H. J. J., López, U. J., Ramírez, V. P. & Guízar, N. E. 2004. Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, Vol. 75, 191-203 pp.
- Elser, J. J., Bracken, M. E., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., Ngai, J. T., Seabloom, E. W., Shurin, J. B. & Smith, J. E. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, Vol. 10, 1135-1142 pp.

- Espinosa, B. M., Acuña, C. E., García, S. J., Rodríguez, L. R. & Rubilar, P. R. 2017. Silvicultura de bosques plantados con fines productivos, Universidad de Concepción, Concepción (Chile). 397 pp.
- Etchevers, B. J. D. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana*, Vol. 17, 209-219 pp.
- Evans, J. 1992. *Plantation forestry in the tropics: tree planting for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes*, 2 ed, Oxford University Press. 404 pp.
- Ezrin, M. H., Amin, M. S. M., Anuar, A. R. & Aimrun, W. 2010. Relationship between rice yield and apparent electrical conductivity of paddy soils. *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, 63-70 pp.
- García, M. a. J., Díaz, M. D. J. O. & Briones, S. M. 2004. Biodiversidad de Oaxaca, Universidad Nacional Autónoma de México. 640 pp.
- Gessel, S., Steinbrenner, E. & Miller, R. 1979. Published. Response of Northwest forests to elements other than nitrogen. *Proceedings of forest fertilization conference* (Gessel SP, Kenady RM, Aldinson WA eds) University of forest resources. Contribution n° 40 1979. 140-149 pp.
- Gregoire, N. & Fisher, R. F. 2004. Nutritional diagnoses in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) established stands using three different approaches. *Forest ecology and management*, Vol. 203, 195-208 pp.
- Hamilton, C. 1965. Changes in the soil under *Pinus radiata*. *Australian Forestry*, Vol. 29, 275-289 pp.
- Haynes, R. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant and soil*, Vol. 68, 289-308 pp.
- Heilman, P. E. & Ekuan, G. 1980. Phosphorus Response of Western Hemlock Seedlings on Pacific Coastal Soils from Washington 1. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, 392-395 pp.
- Hermann, R. K. & Lavender, D. P. 1999. Douglas-fir planted forests. *New Forests*, Vol. 17, 53-70 pp.
- Hernández, G. R. 2001. Nutrición Mineral de las Plantas. *Botanical Book. LibroBotanicaOnLine* [En línea]. Disponible: <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/nutricionmineral/> [Fecha de consulta 16 noviembre 2018].
- Hernández, P. Y. I. 2017. Caracterización mineralógica y geoquímica de caolines del área de Huayacocotla, Veracruz, (México) para uso industrial. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 265 pp.
- Hernández, V. R. R., López, L. M. Á. & Flores, N. P. 2018. Crecimiento y estado nutrimental de una plantación de *Pinus cooperi* Blanco fertilizada con N-P-K. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, Vol. 9 115-134 pp.

- INAFED. 2010. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [En línea]. Disponible: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM30veracruz/municipios/30072a.html> [Fecha de consulta noviembre 2018].
- INEGI. 2009. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA INEGI. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos [En línea]. Disponible: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/30/30072.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30072.pdf) [Fecha de consulta 18 de enero 2019].
- Intermountain Forest Tree Nutrition Cooperative 1987. Seventh annual report. Univ. of Idaho, Intermtn. *Seventh annual report. Univ. of Idaho, Intermtn. For. Tree Nutr. Coop., Moscow.*
- Jones Jr, J. B., Wolf, B. & Mills, H. A. 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide, Micro-Macro Publishing, Inc. Athens, Georgia. 213 pp.
- Juárez, M. F. 2018. Curvas de abastecimiento de N, P y K para planta de *Pinus patula* schl. et cham en etapa de vivero, en un sistema hidropónico de subirrigación. Tesis Profesional. División de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla, Zacapoaxtla, Puebla 89 pp.
- Kenworthy, G. W. H. 1967. Soil Testing and Plant Analysis Part II Plant Analysis, Soil Science Society of America. Madison, WI, pp.
- Kozlowski, T. T. & Pallardi, S. G. 1997. Physiology of woody plants, 2 ed, Academic Press. San Diego, CA USA. 411 pp.
- Kúhl, E. E. K. & Rodríguez, R. H. C. 2011. Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS): herramienta para la interpretación del análisis foliar, Universidad de Chile, Departamento de Producción Agrícola. 64 pp.
- Lambers, H., Chapin, F. S. & Pons, T. L. 1998. Plant physiological ecology, Springer. . New York, NY USA. 540 pp.
- 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. Handbk. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 1-67 pp.
- Lebauer, D. S. & Treseder, K. K. 2008. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, Vol. 89, 371-379 pp.
- López, L. M. A. 1990. Estudio de nutrición de *Pinus patula* Schl. et Cham. en sistema hidropónico. Tesis de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Texcoco, México. 83 pp.
- López, L. M. A. & Alvarado, L. J. 2010. Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera y bosques*, Vol. 16, 99-108 pp.

- López, L. M. Á. & Estañol, B. E. 2007. Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana*, Vol. 25, 9-15 pp.
- López, L. M. A. & Flores, N. P. 2016. Captura de carbono en bosques, en relación con la densidad de arbolado y fertilización química. En: Paz, P. F. y A. R. Torres (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis a 2016. Programa Mexicano del Carbono-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 716-723 pp.
- Lundgren, B. 1978. Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forests in Tanzanian highlands, Swedish University of Agricultural Sciences. 426 pp.
- Mainwaring, D. B., Maguire, D. A. & Perakis, S. S. 2014. Three-year growth response of young Douglas-fir to nitrogen, calcium, phosphorus, and blended fertilizers in Oregon and Washington. *Forest Ecology and Management*, Vol. 327, 178-188 pp.
- Malavolta, E. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações, 2 ed, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Universidad de Cornell. 319 pp.
- Mapula, L. M. 1995. Pruebas de germinación y evaluación del crecimiento inicial de *Pseudotsuga macrolepis* Flous en Chapingo. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. 91 pp.
- Mápula, L. M., López, U. J., Vargas, H. J. & Hernández, L. A. 2008. Germinación y vigor de semillas en *Pseudotsuga menziesii* de México. *Ra Ximhai*, Vol. 4, 119-134 pp.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2 ed, ACADEMIC PRESS. Germany. 901 pp.
- Martínez, C. G., López, U. J., Vargas, H. J. J., Jasso, M. J. & Guerra, D. L. C. V. 2007. Indicadores de maduración en conos de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Fitotecnia Mexicana*, Vol. 30, 191-199 pp.
- Martínez, M. 1963. Las pináceas mexicanas, Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 400 pp.
- Martínez, M. 1979. Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas, Fondo de Cultura Económica, México.
- Mendoza, B. C., López, L. M. Á., Rodríguez, T. D. A., Velásquez, M. A. & García, M. F. 2012. Crecimiento de vara perlilla (*Symphoricarpos microphyllus* HBK) en respuesta a fertilización y altura de corte. *Agrociencia*, Vol. 46, 719-729 pp.
- Mika, P. G. & Moore, J. A. 1991. Foliar potassium status explains Douglas fir response to nitrogen fertilization in the inland northwest, USA. *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 54, 477-491 pp.
- Molina, E. 2007. Análisis de suelos y su interpretación, San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International, 8 pp.

- Nepamuceno, M. F. & Camacho, M. F. 1994. Guía tecnológica para el establecimiento de plantaciones de pino patula (*Pinus patula*) en México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, 48 pp.
- Perakis, S. S. & Sinkhorn, E. R. 2011. Biogeochemistry of a temperate forest nitrogen gradient. *Ecology*, Vol. 92, 1481-1491 pp.
- Perakis, S. S., Sinkhorn, E. R., Catricala, C. E., Bullen, T. D., Fitzpatrick, J. A., Hynicka, J. D. & Cromack Jr, K. 2013. Forest calcium depletion and biotic retention along a soil nitrogen gradient. *Ecological Applications*, Vol. 23, 1947-1961 pp.
- Perez, B. a. P., Valeri, S., Valiengo, E., Da Cruz, M. C. P., De Vasconcelos, R. T. & Orio 2016. Potassium doses for African mahogany plants growth under two hydric conditions. *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 11, 1973-1979 pp.
- Porada, H. J. 1987. The effect of aluminum on the growth and mineral composition of Douglas-fir and western hemlock. Ph.D. Thesis, Coll Forest Resources, University of Washington, Seattle, 251 pp.
- Puentes, P. Y. J., Menjivar, F. J. C. & Aranzazu, H. F. 2016. Concentración de nutrientes en hojas, una herramienta para el diagnóstico nutricional en cacao. *Agronomía Mesoamericana*, Vol. 27, 329-336 pp.
- Rengel, Z. 1992. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytologist*, Vol. 121, 499-513 pp.
- Reyes, H. V. J., Vargas, H. J. J., López, U. J. & Vaquera, H. H. 2006. Similitud fenotípica de poblaciones mexicanas de *Pseudotsuga Carr.* *Agrociencia*, Vol. 40, 545-556 pp.
- Robinson, J. 1967. The effects of exotic softwood crops on the chemical fertility of a tropical soil. *East African Agricultural and Forestry Journal*, Vol. 33, 175-191 pp.
- Rodríguez, O. & Rodríguez, V. 2000. Documento: Desarrollo, determinación e interpretación de normas DRIS para el diagnóstico nutricional en plantas. Una revisión. *Revista de la Facultad de Agronomía*, Vol. 17, 449-470 pp.
- Ruano, M. J. R. 2003. Viveros forestales: Manual de cultivo y proyectos, Mundi prensa. Madrid. 281 pp.
- 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, Texcoco, México. 65 pp.
- SEMARNAT. 2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial de la Federación (DOF). [En línea]. Disponible: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf> [Fecha de consulta 25 de noviembre 2018].
- SEMARNAT. 2010. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación (DOF). [En línea]. Disponible: [https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3552/1/nom-059-semarnat-2010\\_30-dic-2010.pdf](https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3552/1/nom-059-semarnat-2010_30-dic-2010.pdf) [Fecha de consulta 20 de noviembre 2018].

- Shortle, W. C. & Smith, K. T. 1988. Aluminum-induced calcium deficiency syndrome in declining red spruce. *Science*, Vol. 240, 1017-1018 pp.
- Soares, M. R. & Alleoni, L. R. F. 2008. Contribution of soil organic carbon to the ion exchange capacity of tropical soils. *Journal of Sustainable Agriculture*, Vol. 32, 439-462 pp.
- Timmer, V. & Morrow, L. 1984. Published. Predicting fertilizer growth response and nutrient status of jack pine by foliar diagnosis. 6. North American Forest Soils Conference, Knoxville (USA), 1984. Dept. of Forestry.
- Timmer, V. & Stone, E. 1978. Comparative Foliar Analysis of Young Balsam Fir Fertilized With Nitrogen, Phosphorus, Potassium, and Lime 1. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 42, 125-130 pp.
- Torres, C. G. & Carvajal, V. D. 2012. Árboles de navidad: Estado de la reforestación en Costa Rica [En línea]. Disponible: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6290> [Fecha de consulta 20 de febrero 2019].
- Torres V, D. 2006. Evaluación de la regeneración natural de tres poblaciones de *Pseudotsuga* sp. en el estado de Tlaxcala. Tesis Profesional Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México. 70 pp.
- Van Den Driessche, R. 1989. Nutrient deficiency symptoms in container-grown Douglas-fir and white spruce seedlings, Forestry Canada and British Columbia Ministry of Forests. Forest Resource Development Agreement (FRDA) Rep 100. 29 pp.
- Van Den Driessche, R. 1991. Mineral nutrition of conifer seedlings, Senior Tree Physiologist Research Branch Ministry of Forests Victoria, B.C., Canada. 275 pp.
- Vásquez, G. I., López, L. M. Á., Ángeles, P. G., Trinidad, S. A., Jiménez, C. M. & Aguilar, B. G. 2015. Aclareo y fertilización química en la productividad primaria neta de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista mexicana de Ciencias Forestales*, Vol. 6, 82-93 pp.
- Vásquez, H. T. 2004. Caracterización ecológica de una localidad de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *glauca* (Beissn.) Franco, en el Estado de Puebla. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México 53 pp.
- Vázquez, C. I., Prieto, R. J. A., López, L. M. A., Wehenkel, C., Domínguez, C. P. A. & Muñoz, S. F. E. 2018. Crecimiento y supervivencia de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* bajo diferentes tratamientos de fertilización *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Vol. 24, 251-264 pp.
- Velasco, G. M. V., López, U. J., Angeles, P. G., Vargas, H. J. & Guerra, D. L. C. V. 2007. Dispersión de semillas de *Pseudotsuga menziesii* en poblaciones del centro de México. *Agrociencia*, Vol. 41, 121-131 pp.
- Ventura, R. A., López, U. J., Vargas, H. J., Valdez, L. J. R. & Guerra De La Cruz, V. 2009. Caracterización y conservación de *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) franco en la zona

- centro de México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado Forestal., Texcoco, México. 123 pp.
- Vitousek, P. M. 2004. Nutrient cycling and limitation: Hawai'i as a model system, Princeton University Press, USA. 232 pp.
- Walker, T. & Syers, J. K. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, Vol. 15, 1-19 pp.
- Walworth, J. & Sumner, M. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Advances in soil science*. Springer-Verlag, New York. Vol 6, 149-188 pp.
- Waring, R. H. & Schelesinger, W. H. 1985. *Forest ecosystems: concepts and management.*, Academic Prees. New York, NY, USA
- Weetman, G. 1989. Graphical vector analysis technique for testing stand nutritional status., En, W. J. Dyck y C. A. Mees (eds.). *Research strategies for long-term site productivity*. Proceedings, IEA/BE A3 Workshop. Seattle, WA. August 1988. IEA/BE A3 Report No. 8. Bulletin 152. Forest Research Institute, New Zealand Forest Service, 93-109 pp.
- Weetman, G. & Fournier, R. 1982. Graphical Diagnoses of Lodgepole Pine Response to Fertilization 1. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 46, 1280-1289 pp.
- Weetman, G. F., McWilliams, E. R. G. & Thompson, W. A. 1992. Nutrient management of coastal Douglas-fir and western hemlock stands: the issues En: Chappell HN, Weetman GF, Miller RE, editors. *Forest Fertilization: Sustaining and improving nutrition and growth of western forests*. Institute of Forest Resources, College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, WA, Contribution No. 73. , 17-27 pp.
- Wells, C. & Allen, L. 1985. When and where to apply fertilizer: a Loblolly Pine management guide, General Technical Report GTR-SE-36. USDA Forest Service, Southeastern Experiment Station, Asheville, NC, 31 pp.
- Westerman, R. 1990. *Soil testing and plant analysis*, 3 ed, Soil Science Society of America; Madison, Wisconsin, USA. 784 pp.
- Yagi, R., Ferreira, M. E., Cruz, M. C. P. D., Barbosa, J. C. & Araújo, L. a. N. D. 2005. Soil organic matter as a function of nitrogen fertilization in crop successions. *Scientia Agricola*, Vol. 62, 374-380 pp.
- Zamora, M. M. C. 2015. Producción de árboles de Navidad. *Revista mexicana de ciencias forestales*, Vol. 6, 4-6 pp.
- Zas, R. 2003. Foliar nutrient status and tree growth response of young *Pseudotsuga menziesii* Mirb.(Franco) to nitrogen, phosphorus and potassium fertilization in Galicia (Northwest Spain). *Forest Systems*, Vol. 12, 75-85 pp.
- Zérega, L. & Hernández, T. 1998. Efectos del nitrógeno orgánico y mineral sobre el rendimiento de la caña de azúcar. *Bioagro*, Vol. 10, 63-67 pp.