

EVALUACIÓN DE SÍNTOMAS VISUALES Y EFECTOS MORFOLÓGICOS CAUSADOS
POR LA OMISIÓN DE MACRO Y MICRO NUTRIENTES EN PLÁNTULAS DE *Pinus
tecunumanii* Y *Eucalyptus grandis* CULTIVADAS EN CONDICIONES DE VIVERO



CAROL ELIANA SÁNCHEZ CHACUÉ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2012

Copia Controlada

EVALUACIÓN DE SÍNTOMAS VISUALES Y EFECTOS MORFOLÓGICOS CAUSADOS
POR LA OMISIÓN DE MACRO Y MICRO NUTRIENTES EN PLÁNTULAS DE *Pinus
tecunumanii* Y *Eucalyptus grandis* CULTIVADAS EN CONDICIONES DE VIVERO



CAROL ELIANA SÁNCHEZ CHACUÉ

Trabajo Grado en la modalidad de Investigación para optar al título de Ingeniero Forestal

Directora
Catalina García Solórzano M. Sc.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2012

Nota de aceptación:

El director y los jurados, han leído el presente trabajo, han escuchado la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio.

Catalina García Solórzano M. Sc.
Director

Martha Isabel Almanza Ph.D.
Presidente del jurado

María Sara Mejía de Tafour M.Sc
Jurado

AGRADECIMIENTOS

El autor del proyecto expresa su gratitud a las siguientes entidades y personas quienes de una u otra forma contribuyeron a ejecución del presente estudio.

A Dios, por regalarme vida, salud, entendimiento y sabiduría para poder terminar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

A mi madre Francisca Sánchez, por ser el pilar de mi familia y a mi hermana Zulma Sánchez, por su apoyo moral, espiritual y económico durante toda de mi vida y más aún en esta etapa.

A las familias Sánchez Chacué, Campo Sánchez y Latorre Sánchez, por su cariño y apoyo durante toda mi existencia y aún más en esta etapa de mi vida.

A Catalina García Solórzano, I.F. M. Sc., directora del trabajo de grado por pensar en mí para la realización de este proyecto, por su confianza, acompañamiento, asesoramiento y apoyo a lo largo de esta investigación.

A Oscar Bermúdez, M. Sc. Evaluador inicial de este proyecto, por sus aportes y por avalar la realización de esta investigación.

A Martha Isabel Almanza, Ph.D. y María Sara Mejía M.Sc, por aceptar ser los jurados de este proyecto, por sus correcciones y sugerencias en esta investigación.

A Nhora Isaza, I.F. M.Sc. Ingeniera de Investigación Forestal SKCC, por su asesoramiento en el montaje del ensayo, colaboración, apoyo y acompañamiento durante toda la investigación; pero sobre todo por ser un ejemplo de profesionalismo y disciplina.

A Marcela Zapata, I.F. M.Sc. Ingeniera de Investigación Forestal SKCC, por su asesoramiento en el montaje del ensayo, y por su gestión para la realización de los análisis foliares realizados en esta investigación.

A Mauricio Zapata, I.F. M.Sc. Ingeniero de Planeación Forestal SKCC, por su colaboración en la determinación del diseño experimental implementado en este ensayo y por su asesoramiento en los análisis estadísticos durante toda esta investigación.

A Carlos Mario Jiménez, I.F. Superintendente de viveros SKCC, por su colaboración en el establecimiento de este ensayo y por su constante ayuda en la fase de campo de esta investigación.

A Víctor Betancourt, I.F. Representante legal de la empresa contratista FORCOL, por su apoyo económico para la realización de este ensayo y por su colaboración durante la fase de campo de esta investigación.

A Mauricio Arce Supervisor de calidad laboratorio se semillas SKCC y su equipo de trabajo, por su colaboración en el procesamiento de las muestras y datos utilizados en los análisis foliares y en la determinación de la producción de biomasa de esta investigación.

Copia Controlada

A Carlos Rodas, I.F. Ingeniero de Investigación Forestal SKCC, por su colaboración en la toma de fotografías durante este ensayo.

A Smurfit Kappa Cartón Colombia, por abrir estos espacios de aprendizaje, por su apoyo económico y logístico para la realización de este ensayo y por permitir la realización de esta investigación en las instalaciones del Vivero Forestal Rancho Grande.

A mi novio Harvy Andrey Rivera, I.F. Por su apoyo moral y económico durante esta investigación, pero sobre todo por su compañía, amor y comprensión hasta el día de hoy.

A Diego Correcha, Tecnólogo en Administración de Empresas Agropecuarias, por toda su colaboración en la fase de campo de esta investigación.

A los operarios del Vivero Rancho Grande, por su colaboración en las diferentes etapas de esta investigación, en especial a Carlos Eduardo Gallego, Yolanda Portilla, Lucero y Katherine Martínez, por su colaboración en los muestreos destructivos, pero sobre todo por regalarme su invaluable amistad.

A la familia Duque Valencia, mayordomos de la Finca Rancho Grande, por su amabilidad, cariño y por acogerme en su casa y en su hogar durante mi estadía en el Municipio de Restrepo.

A la Universidad del Cauca, por regalarme la fortuna de formarme profesional y personalmente dentro de esta prestigiosa institución.

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias y su personal docente por compartir sus enseñanzas durante estos años.

A todos mis compañeros con los cuales compartí durante estos últimos cinco años, muy especialmente a María del Mar, Ángela, Adriana, Laura, Andrea, Dajhana, Mayra, Kelly, Camilo, Alexander, Felipe y Pablo por estar a mi lado, por los tantos momentos compartidos y de los cuales me llevo estrechos lazos de cariño y amistad.

GLOSARIO

ACHAPARRAMIENTO: también llamado enanismo, es una reducción en la tasa de crecimiento y está asociado a casi todos los síntomas nutricionales. La forma del enanismo puede variar con la deficiencia.

ACOSTILLADO: es la presencia de costas o costillas, filetes en resaltos en algunos órganos de las plantas.

ADELGAZAMIENTO DE TALLOS: o raquitismo, es el desarrollo de tallos delgados larguiruchos es especial por deficiencia de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio.

ANÁLISIS FOLIAR: es una herramienta esencial para el diagnóstico nutricional de una planta, consiste en medir el contenido total de los nutrientes presentes en las hojas, a través de procedimientos químicos específicos.

ALTURA: atributo morfológico que cuantifica la longitud del tallo, se mide a nivel del suelo.

ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS: cualquier característica que puede ser observada o medida es considerada como tal. Como son atributos relativamente fáciles de controlar y medir, han sido extensamente usados para definir la calidad de las plantas.

BIOMASA: o peso seco de las plantas representa a la materia seca acumulada en sus distintos órganos, aéreos y radiculares (tallos, hojas, raíz principal, raíces mayores y menores a 1mm de diámetro).

CLOROSIS: se trata de un amarillamiento de las hojas causado por la falta de clorofila. La clorosis puede manifestarse en todas las hojas, solamente en las más jóvenes o solo en las más viejas; a veces, se manifiesta solamente en las venas o en el espacio situado entre las venas a lo que se le llama clorosis intervenal.

DEFICIENCIA NUTRICIONAL: es la disponibilidad insuficiente de cualquier nutrimento, dependiendo del grado de deficiencia se puede llegar a expresar características anormales visibles específicas para el elemento deficiente.

DEFOLIACIÓN: caída prematura de las hojas de los árboles y plantas, producida por deficiencias nutricionales, enfermedad, contaminación ambiental o acción humana.

DIÁMETRO AL CUELLO DE LA RAÍZ: atributo morfológico que determina la longitud transversal del tallo, se mide a nivel del suelo o a 10 mm bajo los cotiledones o de las cicatrices de los cotiledones.

DISEÑO EXPERIMENTAL: es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. En un diseño experimental se manipulan deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, para medir el efecto que tienen en otra variable de interés.

ENROJECIMIENTO DE ÓRGANOS: adquisición de una coloración rojiza en cualquier órgano de la planta, ya sea tallo, hojas, frutos y ramas, debido a la formación de antocianinas. Estos pigmentos pueden desarrollarse en exceso como consecuencia de falta de minerales, especialmente nitrógenos y fósforo.

MACRONUTRIENTES: son los elementos que las plantas deben absorber en grandes cantidades para su perfecto funcionamiento. los macronutrientes primarios son el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K) y los macronutrientes secundarios son el Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Azufre (S).

MICRONUTRIENTES: son los elementos que las plantas deben absorber en pequeñas cantidades. se denominan también elementos traza, dado que aparecen en trazas o pequeñas cantidades cuando se realiza un análisis químico. Ellos son el Boro (B), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Cloro (Cl), Manganeseo (Mn) y Molibdeno (Mo).

MODELO DE CRECIMIENTO: Este tipo de modelo permite hacer estimaciones respecto a infinidad de variables tales como la altura, el diámetro, la producción de biomasa, la producción maderera o sobre qué efectos tendrá a largo plazo la intervención silvícola por parte del ser humano en una plantación. También permite determinar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos evaluados en un diseño experimental.

NECROSIS: es la muerte de alguna parte de la planta. Entre los ejemplos más significativos se tiene, el secado del borde o ápice de las hojas, ennegrecimiento y muerte de raíces y la muerte de yemas terminales.

NUTRIENTES MINERALES: son aquellos elementos químicos que las plantas necesitan para crecer, mantenerse y producir frutos y semillas.

PLÁNTULAS: plantas muy pequeñas, generalmente el resultado de la germinación de una semilla o del enraizamiento de un esqueje, en sus primeras semanas.

SÍNTOMA VISUAL: es una característica anormal, visible y específica que es expresada por la planta por la insuficiente cantidad o exceso de algún nutrimento. Los síntomas varían de acuerdo al elemento.

RESUMEN

Para determinar los síntomas visuales y los efectos morfológicos del *Pinus tecunumanii* y *Eucalyptus grandis* asociados a las deficiencias de los macro y micronutrientes en condiciones de vivero, se estableció un diseño experimental en parcelas divididas, donde las soluciones nutritivas a evaluar se consideraron las parcelas o tratamientos y los grupos de cinco plántulas se consideraron las subparcelas o subtratamientos. Las variables de respuesta a evaluar durante el ensayo fueron el incremento en altura, en diámetro al cuello de la raíz así como la producción de biomasa y los síntomas visuales expresados en diferentes órganos de la planta. Al final de la investigación se estableció que las plantas de las dos especies que más evidenciaron los síntomas característicos de la deficiencia, fueron las que estuvieron sometidas a una baja cantidad de Nitrógeno (N), omisión de Fósforo (P), Potasio (K) y Boro (B), con síntomas como clorosis, necrosis, enrojecimiento de órganos, muerte de yemas terminales y en general bajos incrementos de altura, diámetro y producción de biomasa. Al determinar los modelos de crecimiento para altura, diámetro y biomasa se obtuvo que los tratamientos ↓N, -P, -K, y -B, presentaron diferencias significativas con respecto al tratamiento Control.

Palabras claves. Deficiencia nutricional, macronutrientes, micronutrientes, modelos de crecimiento, síntomas visuales.

ABSTRACT

In order to determine the visual symptoms and morphological effects of *Pinus tecunumanii* and *Eucalyptus grandis* associated with deficiencies of the macro and micronutrients in greenhouse conditions, an experimental split-plot design was established, where treatments and plots were considered to evaluate nutrient solutions and subplots or subtreatments were considered for groups of five seedlings. The response variables evaluated during the trial were the increase in height, in diameter as well as biomass production and the visual symptoms expressed in different organs of the plant. At the end of the investigation, it was established that the plants of the two species tested that showed more characteristic symptoms of deficiencies, were those that were subjected to a low level of Nitrogen (N), Omission of Phosphorus (P), Potassium (K) and Boron (B), with symptoms such as chlorosis, necrosis, reddening of organs and death of terminal buds. In determining the growth models for height, diameter and biomass was obtained the treatments ↓N, -P, -K, and -B, showed significant differences compared to control treatment.

Key words: Growth models, macronutrients, micronutrients, nutrient deficiency, visual symptoms.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. MARCO TEÓRICO	22
1.1 GENERALIDADES DE LA ESPECIE <i>Pinus tecunumanii</i>	22
1.1.1 Taxonomía	22
1.1.2 Descripción botánica	22
1.1.3 Distribución y hábitat natural	22
1.1.4 Introducción y plantaciones	22
1.1.5 Suelo y clima	22
1.1.6 Propagación en vivero	23
1.2 GENERALIDADES DE LA ESPECIE <i>Eucalyptus grandis</i>	23
1.2.1 Taxonomía	24
1.2.2 Descripción botánica	24
1.2.3 Distribución y hábitat natural	24
1.2.4 Introducción y plantaciones	24
1.2.5 Suelo y clima	25
1.2.6 Propagación en vivero	25
1.3 CULTIVOS HIDROPÓNICOS	25
1.3.1 Solución nutritiva	26
1.4 NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS	28
1.4.1 Elementos minerales y esenciales	28
1.4.2 Deficiencias Nutricionales	30
1.4.2.1 Diagnostico visual y sintomatología por deficiencias nutricionales.	30

1.4.2.2 Análisis químico de tejidos vegetales	32
2. METODOLOGÍA	33
2.1 ÁREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACIÓN	33
2.1.1 Municipio de Restrepo-Valle del Cauca	33
2.1.2 Vivero Forestal Rancho Grande	33
2.2 SELECCIÓN DE LAS ESPECIES Y PROCEDENCIA	34
2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	34
2.4 ESTABLECIMIENTO, SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL ENSAYO	35
2.4.1 Fase de establecimiento	35
2.4.1.1 Preselección del material vegetal	35
2.4.1.2 Selección del medio de cultivo	36
2.4.1.3 Trasplante y aclimatación	36
2.4.1.4 Pesaje de fuentes fertilizantes	37
2.4.1.5 Preparación de las soluciones nutritivas	38
2.4.1.6 Control de la solución nutritiva	39
2.4.1.7 Fertilización y lavado de sales	40
2.4.1.8 Riego	40
2.4.2 Fase de seguimiento y evaluación	41
2.4.2.1 Diagnóstico visual	41
2.4.2.2 Incremento en altura	42
2.4.2.3 Incremento en el diámetro al cuello de la raíz	42
2.4.2.4 Producción de biomasa	43
2.4.2.5 Análisis foliares	43
2.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	44

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1 DIAGNÓSTICO DE LA SÍNTOMATOLOGIA VISUAL POR DEFICIENCIAS NUTRICIONALES	45
3.1.1 Bajo nivel de Nitrógeno	45
3.1.2 Omisión de Fósforo	47
3.1.3 Omisión de Potasio	49
3.1.4 Omisión de Calcio	50
3.1.5 Omisión de Magnesio	52
3.1.6 Omisión de Azufre	53
3.1.7 Omisión de Boro	53
3.1.8 Omisión de Cobre	55
3.1.9 Omisión de Hierro	56
3.1.10 Omisión de Manganeseo	58
3.1.11 Omisión de Zinc	59
3.2 ANALISIS FOLIARES	60
3.2.1 <i>Pinus tecunumanii</i>	61
3.2.2 <i>Eucalyptus grandis</i>	63
3.3 CRECIMIENTO EN ALTURA Y DIÁMETRO AL CUELLO DE LA RAÍZ	64
3.3.1 Crecimiento en altura	64
3.3.2 Crecimiento en diámetro al cuello de la raíz (DCR)	74
3.4 BIOMASA AÉREA Y RADICUALR	83
3.4.1 Biomasa radicular	83
3.4.2 Biomasa aérea	87
4. CONCLUSIONES	91

5. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	101

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Composición de soluciones nutritivas usadas por algunos investigadores	26
Cuadro 2. Composición de la solución nutritiva Hoagland N°1	27
Cuadro 3. Composición de la solución nutritiva de Hoagland N° 2	27
Cuadro 4. Rangos adecuados de niveles foliares de macro y micronutrientes en diferentes especies de Pinos y eucaliptos propuestos por diferentes autores	32
Cuadro 5. Tratamientos evaluados en el ensayo de deficiencias nutricionales en plántulas de <i>Pinus tecunumanii</i> y <i>Eucalyptus grandis</i>	35
Cuadro 6. Contenido foliar de nutrientes en las especies <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i>	60
Cuadro 7. Contenido de macronutrientes en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en <i>Pinus tecunumanii</i>	61
Cuadro 8. Contenido de microelementos en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en <i>Pinus tecunumanii</i>	61
Cuadro 9. Contenido de macronutrientes en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en <i>Eucalyptus grandis</i>	63
Cuadro 10. Contenido de micronutrientes en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en <i>Eucalyptus grandis</i>	63
Cuadro 11. Modelo de Richards elegido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en altura en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	69
Cuadro 12. Modelo de Richards elegido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en altura en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	73
Cuadro 13. Modelo de Richards elegido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	78
Cuadro 14. Modelo de Richards elegido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	82

Cuadro 15. Modelo lineal elegido para la determinación de diferencias estadísticamente significativas en la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	84
Cuadro 16. Modelo lineal elegido para la determinación de diferencias estadísticamente significativas en la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	86
Cuadro 17. Modelo lineal elegido para la determinación de diferencias estadísticamente significativas en la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	88
Cuadro 18. Modelo cuadrático elegido para la determinación de diferencias estadísticamente significativas en la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Restrepo-Valle del Cauca	33
Figura 2. Preselección de plántulas de <i>P. tecunumanii</i> y <i>E. grandis</i> usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales	36
Figura 3. Arena de cuarzo en bolsas de polietileno listas para el trasplante del material vegetal	36
Figura 4. Proceso de trasplante y aclimatación de las plántulas de <i>P. tecunumanii</i> y <i>E. grandis</i> usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales	37
Figura 5. Preparación de las soluciones nutritivas equivalentes a los tratamientos evaluados en el ensayo de deficiencias nutricionales	39
Figura 6. Soluciones madre de micronutrientes preparadas y envasadas de forma individual	39
Figura 7. Equipos utilizados para el control de pH y CE y de las soluciones nutritivas en el ensayo de deficiencias nutricionales	40
Figura 8. Actividad de lavado de sales a cada una de las plántulas del ensayo de deficiencias nutricionales	40
Figura 9. Actividad del riego en cada una de las plántulas del ensayo de deficiencias nutricionales	41
Figura 10. Diagnóstico visual realizado en plantas de <i>P. tecunumanii</i> y <i>E. grandis</i>	41
Figura 11. Medición de altura en las plántulas de <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i> usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales	42
Figura 12. Medición del diámetro al cuello de la raíz en las plántulas de <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i> usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales	42
Figura 13. Muestreos destructivos de las plántulas de <i>P. tecunumanii</i> y <i>E. grandis</i> para obtener la producción de biomasa aérea y radicular	43
Figura 14. Recolección de acículas y hojas medias utilizadas para los análisis foliares	44
Figura 15. Clorosis de una planta de <i>P. tecunumanii</i> con deficiencia de Nitrógeno	45

Figura 16. Progreso de los síntomas por deficiencia de Nitrógeno en hojas de una planta de <i>E. grandis</i>	46
Figura 17. Síntomas de deficiencia de Fósforo en <i>Pinus tecunumanii</i>	47
Figura 18. Progreso de los síntomas por deficiencias de Fósforo en plántulas de <i>E. grandis</i>	48
Figura 19. Clorosis y necrosis de acículas en <i>P. tecunumanii</i> por deficiencia de Potasio	49
Figura 20. Progreso de los síntomas por deficiencias de Potasio en hojas viejas de una planta de <i>E. grandis</i>	50
Figura 21. Acículas jóvenes deformes y con puntas amarillas por deficiencia de Calcio en plantas de <i>P. tecunumanii</i>	51
Figura 22. Leve clorosis de hojas jóvenes en plántulas de <i>E. grandis</i> por deficiencia de Calcio	51
Figura 23. Síntomas de deficiencia de Magnesio en plántulas de <i>E. grandis</i>	52
Figura 24. Clorosis intervenal y deformación de hojas jóvenes por deficiencia de Azufre en plántulas de <i>E. grandis</i>	53
Figura 25. Síntomas por deficiencia de Boro en plántulas de <i>P. tecunumanii</i>	54
Figura 26 Progreso de los síntomas por deficiencias de Boro en plántulas de <i>E. grandis</i>	55
Figura 27. Síntomas de deficiencia de Cu en plantas de <i>E. grandis</i>	56
Figura 28. Clorosis en acículas de <i>P. tecunumanii</i> por deficiencia de Hierro	56
Figura 29. Clorosis por deficiencias de Fe en plántulas de <i>E. grandis</i>	57
Figura 30. Síntomas de deficiencia de Manganeso en plántulas de <i>P. tecunumanii</i>	58
Figura 31. Clorosis intervenal por deficiencia de Manganeso en plántulas de <i>E. grandis</i>	59
Figura 32. Progreso de síntomas por omisión de Zinc en plántulas de <i>E. grandis</i>	59
Figura 33. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable altura para <i>Pinus tecunumanii</i> .	66
Figura 34. Incremento promedio en altura por edades de medición en la especie <i>Pinus tecunumanii</i> para cada uno de los tratamientos.	67

Figura 35. Gráfico de dispersión del comportamiento de la altura en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	68
Figura 36. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable altura para <i>E. grandis</i> .	70
Figura 37. Incremento promedio en altura por edades de medición en la especie <i>E. grandis</i> para cada uno de los tratamientos	71
Figura 38. Gráfico de dispersión del comportamiento de la altura en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	72
Figura 39. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable DCR para <i>Pinus tecunumanii</i>	75
Figura 40. Incremento promedio en DCR por edades de medición en la especie <i>Pinus tecunumanii</i> para cada uno de los tratamientos	75
Figura 41. Gráfico de dispersión del comportamiento del DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	76
Figura 42. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable DCR para <i>E. grandis</i>	79
Figura 43. Incremento promedio en DCR por edades de medición en la especie <i>E. grandis</i> para cada uno de los tratamientos evaluados	79
Figura 44. Gráfico de dispersión del comportamiento del DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	81
Figura 45. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	84
Figura 46. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	85
Figura 47. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>E. grandis</i>	87
Figura 48. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en <i>P. tecunumanii</i>	89

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Distribución en campo del diseño experimental establecido en el ensayo de deficiencia nutricionales en plantas de <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i>	101
Anexo B. Sustancia químicas fertilizantes solubles con sus respectivos elementos aportados usados en la preparación de las diferentes soluciones nutritivas	102
Anexo C. Aporte de cada elemento mineral en cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i>	103
Anexo D. Formato de registro para el control de pH y CE de las soluciones nutritivas evaluadas	104
Anexo E. Formato de registro de las mediciones de altura y diámetro para las plántulas de <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i>	105
Anexo F. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en altura en la especie <i>Pinus tecunimanii</i>	106
Anexo G. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richard para altura probado en algunas plantas de <i>P. tecunuamnii</i> de diferentes tratamientos	107
Anexo H. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en altura en la especie <i>E. grandis</i>	108
Anexo I. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richard para altura probado en algunas plantas de <i>Eucalytus grandis</i> de diferentes tratamientos	109
Anexo J. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en DCR en la especie <i>P. tecunumanii</i>	110
Anexo K. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richards para DCR probado en algunas plantas de <i>Pinus tecunumanii</i> de diferentes tratamientos	111
Anexo L. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en DCR en la especie <i>E. grandis</i>	112
Anexo M. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richard para DCR probado en algunas plantas de <i>Eucalyptus grandis</i> de diferentes tratamientos	113
Anexo N. Estimados para los parámetros del modelo lineal para la biomasa radicular en <i>E. grandis</i>	114

Anexo O. Ejemplo del ajuste del modelo lineal a los datos de biomasa radicular en <i>E. grandis</i>	115
Anexo P. Estimados para los parámetros del modelo lineal para la biomasa radicular en <i>Pinus tecunumanii</i>	116
Anexo Q. Ejemplo del ajuste del modelo lineal a los datos de biomasa radicular en <i>Pinus tecunumanii</i>	117
Anexo R. Estimados para los parámetros del modelo lineal para la biomasa aérea en <i>E. grandis</i>	118
Anexo S. Ejemplo del ajuste del modelo lineal a los datos de biomasa aérea en <i>E. grandis</i>	119
Anexo T. Estimados para los parámetros del modelo cuadrático para la biomasa aérea en <i>Pinus tecunumanii</i>	120
Anexo U. Ejemplo del ajuste del modelo cuadrático los datos de biomasa aérea en <i>Pinus tecunumanii</i>	121

INTRODUCCIÓN

El éxito de una plantación forestal empieza en el vivero, el material vegetal que allí se produce, junto con la adecuada selección de sitio y de las buenas prácticas silviculturales, son las responsables en el largo plazo del cumplimiento de los objetivos trazados en un proyecto forestal (SKCC, 2008).

En el caso de las plantas producidas en condiciones de vivero, la importancia de suministrar una solución nutritiva adecuada, radica en que estas plántulas deben cumplir los más altos estándares de calidad y dentro de ellos está el evitar problemas nutricionales, ya que estos pueden generar bajas tasas de crecimiento tanto en altura como en diámetro, malformaciones en los diferentes órganos, lo que finalmente lleva a pérdidas totales de material vegetal y a su vez a pérdidas en la productividad económica del vivero.

Es conocido que además de la luz, las plantas deben obtener de su entorno ciertos elementos químicos que están implicados en complejas reacciones bioquímicas que son necesarias para el mantenimiento y crecimiento de sus células, es por esto que uno de los factores más influyentes en el desarrollo de las plantas, es la nutrición mineral, ya que afecta de manera directa la calidad física y morfológica de las plantas.

De acuerdo con los antecedentes en plantas forestales, se sospecha la incidencia por concepto de algunas deficiencias y excesos en ciertos elementos minerales, en el desarrollo tanto de plántulas a nivel de vivero como de plantaciones forestales en diferentes regiones de Colombia (Lozada y Zambrano, 1991).

Aunque el tema de nutrición en las plantas ha sido ampliamente estudiado, en el caso de material en fase de vivero, desafortunadamente la falta de documentación disponible acerca de la sintomatología visual y los efectos a nivel morfológico causados por las deficiencias de macro y micronutrientes lo que no es ajeno a especies como *Pinus tecunumanii* y *Eucalyptus grandis*, hacen necesaria la realización de una investigación que permita generar esta información, con el fin de tener una herramienta teórico práctica para la orientación y mejora en la capacidad del personal del vivero en la identificación oportuna de dichos síntomas para estas especies.

Con la investigación realizada se pretendió, mediante ensayos de nutrición controlada a través de la técnica del elemento faltante con manipulación de las soluciones nutritivas, realizar una caracterización de los síntomas visuales generados por las deficiencias de elementos minerales tales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, boro, hierro, cobre, manganeso y zinc en las especies *Pinus tecunumanii* y *Eucalyptus grandis*. Este diagnóstico visual, estuvo apoyado con análisis foliares que mostraron de forma precisa la cantidad de los elementos minerales presentes en las plántulas tratadas.

Además, se quería dar a conocer los efectos morfológicos en las plantas, ante las deficiencias nutricionales de los elementos ya mencionados, a través de la medición de la altura y el diámetro al cuello de la raíz y la cuantificación de la producción de biomasa.

La investigación realizada generó una caracterización escrita y visual de los síntomas por deficiencias de elementos minerales en dos especies de importancia como lo son el *Eucalyptus grandis* y *Pinus tecunumanii*. Sumado a esto se generaron modelos matemáticos de crecimiento para las variables altura, diámetro al cuello de la raíz y producción de biomasa aérea y radicular; respondiendo así a la necesidad de generar una base teórico-práctica para el estudio de la nutrición mineral en estas dos especies.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES DE LA ESPECIE *Pinus tecunumanii*

Pinus tecunumanii es una especie sobresaliente, con excelentes características fenotípicas y silviculturales, rápido crecimiento y probablemente la mejor forma de fuste de todos los pinos tropicales, lo cual le confiere un gran potencial como especie para reforestación en regiones tropicales y subtropicales (CATIE, 2003).

1.1.1 Taxonomía. *Pinus tecunumanii* pertenece a la familia PINACEAE. Su nombre científico es *Pinus tecunumanii* Eguluz & Perry y se le conoce como pino ocote en México y Guatemala y como pinabete en Honduras.

1.1.2 Descripción botánica. Árboles de 30–40 (–45) m de alto y 50–90 (–110) cm de diámetro, corona clara, con algunas ramas delgadas, más o menos ascendentes o laterales; ramas jóvenes con brotes pruinosos, fuste a veces con engrosamientos nodales; corteza áspera y fisurada en la base del fuste, lisa y más delgada hacia arriba, grisácea, exfoliante en escamas, placas o tiras papiráceas, dejando manchas rojizo-anaranjadas por debajo. follaje delgado, patente o más o menos péndulo, verde claro; agujas generalmente 4 por fascículo, a veces 3 ó 5, 14–25 cm de largo, vaina de las agujas de 10–22 mm de largo; canales resiníferos 2–3, casi siempre medios, raramente internos. conos angostamente cónicos, 4–8 cm de largo y 3–5 cm de ancho, solitarios o en pares, o a veces en fascículos verticilados de 4 o más, persistentes, pedúnculos de hasta 2 cm de largo, más raramente sésiles o subsésiles, escamas angostas con apófisis prominentes, a veces con un acúleo proyectado hacia adelante (Veliz *et al*, 2007).

1.1.3 Distribución y hábitat natural. En general la especie *Pinus tecunumanii* tiene un amplio rango altitudinal desde 440 hasta 2800 m.s.n.m. (CATIE, 2003). Según Dvorak y otros, esta especie se divide en dos subpoblaciones denominadas de alta y de baja elevación de acuerdo a la altitud en la que se desarrolle, cada una con sutiles diferencias morfológicas y adaptativas, los de alta elevación se desarrollan en alturas entre 1500 y 2900 m.s.n.m., mientras que los de bajas elevaciones entre 450 y 1500 m.s.n.m. (Álvarez, 2006).

1.1.4 Introducción y plantaciones. Ha sido introducida y plantada en muchos países de los trópicos y subtrópicos, originalmente en ensayos de adaptación y evaluación de procedencias y progenies y luego se han establecido grandes plantaciones. Los países con los mayores programas de evaluación son Australia, Brasil, Colombia; Malawi, Sur África, Swazilandia, Venezuela y Zinbabwe (CATIE, 2003).

1.1.5 Suelo y clima. La distribución de la especie parece estar determinada por la geología y la precipitación, con ocurrencia en sitios de suelos moderadamente fértiles y

profundos, ligeramente ácidos a neutros (pH 4.8-7) y bien drenados, con precipitaciones de 790 a 2200 mm y temperaturas de 14 a 25°C. Puede crecer en áreas donde llueve a lo largo de todo el año como en sitios con estaciones secas de hasta seis meses (CATIE, 2003). La humedad relativa presenta un valor del 80% (CATIE, 2000).

1.1.6 Propagación en vivero. Se puede sembrar en cajas con arena para trasplante posterior o directamente en bolsas. Si se siembra en cajas, el repique debe hacerse cuando las plántulas han alcanzado una altura de 3-4 cm. Para las bolsas, se recomiendan sustratos moderadamente ácidos (pH 5.5-6.0) y es necesario proporcionar sombra durante los primeros días después del trasplante o de la germinación, en caso de siembra directa. Si el vivero es nuevo o si se planta en sitios donde la especie no es nativa, es fundamental inocular el sustrato con micorrizas, ya que de lo contrario las plántulas no desarrollarán bien y se volverán amarillentas y débiles (CATIE, 2003).

- **Calidad física de la semilla.** Se han reportado porcentajes de germinación de 85 a 90% y porcentajes de pureza de 90 a 99%. El contenido de humedad varía de 8.7 a 10.8%.

- **Almacenamiento de la semilla.** La semilla es ortodoxa y debe ser almacenada en bolsas de polietileno herméticamente selladas, con contenidos de humedad de 6 a 8% de y temperaturas de 3 a 4°C; conservan su viabilidad por periodos de cinco a diez años. En condiciones ambientales no controladas la semilla pierde su viabilidad de uno a dos meses (CATIE, 2000).

- **Tratamientos pre-germinativos y germinación.** Con el objeto de obtener una germinación uniforme se recomienda sumergir las semillas en agua limpia por doce horas antes de la siembra (CATIE, 2000). Dvorak menciona que la germinación se produce entre el séptimo y el décimo día con un crecimiento rápido en sus primeras etapas (Álvarez, 2006) y termina de 15 a 17 días después (CATIE, 2000).

- **Duración en vivero.** Se requieren 5-8 meses en vivero para endurecer las plántulas, que estarán listas para la plantación al alcanzar los 25-30 cm de altura (CATIE, 2003).

1.2 GENERALIDADES DE LA ESPECIE *Eucalyptus grandis*

El *Eucalyptus grandis* es uno de los árboles de mayor importancia comercial en el mundo, con más de medio millón de hectáreas plantadas en áreas tropicales y subtropicales de cuatro continentes, en Colombia esta especie se cultiva en los departamentos del Cauca, Valle del Cauca y Antioquia (Meskimen y Francis, 1990).

1.2.1 Taxonomía. *Eucalyptus grandis* pertenece a la familia MYRTACEAE. Su nombre científico es *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden y recibe nombres vulgares como eucalipto y eucalipto rosado.

1.2.2 Descripción botánica. Es un árbol que alcanza hasta 60 m de altura y 1.50 m de diámetro. La corteza es áspera y persistente desde la base hasta uno o dos metros de altura; es delgada, fibrosa o escamosa, tiene una tonalidad de gris clara a marrón y se puede desprender en bandas alargadas. Los árboles son de copa poco densa y amplia, y tiene porte columnar en plantaciones densas (Ospina *et al*, 2006).

Las hojas son alternas horizontales o colgantes con peciolo delgado y cortos, lanceoladas, acuminadas y de base cuneada-peciolada, glabras, delgadas y con nervaduras secundarias finas y regulares, borde entero, ligeramente onduladas, brillantes, de color verde oscuro en el haz y verde pálido en el envés (CATIE, 1986).

Las flores son blancas y crecen en umbelas. Estas inflorescencias son axilares y simples, con siete flores; pedúnculos aplanados, de hasta 2 cm de longitud, yemas sésiles o cortamente pediceladas; los pedicelos con frecuencia son robustos y atenuados, de 0,8 a 0,5 cm y presentan una cicatriz. Las flores tiene cinco estambres flexados irregularmente, y fértiles; anteras versátiles, oblongas, que se abren por ranuras longitudinales. La mayoría de las umbelas originan de cinco a siete frutos hasta la madurez (Ospina *et al*, 2006).

El fruto es una capsula leñosa, cerrada, de forma cónica a ligeramente piriforme, con gran cantidad de semillas muy pequeñas, pedicelos cortos, en ocasiones sésiles, frecuentemente glaucos, de hasta 0,8 cm de largo por 0,6 cm de ancho, con frecuencia contraídos hacia el ápice, reborde delgado, disco no visible, dehiscente con 4 a cinco valvas, anchas y curvadas hacia adentro. Según Hodgson, cada capsula contiene entre 3 y 25 semillas sana, con un promedio de 8 y una cantidad mucho mayor de óvulos no fértiles (Ospina *et al*, 2006).

1.2.3 Distribución y hábitat natural. Se localiza en forma natural en las zonas costeras de Nueva Gales del Sur y Queensland (16° a 33° S); en una franja de unos 100 km en el continente australiano. Es más frecuente entre 25° y 33° S. Se encuentra con mayor frecuencia por debajo de los 350 msnm, pero en la parte más tropical de su distribución se encuentra a los 900 msnm (CATIE, 1994).

1.2.4 Introducción y plantaciones. Se ha introducido en Asia, África, América del Sur y América Central, es la especie más plantada del mundo. En Colombia se cultiva en Cauca, Valle del Cauca y Antioquia (SEMICOL, 2010).

1.2.5 Suelo y clima. El clima en la distribución natural australiana del eucalipto rosado es subtropical húmedo, con unas temperaturas mínimas promedio durante los meses más fríos entre 2 y 10 °C y unas temperaturas máximas promedio de cerca de 29 °C durante los meses más calientes. La precipitación promedia entre 1020 y 1780 mm anuales; se encuentra concentrada durante el verano, pero la precipitación mensual durante la temporada seca es de por lo menos 20 mm (Meskimen y Francis, 1990). Se desarrolla en suelos profundos de textura variable pero bien drenados, preferiblemente franco-arcillosos no calcáreos. No es exigente de suelos ricos de nutrientes. Soporta precipitaciones entre 1.000 y 1.300 mm anuales y temperaturas medias anuales de 10 a 35°C (SEMICOL, 2010).

1.2.6 Propagación en vivero. Se recomienda hacer los germinadores elevados del suelo para evitar problemas de hongos y de humedad y colocarles una cubierta de plástico. Usar un sustrato compuesto por tres partes de arena y una de suelo, previamente cernido para que este suelto y homogéneo. La semilla debe ser colocada en hileras, luego cubrirla con una capa de 0.5 cm del mismo sustrato (Ospina *et al*, 2006).

- **Almacenamiento de la semilla.** Las semillas secas deben almacenarse en bolsas plásticas de calibre grueso de (3-4mm) y estas en recipientes herméticos de vidrio, los cuales deben refrigerarse a una temperatura de 3 a 5°C y una humedad relativa del 80% (Ospina *et al*, 2006).

- **Tratamientos pre-germinativos y germinación.** Generalmente no se requiere tratamiento para inducir la germinación, pero se puede dejar la semilla en remojo durante 24 horas. La germinación de inicia entre los 6 y 15 días y culmina después de los 20 (El Semillero, 2010).

- **Duración en vivero.** Este periodo debe ser lo suficientemente largo como para que los árboles alcancen una altura de 25 cm y esté lista para llevar a campo (El Semillero, 2010).

1.3 CULTIVOS HIDROPÓNICOS

La hidroponía consiste en cultivar plantas en sustratos inorgánicos, por tanto se denominan cultivos hidropónicos aquéllos que se efectúan, en vez de en suelo, en un medio completamente artificial, que puede estar constituido por una solución nutritiva dentro de la cual las plantas, adecuadamente sostenidas, inmergen el aparato radical o por un sustrato sólido poroso e inerte, a través del cual, con diversos métodos, se hace circular dicha solución nutritiva (Bigo de Grosso y García de Pusterla, 2001).

En este sentido, los métodos de cultivo en soluciones nutritivas se constituyen en un gran aliado para la identificación de síntomas característicos o específicos ocasionados por una deficiencia o exceso en cierto elemento mineral (Lozada y Zambrano, 1991).

En 1921 la hidroponía comenzó como método comercial en Estados Unidos, cuando Pember y Adams realizaron ensayos con claveles en arena y en 1929 el profesor Gericke de la Universidad de California introdujo el método de cultivo en soluciones nutritivas sin sustrato, para la producción de tomates. Este último investigador inventó la palabra hidroponía (Bigo de Grosso y García de Pusterla, 2001).

En Colombia la sección de nutrición forestal del servicio nacional de sanidad forestal (INDERENA), fue la pionera en realizar diversos estudios de nutrición mineral en plántulas de pinos, eucaliptos y otras especies forestales de interés, en cabeza de Escobar y del Valle (Lozada y Zambrano, 1991).

1.3.1 Solución nutritiva. En los cultivos hidropónicos todos los elementos esenciales se suministran a las plantas disolviendo las sales fertilizantes en agua para preparar la solución de nutrientes. Mucho tiempo y esfuerzo ha sido empleado en la formulación de soluciones nutritivas y muchas soluciones han sido exitosamente estudiadas pero algunas pueden diferir de otras en la concentración y combinación de sales (Llanos, 2001). El Cuadro 1 presenta algunas de las soluciones nutritivas que fueron desarrolladas y usadas por algunos investigadores durante sus ensayos.

Cuadro 1. Composición de soluciones nutritivas usadas por algunos investigadores

Sachs (1860)		Knop (1865)		Pfeffer (1900)		Crone (1902)	
Fuente	gr/1000 cc de H ₂ O	Fuente	gr/1000 cc de H ₂ O	Fuente	gr/1000 cc de H ₂ O	Fuente	gr/1000 cc de H ₂ O
KNO ₃	1.00	Ca(NO ₃) ₂	0.8	Ca(NO ₃) ₂	0.8	KNO ₃	1.00
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0.50	KNO ₃	0.2	KNO ₃	0.2	Ca ₃ (PO ₄) ₂	0.25
MgSO ₄	0.50	KH ₂ PO ₄	0.2	MgSO ₄	0.2	MgSO ₄	0.25
CaSO ₄	0.50	MgSO ₄	0.2	KH ₂ PO ₄	0.2	CaSO ₄	0.25
NaCl	0.25	FePO ₄	Traza	KCl	0.2	FePO ₄	0.25
FeSO ₄	Traza			FeCl ₃	Poca cantidad		

Fuente: Hoogland y Arnon, 1950

Hoagland y Arnon, en 1950, formularon dos soluciones nutritivas las cuales han sido ampliamente utilizadas y el término "solución de Hoagland" proviene de los laboratorios caseros del mundo, dedicados a la nutrición de las plantas a nivel mundial (Llanos, 2001).

El Cuadro 2, muestra los componentes de la solución de Hoagland N°1 para cultivos de plantas sin suelo.

Cuadro 2. Composición de la solución nutritiva Hoagland N°1

Macronutrientes	
Fuente	g ^l ⁻¹ de H ₂ O destilada
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236
KNO ₃	101
MgSO ₄ ·7H ₂ O	246.5
KH ₂ PO ₄	136
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·2H ₂ O	2.52
K ₂ SO ₄	86.1
CaSO ₄ ·2H ₂ O	1.72
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	256.42
Micronutrientes	
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.8
H ₃ BO ₃	2.86
H ₂ MoO ₄	0.09
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
Quelato de Fe (0.5%)	0.6 ml

Fuente: Lozada y Zambrano, 1991

La solución N°2 de Hoagland contiene iones amonio como también de nitrato dando como resultado una mejor solución buffer que la N°1. La segunda solución fue modificada por Jhonson *et al* en 1957 (Llanos, 2001). La composición de la solución nutritiva se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Composición de la solución nutritiva de Hoagland N° 2

Solución stock g ^l ⁻¹	cc de solución stock para usar en un litro de agua cc/litro
115.1 NH ₄ H ₂ PO ₄	1
101.1 KNO ₃	6
164.1 Ca(NO ₃) ₂	4
120.4 MgSO ₄	2

Fuente: Hoagland y Arnon, 1950

La solución de micronutrientes solo presenta un leve cambio frente a la solución N°1, en cuanto a la cantidad de ácido molibdico (H₂MoO₄), que pasa de 0.09 a 0.02 gr/l.

1.4. NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS

Todas las plantas deben tener en variados grados, suministros básicos para crecer, tales como; temperatura, luz, energía, agua, oxígeno, carbono y elementos minerales (Sánchez, 2005).

El sistema suelo-planta es un sistema abierto en que los elementos son constantemente removidos de un lado a otro donde es acumulado y por tanto se dan todas las reacciones posibles. También tiene un estado estable donde todas las reacciones parciales ocurren con la misma velocidad de izquierda a derecha y viceversa y la concentración del elemento no varía y por último las velocidades de reacción están determinadas por aquella que es menor. Dentro de este aspecto es relevante mencionar que se admiten tres formas de nutrición de plantas.

a. Nutrición carbonada, a través de la incorporación y transformación del CO_2 en carbohidratos en el proceso fotosintético.

b. Nutrición mineral, a través de la absorción radicular de nutrientes en forma aniónicas y catiónicas simples.

c. Nutrición hídrica, es la absorción de agua para la fotosíntesis y con ella la absorción de minerales (Sánchez, 2000).

1.4.1 Elementos minerales y esenciales. De los 92 elementos naturales que se conocen, solamente 60 de ellos han sido encontrados en diversas plantas; no obstante muchos de estos no se consideran esenciales para su crecimiento, y su existencia probablemente se debe a que las raíces de las plantas absorben en su entorno algunos elementos que existen en forma soluble (Resh, 1997).

Se conocen 16 elementos que son esenciales para el crecimiento de los árboles. Se considera que un elemento es esencial, porque su ausencia origina daño o desarrollo anormal; igualmente porque ningún elemento puede sustituirlo y además el elemento en gran número de especies se considera que es indispensable (Meyer *et al*, 1972).

• **Nitrógeno.** Es considerado el cuarto elemento más abundante en vegetales después del carbono, hidrogeno y oxígeno. Como componente de proteínas, coenzimas, nucleótidos y clorofila está implicado en todos los procesos de desarrollo vegetal (Escobar, 2007).

- **Fósforo.** Juega un papel importante en la transferencia de energía. Es esencial para diversos procesos como la fotosíntesis, la respiración y otros procesos químico-fisiológicos. Resulta indispensable para la diferenciación celular y el desarrollo que forman los puntos de crecimiento de las plantas (Resendes, 2007).

- **Potasio.** Cumple funciones trascendentes en la fisiología de las plantas. actúa a nivel del proceso de la fotosíntesis, en la traslocación de fotosintatos, síntesis de proteínas, activación de enzimas claves para varias funciones bioquímicas, mejora la nodulación de las leguminosas, así mismo, una buena nutrición potásica aumenta la resistencia a condiciones adversas como sequías o presencia de enfermedades (Torres, 2000).

- **Calcio.** Es un elemento estructural en la planta, donde las mayores concentraciones de Ca se encuentran en la lámina media de la pared celular, en la superficie exterior de la membrana plasmática, en el retículo endoplasmático y en las vacuolas. Participa en la división y extensión celulares, influye en la compartimentalización de la célula, modula la acción de hormonas y señales, estabiliza la pared y membrana, y contribuye al equilibrio iónico de la célula (Hawkesford *et al*, 2012).

- **Magnesio.** Es un elemento sumamente móvil en la planta. Es constituyente básico de la molécula de la clorofila, que confiere autonomía autotrófica a los vegetales. Por otro lado participa activamente en el metabolismo de los carbohidratos, activa enzimáticamente la síntesis de ácido nucleicos y forma parte estructural de los ribosomas, estabilizando su configuración para la síntesis de proteínas (Kass, 2003).

- **Azufre.** Es el constituyente de un gran número de compuestos orgánicos en la planta, como proteínas y vitaminas que participan en importantes procesos bioquímicos (Navarro y Navarro, 2003).

- **Boro.** Participa en la síntesis de ácidos nucleicos y la traslocación de azúcares, en la formación de polihidroxidos componentes de la pared celular y en la división y desarrollo celular. Este elemento es importante en la formación de tejidos (Schalatter y Gerding, 1985).

- **Cobre.** Varias proteínas que contienen Cu desempeñan un papel fundamental en procesos tales como la fotosíntesis, respiración, desintoxicación de radicales superóxido y lignificación (Kirby, 2007).

- **Hierro.** El Hierro funciona como elemento estructural y como cofactor enzimático. Forma parte estructural de los citocromos, citocromos oxidasa, catalasas, peroxidasa y ferredoxina. Aproximadamente el 75% de hierro está asociado con los cloroplastos, ya

que el hierro es esencial para la síntesis de clorofila, existiendo una buena correlación entre la síntesis de clorofila y la concentración del elemento (Escobar, 2007).

- **Manganeso.** El Manganeso ha sido estudiado en el papel que desempeña en la liberación de oxígeno que tiene lugar en el fotosistema II durante la fotosíntesis. La hipótesis más aceptada es la de que actúa como transportador de electrones entre el agua y el fotosistema II. Actúa en la activación de muchas enzimas del ciclo de Krebs, por lo que la deficiencia de este elemento afecta la respiración celular (Escobar, 2007).

- **Zinc.** En la planta, el Zinc tiene importancia en la fisiología, el metabolismo y la reproducción: actúa como regulador de un gran número de enzimas, ejerce un papel fisiológico en la estructura y función de las membranas biológicas, tiene gran importancia en la fotosíntesis y actúa sobre enzimas involucradas en el metabolismo de la planta, regulación del crecimiento y en la reproducción (Almendros *et al*, 2008).

1.4.2 Deficiencias Nutricionales. La manifestación de síntomas o signos de deficiencia en las plantas independiente del sistema de producción, está supeditada a una disponibilidad inadecuada de elementos. Esta disponibilidad a nivel de medio de cultivo puede deberse primero a la baja, concentración del elemento en el sustrato o en la solución nutritiva, segundo a que el elemento está presente, pero no se encuentra en una forma química disponible o asimilable por la planta y finalmente puede desarrollarse una deficiencia debido a los efectos de un antagonismo entre distintos elementos, de tal forma que la presencia de un elemento en una determinada concentración puede impedir la absorción de otro (Escobar, 2007).

1.4.2.1 Diagnostico visual y sintomatología por deficiencias nutricionales. El diagnostico visual consiste en la observación e identificación de características anormales visibles en la plantas y constituye otra herramienta para evaluar el estado nutricional de una planta o un cultivo. Presenta la ventaja de ser una técnica aplicable en el campo sin depender de ningún laboratorio. Los síntomas visuales varían de una deficiencia a otra, van desde clorosis en sus diferentes formas, necrosis, achaparramiento, hasta la muerte parcial o total de órganos e incluso de toda la planta.

- **Nitrógeno.** Exceptuando la sequía, no hay otra deficiencia que presente síntomas tan dramáticos como la de nitrógeno. La clorosis y reducción del crecimiento, comúnmente llamado “achaparramiento” son los síntomas más característicos, debido a la gran movilidad de este elemento, los síntomas aparecen primero en hojas inferiores (Escobar, 2007).

- **Fósforo.** Las plantas muestran desarrollo y madurez lentos, aspecto raquíptico de los tallos, bajo rendimiento de frutos y semillas. En las hojas más viejas ramas y tallos aparecen coloraciones purpuras (Resendes, 2007).

- **Potasio.** El síntoma más característico de la deficiencia de potasio es la aparición de un moteado de manchas cloróticas seguido por el desarrollo de zonas necróticas en la punta y bordes de las hojas. Debido a la movilidad del elemento la aparición de los síntomas ocurre primero en las hojas maduras. En general una planta deficiente en potasio presenta un aspecto más achaparrado debido al acortamiento de los entrenudos (Escobar, 2007).

- **Calcio.** Los síntomas de deficiencia de calcio son fáciles de observar y muy espectaculares. Las regiones meristemáticas de los tallos, hojas y raíces son atacadas fuertemente y pueden acabar muriendo, cesando el crecimiento de estos órganos. Síntoma característico es la malformación en las hojas jóvenes, las cuales abarquillan sus bordes hacia el haz. Debido a la inmovilidad del calcio los síntomas de deficiencia se presentan primero en hojas jóvenes (Escobar, 2007).

- **Magnesio.** El magnesio es otro nutriente mineral cuya carencia produce una clorosis característica, con un patrón en puntas de las acículas en coníferas y clorosis internerval en las hojas de latifoliadas (Landis, 1989).

- **Azufre.** Presenta una notable similitud con la deficiencia del nitrógeno, ya que las plántulas muestran retraso en su crecimiento, clorosis uniforme de las hojas y tendencia a formar gradualmente coloración bronceada con necrosis en las puntas. La diferencia con el N es que presenta clorosis inicialmente en las hojas jóvenes (Navarro y Navarro, 2003).

- **Boro.** La deficiencia de este elemento impide los procesos fisiológicos en que participa y puede causar daños en el tejido vascular, lo cual restringe o inhibe el transporte de agua. Se manifiesta en los puntos apicales, tanto del vástago como de la raíz. La deficiencia pronunciada produce muerte de los ápices y toda la planta presenta un crecimiento reducido (Schalatter y Gerding, 1985).

- **Cobre.** En las plántulas esta deficiencia ocasiona una coloración verde azulosa en el follaje, muertes de las acículas secundarias; acículas curvadas hacia adentro. las yemas terminales de las coníferas pueden volverse torcidas (Davey, 1983).

- **Hierro.** Debido a la relativa inmovilidad de este elemento, el síntoma más característico es una clorosis general en las hojas jóvenes, que puede comenzar como intervenal, pero al cabo del tiempo los nervios también acaban perdiendo la clorofila (Escobar, 2007).

- **Manganeso.** Los síntomas iniciales de esta deficiencia son a menudo una clorosis de la zona entre las nervaduras de las hojas tanto jóvenes como viejas según la especie. con posterioridad pueden aparecer lesiones necróticas y caída de las hojas (CITHI, 1989).

- **Zinc.** Los síntomas típicos de la ausencia de este elemento son doblamiento hacia adentro de las acículas apicales, moteado amarillento, posteriormente coloración bronceada y rápidamente se tornan duras y de color verde oscuro. En algunas especies se presenta reducción de la longitud de los internudos y del tamaño de las hojas (Smith, 1984).

1.4.2.2 Análisis químico de tejidos vegetales. Consiste es la determinación de la concentración de un elemento o fracción del mismo en una muestra proveniente de una parte definida de la planta (hojas, tallo, ramas, raíces, etc.), muestreada en determinada etapa de su desarrollo fisiológico. En cuanto a la interpretación de este tipo de análisis, uno de los métodos propuestos se basa en la comparación de datos o valores del análisis de la muestra problema con valores estándar, estos valores provienen del análisis de un gran número de muestras recogidas de cultivos o especies producidos normalmente (Barbazán, 1998).

El Cuadro 4 muestra los rangos adecuados de concentración de macro y micro nutrientes en la materia seca de hojas, encontrados en diferentes especies de pino y eucalipto y descritos por diferentes autores.

Cuadro 4. Rangos adecuados de niveles foliares de macro y micronutrientes en diferentes especies de pinos y eucaliptos propuestos por diferentes autores

Elemento	Especie				
	Pinus sp.		Eucalyptus sp.		
	Gonçalves ¹ 1995	Hernandez ² 2002	Gonçalves ³ 1995	Herbert ⁴ 1996	Escobar ⁵ 2007
Macronutrientes (%)					
N	1,1-1,6	1,8	1,35-1,8	1,25-2,8	1,7-0,2
P	0,08-0,14	0,29	0,09-0,13	0,10-0,15	0,15-0,24
K	0,6-1	0,8	0,9-1,3	0,36-0,75	0,8-1,3
Ca	0,3-0,5	0,35	0,6-1,0	0,56-1,0	0,6-0,9
Mg	0,13-0,2	0,14	0,35-0,5	0,21-0,35	0,2-0,3
S	0,13-0,16	0,45	0,15-0,2	0,10-0,20	-
Micronutrientes (ppm)					
B	12-25	35,6	30-50	15-32	15-20
Cu	4-7	-	7-10	2-12	10-15
Fe	100-200	73,5	150-200	52-110	60-80
Mn	250-600	144,6	400-600	129-600	90-110
Zn	30-40	-	35-50	8-18	40-42

¹ y ³ Rangos óptimos para *Eucalyptus sp.* y *Pinus sp.* en estado adulto

² Rangos obtenidos en las plantas tratadas con la solución nutritiva completa en *P. caribea*

⁴ Rangos óptimos en rodales de *E. grandis* en Sur África

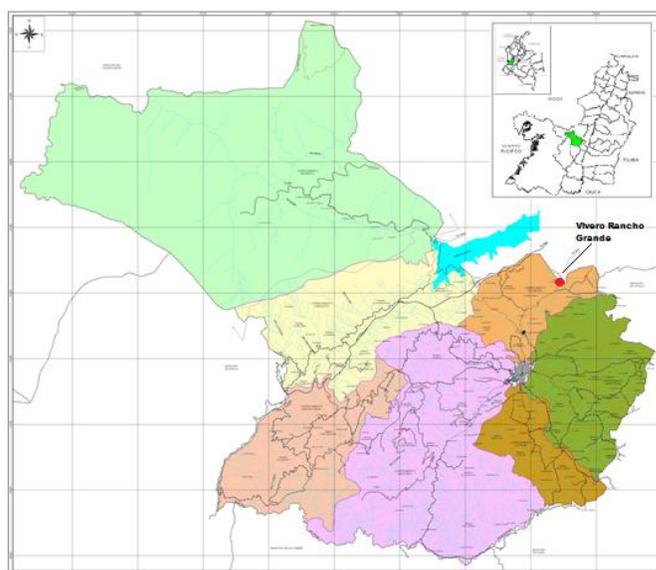
⁵ Rangos óptimos para *E. globulus* en vivero

2. METODOLOGÍA

2.1 ÁREA DE ESTUDIO Y LOCALIZACIÓN

2.1.1 Municipio de Restrepo-Valle del Cauca. Se encuentra localizado al occidente del Departamento del Valle del Cauca, sus coordenadas son; latitud norte $3^{\circ} 49' 30''$ y longitud occidental $76^{\circ} 31' 30''$. Por el Norte limita con el Municipio de Calima Darién, por el Sur limita con los Municipios de La Cumbre y Vijes; por el Oriente limita con Vijes y Yotoco; y por el Occidente con los Municipios de Dagua y La Cumbre (Gobernación del Valle del Cauca, 2010). La ubicación geográfica del municipio se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación geográfica del Municipio de Restrepo-Valle del Cauca



Fuente: IGAC, 2004

2.1.2 Vivero Forestal Rancho Grande. La investigación se llevó a cabo en el Vivero Forestal Rancho Grande de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia, este se encuentra ubicado en la Vereda Aguamona del Municipio de Restrepo, Departamento del Valle del Cauca, a 75 kilómetros de la ciudad de Cali. Tiene como coordenadas geográficas latitud $3^{\circ} 49'$ norte, longitud $76^{\circ} 28'$ oeste y se encuentra a una altitud promedio de 1400 m.s.n.m.

La zona presenta una temperatura anual promedio de 22°C y precipitación media de 1.100 mm al año. El vivero cuenta con una superficie de 40 mil metros cuadrados, para la producción de 12 millones de plántulas al año (SKCC, 2008).

2.2 SELECCIÓN DE LAS ESPECIES Y PROCEDENCIA

Las especies evaluadas *Pinus tecunumanii* Eguluz & J.E. y *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden, se eligieron teniendo en cuenta la importancia comercial que tienen para el vivero y la compañía SKCC. Las semillas de estas especies (*P. tecunumanii* y *E. grandis*) provinieron de los huertos semilleros propiedad de SKCC, situados en la finca La Suiza, Municipio de Restrepo (Valle del Cauca) y finca San Bernardino, Municipio de Popayán (Cauca) respectivamente. Dado que existen dos variedades de *P. tecunumanii* como lo son de alta y baja elevación, en esta investigación se trabajó con *P. tecunumanii* de baja elevación, debido al rango altitudinal del área de estudio de esta investigación

2.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el estudio de deficiencias nutricionales se empleó un diseño experimental en parcelas divididas en el tiempo, donde las parcelas principales correspondieron a las doce (12) soluciones nutritivas aplicadas y 5 subparcelas con cinco (5) individuos cada una, lo que implicó un subtotal de 25 individuos por parcela. El total de individuos evaluados fue de 600 plántulas, producto de los factores considerados (12 Parcelas, 5 subparcelas, 5 plántulas por subparcela y 2 especies). La distribución en campo de las parcelas (tratamientos) y subparcelas que se emplearon para el diseño experimental de este ensayo de deficiencias nutricionales se expone en el Anexo A. En campo tanto las parcelas (tratamientos) como las subparcelas (grupos de plántulas), fueron distribuidas al azar.

Este tipo de diseño se emplea por la facilidad de controlar y aplicar las soluciones nutritivas en vivero, además para las evaluaciones en el tiempo se requería de extracción de submuestras dentro de la gran parcela y por tanto se definieron las subparcelas tantas como evaluaciones destructivas se planearon.

En este sentido se evaluó en las diferentes soluciones nutritivas, el bajo nivel de Nitrógeno (N), la omisión de cinco macronutrientes; Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), y Azufre (S) y la omisión cinco micronutrientes, boro (B), Cobre (Cu), Hierro (Fe); Manganeseo (Mn) y Zinc (Zn). De igual manera se evaluó una solución completa que correspondió al tratamiento testigo, que sirvió como patrón de comparación en cada una de las variables. En el Cuadro 5, se detallan cada uno de los tratamientos implementados en esta investigación y sus respectivas descripciones.

Las variables de respuesta para la investigación, fueron el incremento en altura, incremento del diámetro al cuello de la raíz (DCR) así como la producción de biomasa tanto de la parte aérea como de la parte radicular, el registro de los datos de estas variables se efectuó cada quince días para la altura y el diámetro y cada dos meses para la producción de biomasa aérea y radicular durante 8 meses. Sumado a esto se tiene la

descripción escrita y fotográfica de la sintomatología visual desencadenada por el déficit nutricional de cada uno de los elementos faltantes.

Cuadro 5. Tratamientos evaluados en el ensayo de deficiencias nutricionales en plántulas de *Pinus tecunumanii* y *Eucalyptus grandis*

Tratamiento	Descripción	Identificación en campo*
T ₁	Solución completa (Testigo)	C
T ₂	Solución con bajo nivel de Nitrógeno	↓ N
T ₃	Solución con omisión de Fósforo	-P
T ₄	Solución con omisión de Potasio	-K
T ₅	Solución con omisión de Calcio	-Ca
T ₆	Solución con omisión de Magnesio	-Mg
T ₇	Solución con omisión de Azufre	-S
T ₈	Solución con omisión de Boro	-B
T ₉	Solución con omisión de Cobre	-Cu
T ₁₀	Solución con omisión de Hierro	-Fe
T ₁₁	Solución con omisión de Manganeso	-Mn
T ₁₂	Solución con omisión de Zinc	-Zn

*Esta identificación será usada durante el informe para referirse a los tratamientos

2.4 ESTABLECIMIENTO, SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL ENSAYO

La investigación realizada en el Vivero Forestal Rancho Grande tuvo una duración de diez meses la cual incluyó una fase de establecimiento (1 mes y 6 días) y una de seguimiento y evaluación (8 meses y 24 días) que se describen a continuación.

2.4.1 Fase de establecimiento. En esta fase se tuvieron en cuenta todas las actividades previas al inicio del ensayo y las que se realizaron en el transcurso de la investigación.

2.4.1.1 Preselección del material vegetal. Una vez elegidas las especies, se preseleccionó el material vegetal, fueron separados 520 individuos de cada especie con las mejores condiciones fitosanitarias y un buen estado en general. Para ese momento las plántulas contaban con una edad aproximada de 2 meses y 26 días para el pino y para el eucalipto de 1 mes y 15 días. Aún en las eras de germinación las plántulas fueron tratadas como material de vivero (Figura 2).

Figura 2. Preselección de plántulas de *P. tecunumanii* y *E. grandis* usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales



2.4.1.2 Selección del medio de cultivo. El sustrato empleado fue arena de cuarzo, ya que es un material homogéneo e inerte, lo que garantizó que no reaccionará ante ninguno de los nutrientes presentes en las soluciones, de manera que las plántulas no obtuvieran ningún aporte mineral diferente al proveniente de las soluciones nutritivas, esta solo sirvió para dar soporte a las plántulas. La arena cuarcítica fue previamente lavada con agua y desinfectada para eliminar todo tipo de impurezas que pudiesen afectar el ensayo. Posteriormente la arena fue envasada en bolsas de polietileno, con una capacidad aproximada de 8.3 litros (Figura 3).

Figura 3. Arena de cuarzo en bolsas de polietileno listas para el trasplante del material vegetal



2.4.1.3 Trasplante y aclimatación. El trasplante se realizó desde contenedores tipo bandeja a bolsas de polietileno previamente llenadas con arena de cuarzo. Las plántulas fueron resembradas a raíz desnuda, es decir se removió todo el pan de tierra que las soportaba. En este momento la edad de las plántulas fue de 3 meses y 11 días para *P. tecunumanii* y de 2 meses para *E. grandis*, las plántulas pasaron por un periodo de

aclimatación, equivalente a 15 días, recibiendo fertilización completa antes de iniciar el ensayo, la fertilización en este periodo se realizó con solución nutritiva implementada por el Vivero Rancho Grande. Esto se realizó con el fin de garantizar que todo el material vegetal objeto de estudio se encontrara en igualdad de condiciones (Figura 4).

Figura 4. Proceso de trasplante y aclimatación de las plántulas de *P. tecunumanii* y *E. grandis* usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales



a y d. Lavado del sustrato a las plántulas de *P. tecunumanii* y *E. grandis*. **b.** Plántulas listas para trasplante. **c y e.** Proceso de trasplante a raíz desnuda. **f y g.** Plántulas de *P. tecunumanii* y *E. grandis* en arena cuarcítica. **h.** plántulas de pino y eucalipto en periodo de aclimatación.

2.4.1.4 Pesaje de fuentes fertilizantes. Previo a la preparación de las soluciones nutritivas, fueron pesadas las diferentes fuentes fertilizantes (de macro y micro nutrientes) de forma individual en una balanza digital, a su vez fueron almacenadas independientemente en bolsas plásticas tipo ziploc. Posteriormente fueron agrupados de acuerdo al tratamiento al que correspondían. Las bolsas fueron marcadas con su respectiva fórmula química para evitar confusiones durante la preparación. Esta actividad se realizó una vez a la semana durante el período de evaluación.

2.4.1.5 Preparación de las soluciones nutritivas. Para la preparación de las soluciones nutritivas (tratamientos) implementadas en este ensayo, se tomaron como referencia las soluciones ideadas por Hoagland, finalmente la composición de las soluciones nutritivas a implementar en este ensayo fue formulada por Silveira (2009), como recomendación en una visita técnica a SKCC. El Anexo B, muestra las sustancias químicas fertilizantes que se usaron para la preparación de cada una de las soluciones nutritivas evaluadas con el respectivo elemento o elementos que aporta (Landis *et al*, 1989). Por su parte el Anexo C muestra los aportes de cada uno de los elementos minerales (macro y micronutrientes), en cada uno de los tratamientos evaluados en esta investigación.

El agua para preparar una solución nutritiva debe ser de la más alta calidad posible, debe tener un pH entre 5,5-6,0, una conductividad eléctrica (CE) entre 0,10–0,30 ms/cm, que corresponde a 96–288 ppm de sales disueltas en el agua (SKCC, 2005). Una vez pesadas las fuentes, se procedió a la preparación de las 12 soluciones a aplicar, cada una de las soluciones fue preparada en canecas individuales y marcadas con el respectivo tratamiento (Figura 5). Esta preparación se realizó una vez en la semana y sirvió para una aplicación diaria durante 6 días a cada uno de los individuos objeto de estudio. La preparación se realizó teniendo en cuenta un procedimiento desarrollado por Resh (1997), que consta de los siguientes pasos:

- Se llena el tanque de almacenamiento de la solución de nutrientes con agua hasta aproximadamente la mitad del volumen.
- Se disuelve cada sal fertilizante en un poco de agua.
- Los macronutrientes son los primeros en disolver y después los micronutrientes.
- Se agregan los fertilizantes al recipiente comenzando por los nitratos, cloruros y luego la urea.
- Se llena el tanque hasta las tres cuartas partes y se agregan los sulfatos.
- Se agregan lentamente los fosfatos.
- Se completa el volumen requerido.
- Se agrega la solución de micronutrientes correspondiente a cada tratamiento.
- Ajustar pH entre 5.5 a 6.5
- Agitar la solución durante 5 minutos.
- Comprobar pH nuevamente y ajustarlo si es necesario.

Figura 5. Preparación de las soluciones nutritivas equivalentes a los tratamientos evaluados en el ensayo de deficiencias nutricionales



Las soluciones madre de micronutrientes que se utilizaron para la evaluación de la omisión de los micronutrientes fueron preparadas diluyendo en un litro de agua desmineralizada las diferentes sales. Las fuentes minerales utilizadas en la preparación de las soluciones madre se muestran en el Anexo B. Después de preparadas las soluciones fueron almacenadas de forma individual en recipientes plásticos debidamente marcados (Figura 6). Las soluciones fueron preparadas para un período de tres semanas, después de las cuales eran nuevamente reemplazadas.

Figura 6. Soluciones madre de micronutrientes preparadas y envasadas de forma individual



2.4.1.6 Control de la solución nutritiva. Este control se realizó con el fin de verificar si los niveles de los nutrientes en la solución estaban en el rango que se deseaba, para esto se midió el pH y la conductividad eléctrica (CE) de la solución. El pH debía estar en el rango de 5.5 a 6.5 y la conductividad eléctrica entre 1.8-2.3 ms/cm (Figura 7). Esta verificación se realizó al momento de preparar la solución y cada día, antes de iniciar la fertilización. El formato donde se llevó el control de pH y CE se muestra en el Anexo D.

Figura 7. Equipos utilizados para el control de pH y Conductividad Eléctrica y de las soluciones nutritivas en el ensayo de deficiencias nutricionales.



2.4.1.7 Fertilización y lavado de sales. La fertilización se realizó diariamente, por un período de 8 meses. Cada plántula tuvo una única aplicación de 500 cm³ en las horas de la mañana. El lavado de sales se realizó con agua corriente un día en la semana, esto para evitar la acumulación de sales en el sustrato; se aplicó aproximadamente tres litros de agua por plántula (Figura 8).

Figura 8. Actividad de lavado de sales a cada una de las plántulas del ensayo de deficiencias nutricionales.



2.4.1.8 Riego. Esta actividad fue realizada durante todo el ensayo cuando fue necesario. En los primeros meses el riego se realizó con una bomba de fumigar, para mantener el tejido foliar de las plántulas hidratado. En los meses siguientes solo se realizó riego al sustrato en los días donde se presentaron altas temperaturas que resecaron de forma acelerada el sustrato (Figura 9).

Figura 9. Actividad del riego en cada una de las plántulas del ensayo de deficiencias nutricionales.



2.4.2 Fase de seguimiento y evaluación. Una vez efectuada la siembra se realizó un seguimiento mensual durante ocho meses a cada uno de los 600 individuos sembrados para el estudio. Para la evaluación de las plántulas se tuvieron en cuenta los atributos morfológicos como altura, diámetro al cuello de la raíz y biomasa, registrando los incrementos quincenales que tuvieron estas variables, de igual forma se realizó la descripción de la sintomatología visual para cada uno de los tratamientos ya mencionados.

2.4.2.1 Diagnóstico visual. Se tomó como síntoma de deficiencia nutricional, aquel que fue expresado por el 80% de las plántulas en cada tratamiento. Los cambios o síntomas de deficiencia nutricional que fueron expresados por las plántulas se monitorearon y registraron en medio escrito y fotográfico (Figura 10).

Figura 10. Diagnóstico visual realizado en las plantas de *P. tecunumanii* y *E. grandis*



2.4.2.2 Incremento en altura. La toma de datos de esta variable se realizó cada 15 días durante un período de ocho meses; para la medición de los individuos se utilizó un flexómetro metálico ubicándolo de forma paralela al tallo de la plántula midiendo desde el sustrato hasta el ápice como se muestra en la Figura 11. El Anexo E muestra el formato donde se registraron los datos de campo.

Figura 11. Medición de altura en las plántulas de *E. grandis* y *P. tecunumanii* usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales



2.4.2.3 Incremento en el diámetro al cuello de la raíz. Para determinar el incremento de esta variable, se realizaron mediciones quincenales a cada individuo desde el inicio del estudio hasta la fecha en que terminó el ensayo. El diámetro fue medido en la base del tallo de cada plántula con la ayuda de un pie de rey digital (Figura 12). El Anexo E muestra el formato donde se registran los datos de campo.

Figura 12. Medición del diámetro al cuello de la raíz en las plántulas de *E. grandis* y *P. tecunumanii* usadas en el ensayo de deficiencias nutricionales



2.4.2.4 Producción de biomasa. Para la determinación de la biomasa tanto aérea como radicular producida por las plántulas en cada tratamiento, se realizaron muestreos destructivos cada dos meses, en total se realizaron cinco muestreos durante toda la investigación. En campo la subparcela a muestrear fue elegida al azar de la parcela mayor, los individuos fueron sometidos a un proceso de desmembramiento donde se separó la parte aérea correspondiente a los tallos, hojas y ramas, de la parte radicular. La las muestras recogidas se almacenaron en bolsas de papel previamente marcadas con el tratamiento, subparcela e individuo correspondiente (Figura 13).

En el laboratorio cada muestra fue pesada para la obtención del peso fresco y luego fue secada al horno a una temperatura de 70°C por espacio de 24 horas. Finalmente se molieron las muestras y se obtuvo el peso seco para cada una. La biomasa producida se obtuvo restando el peso seco del peso fresco de cada una de las muestras.

Figura 13. Muestreos destructivos de las plántulas de *P. tecunumanii* y *E. grandis* para obtener la producción de biomasa aérea y radicular



2.4.2.4 Análisis foliares. Los análisis se realizaron cada dos meses antes del muestreo destructivo para biomasa. Las hojas y acículas para la muestra se recogieron de la parte media de cada una de las plantas en cada uno de los tratamientos hasta completar el peso requerido. El primer análisis foliar se realizó antes de iniciar la fertilización con las diferentes soluciones, con el fin de determinar el estado nutricional inicial de las plántulas (Figura 14).

Las muestras se tomaron de la parte media de las plantas, teniendo en cuenta la recomendación de evitar tomar muestras de tejidos vegetales que son fisiológicamente más jóvenes, ya que su contenido de nutrientes cambia rápidamente, de la misma forma, tejidos muy viejos tampoco son representativos (Sela, 2008).

Figura 14. Recolección de acículas y hojas medias utilizadas para los análisis foliares



2.5 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En el análisis de las variables de respuesta y el grado de correlación entre ellas se utilizó el programa estadístico R. Los datos obtenidos en campo fueron sometidos a análisis exploratorios para determinar los modelos matemáticos de crecimiento para cada una de las variables medidas. Estos modelos permitieron determinar las diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DIAGNÓSTICO VISUAL POR DEFICIENCIAS NUTRICIONALES

Los síntomas expresados en la especie *P. tecunumanii* correspondieron a 7 de los 11 elementos minerales faltantes y en la especie *E. grandis* todos los tratamientos expresaron los síntomas correspondientes unos más evidentes que otros. A continuación se muestran los resultados en cada una de las especies por tratamiento.

3.1.1 Bajo nivel de Nitrógeno. En este tratamiento no se realizó una omisión total del nutriente y sin embargo los síntomas expresados lo hicieron de manera drástica y contundente.

- ***Pinus tecunumanii*.** Al inicio del período de observación, las plantas tomaron una coloración verde intensa en las acículas viejas y al cabo de un tiempo se empezó a generar una clorosis generalizada de todas las acículas con posterior aparición de necrosis en las puntas. Las plántulas se tornaron achaparradas y presentaron bajo desarrollo en diámetro (Figura 15a). En el estado más avanzado las plántulas mostraron enrojecimiento de las acículas más viejas con posterior caída de las mismas, avanzando hacia las más jóvenes. En este estadio las plántulas presentaron un aspecto desmedrado (Figura 15b).

Figura 15. Clorosis de una planta de *P. tecunumanii* con deficiencia de Nitrógeno



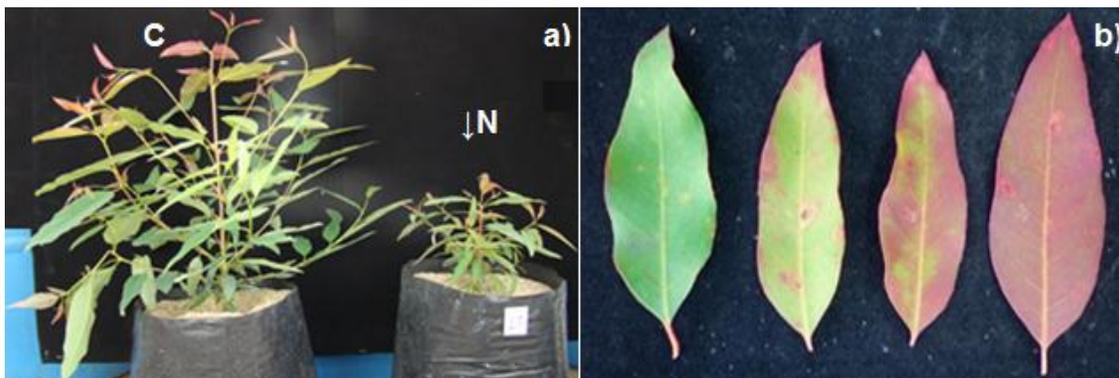
a) Plántula de *P. tecunumanii* deficiente de nitrógeno comparada con una del tratamiento completo. b) Acículas bajas con coloración rojiza por deficiencia de N.

Los síntomas descritos en este ensayo, son similares a los descritos por Lozada y Zambrano (1991), quienes reportan plántulas de *P. patula* con aspecto desmedrado, con clorosis en acículas viejas y después de un tiempo clorosis generalizada en toda la planta.

En general para el género *Pinus*, se han reportado síntomas por deficiencia de N, tales como: clorosis de agujas, con tonos amarillentos, una senescencia temprana de las agujas, con caída posterior de las mismas. De igual forma se da una reducción en la tasa de crecimiento (Gonçalves, 1995). Síntomas que concuerdan evidentemente con los obtenidos en este ensayo.

• ***Eucalyptus grandis***. En general plantas achaparradas y de aspecto desmedrado, poco desarrollo foliar y con hojas de tamaño pequeño. Tallos delgados y frágiles (Figura 16a). Inicialmente las hojas bajas tomaron una coloración verde intensa que prosiguió hacia las más jóvenes, en el estado más avanzado aparecieron en las hojas puntos o manchas rojizas que posteriormente cubrieron toda la hoja (Figura 16b). Se presentó una defoliación excesiva hasta casi perder la totalidad de las hojas.

Figura 16. Progreso de los síntomas por deficiencia de Nitrógeno en hojas de una planta de *E. grandis*



a) Plántula de *E. grandis* deficiente de Nitrógeno comparada con una del tratamiento completo. b) Progreso de la clorosis y enrojecimiento por deficiencia de N en hojas de una planta de *E. grandis*.

Los síntomas obtenidos en este ensayo son similares a los reportados por Silveira *et al* (2002), donde las hojas viejas de híbridos de *E. grandis* con *E. urophylla*, presentaron una coloración verde clara y luego amarillenta uniforme en todo el limbo foliar. Para el género *Eucalyptus*, los síntomas de déficit de N, son en general muy similares entre especies. Las hojas viejas toman un color verde claro, con el paso del tiempo aparecen manchas amarillas y rojas que posteriormente cubren todo el limbo foliar, causando un enrojecimiento generalizado (Silveira *et al*, 2001).

El amarillamiento que se presenta en las hojas y acículas de las dos especies evaluadas se debe a una disminución de la formación de clorofila. Dado que el Nitrógeno es un

elemento móvil, las hojas maduras degradan su proteína a formas solubles de nitrógeno, traslocándolas por el floema a las hojas jóvenes y a otras áreas de la planta (Barbazán, 1998), de igual manera como constituyente estructural de las paredes celulares, la deficiencia de Nitrógeno afecta de forma negativa el crecimiento de las plantas (Dell, 1996).

3.1.2 Omisión de Fósforo.

- ***Pinus tecunumanii***. En un principio las acículas más viejas tomaron una coloración verde oscuro y paulatinamente tomaron una coloración purpura-rojiza con patrón de avance de las puntas hacia la base, progresando hacia las acículas más jóvenes pero sin afectar fascículos. Posteriormente las acículas presentaron secamiento con el mismo patrón del enrojecimiento para después caer (Figuras 17a y 17b). En el estadio más avanzado se presentó necrosis en los ápices de las acículas y fascículos. En general las plántulas presentaron una apariencia desmedrada, con tallos delgados y pocas acículas. Se dieron bajos incrementos de altura y diámetro con respecto al tratamiento control como lo muestra la Figura 17c.

HacsKaylo *et al*, reporta síntomas parecidos a los obtenidos en esta investigación, tales como, un retraso en el crecimiento de la planta y agujas inferiores de color purpura en plantas de *P. sylvestris* y *P. strobus* (Truman, 1969).

Figura 17. Síntomas de deficiencia de Fósforo en *Pinus tecunumanii*



Fotografías: Ingeniero Carlos Rodas (SKCC)

La deficiencia de fósforo en *P. elliotii* y *P. tadea*, causó en las plantas, una coloración verde oscura en las agujas más inferiores, seguidas de una coloración purpura en algunas ocasiones. Posteriormente las agujas se tornaron necróticas para después colapsar, (Truman, 1969), síntomas que coinciden con los encontrados en este ensayo

- ***Eucalyptus grandis***. Las hojas maduras toman una tonalidad verde oscura y paulatinamente van tomando una coloración púrpura en el haz de la hoja, con un patrón de avance de los bordes hacia el centro de la hoja. Esta coloración aparece de forma simétrica en las hojas. En el estado más avanzado el pigmento púrpura se extiende hasta las hojas más jóvenes hasta presentarse en toda la planta. Se aprecia adelgazamiento de tallos, que toman también una coloración púrpura. Aparece necrosis intervenal tanto en hojas maduras como en jóvenes y algunas caen antes de desarrollar este síntoma. Con respecto al tratamiento control se obtuvieron bajos incrementos de altura y diámetro. El progreso de los síntomas por deficiencia de P en este ensayo se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Progreso de los síntomas por deficiencias de Fósforo en plántulas de *E. grandis*



Estos síntomas concuerdan con los reportados por Escobar (2007), quien describió para *E. globulus* la presencia de una coloración púrpura en las hojas viejas. También Silveira *et al* (2001), para el género *Eucalyptus*, reportó en general síntomas por deficiencia de Fósforo, hojas con coloración inicial verde oscura que progresa como manchas a color púrpura. A lo largo del limbo aparecen manchas oscuras que en el estado más avanzado se vuelven necróticas.

Como era de esperarse los síntomas por deficiencia de fósforo tanto en pino como en eucalipto se dieron en hojas viejas, esto se debe a que el fosfato (ion asimilable por las plantas) se redistribuye fácilmente y se mueve de las hojas viejas hacia las jóvenes en las que se almacena, es por esto que las deficiencias de fósforo se observan primero en hojas maduras. Para el caso de la aparición de una coloración púrpura característica de esta deficiencia, se debe a la acumulación del pigmento antocianina en el tejido de la planta (Hernández, 2002).

3.1.3 Omisión de Potasio.

- ***Pinus tecunumanii***. Inicialmente se presenta clorosis en las acículas y fascículos más maduros avanzando del ápice hacia la base, mientras que las acículas más jóvenes conservan su color. Este síntoma fue seguido por secamiento de acículas simples y fascículos avanzando del ápice hasta parte media, pero la parte más cercana al tallo se mantuvo verde (Figuras 19a y 19b). Las plantas presentan un aspecto desmedrado, con bajos incrementos de altura y diámetro con respecto al tratamiento control.

Estos síntomas también fueron reportados por Truman, (1969), en *P. radiata*, con agujas secundarias de color verde-amarillento, con posterior necrosis de las puntas, formando un marcado contraste con las agujas nuevas. Para el género *Pinus* se han descrito síntomas visuales de deficiencia de K, como acículas cloróticas, con un grado más acentuado en las puntas, para evolucionar con el tiempo a una necrosis de las puntas hacia la base (Gonçalves, 1995), síntomas que coinciden con los obtenidos en este ensayo.

Figura 19. Clorosis y necrosis de acículas en *P. tecunumanii* por deficiencia de Potasio



Fotografías: Ing. Carlos Rodas (SKCC)

a) Clorosis en acículas medias y bajas de una planta de *P. tecunumanii* con deficiencia de K. b) Arriba: acículas jóvenes sanas; medio: acículas medias cloróticas; abajo: acículas maduras cloróticas y necróticas.

- ***Eucalyptus grandis***. Inicialmente las hojas más viejas desarrollaron clorosis en los márgenes y el ápice, avanzando hacia el interior de la hoja, seguido por un leve enrojecimiento en los bordes de las hojas, los cuales después de un tiempo desarrollaron necrosis marginal y del ápice, aquí las hojas se enrollaron hacia su haz hasta secarse completamente para después caer. Los síntomas se extendieron hasta las hojas más jóvenes. En general las plantas presentaron un aspecto desmedrado y raquítico, con tallos delgados, abundante desarrollo foliar, pero con hojas muy pequeñas (Figura 20).

Figura 20. Progreso de los síntomas por deficiencias de Potasio en hojas viejas de una planta de *E. grandis*



Fotografía: Ing. Carlos Rodas (SKCC)

Los síntomas visuales por deficiencia de K en *E. grandis*, obtenidos en este ensayo concuerdan con los descritos en híbridos de *E. urophylla*, donde la deficiencia de Potasio, se manifestó con unas manchas cloróticas en los bordes y ápice de las hojas (Rocha Filho *et al*, 1978).

También coinciden con los síntomas reportados para híbridos de *E. grandis* con *E. urophylla*, donde se describe un enrojecimiento marginal en las hojas viejas, que avanza hasta el centro del limbo de la hoja, con posterior necrosis de las puntas (Silveira *et al*, 2002).

3.1.4 Omisión de Calcio.

- ***Pinus tecunumanii*.** Al omitir este macronutriente, las plantas respondieron con una deformación de sus acículas más jóvenes, las cuales presentaron una apariencia ondulada y desaliñada y con una longitud más corta de la normal, adicionalmente presentaron puntas amarillas, estos síntomas se observaron casi al final del periodo de observación (Figura 21). En general las plantas deficientes de Ca se vieron en buen estado y con alto desarrollo en altura y diámetro.

En plántulas de *P. patula* deficientes de Ca, se han reportaron acículas jóvenes deformes y onduladas (Lozada y Zambrano, 1991), coincidiendo con el resultado obtenido en esta investigación, pero difieren de este ensayo ya que no reportan puntas amarillas en acículas.

Figura 21. Acículas jóvenes deformes y con puntas amarillas por deficiencia de Calcio en plantas de *P. tecunumanii*



Fotografías: Ing. Carlos Rodas (SKCC)

• ***Eucaliptus grandis*.** Los síntomas por déficit de Ca no fueron totalmente visibles en las plántulas de *E. grandis*. En algunas de las hojas más jóvenes se presentó un leve amarillamiento en la punta, mientras que los bordes se tornaron algo ondulados. El amarillamiento de puntas y márgenes de las hojas coincide con el reportado por Silveira *et al* (2002), en sus clones de *E. grandis* con *E. urophylla*, pero difiere en cuanto a que las plantas de este ensayo no mostraron realmente deformaciones drásticas como enrollamiento de las hojas y la muerte de yemas terminales. Esto pudo deberse a que el tiempo de evaluación no fue suficiente para que los síntomas se expresaran con claridad (Figura 22).

Figura 22. Leve clorosis de hojas jóvenes en plántulas de *E. grandis* por deficiencia de Calcio



3.1.5 Omisión de Magnesio.

- ***Pinus tecunumanii***. Durante el tiempo de evaluación no fue posible observar síntomas de deficiencia de este elemento para la especie *Pinus tecunumanii*, las plántulas de este tratamiento en general tuvieron un aspecto saludable, con incrementos de altura y diámetro al cuello de la raíz similares a las plántulas del tratamiento Control. Al comparar los resultados de este ensayo con otros autores no se encontraron similitudes en cuanto a la ausencia de síntomas, tal es el caso de Hernández, (2002) quien encontró en *Pinus caribea*, acículas basales de un color amarillo intenso, que inicialmente ocupó la zona apical de la acícula, progresando hacia la parte basal, ocupándola homogéneamente.

- ***Eucalyptus grandis***. Inicialmente las hojas más maduras presentaron clorosis intervenal (Figura 23a). En el estado más avanzado se presentó una coloración rojiza en los márgenes y entre las venas de las hojas, seguido por la aparición de puntos necróticos a lo largo del limbo foliar (Figura 23b). En general las plantas dieron buenos incrementos de altura y diámetro.

Al comparar el ensayo con el realizado por Escobar, (2007), se encontró que para *E. globulus* la clorosis intervenal en las hojas viejas es uno de los síntomas más característicos de la deficiencia de este elemento. Los síntomas se presentaron primero en las hojas maduras dato indicativo de su movilidad dentro de la planta.

En general para el género *Eucalyptus*, la deficiencia de Mg, se manifiesta inicialmente, en las hojas viejas que presentan clorosis intervenal, donde las nervaduras permanecen verdes. También se presentan manchas marrones de tamaños y formas variables (Silveira *et al*, 2001).

Figura 23. Síntomas de deficiencia de Magnesio en plántulas de *E. grandis*



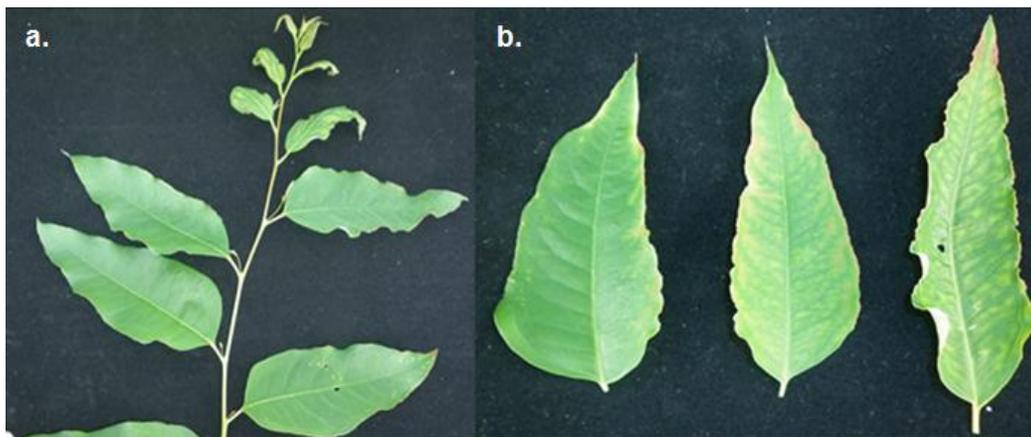
3.1.6 Omisión de Azufre.

- ***Pinus tecunumanii***. Durante el tiempo de evaluación, no se observó ninguna sintomatología clara de deficiencia de Azufre. Las plantas durante este periodo se mostraron saludables, y no se presentó limitación alguna del crecimiento en altura y DCR. Al contrastar estos resultados con los de Lozada y Zambrano (1991) para *Pinus patula*, se encontraron síntomas como clorosis en las puntas y uniforme en la yema terminal, lo que difiere por completo de la repuesta conseguido en este ensayo.

- ***Eucaliptus grandis***. El primer síntoma expresado por las plantas que crecieron en este tratamiento fue la clorosis intervenal en las hojas jóvenes, mientras las maduras conservaron su color verde. Las yemas terminales se deformaron enrollándose hacia el envés de la hoja (Figuras 24a y 24b). En general las plantas tenían un aspecto saludable y desarrollaron altos incrementos de altura y diámetro.

Estos síntomas difieren de los resultados de Silveira *et al* (2002), quien reporta clorosis uniforme y leve en hojas jóvenes, pero concuerda en que la deficiencia de este elemento no afecta a las plantas en su crecimiento. Según Dell y Robinson, (1993), en estados tempranos se puede presentar clorosis intervenal verde pálido en hojas jóvenes, lo que concuerda con los síntomas descritos para *E. grandis* obtenidos en la investigación.

Figura 24. Clorosis intervenal y deformación de hojas jóvenes por deficiencia de Azufre en plántulas de *E. grandis*.



3.1.7 Omisión de Boro.

- ***Pinus tecunumanii***. Al omitir este nutriente las plantas se ven con aspecto achaparrado y desmedrado, presentan un desarrollo excesivo de ramificaciones laterales lo que altera la arquitectura de la planta donde el tallo principal pierde el liderazgo. Las acículas de la

parte terminal son cortas, reseca, retorcidas y presentan necrosis en forma de bandas, las yemas terminales sufren una muerte progresiva con el paso del tiempo; además, las plantas exhiben restos de resina en las yemas terminales y en diferentes partes de las acículas (Figura 25). En general se presentaron bajos incrementos de altura y diámetro.

Los síntomas descritos concuerdan con los reportados por Coy (1976), para el género *Pinus*, donde se considera que una deficiencia de Boro afecta de manera típica los meristemas o tejidos en división activa, es decir tejidos que conforman las yemas terminales principalmente. Por su parte, Hernández (2002) reportó que las plántulas de *P. caribea*, ante deficiencia de boro presentaron una apariencia achaparrada, cesando el crecimiento en longitud. Además se evidenció la exudación de resina en diferentes partes de la planta y la muerte del meristemo apical; lo que muestra la importancia de este macronutriente en la formación de los tejidos en desarrollo de las plantas.

Figura 25. Síntomas por deficiencia de Boro en plántulas de *P. tecunumanii*



Fotografías: Ing. Carlos Rodas (SKCC)

- ***Eucalyptus grandis*.** Inicialmente las hojas nuevas presentaron clorosis intervenal, seguida por una coloración rojiza-púrpura acentuada en el margen de las hojas y que avanzó hacia el centro. Posteriormente se observó un pronunciamiento de la vena principal y las venas secundarias formando lo que se conoce como acostillamiento, las hojas al tacto tomaron una consistencia coriácea y se deformaron.

En el estado más avanzado los síntomas descritos alcanzaron a las hojas maduras y se desarrollan puntos necróticos a lo largo del limbo que terminaron por secar toda la hoja, para después caer. Las yemas terminales mueren y se aprecia un excesivo brotamiento anormal de yemas laterales. Finalmente la dominancia apical se pierde totalmente. En general las plantas de este tratamiento tomaron una apariencia marchita y desmedrada, con crecimientos en altura y diámetro limitados (Figura 26).

Estos síntomas coinciden con los reportados para híbridos de *E. grandis* con *E. urophylla*, siendo caracterizados por hojas pequeñas deformadas, con clorosis marginal y presencia de nervaduras salientes. También se observa muerte de la yema apical y superbrotamiento de yemas laterales a lo largo del tallo (Silveira *et al*, 2002).

Figura 26. Progreso de los síntomas por deficiencias de Boro en plántulas de *E. grandis*



3.1.8 Omisión de Cobre.

- ***Pinus tecunumanii*.** El tiempo de evaluación de este ensayo no fue suficiente para observar síntomas de deficiencia asociados a este elemento. En general las plántulas de este tratamiento tuvieron crecimiento en altura y diámetro similar al del tratamiento control, mostrando una apariencia vigorosa y robusta.

- ***Eucalyptus grandis*.** Inicialmente las hojas jóvenes se tornaron opacas, con márgenes color púrpura, algunas hojas se tornaron deformes. Al final del ensayo se evidenció necrosis en las puntas de las hojas. (Figura 27), en general las plantas tuvieron aspecto saludable, con altos incrementos en altura y diámetro.

Estos síntomas coinciden con los reportados para *E. maculata*, con la pérdida de brillo de la hoja, las hojas en expansión presentan márgenes ondulados o márgenes deformes (Dell y Robinson, 1993). Por otro lado Hernández reporta que en general en las plantas deficientes de Cu, las hojas jóvenes se colorean de verde oscuro, se doblan y adquieren malas formas, coincidiendo con los síntomas obtenidos en este ensayo para *E. grandis*.

Figura 27. Síntomas de deficiencia de Cu en plantas de *E. grandis*



3.1.9 Omisión de Hierro.

***Pinus tecunumanii*.** Al omitir el Hierro se observó clorosis en las acículas jóvenes mientras que las maduras se conservaron verdes (Figuras 28a y 28b). En general la omisión de este nutriente no afectó la vigorosidad de las plantas, por el contrario, se vieron saludables con altos incrementos de altura y diámetro (Figura 28c). En el estado más avanzado se presentó una clorosis generalizada de la planta.

Los síntomas descritos anteriormente concuerdan con los reportados por Lozada y Zambrano (1991), donde en plántulas de *P. patula* se describe una coloración verde amarillenta de las acículas jóvenes, sin embargo, no reportan que haya existido una clorosis generalizada. Por su parte, en *P. pinaster* se presentaron síntomas por déficit de Fe, como clorosis en acículas jóvenes, avanzando hacia las acículas viejas, llegando a afectar a toda la planta en los casos más severos lo que ratifica el resultado obtenido en esta investigación (Gallegos *et al*, 2001).

Figura 28. Clorosis en acículas de *P. tecunumanii* por deficiencia de Hierro.



a) Clorosis de una rama joven de *P. tecunumanii* deficiente de Hierro vs rama madura del mismo individuo. b) arriba: acículas maduras, abajo: acículas jóvenes. c) Planta de *P. tecunumanii* del tratamiento completo y a su lado planta con deficiencia de Fe.

Al inicio de la investigación, se estableció que para considerar un síntoma como de deficiencia nutricional, este debía ser expresado por el 80% de los individuos, en el tratamiento omisión de Fe evaluado en este ensayo solo un individuo de los últimos cinco que conformaban el tratamiento mostro los síntomas mencionados anteriormente, esto se pudo deber a que este individuo tenía menos reservas de este elemento con respecto a sus homólogos, desafortunadamente no se puede comprobar esta hipótesis ni siquiera con los análisis foliares, ya que estos se hicieron por tratamiento y no por individuo.

- ***Eucalyptus grandis***. Al inicio del periodo de observación las hojas más jóvenes presentaron clorosis intervenal, donde las nervaduras se observan muy delgadas y conservan su cloración verde, mientras que el limbo foliar se torna amarillento, las hojas más maduras conservaron su color (figura 29). Las plantas en general tenían un aspecto saludable con alturas similares a las reportadas al tratamiento control.

Figura 29. Clorosis por deficiencias de Fe en plántulas de *E. grandis*



Fotografía: Ing. Carlos Rodas (SKCC)

Los síntomas descritos por la omisión de Fe de este ensayo, coinciden con los reportados para plántulas de vivero de *E. globulus*, con clorosis intervenal en hojas jóvenes, así mismo Silveira *et al* (2001), reporta en general para el género *Eucalyptus* hojas nuevas con clorosis intervenal con apariencia de un reticulado fino, donde las nervaduras son de color verde oscuro y el limbo foliar es verde-claro.

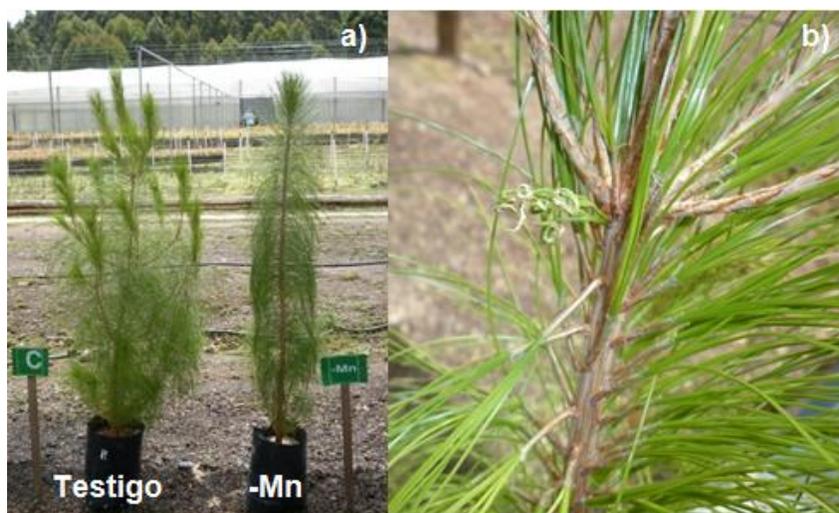
Tal y como se esperaba, los síntomas por déficit de Hierro se dieron en las hojas jóvenes debido a la relativa inmovilidad de este elemento (Escobar, 2007). Por otro lado la clorosis férrica muy característica de esta deficiencia se debe a la falta de este elemento que aunque no hace parte constituyente de la clorofila, si participa en su síntesis (BOTANICAL-ONLINE, 1999).

3.1.10 Omisión de Manganeso.

- ***Pinus tecunumanii***. Plantas de aspecto marchito, con pocas ramificaciones secundarias (Figura 30a). Las acículas al tacto se sentían secas. En algunos individuos se presentaron deformaciones en los fascículos (Figura 30b).

Síntomas similares a los obtenidos en esta investigación, fueron descritos en un ensayo de nutrición con *P. caribea*, donde las plántulas deficientes de Mn, se marchitaron y tenían un aspecto raquíptico (Hernández, 2002). Ninguno de los autores consultados reportó malformaciones en los fascículos.

Figura 30. Síntomas de deficiencia de Manganeso en plántulas de *P. tecunumanii*



a) Planta de *P. tecunumanii* del tratamiento completo y a su lado planta con deficiencia de Mn. b) Deformación de un fascículo de la parte terminal de una planta de *Pinus tecunumanii*.

- ***Eucalyptus grandis***. Inicialmente las hojas jóvenes presentaron clorosis intervenal, es decir los espacios entre las venas toman una coloración amarilla y las venas permanecen verdes, mientras las hojas maduras permanecen verdes (Figura 31).

Los síntomas descritos anteriormente coinciden con los reportados por Malavolta *et al* (1962) para *E. tereticornis*, donde se presentó clorosis intervenal en hojas jóvenes (Dell, 1996). En general para el género *Eucalyptus*, el déficit de manganeso en las plantas causa clorosis intervenal asemejando un reticulado grueso, es decir las venas y los espacios adyacente a ellas conservan su color verde oscuro, mientras que el resto del limbo foliar se torna verde claro (Silveira *et al*, 2002).

Figura 31. Clorosis intervenal por deficiencia de Manganeso en plántulas de *E. grandis*



3.1.11 Omisión de Zinc

- ***Pinus tecunumanii*.** La deficiencia de este elemento no causo ningún síntoma visible, ni determinante en las plantas tratadas bajo este tratamiento, mostrando individuos aparentemente sanos, con desarrollo en altura y diámetro similar a las plantas del tratamiento control.

- ***Eucalyptus grandis*.** El primer síntoma expresado fue una leve clorosis intervenal en las hojas jóvenes (Figura 32a), con el paso del tiempo tanto las hojas jóvenes como las maduras desarrollaron coloraciones rojizas en las puntas y finalmente se evidenciaron inicios de necrosis en esta zona también (Figura 32b). Los síntomas obtenidos en este ensayo concuerdan con los reportados en estados tempranos de deficiencia de Zinc, por Malavolta en 1962, en plántulas de *E. tereticornis* y por Dell y Wilson en 1985, en plantas de *E. marginata*, con síntomas como la aparición de un color verde pálido en las zonas intervenales de las hojas jóvenes. De igual forma en estados avanzados se describen hojas con puntas rojizas y necróticas (Dell, 1996).

Figura 32. Progreso de síntomas por omisión de Zinc en plántulas de *E. grandis*



3.2 ANÁLISIS FOLIARES

Se realizó un primer análisis foliar general para las dos especies antes de iniciar el ensayo, esto con el fin de determinar el estado nutricional del material vegetal que provenía del Vivero Rancho Grande. Los niveles de cada uno de los nutrientes por especie se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Contenido foliar inicial de nutrientes en las especies *E. grandis* y *P. tecunumanii*

Elemento	Especie	
	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Pinus tecunumanii</i>
Macronutrientes (%)		
N	1.97	3.03
P	0.18	0.23
K	1.16	1.7
Ca	0.48	0.75
Mg	0.15	0.29
S	0.19	0.24
Micronutrientes (ppm)		
B	25.55	39.13
Cu	4.01	10.05
Fe	107	125
Mn	206.54	181.81
Zn	41.73	26.03

Para el caso de la muestra base de *Pinus tecunumanii*, los contenidos de macronutrientes y Boro arrojados por el análisis foliar están por encima de los rangos adecuados descritos por Gonçalves en 1995 para *Pinus* en estado adulto, mientras que los valores de los elementos Mn y Zn se encuentran por debajo de estos rangos, solo el Fe se halló en el rango adecuado. (Cuadro 4).

Para la especie *E. grandis* los porcentajes de N, S, B, Cu, Fe y Mn son adecuados con respecto a los reportados por Herbert (1996), en tejido foliar de rodales de *E. grandis* en Sur África, los valores de P y K y Zn están por encima de este rango mientras que los porcentajes de Ca y Mg están por debajo del óptimo (Cuadro 4).

Los datos obtenidos en este ensayo, se compararon con los datos de *Eucalyptus* y *Pinus* en estado adulto, debido a la falta de documentación disponible de análisis foliares de estas especies en estado juvenil. Es importante resaltar este aspecto, ya que según Schonau (1981) en *E. grandis*, las concentraciones foliares de N, P, S y Cu, generalmente decrecen con la edad mientras que el K, Ca, Mg, Mn y Zn son constantes y la concentración de Fe tiende a incrementarse (Herbert, 1996).

3.2.1 *Pinus tecunumanii*. Los resultados de los cuatro análisis foliares realizados a lo largo del ensayo en la especie *Pinus tecunumanii* se presentan en los Cuadros 7 y 8.

Cuadro 7. Contenido de macronutrientes en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en *Pinus tecunumanii*

TRATAMIENTO	ELEMENTO MINERAL (%)																							
	N				P				K				Ca				Mg				S			
	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4
Completo	2,33	2,09	1,61	1,1	0,25	0,29	0,22	0,14	1,08	1,11	1,06	0,79	0,43	0,47	0,36	0,29	0,13	0,14	0,12	0,11	0,22	0,19	0,16	0,11
↓ N	2,03	1,33	0,83	0,7	0,37	0,48	0,68	0,69	1,38	1,36	1,48	1,46	0,36	0,37	0,38	0,35	0,13	0,13	0,13	0,14	0,22	0,18	0,23	0,19
-P	1,8	1,69	1,14	1,1	0,17	0,12	0,05	0,03	1,23	1,1	0,97	0,83	0,39	0,39	0,33	0,27	0,12	0,14	0,12	0,13	0,18	0,14	0,1	0,07
-K	2,22	2,07	1,65	1,6	0,26	0,32	0,31	0,23	0,58	0,33	0,17	0,14	0,59	0,68	0,62	0,5	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,22	0,14
-Ca	2,65	2,55	1,86	1,2	0,29	0,35	0,25	0,2	0,95	1,03	1,01	0,98	0,32	0,41	0,32	0,26	0,12	0,15	0,12	0,13	0,24	0,24	0,22	0,15
-Mg	2,15	1,85	1,44	1,2	0,25	0,31	0,31	0,31	1,14	1,2	1,33	1,25	0,53	0,62	0,52	0,38	0,09	0,1	0,09	0,08	0,24	0,21	0,19	0,16
-S	2,34	2,17	1,56	1,3	0,26	0,25	0,21	0,14	1,05	1,11	1,02	0,78	0,42	0,45	0,41	0,33	0,14	0,13	0,11	0,08	0,21	0,19	0,15	0,09
-B	2,25	2,1	1,55	1,1	0,26	0,26	0,22	0,13	1,05	0,98	0,89	0,81	0,47	0,44	0,42	0,34	0,1	0,08	0,07	0,08	0,21	0,16	0,2	0,08
-Cu	2,32	2,11	1,52	1,1	0,24	0,28	0,21	0,16	0,95	1,14	1,08	0,99	0,42	0,54	0,42	0,33	0,1	0,11	0,09	0,08	0,19	0,17	0,16	0,08
-Fe	2,14	2,05	1,53	1,2	0,24	0,26	0,24	0,17	1,33	1,13	1,3	0,96	0,51	0,52	0,54	0,46	0,09	0,08	0,09	0,09	0,21	0,17	0,19	0,09
-Mn	2,27	2,2	1,69	1,2	0,25	0,28	0,2	0,13	1,03	1,11	1,02	0,81	0,51	0,55	0,46	0,34	0,11	0,1	0,09	0,08	0,21	0,19	0,16	0,08
-Zn	2,39	2,15	1,59	1,3	0,27	0,3	0,28	0,17	1,17	1,14	1,13	0,88	0,47	0,49	0,47	0,38	0,1	0,1	0,09	0,09	0,22	0,18	0,23	0,11

* AF: Análisis foliar

Cuadro 8. Contenido de microelementos en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en *Pinus tecunumanii*

TRATAMIENTO	ELEMENTO MINERAL (ppm)																			
	B				Cu				Fe				Mn				Zn			
	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4
Completo	37,95	44,41	42	26,85	5,89	7,2	5	5,26	123,1	x	x	48,75	285,37	363,78	258	136,06	55,49	49,02	27	18,37
↓ N	33,88	45,97	57	37,7	7,99	6,01	5	4,33	865,82	x	x	140,64	272,66	575,87	550	652,11	65,65	46,59	39	37,88
-P	32,02	37,6	32	22,83	5,1	6,59	4	5,13	713,54	x	x	91,73	75,7	108,33	75	71,73	43,88	57,47	40	35,89
-K	31,82	57,4	60	35,54	4,46	7,95	5	5,73	126,02	x	x	60,36	229,12	468,09	352	217,77	48,8	47,43	38	27,24
-Ca	47,17	53,02	48	38,6	7,31	9,79	7	5,05	174,25	x	x	124,46	474,53	510,64	262	166,15	47,32	47,02	33	20,05
-Mg	44,13	53,18	54	38,08	5,41	7,27	6	4,99	109,02	x	x	54,96	294,18	420,67	290	227,69	48,51	55,58	34	19,03
-S	30,6	44,57	48	18,52	5,28	7,24	5	4,74	86,46	x	x	96,7	291,07	413,76	299	157,16	59,19	49,82	33	19,2
-B	14,08	7,65	5	3,71	5,3	6,54	5	4,91	257,09	x	x	47,36	311,38	351,87	273	167,28	56	40,24	27	18,56
-Cu	31,09	46,25	43	25,78	4,85	6,01	3	2,54	121,06	x	x	57,5	308,71	391,09	206	106,28	49,32	46,4	27	16,57
-Fe	50,3	50,35	62	36,57	5,23	7,44	6	5,23	124,93	x	x	106,28	368,57	489,73	368	240,05	55,84	61,03	45	28,6
-Mn	38,73	53,58	46	23,39	5,35	8,15	5	5,12	152,44	x	x	2933,12	89,5	60,27	28	18,07	53,69	47,39	31	16,99
-Zn	38,29	43,78	53	25,42	5,68	6,32	5	4,72	100,39	x	x	54,72	317,19	429,84	296	198,86	50,33	27,97	18	10,03

El tratamiento completo presentó niveles adecuados para los macro y micronutrientes a lo largo del ensayo, solo en el último análisis se reportaron valores inferiores a los adecuados para Ca, Mg, S, Fe, Mn y Zn, esto comparado con los porcentajes reportados

por Gonçalves (1995), a pesar de estos valores deficientes las plántulas de este tratamiento no presentaron ningún síntoma visual relacionado a dichas deficiencias.

Los tratamientos con deficiencia de Nitrógeno; Fósforo y Potasio, presentaron niveles de deficiencia crítica en sus respectivos elementos, registrando valores de 0.7%, 0.03% y 0.14% respectivamente, valores que concuerdan con los descritos por Will en 1985, citado por Zas (2003), por esta razón los síntomas en cada deficiencia fueron muy evidentes y diferenciables de los demás tratamientos.

El Tratamiento de omisión de Ca, reportó un nivel adecuado de este elemento a lo largo del ensayo, solo hasta el final de la investigación se determinó un 0.26% de Ca, de acuerdo a Gonçalves (1995), valores inferiores a 0.3% dejan de ser adecuados. Esto explicaría porque los síntomas de esta deficiencia solo aparecieron casi hasta el final del ensayo.

En los tratamientos donde se omitieron los micronutrientes, B y Cu Fe, Mn y Zn, el primer análisis foliar muestra que las concentraciones foliares de cada elemento fueron adecuados con excepción del Mn que se encontró desde el principio hasta el final del ensayo en un nivel deficiente, esto comparado con los rangos óptimos reportados por Gonçalves (1995). A partir del segundo análisis los niveles foliares de los micronutrientes empezaron a disminuir drásticamente hasta llegar a niveles muy bajos como en el caso del B con un 3.7%, valor que de acuerdo a Dickens *et al* (2003), es crítico en el tejido foliar, esta es la razón por la cual los síntomas en los individuos de este tratamiento (-B), fueron evidentes, afectando el normal desarrollo de dichos individuos.

En el caso del Tratamientos -Cu y -Zn, que no presentaron síntomas visibles de deficiencia, los análisis foliares permitieron determinar que efectivamente los niveles de estos elementos en el tejido foliar de las plántulas de estos tratamientos se mostraron en niveles considerados deficientes por Hernández (2002), esto probablemente se debió a que los niveles más bajos se alcanzaron casi al final del ensayo, lo que indicaría que lo que hizo falta fue un periodo de tiempo más largo para la observación de los síntomas de estas dos deficiencias, ya que la igual que los síntomas varían con especie, el tiempo de ocurrencia también pueden variar.

En las plantas del tratamiento -Mg, el análisis foliar comprobó que existió un déficit de este nutriente de acuerdo a Gonçalves (1995), sin embargo las plantas no presentaron síntomas visibles característicos de esta deficiencia, esto pudo deberse a que los niveles fueron suficientes para el consumo de la planta y que no fueron lo suficientemente bajos para inducir a la aparición de síntomas, como ejemplo se tiene el caso de Hernández (2002), quien reportó que las plantas de *P. caribea* deficientes de S, tenían niveles de este elemento de 0.012%, valor muy por debajo de los presentados en este ensayo donde los valores oscilan entre 0.1% y 0.08%.

En el tratamiento -S, los análisis foliares mostraron que el nivel de este elemento no fue deficiente en los tres primeros y solo hasta el último análisis se encontró un nivel foliar del 0.09%, valor deficiente de acuerdo a Gonçalves (1995). Esta sería la razón que explicaría porque los síntomas no se evidenciaron claramente durante el periodo de observación.

3.2.2 *Eucalyptus grandis*. Los resultados de los cuatro análisis foliares realizados a lo largo del ensayo en la especie *Eucalyptus grandis* se presentan en los Cuadros 9 y 10

Cuadro 9. Contenido de macronutrientes en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en *Eucalyptus grandis*

TRATAMIENTO	ELEMENTO MINERAL (%)																							
	N				P				K				Ca				Mg				S			
	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4
Completo	5,52	2,39	1,41	1,4	0,27	0,25	0,18	0,2	2,02	1,4	0,91	0,81	0,92	0,97	0,97	0,69	0,3	0,29	0,28	0,32	0,21	0,16	0,15	0,14
↓ N	1,65	1,13	0,91	1,06	0,74	0,69	0,68	0,77	2,26	1,48	1,38	1,39	0,82	0,87	1,02	1,38	0,3	0,24	0,25	0,37	0,16	0,1	0,09	0,13
-P	2,58	1,93	1,57	1,38	0,11	0,05	0,04	0,03	1,98	1,29	1,17	1,04	0,95	0,81	0,77	0,77	0,26	0,24	0,25	0,29	0,19	0,13	0,11	0,11
-K	2,94	3,05	2,43	2,65	0,33	0,36	0,28	0,31	0,44	0,29	0,23	0,2	1,59	1,35	1,43	1,49	0,36	0,37	0,36	0,42	0,32	0,26	0,2	0,21
-Ca	2,47	2,17	1,57	1,49	0,29	0,28	0,3	0,3	2,03	1,48	1,11	0,92	0,47	0,45	0,51	0,48	0,33	0,38	0,35	0,39	0,2	0,23	0,18	0,23
-Mg	1,96	1,86	1,36	1,13	0,27	0,26	0,31	0,33	2,17	1,85	1,24	1,16	1,1	0,98	0,91	0,83	0,13	0,13	0,12	0,15	0,18	0,15	0,16	0,15
-S	2,95	2,29	1,29	1,59	0,31	0,27	0,23	0,22	2,08	1,49	0,97	0,93	1,09	1,14	1,1	0,95	0,24	0,29	0,24	0,27	0,21	0,16	0,1	0,12
-B	2,33	2,23	2,27	1,67	0,27	0,24	0,24	0,15	2,07	1,42	1,27	1,18	1,19	1,03	1,33	0,6	0,13	0,11	0,13	0,13	0,17	0,15	0,15	0,12
-Cu	2,92	2,58	1,44	1,81	0,3	0,32	0,3	0,35	2,13	1,76	1,28	1,25	1,13	1,52	1,41	1,11	0,14	0,17	0,13	0,16	0,21	0,17	0,11	0,13
-Fe	2,53	2,5	1,42	1,39	0,25	0,23	0,17	0,19	2,12	1,43	1,14	1,14	1,34	1,25	1,37	0,89	0,13	0,13	0,12	0,13	0,17	0,16	0,1	0,11
-Mn	2,58	2,61	1,53	1,64	0,26	0,28	0,18	0,21	1,94	1,61	1,04	1,05	1,03	1,54	1,1	0,92	0,14	0,16	0,13	0,17	0,19	0,18	0,1	0,12
-Zn	2,59	2,23	1,52	1,55	0,27	0,25	0,29	0,27	2,2	1,52	1,19	1,15	1,05	1,36	1,31	1,23	0,14	0,15	0,14	0,16	0,2	0,14	0,11	0,12

Cuadro 10. Contenido de micronutrientes en el tejido foliar de cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en *Eucalyptus grandis*

TRATAMIENTO	ELEMENTO MINERAL (ppm)																			
	B				Cu				Fe				Mn				Zn			
	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4	AF1	AF2	AF3	AF4
Completo	54,03	57	66	50,56	8,69	6	4	2,62	191	x	x	110,56	334,23	316	285	233,94	24,08	18	25	12,46
↓ N	59,37	62	67	70,19	13,71	7	6	5,86	287	x	x	67,9	841,38	1225	998	1634,68	40,79	21	22	17,65
-P	46,97	51	50	46,48	12,35	8	6	5,45	96	x	x	76,03	141,4	325	311	440,62	26,21	17	16	12,64
-K	78,24	80	84	77,84	10,86	12	13	13,25	122	x	x	115,13	358,83	558	507	505,7	24,77	29	28	24,16
-Ca	44,27	88	92	92,46	11,76	9	6	4,31	107	x	x	88,62	485,99	347	286	237,62	25,59	24	25	16,18
-Mg	44,47	63	75	64,7	7,43	7	5	2,65	120	x	x	87,37	450,38	469	376	288,42	22,52	19	25	13,24
-S	41,14	75	75	62,71	9,14	7	5	3,02	129	x	x	96,69	349,7	372	328	283,77	22,62	20	22	14,27
-B	8,98	15	10	3,82	6,95	10	9	7	96	x	x	71,22	262,23	346	448	233,05	17,45	19	30	18,31
-Cu	53,05	78	92	82,48	3,63	4	3	1,67	175	x	x	109,75	343,46	473	418	315,6	20,96	19	22	17,16
-Fe	66,92	87	86	59,8	9,59	10	5	3,62	108	x	x	85,99	394,48	487	408	283,25	22,6	31	19	13,53
-Mn	48,39	74	75	76,08	7,06	10	6	3,8	113	x	x	77,37	100,04	117	69	38,47	18,37	19	18	18,28
-Zn	45,7	72	88	79,79	9,44	7	5	4,03	143	x	x	125,21	374,84	393	363	340,76	20,99	14	18	11,96

En el Cuadro 9 se puede observar que el tratamiento Completo durante todo el ensayo presentó niveles adecuados para los macro y micronutrientes exceptuando el Cu, comparado con los rangos reportados por Escobar (2007) para *E. globulus*. (Cuadro 4).

Los tratamientos con deficiencia de Nitrógeno; Fósforo y Potasio, presentaron niveles de deficiencia crítica en sus respectivos elementos, registrando valores al final del ensayo de 1.06%, 0.03% y 0.2% respectivamente, valores que coinciden con los descritos por Escobar (2007). Para el caso del tratamiento -P también se coincide con Dell *et al* (1995) y Boardman *et al* (1997), quienes reportan para *E. grandis* en estado juvenil que valores menores a 0.08% y 0.07% respectivamente, son deficientes y dan lugar a síntomas visuales (Silveira, 2004).

El Tratamiento de omisión de Ca, reportó un nivel adecuado de este elemento a lo largo del ensayo, solo hasta el último análisis foliar se observó un valor de 0.48% de Ca, que de acuerdo a Escobar (2007), es deficiente, pues valores inferiores a 0.50% generan déficit de este elemento en las plantas de *E. globulus*. Esta situación ratifica el retraso en la aparición de los síntomas de deficiencia de Calcio, los cuales solo fueron visibles al final del periodo de observación.

En los tratamientos donde se omitieron los micronutrientes, B, Cu Fe, Mn y Zn, los niveles foliares a lo largo de todo el ensayo fueron deficientes comparados con los rangos óptimos reportados por Gonçalves (1995) (Cuadro 4).

3.3 CRECIMIENTO EN ALTURA Y DIÁMETRO AL CUELLO DE LA RAÍZ

Para determinar el efecto de las deficiencias nutricionales en las variables altura y diámetro al cuello de la raíz (DCR), se ejecutaron previamente análisis exploratorios y depuraciones de las bases de datos con el fin de encontrar posibles errores (observaciones extremas o errores de digitación). Finalmente se obtuvo un modelo para la estimación del crecimiento en altura y DCR en cada una de las especies. El objetivo de esta modelación fue encontrar posibles diferencias estadísticas significativas en las mediciones de altura y diámetro al cuello de la raíz entre los tratamientos evaluados y el tratamiento control.

3.3.1 Crecimiento en altura. Para evaluar el efecto de los tratamientos en el crecimiento en altura para estas especies se empleó un modelo no lineal de efectos mixtos, usando la librería nlme de R (Pinheiro, 2011). La forma funcional del modelo no lineal es el modelo de Richards (Pienaar and Turnbull 1973). Ver ecuación (1)

$$y = c + a (1 - \exp(-k \cdot t))^m \quad (1)$$

y = variable a estimar (en nuestro caso la altura y el DCR)
c = intercepto par la edad 0
a = valor asintótico
k = parámetro que gobierna la tasa de crecimiento de la altura
m= parámetro de escala
t = edad

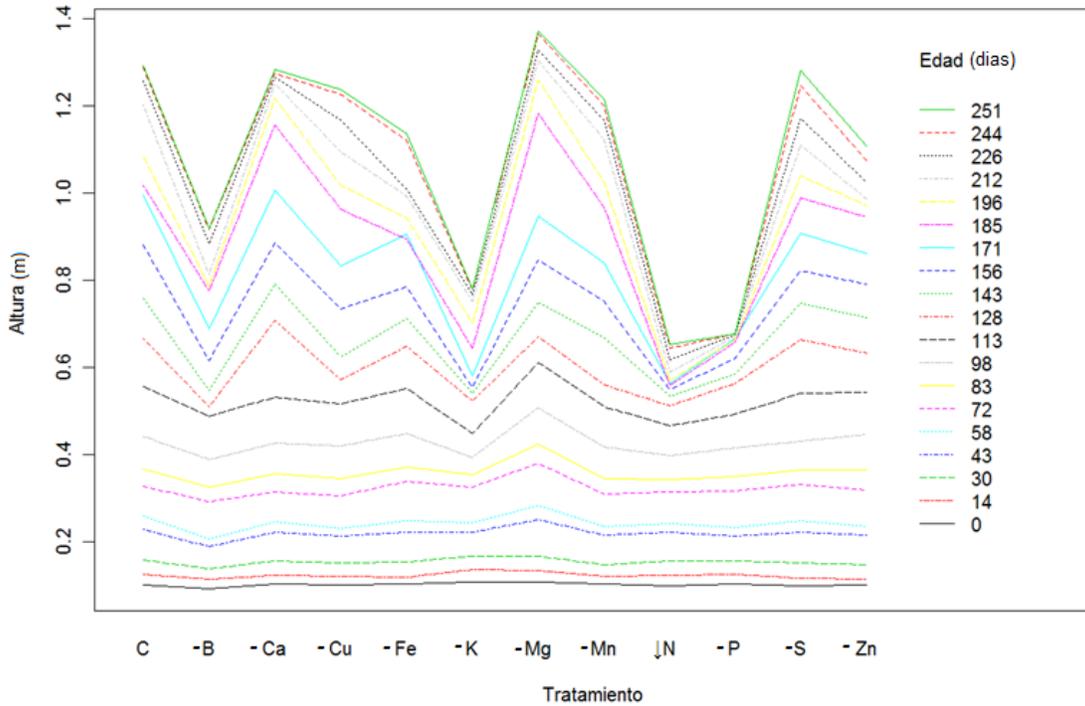
El modelo de Richards ha mostrado ser más versátil para modelar crecimiento, fue propuesto inicialmente por Von Bertalanffy y se basa en principios biológicos. Este es un modelo diferencial que en su forma integrada se puede usar para encontrar la relación altura vs edad, además permite fijar una asíntota en el registro de mayor altura encontrada en los datos de las mediciones o estimarla. Este modelo en su forma integrada original presenta al parámetro de escala como $1/1-m$ (Zapata, 2007).

Para ciertos valores de m el modelo asume formas de modelos de crecimiento clásicos, cuando m es 0, es la función de crecimiento monomolecular, si m es $2/3$ es el modelo propuesto inicialmente por Von Bertalanffy y cuando $m > 1$ es de tipo sigmoide (Pienaar y Turnbull, 1973).

Dado que la modelación de efectos mixtos permite evaluar la significancia de los parámetros del modelo, para cada tratamiento a través del tiempo, en este caso se hace énfasis en la inferencia estadística para el parámetro a (asíntota), con la cual se pudo comprobar si existen diferencias significativas estadísticas en la altura máxima que alcanzan las plantas de las dos especies sometidas a los diferentes tratamientos hasta la edad máxima de observaciones para un total de 251 días.

- ***Pinus tecunamni***. El total de registros de altura fue de 2794 en todos los tratamientos, en todas las mediciones. Dentro de este grupo de datos, los registros de 30 árboles en diferentes tratamientos fueron suprimidos, ya que estos sufrieron daño mecánico durante la fase de campo, lo que limitó su crecimiento con respecto a los demás individuos; de igual forma se eliminaron los registros que tenían una sola medición en todo el ensayo. Esta eliminación se realizó con el fin de evitar ruidos o anomalías en la modelación. Una vez realizada la depuración de la base de datos, se obtuvieron gráficos de interacciones entre los tratamientos, la altura y las edades de mediciones que se muestran en las Figuras 33 y 34.

Figura 33. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable altura para *Pinus tecunumanii*.

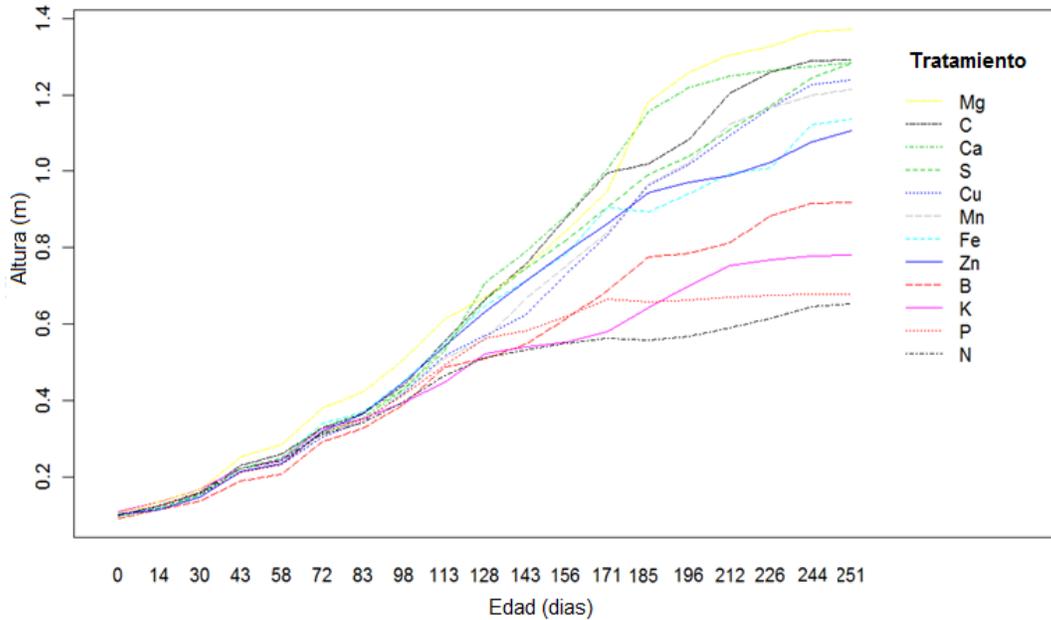


La Figura 33 muestra que realmente existe una interacción entre los tratamientos y la edad de medición, observándose que a través del tiempo la respuesta de la altura no es la misma debido a la influencia de los tratamientos.

En general se podría deducir que bajo las condiciones del experimento en las primeras mediciones no se evidenciaron cambios significativos en la altura, pero a partir de los 72 días de edad, se empieza a notar un distanciamiento de las mediciones de altura en los diferentes tratamientos. Es posible observar que al igual que el tratamiento testigo (C), la omisión de elementos como S, Ca y Mg muestran una tendencia a disparar su crecimiento alrededor de los 128 días, tomando una ventaja considerable respecto a tratamientos como el ↓N, -P y -K

Las plántulas del tratamiento -B, hasta los 113 días tuvieron un comportamiento similar a los individuos del tratamiento testigo, pero a partir de los 128 días muestran un marcado retraso en el incremento comprado con este mismo tratamiento y con -Ca, -S y -Cu.

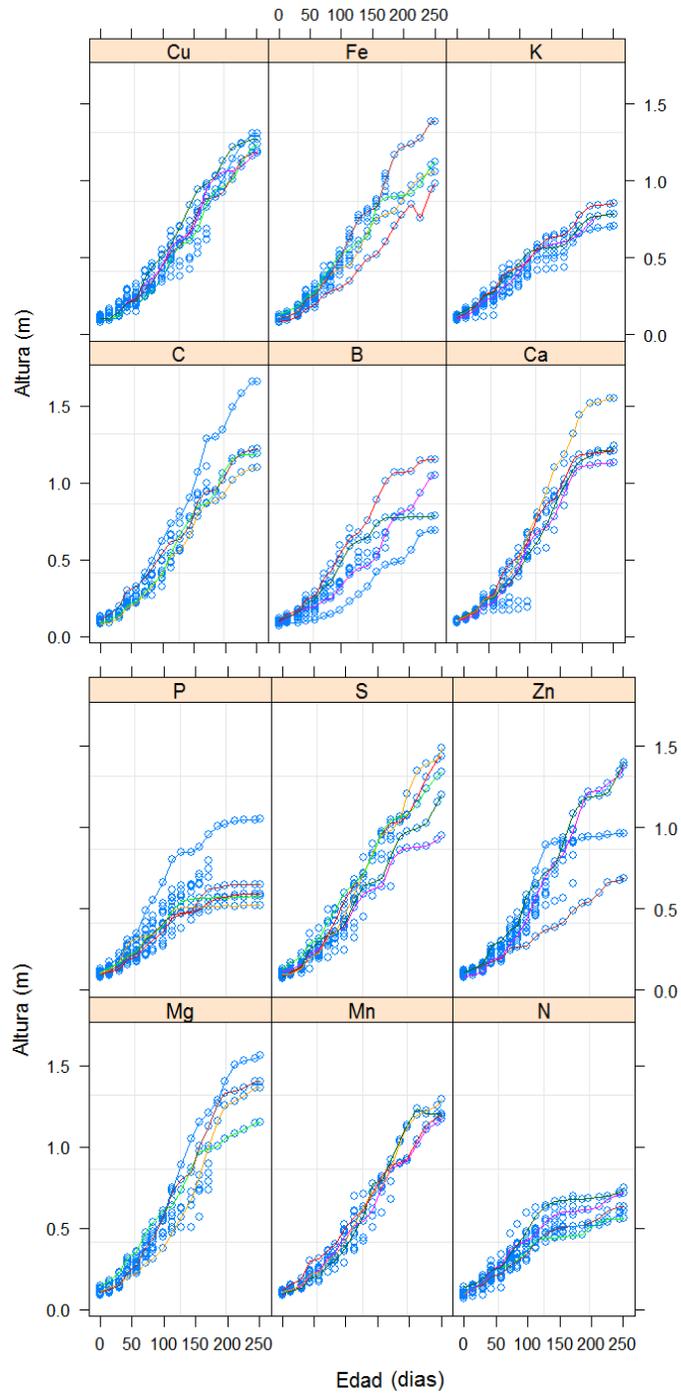
Figura 34. Incremento promedio en altura por edades de medición en la especie *Pinus tecunumanii* para cada uno de los tratamientos.



La Figura 34, muestra la interacción de los tratamientos y la edad para el crecimiento de esta variable, se observa como las pendientes son diferentes para los distintos tratamientos, e incluso en un mismo tratamiento se pudo ver cómo cambia la pendiente a lo largo del tiempo. Claramente se evidencia que tratamientos como \downarrow N, -P, -K y -B; son los que reportaron los más bajos incrementos en altura con 0.65, 0.67, 0.68 y 0.85 metros respectivamente en relación al tratamiento control que reportó un promedio de altura de 1.29 m. Solamente el tratamiento -Mg reportó una altura promedio mayor a la reportada por el testigo. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Lozada y Zambrano (1991), quienes en su ensayo de nutrición en plántulas de *Pinus patula*, también reportaron que los individuos sometidos a deficiencias de P, N, B y K, alcanzaron los más bajos incrementos en altura en este respectivo orden.

Para ver el comportamiento de la altura con la edad y la tendencia no lineal que esta presenta se realizaron gráficos de dispersión de altura en función de la edad para cada tratamiento con los árboles disponibles, los resultados se muestran en la Figura 35.

Figura 35. Gráfico de dispersión del comportamiento de la altura en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*



En general se observa que el comportamiento de la altura en función de la edad es no lineal y sigmoide. Algunos de los tratamientos tienen un comportamiento asintótico como es el caso de ↓N, -P y -K muy diferente al comportamiento que presenta el tratamiento control. Lo que reitera que la omisión de estos tres macronutrientes afecta de forma negativa el crecimiento de esta especie.

Después de corroborar que el comportamiento de la altura no era lineal, se corrió el modelo para cada uno de los tratamientos evaluados, en el Anexo F se muestra el resumen de los estimados de cada uno de los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en altura en la especie *Pinus tecunumanii*. Dentro de estos estimados se tiene que el factor tratamiento hace parte del efecto fijo en el parámetro a y en el parámetro k (tasa), pero existe un efecto aleatorio sobre cada uno de los árboles dentro del tratamiento para su asíntota.

El Cuadro 11 presenta el modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para el incremento en altura para cada tratamiento interpretado de los valores ajustados para los parámetros en su parte fija y aleatoria.

Cuadro 11. Modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en altura en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*

Tratamiento	Modelo de Richards $y = c+a(1-\exp(-k*t))^m$	Valor Asíntota	p-valor
Testigo	$y = 0.11467+1.61270(1-\exp(-0.00824*t))^{2.54084}$	1.61270	< 0.0001 *
↓N	$y = 0.11467+0,50029 (1-\exp(-0.00818*t))^{2.54084}$	0,50029	< 0.0001 *
-P	$y = 0.11467+0,55246 (1-\exp(-0.00712*t))^{2.54084}$	0,55246	< 0.0001 *
-K	$y = 0.11467+0,57601 (1-\exp(-0.00599*t))^{2.54084}$	0,57601	< 0.0001 *
-Ca	$y = 0.11467+1,43522 (1-\exp(-0.00056*t))^{2.54084}$	1,43522	0.1577
-Mg	$y = 0.11467+1,71174 (1-\exp(-0.00114*t))^{2.54084}$	1,71174	0.4398
-S	$y = 0.11467+1,44133 (1-\exp(-0.00040*t))^{2.54084}$	1,44133	0.1722
-B	$y = 0.11467+1,02155 (1-\exp(-0.00110*t))^{2.54084}$	1,02155	< 0.0001 *
-Cu	$y = 0.11467+1,61145 (1-\exp(0.00052*t))^{2.54084}$	1,61145	0.9923
-Fe	$y = 0.11467+1,44008 (1-\exp(-0.00035*t))^{2.54084}$	1,44008	0.1919
-Mn	$y = 0.11467+1,62660 (1-\exp(0.00060*t))^{2.54084}$	1,62660	0.9211
-Zn	$y = 0.11467+1,95270 (1-\exp(-0.00106*t))^{2.54084}$	1,95270	0.0066*

*Significativo a un 95%

Los tratamientos que muestran un valor asintótico en la curva de crecimiento estadísticamente diferente e inferior al del control son los tratamientos que más limitaron el desarrollo en altura de las plantas, es decir -B, -K, ↓N y -P, también existe una diferencia significativa entre el tratamiento Control y -Zn, pero este reporta un valor mayor al del control lo que significa que los individuos de este tratamiento superaron el promedio de altura de los del control. Por otro lado no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -Ca, -Mg, -S, -Cu, -y Mn, indicando que las plantas

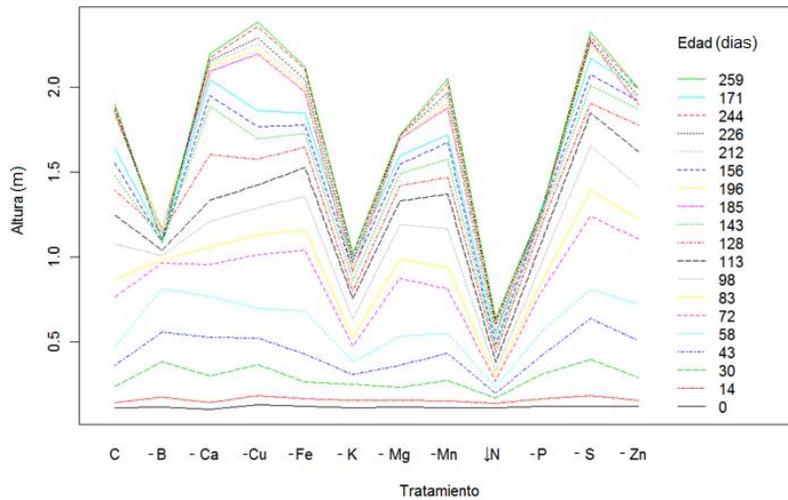
de estos tratamientos se comportaron en cuanto al crecimiento en altura de forma similar a las plantas del tratamiento Control.

Para evaluar la bondad de ajuste del modelo de Richards seleccionado en la determinación de la significancia de los tratamientos en la variable altura, se realizaron análisis de varianza sobre las variables utilizadas en el modelo donde se muestra que las variables tratamiento y edad son significativas, bajo este modelo es que se pudo probar la hipótesis de similaridad de asíntotas, también se usaron estadísticos como el Criterio de Información de Akaike (AIC), el cual permite seleccionar entre diferentes modelos el que mejor grado de ajuste presente (a menor AIC menor pérdida de información y por tanto mayor ajuste) (Pinheiro, 2001). Este método se aplicó para todos los modelos que se generaron en esta investigación.

Para el modelo finalmente seleccionado se muestra gráficamente como este explica los datos y se ilustran algunos árboles de diferentes tratamientos con los datos observados de altura en forma de puntos y los valores ajustados de altura en forma de línea (Anexo G). Es posible determinar que efectivamente el modelo no lineal de efectos mixtos usando el modelo de Richards explica el comportamiento en altura de las plántulas de *P. tecunumanii*.

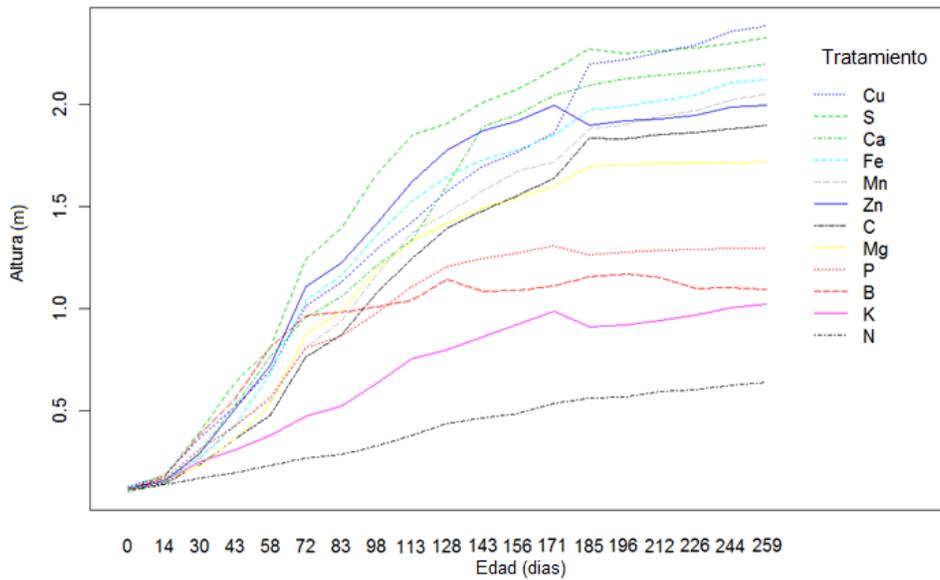
•***Eucalyptus grandis***. El total de registros para altura fue de 2834, en todos los tratamientos, en todas las mediciones, dentro de este grupo de datos, se eliminaron los registros de los árboles que tenían una sola medición. La exclusión de los registros se realizó con el fin de evitar datos anómalos que afectaran la modelación. El análisis exploratorio permitió graficar las interacciones entre los tratamientos, la altura y las edades de mediciones (Figuras 36 y 37).

Figura 36. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable altura para *E. grandis*.



La Figura 36 ilustra la existencia de la interacción entre los tratamientos y la edad de medición que se dio con el paso del tiempo para *E. grandis*, es evidente como las diferentes deficiencias afectaron de forma positiva o negativa el incremento en altura. Bajo las condiciones de este ensayo, se evidencia una fuerte influencia de los tratamientos en el incremento en altura, ya que con tan solo 30 días de iniciado el ensayo se promueve un alejamiento de las mediciones de altura en los diferentes tratamientos. Es posible notar que el tratamiento -B, tuvo un incremento superior al tratamiento control hasta la edad de medición 83 (días), en ese punto se observa un estancamiento progresivo hasta el final del ensayo. Tratamientos como -Cu, -Mn y -S, superaron el crecimiento del tratamiento control desde los 30 primeros días hasta el final del ensayo.

Figura 37. Incremento promedio en altura por edades de medición en la especie *E. grandis* para cada uno de los tratamientos

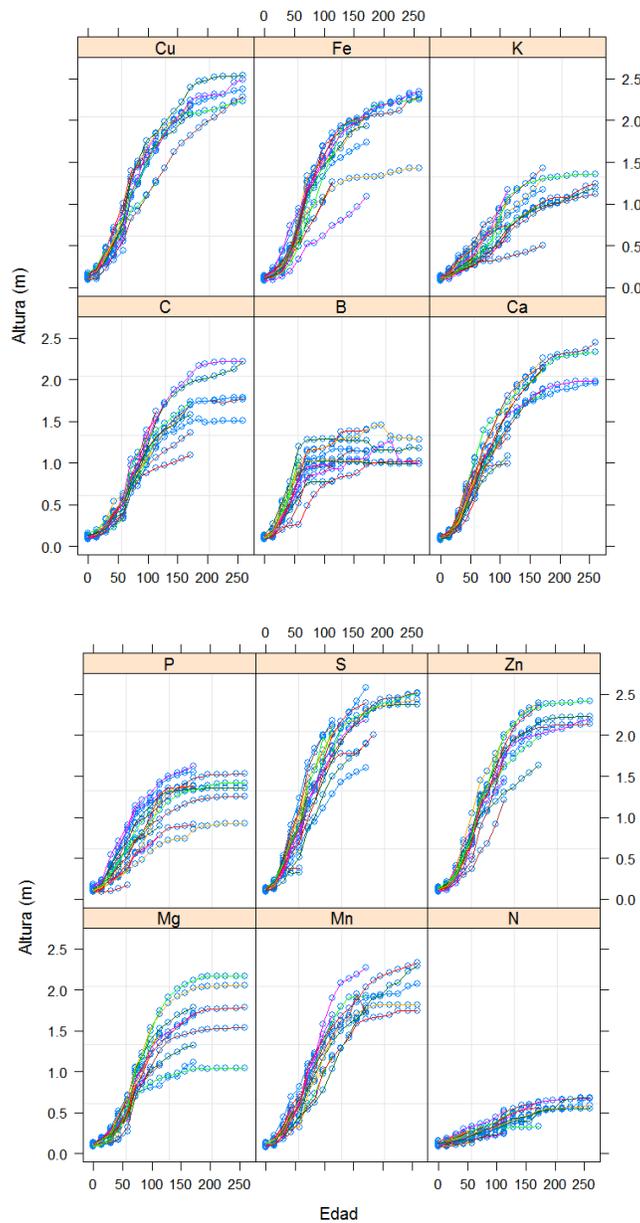


La Figura 37 exhibe otra forma de ver la interacción de los tratamientos y la edad para el crecimiento de esta variable. Es evidente como las pendientes difieren entre uno y otro tratamiento y dentro de un mismo tratamiento la pendiente varía a lo largo del ensayo. De igual forma muestra que un bajo contenido de N, la omisión de K, P, y B en una solución nutritiva afecta de manera negativa el incremento en altura para esta especie, reportando valores de 0.63, 1.02, 1.09 y 1.13 metros respectivamente en relación al tratamiento control que reportó un promedio de altura de 1.9 m. Los tratamientos correspondientes a -Zn, -Mn, -Cu, -Fe, -Ca, -S y -Cu reportaron alturas promedio de sus plantas muy superiores a las reportadas por el control (C). Los individuos de estos tratamientos alcanzaron alturas entre los 2 y 2.30 metros la final del ensayo.

Para observar que el comportamiento de la altura con la edad presenta una tendencia no lineal de crecimiento, se realizaron gráficos de dispersión de esta variable en función de la

edad para cada tratamiento con los arboles disponibles, con esto se quiso comprobar que era adecuada la utilización de un modelo no lineal. Los resultados se muestran en la Figura 38.

Figura 38. Gráfico de dispersión del comportamiento de la altura en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*



En los perfiles de crecimiento en altura que se ilustran en la Figura 37, se puede establecer que el modelo es apropiado para explicar el incremento de esta variable bajo la influencia de los diferentes tratamientos. Claramente se observa que el comportamiento de la altura en función de la edad es no lineal y sigmoide. En el caso de la omisión de los tratamientos ↓N, -P y -K se observa un comportamiento asintótico, caso opuesto al que presenta el tratamiento Control, -S, y -Zn por mencionar algunos. Esto reitera que para este ensayo la omisión de estos los tres macronutrientes principales afecta de forma negativa el crecimiento de la especie *E. grandis*.

Analizando el modelo de Richards en cada uno de los tratamientos, en el Anexo H se presenta un resumen de los estimados para los valores de los parámetros de los modelos de crecimiento en altura para la especie *E. grandis*.

El Cuadro 12 presenta el modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para el incremento en altura para cada tratamiento.

Cuadro 12. Modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en altura en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*

Tratamiento	Modelo de Richards $y = c+a(1-\exp(-k*t))^m$	Valor Asintota	p-valor
Testigo	$y = 0.12586+1.74037(1-\exp(0.01787*t))^{3.17003}$	1.74037	< 0.0001*
↓N	$y = 0.12586+0.53195(1-\exp(-0.00323*t))^{3.17003}$	0.53195	< 0.0001*
-P	$y = 0.12586+1.09819(1-\exp(0.00652*t))^{3.17003}$	1.09819	< 0.0001*
-K	$y = 0.12586+1.20888(1-\exp(-0.00123*t))^{3.17003}$	1.20888	< 0.0001*
-Ca	$y = 0.12586+1.93871(1-\exp(0.00355*t))^{3.17003}$	1.93871	0.1088
-Mg	$y = 0.12586+1.53882(1-\exp(0.00250*t))^{3.17003}$	1.53882	0.0943
-S	$y = 0.12586+2.20395(1-\exp(0.00365*t))^{3.17003}$	2.20395	0.0001*
-B	$y = 0.12586+0.99127(1-\exp(0.01802*t))^{3.17003}$	0.99127	< 0.0001*
-Cu	$y = 0.12586+2.07411(1-\exp(0.00274*t))^{3.17003}$	2.07411	0.0080*
-Fe	$y = 0.12586+1.82118(1-\exp(0.00338*t))^{3.17003}$	1.82118	0.5012
-Mn	$y = 0.12586+2.23987(1-\exp(-0.00078*t))^{3.17003}$	2.23987	0.0002*
-Zn	$y = 0.12586+1.96941(1-\exp(0.00340*t))^{3.17003}$	1.96941	0.0602*

*Significativo a un 95%

Del Cuadro 12 se puede inferir que existen diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento Control y los tratamientos ↓N, -B, -P, y -K, ya que estos tratamientos presentan un valor asintótico menor al reportado por el Control, dando como resultado que los déficit de estos cuatro elementos fueron los que limitaron fuertemente el crecimiento en altura de la especie *E. grandis*. De igual manera existen diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento Control y los tratamientos -S, -Cu y -Mn, los cuales reportan un valor asintótico superior al del tratamiento control, lo que indica que no afectaron el crecimiento en altura de las plantas, sino que por el contrario superaron el promedio de altura de los individuos fertilizados con la solución completa. Adicionalmente,

no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -Ca, -Mg, -Fe -Zn, lo que indica que las deficiencias de estos elementos tampoco afectaron el incremento en altura de los individuos de *E. grandis*.

Estos resultados coinciden con el estudio realizado por Silveira *et al* (2002), quienes reportan que híbridos de *E. grandis* con *E. urophylla* que fueron sometidos a deficiencias de N, P, K, y B, presentaron retrasos y/o parálisis del crecimiento en altura, con respecto al tratamiento control, mientras que las plantas deficientes de S, no sufrieron alteraciones negativas en su crecimiento.

Para ejemplificar el ajuste que ofrece este modelo a los datos de crecimiento en altura, se ilustran algunos árboles de diferentes tratamientos con el modelo de Richards donde se observan los datos observados de altura en forma de puntos y los valores ajustados de altura en forma de línea (Anexo I), determinando que efectivamente el modelo de efectos mixtos usando el modelo de Richards explica el comportamiento en altura de la plántulas de *E. grandis* sometidas a deficiencias de macro y micronutrientes.

3.3.2 Crecimiento en diámetro al cuello de la raíz (DCR). Para la modelación de esta variable se usó el mismo modelo que se ajustó al crecimiento en altura, este es el modelo no lineal de efectos mixtos con la fórmula de Richards (ver ecuación 1), de igual forma se hizo inferencia estadística en el valor de la asíntota del modelo para cada tratamiento a la hora de determinar la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

- ***Pinus tecunumanii*.** Tras realizar la depuración de las bases de datos para esta variable el total de registros de DCR fue de 2395 en todos los tratamientos, en todas las mediciones. Para esta modelación se eliminaron datos de los individuos que se vieron afectados en la fase de campo y los registros que tenían una sola medición. Los gráficos de interacciones entre los tratamientos y las edades de medición para esta variable se presentan en las Figuras 39 y 40.

La Figura 39 muestra que realmente existe una interacción entre los tratamientos y la edad de medición para el crecimiento de DCR, observándose que a través del tiempo la respuesta de este no es la misma debido a la influencia de las deficiencias de los nutrientes con respecto al tratamiento control. Se observa que bajo las condiciones del experimento en las primeras mediciones no se evidenciaron cambios drásticos en el DCR, pero a partir de los 98 días de edad de medición, se nota un distanciamiento de las mediciones de DCR, como es el caso de los tratamiento ↓N que queda retrasado con respecto a tratamientos como Control, Ca, S y Mn que crecen a un ritmo similar.

Es evidente que hacia el final del periodo de mediciones los tratamientos ↓N, P y K, son los que presentan los más bajos incrementos en DCR, mientras que tratamientos como Ca, Mg, Mn y S alcanzan valores similares y superiores al tratamiento control.

Figura 39. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable DCR para *Pinus tecunumanii*.

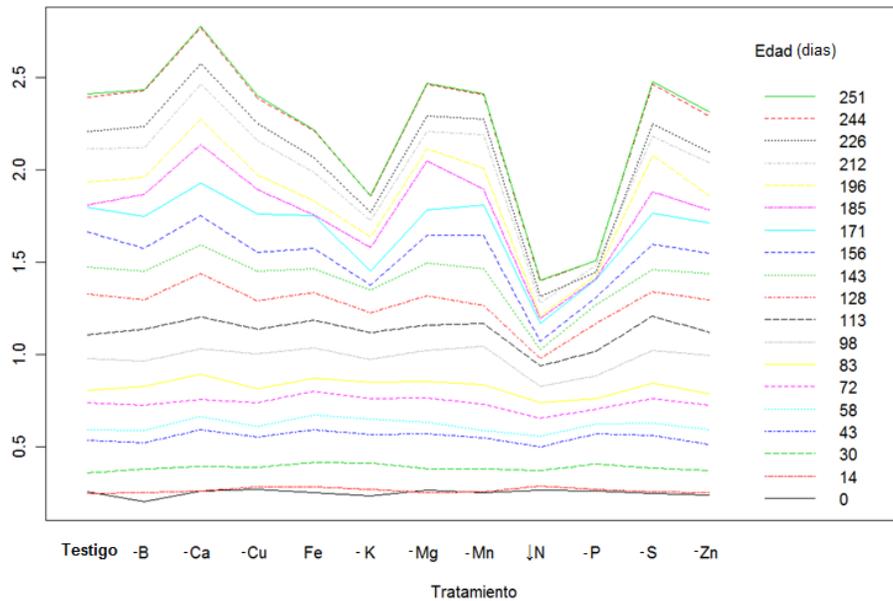
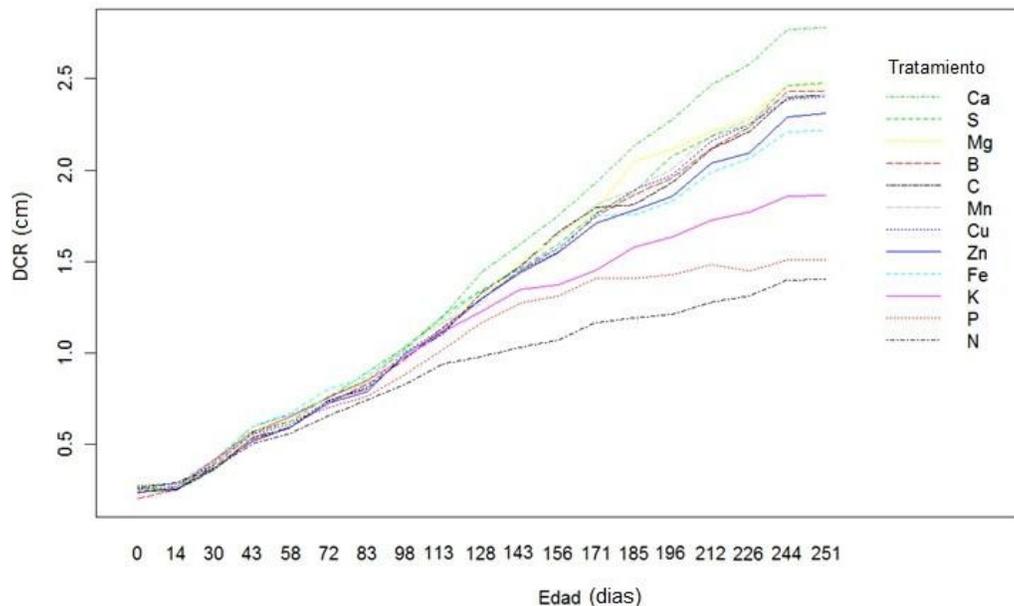


Figura 40. Incremento promedio en DCR por edades de medición en la especie *Pinus tecunumanii* para cada uno de los tratamientos



La Figura 40, muestra como las pendientes en las curvas de crecimiento en DCR son diferentes para los distintos tratamientos. Se determinó que los tratamientos ↓N, -P, -K, son los que obtuvieron incrementos más bajos en DCR al final del ensayo con 1.40, 1.51 y

1.86 cm respectivamente en relación al tratamiento control que reportó un promedio de DCR de 2.42 cm, mientras que los tratamientos Ca, -S, -Mg y -B, reportaron DCR promedio mayor al del reportado por el testigo. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Lozada y Zambrano (1991), quienes en su ensayo de nutrición en plántulas de *Pinus patula*, también reportaron que los individuos sometidos a deficiencias de P, N y K, alcanzaron los más bajos incrementos en DCR, mientras que las plantas deficientes de S y Ca superaron el promedio alcanzado por el control.

Para visualizar el comportamiento del diámetro al cuello de la raíz con respecto a la edad de medición y la tendencia no lineal con la que crece, se realizaron gráficos de dispersión de DCR en función de la edad para cada tratamiento con los arboles disponibles. Los resultados se muestran en la Figura 41.

Figura 41. Gráfico de dispersión del comportamiento del DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*

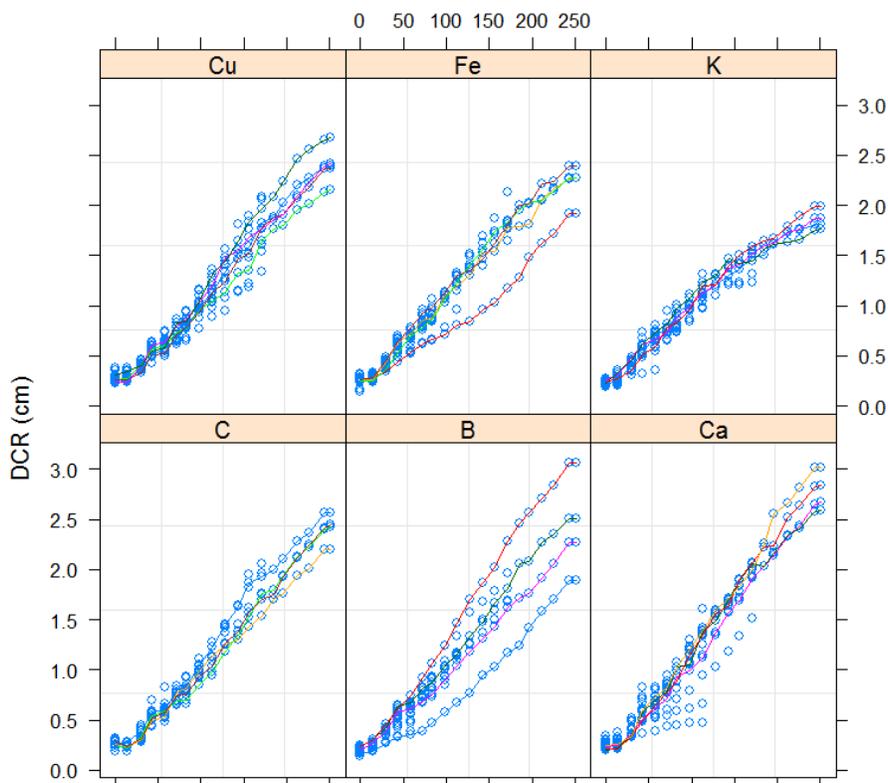
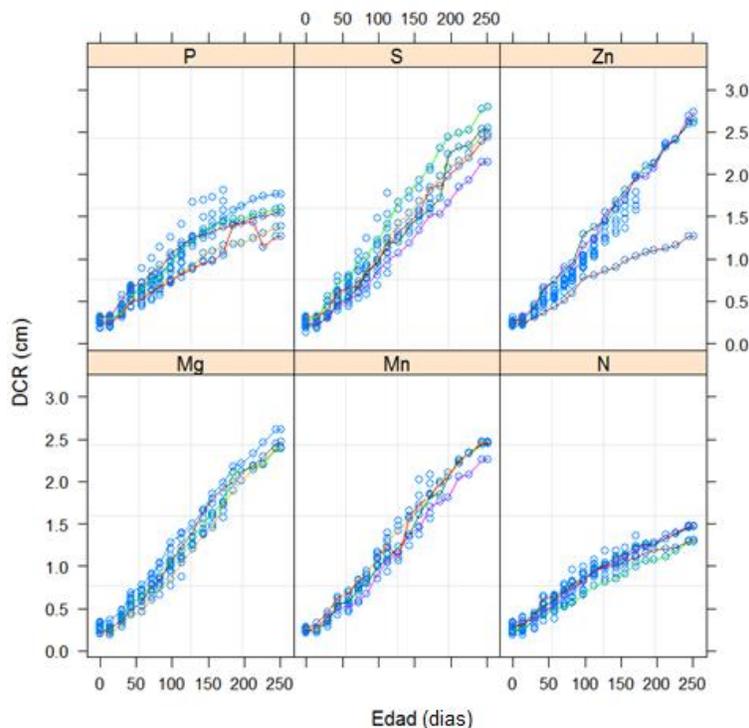


Figura 40. Continuación



En la Figura 41 se observan árboles que no siguen el patrón de crecimiento de la mayoría, pero esto hace parte de la variabilidad intrínseca de las plántulas, también se aprecia como algunos tratamientos cambian su patrón de crecimiento y llegan rápidamente a comportamientos asintóticos comparados con el tratamiento control como es el caso de los tratamientos $\downarrow N$ y $-P$. En el caso del tratamiento Control, el crecimiento del DCR sigue una tendencia lineal con la edad.

En la evaluación del efecto de los tratamientos en el crecimiento en DCR para *P. tecunumanii*, nuevamente se empleó el modelo de Richards descrito anteriormente. La modelación de esta variable a través del modelo no lineal de efectos mixtos permitió determinar las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a través del valor de la asíntota de cada uno de los modelos. En el Anexo J se muestra un resumen de los estimados para los valores de cada uno de los parámetros del modelo de crecimiento en DCR para la especie *Pinus tecunumanii*.

El Cuadro 13 presenta el modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p -valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para el incremento en DCR para cada tratamiento.

Cuadro 13. Modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*

Tratamiento	Modelo de Richards $y = c+a(1-\exp(-k*t))^m$	Valor Asíntota	p-valor
Testigo	$y = 0.24084+4.70267(1-\exp(0.00398*t))^{1.63165}$	4.70267	< 0.0001*
↓N	$y = 0.24084+1.40551(1-\exp(0.00512*t))^{1.63165}$	1.40551	< 0.0001*
-P	$y = 0.24084+1.59875(1-\exp(0.00554*t))^{1.63165}$	1.59875	< 0.0001*
-K	$y = 0.24084+1.77377(1-\exp(0.00506*t))^{1.63165}$	1.77377	< 0.0001*
-Ca	$y = 0.24084+4.47496(1-\exp(0.00071*t))^{1.63165}$	4.47496	0.5452
-Mg	$y = 0.24084+3.82893(1-\exp(0.00100*t))^{1.63165}$	3.82893	0.0216*
-S	$y = 0.24084+4.13449(1-\exp(0.00069*t))^{1.63165}$	4.13449	0.1295
-B	$y = 0.24084+4.34028(1-\exp(0.00017*t))^{1.63165}$	4.34028	0.3753
-Cu	$y = 0.24084+4.12374(1-\exp(0.00061*t))^{1.63165}$	4.12374	0.1222
-Fe	$y = 0.24084+3.17953(1-\exp(0.00188*t))^{1.63165}$	3.17953	< 0.0001*
-Mn	$y = 0.24084+4.29252(1-\exp(0.00039*t))^{1.63165}$	4.29252	0.3078
-Zn	$y = 0.24084+3.48441(1-\exp(0.00096*t))^{1.63165}$	3.48441	0.0011*

*Significativo a un 95%

Existen diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento control y los tratamientos ↓N, -P, -K, -Mg, -Fe y -Zn, dado que su valor asíntótico es menor al reportado para el tratamiento control, siendo los individuos sometidos a déficit de N, P y K los más afectados en su desempeño en DCR. Por otra parte no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -Ca, -S, -B, -Cu, y -Mn, indicando que las plantas de estos tratamientos se comportaron en cuanto al crecimiento en DCR de forma similar a las plantas del tratamiento Control.

Para mostrar el ajuste que ofrece este modelo a los datos de crecimiento en DCR, se ilustran algunos árboles de *P. tecunumanii* de diferentes tratamientos con el modelo de Richards donde se observan los datos observados de DCR en forma de puntos y los valores ajustados en forma de línea (Anexo K), determinando que efectivamente el modelo no lineal de efectos mixtos usando la fórmula de Richards explica el comportamiento en DCR de las plántulas de *P. tecunumanii* sometidas a déficit de macro y micronutrientes.

- ***Eucalyptus grandis***. Después de realizar los análisis exploratorios de la base de datos de DCR, se tuvo un total de registros de 2395 en todos los tratamientos, en todas las mediciones. Para esta modelación se eliminaron datos de los individuos que registraban una sola medición, los gráficos de interacciones entre los tratamientos y las edades de medición que se generaron para esta variable se presentan en las Figuras 42 y 43.

Figura 42. Interacción entre los tratamientos y la edad de medición en la variable DCR para *E. grandis*.

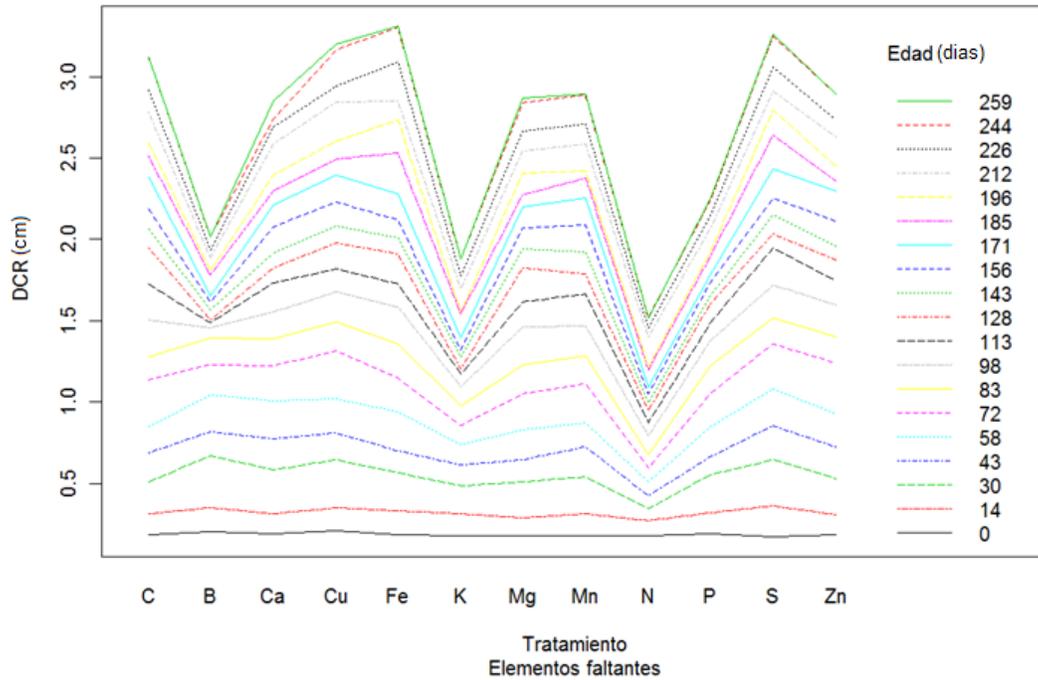
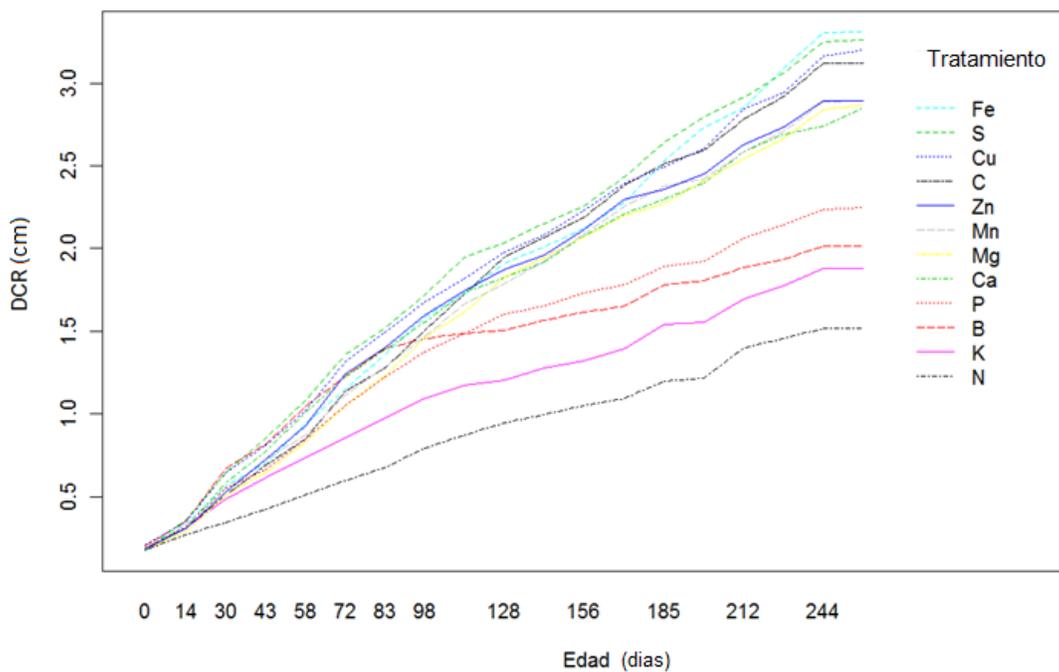


Figura 43. Incremento promedio en DCR por edades de medición en la especie *E. grandis* para cada uno de los tratamientos evaluados



La Figura 42 muestra que realmente existe una interacción entre los tratamientos y la edad de medición para el crecimiento de DCR en *E. grandis*, se observa que a través del tiempo la respuesta este no es la misma debido a la influencia de las deficiencias de los nutrientes con respecto al tratamiento control.

Bajo las condiciones de este ensayo se identificó que a partir de los 43 días ya se evidenciaban cambios drásticos en el comportamiento del DCR, siendo el tratamiento ↓N el primero en responder de forma negativa al déficit de este nutriente, mientras que tratamientos como el Control, -Cu, -Mn y -S presentaron un comportamiento similar a lo largo del periodo de medición.

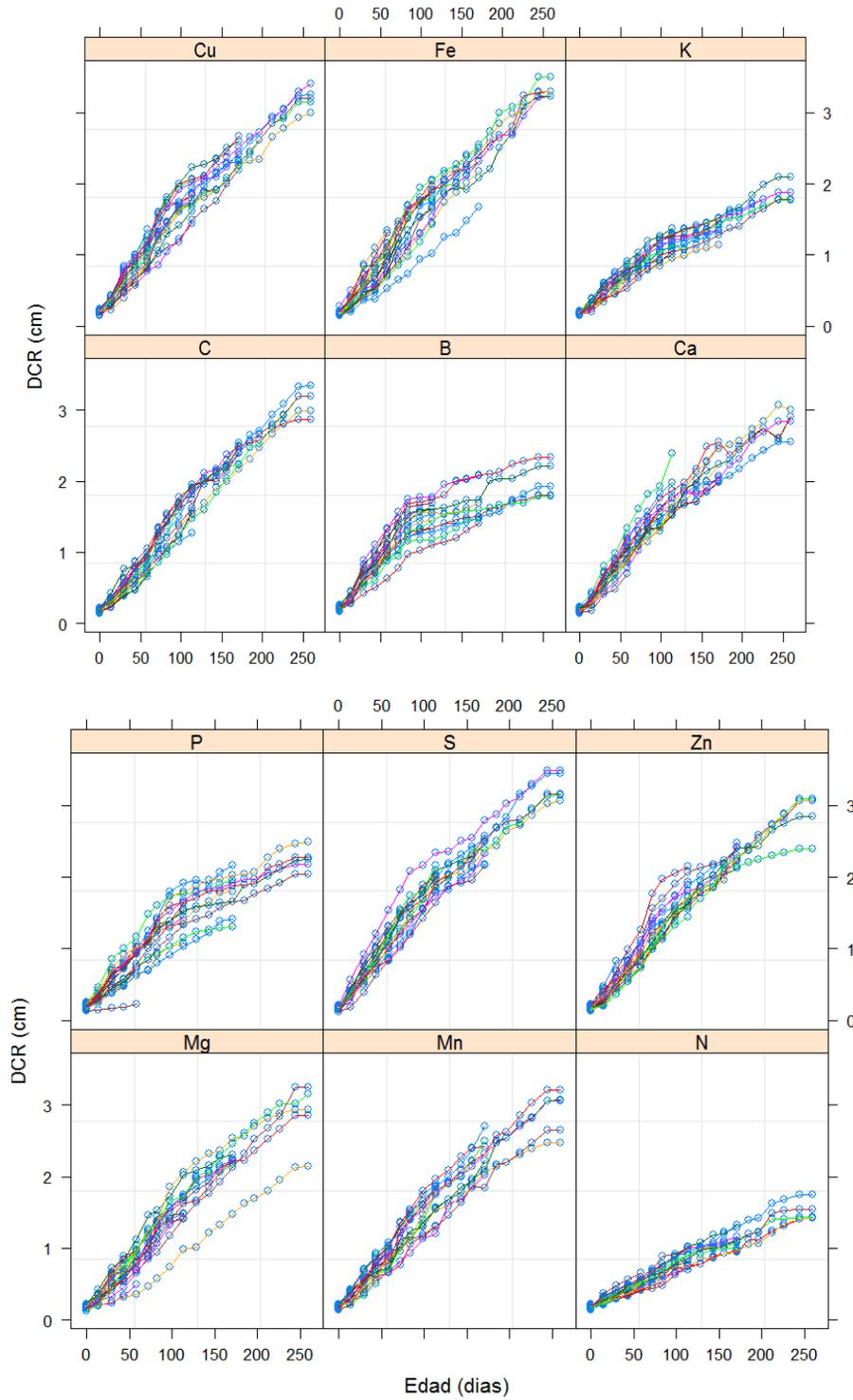
En el caso específico del tratamiento -B, se observa que hasta la edad de medición de 98 (días), presentó un crecimiento de DCR similar al del control, pero después de este tiempo se nota un estancamiento que se prolongó hasta el final del ensayo.

Es evidente que hacia el final del periodo de mediciones los tratamientos ↓N, -K, y -B son los que presentan los más bajos incrementos en DCR, mientras que tratamientos como -Fe y -S alcanzan valores similares y superiores al tratamiento control.

La Figura 43 muestra como las pendientes en las curvas de crecimiento en DCR son diferentes para los distintos tratamientos. Se observa que los tratamientos ↓N, -K, -B y -P presentaron los menores incrementos de DCR al final del ensayo con 1.52, 1.88, 2.02, 2.25 cm respectivamente en relación al tratamiento control que reportó un promedio de DCR de 3.12 cm, mientras que los tratamientos -S, -Cu y -Fe, reportaron DCR promedio mayor a del reportada por el testigo.

Para visualizar el comportamiento del diámetro al cuello de la raíz con respecto a la edad de medición y la tendencia no lineal con la que crece, se realizaron gráficos de dispersión de DCR en función de la edad para cada tratamiento con los arboles disponibles. Los resultados se muestran en la Figura 44.

Figura 44. Gráfico de dispersión del comportamiento del DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*



En la Figura 44 se observan árboles que no siguen el patrón de crecimiento de la mayoría, pero esto hace parte de la variabilidad intrínseca de las plántulas, también se aprecia como algunos tratamientos cambian su patrón de crecimiento y llegan rápidamente a comportamientos asintóticos comparados con el tratamiento control como es el caso de los tratamientos ↓N, -P, -K y -B. En el caso del tratamiento Control, el crecimiento del DCR sigue una tendencia lineal con la edad.

La modelación del crecimiento en DCR a través de un modelo de efectos mixtos permitió determinar las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos a través del valor de la asíntota del modelo en cada uno de los tratamientos evaluados. El Anexo L muestra un resumen de los estimados para los valores de cada uno de los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en DCR para la especie *E. grandis*.

El Cuadro 14 presenta el modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para el incremento en DCR para cada tratamiento.

Cuadro 14. Modelo de Richards obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en DCR en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*

Tratamiento	Modelo de Richards $y = c+a(1-\exp(-k*t))^m$	Valor Asíntota	Significativo a un 95%
Testigo	$y = 0.16587+4.89989(1-\exp(0.00412*t))^{1.20712}$	4.88989	< 0.0001*
↓N	$y = 0.16587+2.33848(1-\exp(-0.00008*t))^{1.20712}$	2.33848	< 0.0001*
-P	$y = 0.16587+1.88549(1-\exp(0.00589*t))^{1.20712}$	1.88549	< 0.0001*
-K	$y = 0.16587+1.87114(1-\exp(0.00409*t))^{1.20712}$	1.87114	< 0.0001*
-Ca	$y = 0.16587+3.12027(1-\exp(0.00308*t))^{1.20712}$	3.12027	< 0.0001*
-Mg	$y = 0.16587+4.37499(1-\exp(0.00030*t))^{1.20712}$	4.37499	0.1080
-S	$y = 0.16587+3.60511(1-\exp(0.00274*t))^{1.20712}$	3.60511	< 0.0001*
-B	$y = 0.16587+1.83182(1-\exp(0.00937*t))^{1.20712}$	1.83182	< 0.0001*
-Cu	$y = 0.16587+4.08987(1-\exp(0.00170*t))^{1.20712}$	4.08987	0.0080*
-Fe	$y = 0.16587+4.66102(1-\exp(0.00056*t))^{1.20712}$	4.66102	0.4607
-Mn	$y = 0.16587+4.65358(1-\exp(0.00025*t))^{1.20712}$	4.65358	0.4729
-Zn	$y = 0.16587+4.5067(1-\exp(0.00062*t))^{1.20712}$	4.5067	0.2353

*Significativo a un 95%

Del Cuadro 14 se puede inferir que existen diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento Control y los tratamientos ↓N, -B, -P, -K, -Ca, -S y -Cu ya que estos tratamientos presentan un valor asintótico menor al reportado por el Control, dando como resultado que los déficit de los cuatro primeros elementos fueron los que limitaron crecimiento en DCR de la especie *E. grandis*. Por otro lado no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -Mg, -Fe, -Mn y -Zn. lo que indica que las deficiencias de estos elementos no afectaron el incremento en DCR de los individuos de *E. grandis*.

Para mostrar el ajuste que el modelo de Richards ofrece a los datos de crecimiento en DCR para esta especie, se ilustran algunos árboles de *E. grandis* de diferentes tratamientos, donde se observan los datos observados de DCR en forma de puntos y los valores ajustados en forma de línea (Anexo M), determinando que efectivamente el modelo no lineal de efectos mixtos usando la fórmula de Richards explica el comportamiento en DCR de las plántulas de *E. grandis* sometidas a déficit de macro y micronutrientes.

3.4 BIOMASA RADICULAR Y ÁEREA

Para evaluar el efecto de los tratamientos en la biomasa aérea y radicular en las dos especies, no fue necesario realizar análisis exploratorios ni depuraciones de las bases de datos. Finalmente se determinaron las diferencias significativas entre los tratamientos evaluados y el tratamiento control a través de la modelación de las variables de respuesta biomasa aérea y radicular.

3.4.1 Biomasa radicular. Para evaluar el efecto de los tratamientos en la producción de biomasa radicular para estas especies se empleó un modelo lineal con interacciones, usando la librería lme de R (Pinheiro, 2011). La forma funcional del modelo lineal se presenta en la ecuación (2)

$$y = mx + b \quad (2)$$

y = variable a estimar (en nuestro caso la producción de biomasa radicular)

m = pendiente

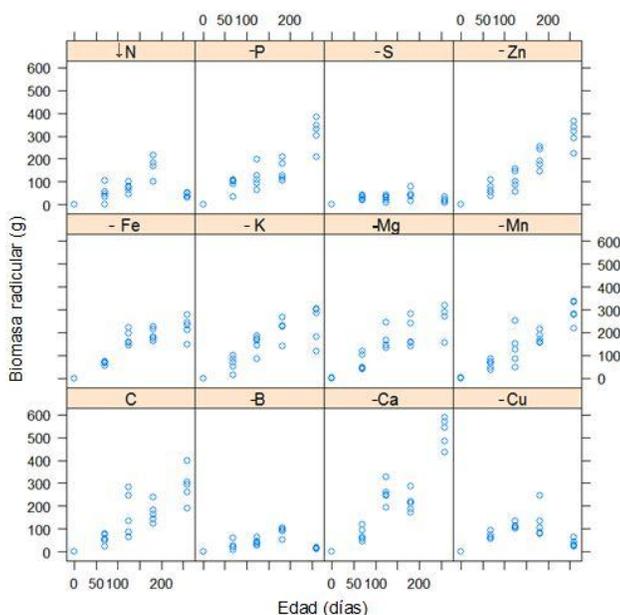
b = intercepto

x = edad de medición

Dado que la modelación de efectos mixtos permite evaluar la significancia de los parámetros del modelo, para cada tratamiento a través del tiempo, en este caso se hace énfasis en la inferencia estadística para los parámetros b (intercepto) y m (pendiente), con la cual se pudo comprobar si existen diferencias significativas estadísticas en la biomasa radicular que alcanzan las plantas de las dos especies sometidas a los diferentes tratamientos hasta la edad máxima de observaciones.

• ***Eucalyptus grandis*.** El total de registros para biomasa radicular en esta especie fue de 300 en todos los tratamientos, en los cinco muestreos realizados. La realización de gráficos de dispersión permitió observar el comportamiento de la producción de biomasa radicular con respecto la edad de observación en cada uno de los tratamientos, los resultados se muestran en la Figura 45.

Figura 45. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*



Después de corroborar que el comportamiento de la biomasa radicular era lineal, se corrió el modelo para cada uno de los tratamientos evaluados, el Anexo N muestra el resumen de los estimados para cada uno de los parámetros del modelo para la biomasa radicular en la especie *Eucalyptus grandis*. El Cuadro 15 presenta el modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para la biomasa radicular en cada tratamiento.

Cuadro 15. Modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas para la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*

Tratamiento	Modelo lineal $y = mx + b$	Valor Pendiente (m)	p-valor	Valor intercepto (b)	p-valor
Testigo	$y = 1.1047x - 8.0765$	1.1047	< 0.0001*	-8.0765	0.6377
↓N	$y = 0.131x + 18.5523$	0.131	< 0.0001*	18.5523	0.2727
-P	$y = 0.2962x + 30.267$	0.2962	< 0.0001*	30.267	0.1146
-K	$y = 0.0803x + 14.3266$	0.0803	< 0.0001*	14.3266	0.3559
-Ca	$y = 1.9081x - 27.2829$	1.9081	< 0.0001*	-27.2829	0.4286
-Mg	$y = 0.9828x + 9.9386$	0.9828	0.4365	9.9386	0.4577
-S	$y = 1.0279x + 9.0913$	1.0279	0.6238	9.0913	0.4791
-B	$y = 0.1852x + 47.1729$	0.1852	< 0.0001*	47.1729	0.0233*
-Cu	$y = 1.1905x - 12.8758$	1.1905	0.5839	-12.8758	0.8431
-Fe	$y = 1.1125x - 7.1135$	1.1125	0.9601	-7.1135	0.9683
-Mn	$y = 1.102x - 3.748$	1.102	0.9865	-3.748	0.8583
-Zn	$y = 0.8883x + 18.894$	0.8883	0.1676	18.894	0.2666

* Significativo a un 95%

y=Biomasa radicular

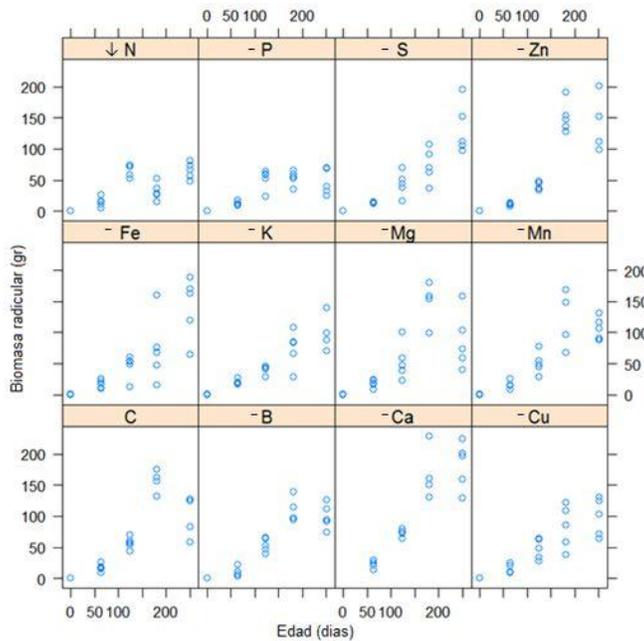
x=Edad de medición

Los tratamientos que muestran un valor en el intercepto (b) y/o en la pendiente de la recta (m), estadísticamente diferente e inferior al del control son los tratamientos que limitaron el peso del sistema radicular en las plantas, para este caso fueron los tratamientos, -K ↓N, -B y -P, también existe una diferencia significativa entre el tratamiento Control y -Ca, pero este reporta un valor mayor en su pendiente comparado al del control lo que significa que los individuos de este tratamiento superaron el promedio de biomasa radicular de los individuos del tratamiento control. Por otro lado no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -Mg, -S, -Cu, Fe, -Mn y Zn, indicando que las plantas de estos tratamientos se comportaron en cuanto a la producción de biomasa radicular de forma similar a las plantas del tratamiento Control.

Para el modelo finalmente seleccionado se muestra gráficamente como este explica los datos y se ilustran algunos árboles de diferentes tratamientos con los datos de biomasa de raíces observados en forma de puntos y los valores ajustados en forma de línea (Anexo O). Es posible determinar que efectivamente este modelo lineal de efectos mixtos explica el comportamiento de la biomasa radicular de las plántulas de *E. grandis*.

• ***Pinus tecunumanii***. El total de registros biomasa radicular fue de 293 en todos los tratamientos, en los cinco muestreos realizados. Inicialmente para observar el comportamiento de la biomasa radicular con respecto la edad de observación y la tendencia lineal que esta presenta se realizaron gráficos de dispersión de la biomasa radicular en función de la edad de observación para cada tratamiento con las plantas disponibles, los resultados se muestran en la Figura 46.

Figura 46. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*



Después de corroborar que el comportamiento de la biomasa radicular era lineal, se corrió el modelo para cada uno de los tratamientos evaluados, en el Anexo P se muestra el resumen de los estimados para los valores de cada uno de los parámetros del modelo para la producción de biomasa radicular para la especie *Pinus tecunumanii*.

El Cuadro 16 presenta el modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para la biomasa radicular en cada tratamiento.

Cuadro 16. Modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas para la biomasa radicular en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*

Tratamiento	Modelo lineal $y = mx + b$	Valor Pendiente (m)	p-valor	Valor intercepto (b)	p-valor
Testigo	$y = 0.5342x - 1.8783$	0.5342	< 0.0001*	-1.8783	0.8489
↓N	$y = 0.2358x + 6.0677$	0.2358	0.0018*	6.0677	0.5673
-P	$y = 0.2111x + 7.1308$	0.2111	0.0007*	7.1308	0.5167
-K	$y = 0.4061x - 3.4718$	0.4061	0.1826	-3.4718	0.9093
-Ca	$y = 0.8074x - 12.3932$	0.8074	0.0040*	-12.3932	0.4508
-Mg	$y = 0.4779x + 2.445$	0.4779	0.5484	2.445	0.7556
-S	$y = 0.5271x - 12.6554$	0.5271	0.9395	-12.6554	0.4380
-B	$y = 0.4764x - 3.9046$	0.4764	0.5377	-3.9046	0.8840
-Cu	$y = 0.4213x - 3.1514$	0.4213	0.2295	-3.1514	0.9270
-Fe	$y = 0.548x - 12.465$	0.548	0.8830	-12.465	0.4461
-Mn	$y = 0.4977x - 3.7697$	0.4977	0.6969	-3.7697	0.8917
-Zn	$y = 0.6815x - 14.9095$	0.6815	0.1256	-14.9095	0.3505

*Significativo al 95%

y=Biomasa radicular

x=Edad de medición

Los tratamientos que muestran un valor en el intercepto y/o en la pendiente de la recta, estadísticamente diferente e inferior al del control son los tratamientos que limitaron el peso del sistema radicular en las plantas, para este caso fueron la omisión de Nitrógeno y Fósforo, también existe una diferencia significativa entre el tratamiento Control y -Ca, pero este reporta un valor mayor en su pendiente comparado al del control lo que significa que los individuos de este tratamiento superaron el promedio biomasa radicular de los del control. Por otro lado no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -K, -Mg, -S, -B, -Cu, Fe, -Mn y Zn, indicando que las plantas de estos tratamientos se comportaron en cuanto a la producción de biomasa radicular de forma similar a las plantas del tratamiento Control.

Para el modelo finalmente seleccionado se muestra gráficamente como este explica los datos y se ilustran algunos árboles de diferentes tratamientos con los datos de biomasa de raíces observados en forma de puntos y los valores ajustados en forma de línea (Anexo Q). Es posible determinar que efectivamente este modelo lineal de efectos mixtos usado explica el comportamiento de la biomasa radicular de las plántulas de *P. tecunumanii*.

3.4.2 Biomasa aérea. Para evaluar el efecto de los tratamientos en la producción de biomasa aérea para estas especies se empleó un modelo lineal para la especie *E. grandis* y un modelo cuadrático para la especie *P. tecunumanii*, usando la librería lme de R (Pinheiro, 2011). La forma funcional del modelo lineal se presentó anteriormente en la ecuación (2) y la forma funcional del modelo cuadrático se presenta en la ecuación (3)

$$y = a + bx + cx^2 \quad (3)$$

y = variable respuesta (en nuestro caso la producción de biomasa aérea)

a = intercepto

b= parámetro del efecto lineal para la edad

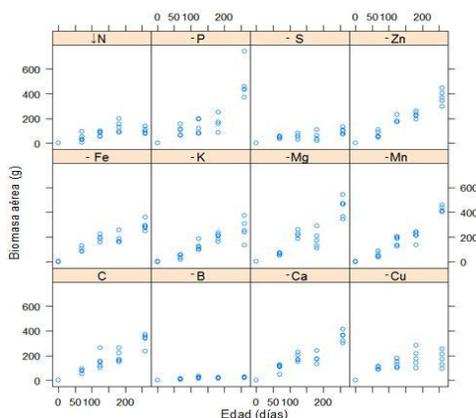
c= parámetro del efecto cuadrático para la edad

x= edad de medición

Dado que la modelación de efectos mixtos permite evaluar la significancia de los parámetros del modelo para cada tratamiento a través del tiempo, en el caso del modelo lineal se hizo énfasis en la inferencia estadística para los parámetros intercepto y pendiente, y para el modelo cuadrático en el parámetro del efecto lineal para la edad (a) y el parámetro del efecto cuadrático para la edad (b), para comprobar si existen diferencias significativas estadísticas en la biomasa aérea que alcanzan las plantas de las dos especies sometidas a los diferentes tratamientos hasta la edad máxima de observaciones.

- ***Eucalyptus grandis*.** El total de registros para biomasa aérea en esta especie fue de 300 en todos los tratamientos, en los cinco muestreos realizados. La realización de gráficos de dispersión permitió observar el comportamiento de la producción de biomasa radicular con respecto a la edad de observación en cada uno de los tratamientos, los resultados se muestran en la Figura 47.

Figura 47. Gráficos de dispersión del comportamiento de la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*



Después de comprobar que el comportamiento de la biomasa radicular era lineal, se corrió el modelo para cada uno de los tratamientos evaluados, el Anexo R muestra el resumen de los estimados para los valores de cada uno de los parámetros de los modelos para la producción de biomasa aérea para la especie *Eucalyptus grandis*.

El Cuadro 17 presenta el modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para la biomasa aérea en cada tratamiento.

Cuadro 17. Modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas para la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en *E. grandis*

Tratamiento	Modelo lineal $y = mx + b$	Valor Pendiente (m)	p-valor m	Valor intercepto (b)	p-valor b
Testigo	$y = 1.5875x - 28.8229$	1.5875	< 0.0001*	-28.8229	0.0959
↓N	$y = 0.0856x + 4.9057$	0.0856	< 0.0001*	4.9057	0.1679
-P	$y = 0.4415x + 15.4869$	0.4415	< 0.0001*	15.4869	0.0704
-K	$y = 0.3192x + 10.1299$	0.3192	< 0.0001*	10.1299	0.1115
-Ca	$y = 1.2366x + 5.5777$	1.2366	0.0267*	5.5777	0.1596
-Mg	$y = 1.0701x - 8.1157$	1.0701	0.0011*	-8.1157	0.3967
-S	$y = 1.5937x - 19.7763$	1.5937	0.9686	-19.7763	0.7110
-B	$y = 0.6602x + 34.4814$	0.6602	< 0.0001*	34.4814	0.0100*
-Cu	$y = 1.4247x - 7.8661$	1.4247	0.3022	-7.8661	0.3910
-Fe	$y = 1.6884x - 34.9646$	1.6884	0.5224	-34.9646	0.8014
-Mn	$y = 1.2315x - 4.0894$	1.2315	0.0246*	-4.0894	0.3115
-Zn	$y = 1.0667x + 21.4292$	1.0667	0.0011*	21.4292	0.0403*

*Significativo a un 95%

y=Biomasa aérea

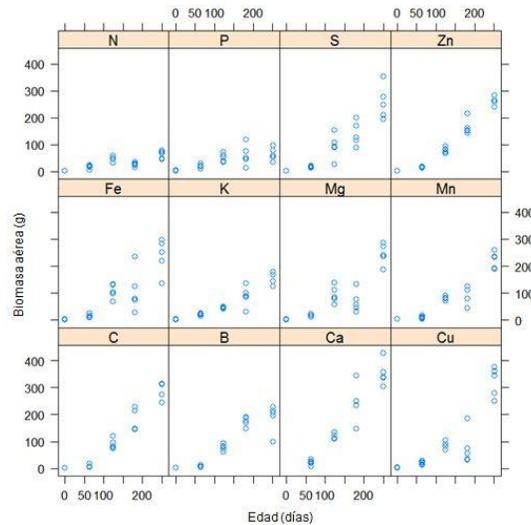
x=Edad de medición

Los tratamientos que muestran un valor en el intercepto y/o en la pendiente de la recta, estadísticamente diferente e inferior al del control son los tratamientos que limitaron el peso del sistema radicular en las plantas, para este caso fueron los tratamientos, ↓N, -K, -P, -B, -Mg, -Mn, -Ca y Zn. Por otro lado no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -S, -Cu y Fe, indicando que las plantas de estos tratamientos se comportaron en cuanto a la producción de biomasa aérea de forma similar a las plantas del tratamiento Control.

Para el modelo finalmente seleccionado se muestra gráficamente como este explica los datos y se ilustran algunos árboles de diferentes tratamientos con los datos de biomasa aérea observados en forma de puntos y los valores ajustados en forma de línea (Anexo S). Es posible determinar que efectivamente este modelo lineal de efectos mixtos usado explica el comportamiento de la biomasa aérea de las plántulas de *E. grandis*.

• ***Pinus tecunumanii***. El total de registros para biomasa aérea en esta especie fue de 293 en todos los tratamientos, en los cinco muestreos realizados. La realización de gráficos de dispersión permitió observar el comportamiento de la producción de biomasa radicular con respecto a la edad de observación en cada uno de los tratamientos, los resultados se muestran en la Figura 48.

Figura 48. Gráfico de dispersión del comportamiento de la biomasa aérea en cada uno de los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*



Después de observar el comportamiento de la biomasa aérea, se corrió el modelo para cada uno de los tratamientos evaluados, el Anexo T muestra el resumen de los estimados para los valores de cada uno de los parámetros del modelo para la producción de biomasa aérea para la especie *P. tecunumanii*.

El Cuadro 18 presenta el modelo lineal obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas (p-valor), entre cada uno de los tratamientos evaluados con respecto al tratamiento control, expresando además el modelo reescrito para la biomasa aérea en cada tratamiento.

Cuadro 18. Modelo cuadrático obtenido para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas para la biomasa aérea entre los tratamientos evaluados en *P. tecunumanii*

Tratamiento	Modelo lineal $y=a+bx+cx^2$	Intercepto (a)	p-valor a	Parámetro lineal (b)	p-valor b
Control	$y=12.4014+0.5397x+0.0026x^2$	-12.4014	0.3425	0.5397	< 0.0001*
↓N	$y=25.0559-0.4396x+0.0026x^2$	25.0559	0.0388*	-0.4396	< 0.0001*
-P	$y=27.4445-0.3875x+0.0026x^2$	27.4445	0.0280*	-0.3875	< 0.0001*
-K	$y=7.5813-0.0495x+0.0026x^2$	7.5813	0.2724	-0.0495	< 0.0001*
-Ca	$y=-15.8778+0.8317x+0.0026x^2$	-15.8778	0.8478	0.8317	0.0177*
-Mg	$y=-2.2881+0.2217x+0.0026x^2$	-2.2881	0.5755	0.2217	0.0096*
-S	$y=-4.314+0.3685x+0.0026x^2$	-4.314	0.6543	0.3685	0.1613
-B	$y=3.507+0.2123x+0.0026x^2$	3.507	0.3786	0.2123	0.0077*
-Cu	$y=-19.2015+0.4897x+0.0026x^2$	-19.2015	0.7065	0.4897	0.6822
-Fe	$y=1.9889+0.259x+0.0026x^2$	1.9889	0.4257	0.259	0.0220*
-Mn	$y=-3.0707+0.1771x+0.0026x^2$	-3.0707	0.6054	0.1771	0.0032*
-Zn	$y=-9.1717+0.4305x+0.0026x^2$	-9.1717	0.8586	0.4305	0.3816

Significativo a un 95% y=Biomasa aérea x=Edad de medición 0.0026 $x^2 = < 0.0001^$

Los tratamientos que muestran un valor estadísticamente diferente y superior en el intercepto y/o un valor estadísticamente diferente e inferior en el parámetro lineal de la edad con respecto al control, son los tratamientos que limitaron la biomasa aérea en las plantas, para este caso fueron los tratamientos, ↓N, -K, -P, -Mg, -B, -Fe y -Mn, mientras que el tratamiento -Ca, reporta un valor b superior al del control, reportando una producción de biomasa aérea mayor al testigo. Por otro lado no existen diferencias significativas entre el tratamiento control y los tratamientos -S, -Cu y -Zn, indicando que las plantas de estos tratamientos se comportaron en cuanto a la producción de biomasa aérea de forma similar a las plantas del tratamiento Control.

Para el modelo finalmente seleccionado se muestra gráficamente como este explica los datos y se ilustran algunos árboles de diferentes tratamientos con los datos de biomasa aérea observados en forma de puntos y los valores ajustados en forma de línea (Anexo U). Es posible determinar que efectivamente este modelo lineal de efectos mixtos usado explica el comportamiento de la biomasa aérea de las plántulas de *P. tecunumanii*.

4. CONCLUSIONES

La especie más afectada por las deficiencias nutricionales fue el *Eucalyptus grandis*, ya que presentó la mayoría de síntomas que se esperaban y se vio afectada en los tres atributos morfológicos evaluados, altura, diámetro al cuello de la raíz y biomasa.

La variable más susceptible ante deficiencias nutricionales bajo las condiciones de este ensayo fue el crecimiento en altura, siendo el daño a nivel morfológico más claro manifestado por las dos especies evaluadas.

Las deficiencias de los macronutrientes Nitrógeno, Potasio, Fósforo y Magnesio, en plantas de *Eucalyptus grandis* expresaron síntomas marcados en sus hojas basales como clorosis generalizada en el caso de la deficiencia de Nitrógeno, clorosis y necrosis marginal en el caso de la deficiencia de Potasio, clorosis intervenal en el caso de la deficiencia de Mg; coloraciones púrpura y secamiento de hojas en el caso de déficit de Fósforo.

En la especie *E. grandis*, las deficiencias de los elementos Cobre, Hierro, Calcio, Manganeso y Zinc, indujeron síntomas en las hojas más jóvenes y en el caso del Boro en las yemas terminales. Se evidenciaron síntomas como clorosis en el caso del Hierro, Manganeso, Calcio y Zinc, y coloraciones rojizas, acompañadas de acostillamiento, secamiento de hojas y muerte de yemas terminales por déficit de Boro.

En las plantas de *Pinus tecunumanii* las deficiencias de Nitrógeno, Potasio y Fósforo fueron las que expresaron más claramente los síntomas visuales en sus acículas maduras, con síntomas como la clorosis generalizada por deficiencia de Nitrógeno, clorosis y necrosis en las puntas de las acículas por deficiencia de Potasio, así como coloración púrpura-rojiza y secamiento de agujas en el caso del Fósforo.

Bajo las condiciones de este ensayo no fue posible visualizar síntomas de deficiencia de los elementos Magnesio, Azufre, Cobre y zinc en las plántulas de *Pinus tecunumanii*.

La omisión de los macroelementos N, P y K en la solución nutritiva, limitó fuertemente el crecimiento en altura, en diámetro al cuello de la raíz y la biomasa de las plantas de *Pinus tecunumanii* y *Eucalyptus grandis*, mostrando en los tres casos plantas de aspecto desmedrado, achaparrado y con poco desarrollo foliar.

Gracias al modelo no lineal de efectos mixtos con la fórmula de Richards se logró establecer las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados y el tratamiento control en las variables crecimiento en altura y diámetro al cuello de la raíz de las plántulas de *Eucalyptus grandis* y *Pinus tecunumanii*.

Con el modelo lineal y cuadrático se pudo determinar las diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados y el tratamiento control en las variables Biomasa aérea y biomasa radicular de las plántulas de *Eucalyptus grandis* y *Pinus tecunumanii*.

Los análisis foliares realizados en esta investigación, permitieron determinar los niveles foliares de los elementos evaluados en las especies *Pinus tecunumanii* y *Eucalyptus grandis*, respaldando el diagnóstico visual descrito en esta investigación.

Esta investigación es clave para la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia, debido a que provee herramientas útiles para la identificación de deficiencias nutricionales de plántulas en etapa de vivero, que puedan ser corregidas antes de llevarlas a campo.

La evaluación de las variables morfológicas altura y diámetro en este estudio fue de vital importancia, ya que permitió determinar el grado de afectación causado por las deficiencias nutricionales en estos parámetros que son de vital importancia en la determinación de la calidad de una planta en la fase de vivero, que es esencial en la determinación del material vegetal que será destinado a las plantaciones forestales de la compañía.

Los análisis foliares realizados en este ensayo, servirán para establecer rangos de niveles de deficiencias, con el fin de aportar a otros estudios de nutrición mineral una comparación en la determinación de los niveles foliares deficientes en las plantas de *P. tecunumanii* y *E. grandis*.

Los registros fotográficos de la sintomatología visual causada por deficiencias nutricionales conseguidos con este ensayo, representan una herramienta teórico-práctica en el diagnóstico de deficiencias nutricionales, no solo para el Vivero Rancho Grande, sino para los viveristas que se dedican a la producción de estas especies.

La fertilización adecuada se debe escoger de acuerdo a la especie y a las necesidades que se tengan con la especie, ya que no todas responden de la misma manera a un esquema de fertilización, ni a la aplicación de las diferentes fuentes fertilizantes.

5. RECOMENDACIONES

Este estudio se puede emplear como referente para recomendar estudios posteriores donde se pueda determinar los valores óptimos a aplicar en una solución nutritiva en especies de *Eucalyptus grandis* y *Pinus tecunumanii* y así garantizar la calidad del material vegetal que sale del vivero.

Se recomienda ejecutar ensayos de nutrición mineral controlada cambiando de material vegetal proveniente de semilla a material clonal, esto para probar si existen diferencias en el crecimiento debido a la variabilidad intrínseca que tiene el material de semilla versus una muestra más homogénea genéticamente. Esto se justifica en la medida que se tiene gran cantidad de material clonal en el Vivero Rancho Grande.

Se recomienda para futuros ensayos iniciar la fertilización con las diferentes soluciones nutritivas (tratamientos), una vez germine la semilla y no aplicar ningún tipo de fertilizante diferente al que se vaya a evaluar, con el fin de no aumentar las reservas de nutrientes de las plantas y por lo tanto no retrasar la aparición de los diferentes síntomas visuales.

Se recomienda realizar análisis foliares sectorizando la planta y tomando muestras de cada órgano, para generar información acerca de niveles foliares óptimos y deficientes en cada parte de la planta en las especies *Eucalyptus grandis* y *Pinus tecunumanii*.

Se recomienda buscar asesoramiento para la interpretación de los resultados de los análisis foliares, ya que al ser una herramienta tan valiosa en el diagnóstico de problemas de nutrición, requiere de habilidad y experiencia en su interpretación.

BIBLIOGRAFÍA

ALMENDROS, R., RICO, M., LÓPEZ-VALDIVIA, I. y ALVAREZ, J. Deficiencia de zinc en los cultivos y correctores de carencia del micronutriente. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Química y Análisis Agrícola. España. 2008. p. 12-16

BARBAZÁN, M. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes. Universidad de la República Facultad de Agronomía. Uruguay. 1998. 17p.

BIGO DE GROSSO, M. y GARCÍA DE PUSTERLA, Sonia. Hidroponía: cultivo de plantas sin tierra. 2001. p. 178-183.

BOTANICAL-ONLINE. Deficiencias de nutrientes en las plantas. [En línea] [Citado en 1 Febrero de 2012]. 1999. 1p. Disponible en internet: <http://www.botanical-online.com/deficienciadenutrientes.htm>

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. Silvicultura de Especies Promisorias para Producción de Leña en América Central. Costa Rica, 1986. Pag. 127 En Línea. Citado en 14 septiembre de 2011. Disponible en internet: http://books.google.com.co/books?id=cm4OQAIAAJ&pg=PA127&dq=eucalyptus+grandis+y+su+importancia&hl=es&ei=oPlwTv6wlsCtgf5ylmXCg&sa=X&oi=book_result&ct=book_thumbnail&resnum=2&ved=0CDAQ6wEwAQ#v=onepage&q=grandis&f=false

CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. Grandis, (*Eucalyptus grandis*). Especie de Árbol de Uso Múltiple en América Central. Colección de Guías Silviculturales N° 15. Costa Rica, 1994. 34 p. [En línea]. [Citado en 1 Junio de 2010]. Disponible en internet: http://books.google.com.co/books?id=8eeJHZXn8r0C&printsec=frontcover&dq=eucalyptus+grandis&hl=es&ei=jCZxTvmnH8LDgQfMr6WNBQ&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDQQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false

CATIE. Manejo de semillas de 100 especies forestales de América Latina. Volumen 1. Proyecto de semillas forestales. Manual técnico n° 41. Costa Rica, 2000. [En línea]. [Citado en 1 junio de 2010]. p. 23-24 disponible en internet: http://books.google.com/books?id=ineoaqaaiaaj&printsec=frontcover&dq=pinus+tecunuma ni&hl=es&source=gbs_similarbooks_s&cad=1#v=onepage&q&f=false

CATIE. Árboles de Centroamérica: Un manual para extensionistas. Costa Rica. 2003. [En línea] [Citado en 1 junio de 2010] p. 771-774. Disponible en internet: http://books.google.com/books?id=q0naqaaiaaj&printsec=frontcover&dq=editions:ws_3vup

i4zgc&hl=es&source=gbs_similarbooks_s&cad=1#v=onepage&q=pinus%20tecunumanii &f=false.

CENTRO DE INVESTIGACION TROPICAL DE HIDROPONIA (CITHI). Generalidades. Principios básicos de los cultivos hidropónicos. Centro de investigación tropical de hidroponía. Cali, Colombia. 1989. p. 69.

COY, A. La fertilización forestal en los trópicos. En: Foro sobre nutrición y fertilización forestal. CONIF. Bogotá D.C. Junio 26 y 27 de 1980. p 21.

DAVEY, C. Crecimiento de los árboles y los elementos nutrientes esenciales. En: fertilización forestal en el Valle del Cauca. Investigación forestal. Cartón de Colombia. Cali, Colombia. 1983. p. 14.

DELL, B. Diagnosis of nutrient deficiencies in Eucalyptus. School of Biological and environment Sciences, Murdoch University. In: Nutrition of eucalyptus. Australia. 1996

DELL, B and ROBINSON, J. Symptoms of mineral nutrient deficiencies and the nutrient concentration ranges in seedlings of Eucalyptus maculate Hook. Plant and soil. 1993

DE ROCHA FILHO, J.V., HAAG, H. and OLIVEIRA G. Deficiencia de macronutrientes, boro e ferro em *Eucalyptus urophylla*. Anais de Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Brasil. 1978. p 19.

DICKENS, D. Y MCELVANY B. Fertilización de plantaciones de pino. 2003. 5p

DVORAK, W., HODGE, G., GUTIERREZ, E., OSORIO, L., MALAN, F. and STANGER, T. *Pinus tecunumanii*. In: Conservation & testing of tropical & subtropical forest Tree Species by the CAMCORE COOPERATIVE. College of natural resources. USA, 2000b. p.188-209, citado por Álvarez D. Potencial de crecimiento radical y evaluación de otros parámetros morfo-fisiológicos en plantas de vivero de *Pinus tecunumanii* eguiluz & J.E. Perry y *Pinus maximinoi* H.E. Moore. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales. 2006. p.7.

DVORAK, W. *Pinus tecunumanii* Eguiluz & J.E. Perry. In: Part II Species descriptions of: tropical tree seed manual. United States Department of Agriculture, Forest Service, 2003. 899 p. Citado por Álvarez, D. Potencial de crecimiento radical y evaluación de otros parámetros morfo-fisiológicos en plantas de vivero de *Pinus tecunumanii* Eguiluz & J.E. Perry y *Pinus maximinoi* H.E. Moore. Trabajo de grado para optar la título de Ingeniero

Forestal. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales, 2006. p.7.

EL SEMILLERO. Adaptación, usos, madera, vivero, rendimientos y silvicultura de 95 especies forestales. Colombia. 2010. [En línea]. [Citado 10 de Junio de 2010] Disponible en: http://elsemillero.net/nuevo/semillas/eucalipto_grandis.html.

ESCOBAR, Rene. Manual de viverización de *Eucalyptus globulus* a raíz cubierta. Proyecto INNOVA Chile. Desarrollo de estándares de origen de la semilla y calidad de la planta para el aumento de la productividad en plantaciones y bosques naturales. Chile. 2007. 213 p.

GOBERNACIÓN DEL VALLE DEL CAUCA, RESTREPO. Nuestro Municipio, Información General, [En Línea], 2011. [Citado en 14 Septiembre de 2011]. Disponible en internet: <http://www.restrepo-valle.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=mlxx-1-&m=f>

GALLEGOS, P., NAVARRO, R. y ALCANTARA E. Deficiencias nutritivas en plantas de una savia de tres especies del genero *Pinus sp* en cultivo hidropónico. Universidad de Córdoba. 2001. 16 p.

GÓMEZ, Hernán. Estadística experimental aplicada las ciencias agrícolas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 1997. ISBN: 958-628-139-6. p. 333-335.

GONÇALVES, J. Recomendações de Adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e Espécies Típicas da Mata Atlântica. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Departamento de Ciências Florestais. Brasil, 1995. 15p.

HERBERT, M. Fertilizers and Eucalypt plantations in South Africa. Institute for commercial forestry research. University of Natal. p. 315-316 In: Nutrition of Eucalypts. Australia. 1996.

HERNÁNDEZ, R. Libro botánica Online. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Venezuela. 2002.

HOAGLAND, D.R. and ARNON, D.I. The water culture method for growing plants without soil. University of California. Agricultural Experimental Station. [En línea]. Circular n° 347. 1950. [Citado en 3 junio de 2010]. 32 p. disponible en internet:http://pmb.berkeley.edu/newpmb/faculty/arnon/hoagland_arnon_solution.

HAWKESFORD, M., HORST, W., KICHEY, T., SCHJOERRING, J., SKRUMNSAGER, M., and WHITE, P. Functions of macronutrients. p. 171. In: Mineral nutrition of higher plants. Petra Marschener. 3th edition. United States of America. 2012.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Mapa Geográfico – Municipio de Restrepo, Citado por ALCALDIA MUNICIPAL DE RESTREPO. Nuestro Municipio. Mapas, [En línea]. Noviembre, 2004. [Citado en 14 Septiembre de 2011]. Disponible en Internet: <http://www.restrepo-valle.gov.co/nuestromunicipio.shtml?apc=mmxx-1-&x=2768244>

KASS, Donald. Fertilidad de suelos. [En línea]. [Citado 10 de Agosto de 2010]. Costa Rica. 1998. p.18-19. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=srua411jhvgc&pg=pa14&dq=funciondel+fosforo+en+las+plantas&hl=es&ei=kbrttjt6i4hglqec2yjpba&sa=x&oi=book_result&ct=bookthumbnail&esnum=2&ved=0cc8q6wewa#v=onepage&q=calcio%20&f=false.

KIRBY, E.A. and RÖMHELD, V. Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility. Proceedings 543, the international fertilizer society. United Kingdom. 2007. p. 9

LANDIS, T.D.; TINUS, R.W.; McDONALD, S.E. y BARNETT, J.P. Fertilización y riego. In: Manual de Viveros para la Producción de Especies Forestales en Contenedor. Departamento de Agricultura, Servicio Forestal. 1989. 119p.

LLANOS, P. La solución nutritiva, nutrientes comerciales, formulas completas. Walco S.A. Bogotá D.C., 2001. 8 p.

LOZADA, C. y ZAMBRANO, J. Respuesta del pino patula (*Pinus patula* Schiede & deppc). Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Forestal. Ibagué: Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Forestal. 1991. 134 p.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic press. Londres. 1986. Citado por: DÍAZ, A.; CAYÓN, G. y MIRA J. Metabolismo del calcio y su relación con la “mancha de madurez” del fruto de banano. Medellín, Colombia, 2007.

MESKIMEN, G and FRANCIS, J. *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. Rose gum *Eucalyptus*. [En línea]. [Citado 12 de Agosto de 2010]. In: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., eds. Silvics of North America: 2. Hardwoods. Agric. Handb. 654. Washington, DC: U.S, 1990 Department of Agriculture, Forest Service: 305-312. Disponible en: <http://www.fs.fed.us/global/iitf/Eucalyptusgrandis.pdf>.

MEYER, S.; ANDERSON, D. y BOLTINING, R. Introducción a la fisiología vegetal. Eudeba. Buenos Aires, Argentina. 1972. p. 131.

NAVARRO, S. y NAVARRO, G. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Mundiprensa. Madrid, España. 2003. p 273-282.

OSPINA, C., HERNANDEZ, R., RODAS, C., URRREGO, B., RIAÑO, N., ARISTIZABAL, F., GODOY, J. Y OSORIO, O. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina de Colombia. El eucalipto. Federación Nacional de Cafeteros-CENICAFE. 2006. p. 4-15.

PIENAAR, L. y TURNBULL, K. The Chapman-Richards Generalization of Von Bertalanffy's Growth Model for Basal Area Growth and Yield in Even – Aged Stands. In Forest Science. Vol 19.1973. p. 5.

PINHEIRO, J., BATES, D. and DEBROY, S. SARKAR, D. The R development core team. nlme: linear and no linear mixed effects models. R package versión 3.1-102. 2011

RESENDES, A. Elementos nutritivos. Asimilación, funciones, toxicidad indisponibilidad en los suelos. [En línea] [Citado 10 de Septiembre de 2010]. 2007. p. 14-16. disponible en:http://books.google.com.co/books?id=kaqx9kmkcyec&pg=pa18&dq=funciondel+fosforo+en+las+plantas&hl=es&ei=kbrttjt6i4hglqec2yjpba&sa=x&oi=book_result&ct=bookthumbnail&resnum=1&ved=0ccsq6wewaa#v=onepage&q&f=false

RESH, Howard. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. Cuarta edición. Ediciones Mundi prensa. España, 1997. ISBN: 84-7114-641-x.

SANCHEZ, J. Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas. Conceptos básicos. FERTITEC S.A. 2000.

SÁNCHEZ, J. Nutrición y fertilización del cultivo de espárragos. Conferencia dictada en: módulo integrado de espárragos y alcachofas. Facultad de Agronomía. UNALM. Lima-Perú. Noviembre, 2005.

SCHALATTER, E. y GERDIN, V. Deficiencias de boro en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. II Principales causas y corrección En: bosque. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Vol. 6. Chile, 1985. p. 37-38. [En línea]. [Citado 20 de Octubre de 2010]. disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=qffhns0kuq0c&pg=pa37&dq=funcion+del+boro+en+l>

as+plantas&hl=es&ei=787ttonomslflgecnrj4ba&sa=x&oi=book_result&ct=bookthumbnail&resnum=2&ved=0cc4q6wewa#v=onepage&q=funcion%20del%20boro%20&f=false.

SELA, G. Smart growing intelligently. Análisis Foliar. 2008

SEMICOL. Ficha técnica *Eucalyptus grandis*. [En línea]. [Citado 10 de Agosto de 2010] disponible en: http://www.semicol.co/semillas/forestalesyornamentales/eucaliptograndis/flypage_new.tpl.html.

SILVEIRA, R., HIGASHI, E., SGARBI, F y ALMEIDA, M. Seja o Doutor do Seu Eucalipto. Informações Agrônômicas Nº 93. Brasil. 2001. 32p

SILVEIRA, R., MOREIRA, A., TAKASHI, E., SGARBI, F.Y BRANCO, E. Síntomas de deficiência de macronutrientes e de boro em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*. Brasil. 2002. 10p.

SILVEIRA, R y GAVA, J. Nutrição e Adubação Fosfatada em *Eucalyptus*. En: YAMADA, T. Y ABDAYLA, R. Fósforo na agricultura brasileira. Associação Brasileira para pesquisa de potasa e do fosfato. Brasil. 2004. 15p.

SILVEIRA, R.L.V.D.A. Informe técnico de la visita a Smurfit Kappa Cartón Colombia. 2009. p. 18-19.

SMITH, W. Patología del árbol, una breve introducción. INDERENA. Bogotá D.C. 1984. p.12.

SMURFIT KAPPA CARTÓN DE COLOMBIA. Folleto informativo del vivero forestal rancho grande. 2008.

SMURFIT KAPPA CARTÓN DE COLOMBIA. Protocolo mini jardín clonal Vivero Forestal Rancho Grande. 2005 10p.

TORRES, M. Funcionamiento del K en el sistema suelo-planta. Biblioteca de fertilidad y fertilizantes en español. 2000. [En línea]. [Citado 22 de Agosto de 2010]. disponible en: <http://www.fertilizando.com/articulos/funcionamiento%20del%20k%20en%20el%20sistema%20suelo-planta.asp>

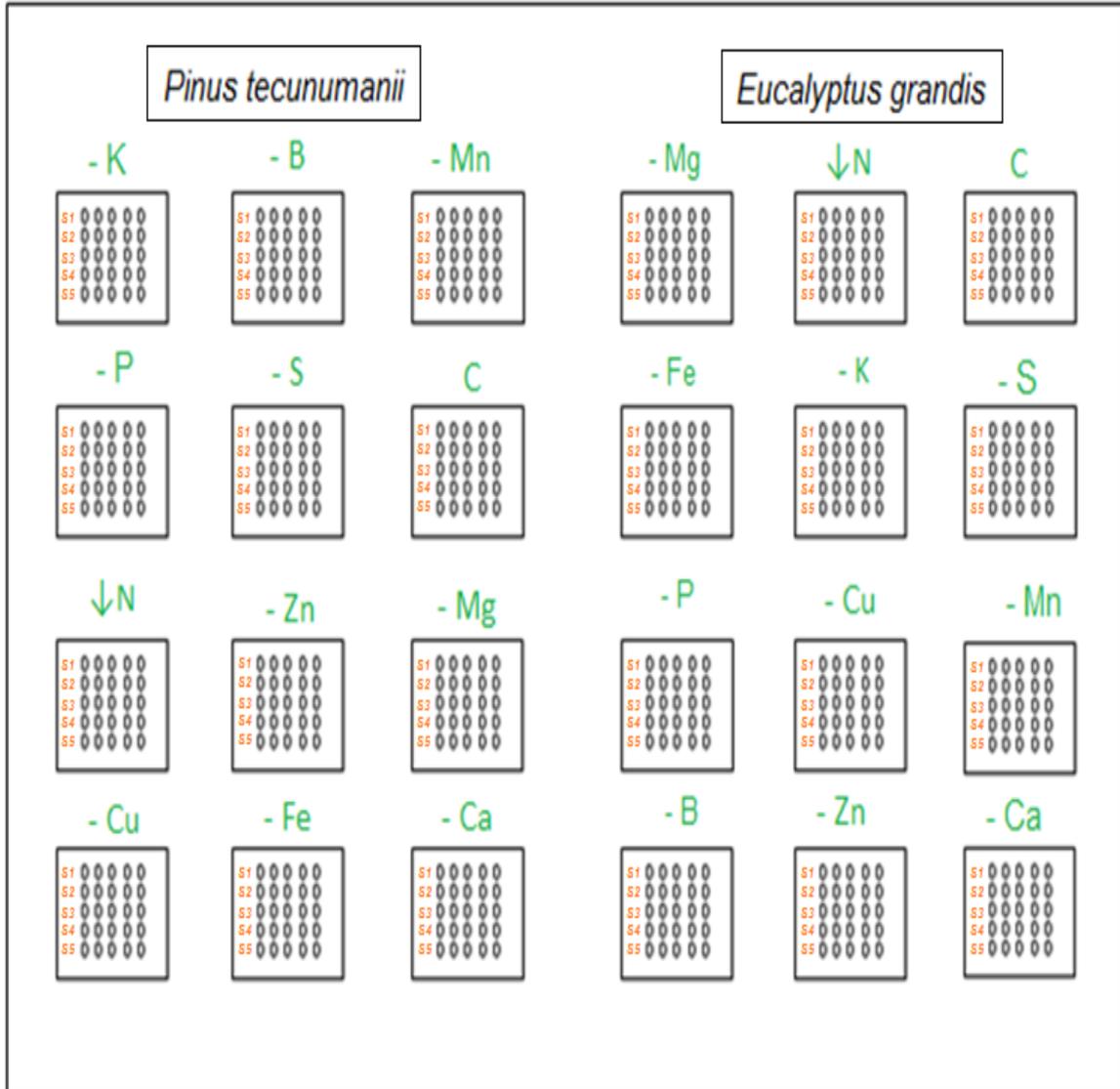
TRUMAN, R. The Detection of Mineral Deficiencies in *Pinus elliotti*, *Pinus radiata* and *Pinus taeda* by Visual Means. Forestry Commission of N.S.W. 1969. 52p.

VELIZ, M., ROSALITO, A. y DAVILA, C. Actualización taxonómica de la flora de Guatemala, Capítulo 1. *Pinophyta* (coníferas). Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Dirección General de Investigación (DIGI). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 2007.

ZAPATA, Mauricio. Modelos de sitio para plantaciones tropicales. Caso de estudio: aplicación de modelos jerárquicos bayesianos. En XVII Simposio Nacional de Estadística. Cali, 2007. p.4.

ZAS, R. Interpretación de las concentraciones foliares en nutrientes en plantaciones jóvenes de *Pinus radiata* D. Don en tierras agrícolas en Galicia. Departamento de Producción Forestal CIFA. España. 2003. 9p.

Anexo A. Distribución en campo del diseño experimental establecido en el ensayo de deficiencia nutricionales en plantas de *E. grandis* y *P. tecunumanii*



S₁: Subparcela 1, S₂: Subparcela 2, S₃: Subparcela 3, S₄: Subparcela 4, S₅: Subparcela 5

Anexo B. Sustancia químicas fertilizantes solubles con sus respectivos elementos aportados usados en la preparación de las diferentes soluciones nutritivas

Tratamientos	Sustancia químicas fertilizantes										Solucion de micronutrientes				
	MAP	KCl	Ca(NO ₃) ₂	MgSO ₄	CaCl ₂	CO(NH ₂) ₂	CaSO ₄	MgCl ₂	Completa	-B	-Cu	-Fe	-Mn	-Zn	
	Cantidad para 100 litros de agua														
Completo	0	0	0	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	
↓N	0	0	-	0	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	
-P	-	0	0	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	
-K	0	-	0	0	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	
-Ca	0	0	-	0	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	
-Mg	0	0	0	-	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-	
-S	0	0	0	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	
-B	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	
-Cu	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	
-Fe	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	
-Mn	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	
-Zn	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	

O: Se utilizó en la solución

-: No se uso

Fuente fertilizante	Fórmula química	% de nutriente proporcionado											
		N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
Nitrato de Calcio	Ca(NO ₃) ₂	15.5	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-
Fosfato Monoamónico	(NH ₄) ₂ PO ₄	11	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cloruro de Potasio	KCl	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfato de Magnesio	MgSO ₄	-	-	-	-	10	13	-	-	-	-	-	-
Cloruro de Calcio	CaCl ₂	-	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-	-
Urea	CO(NH ₂) ₂	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfato de Calcio	CaSO ₄	-	-	-	33.7	-	26.7	-	-	-	-	-	-
Cloruro de Magnesio	MgCl ₂	-	-	-	-	25.5	-	-	-	-	-	-	-
Micronutrientes para la preparación de las soluciones madre (1 L de H ₂ O)*													
Ácido Bórico	H ₃ BO ₃	-	-	-	-	-	-	17.5	-	-	-	-	-
Sulfato de Cobre	CuSO ₄	-	-	-	-	-	13	-	25	-	-	-	-
Hierro Quelatado	NaFeAHEDT	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-
Sulfato de Manganeseo	MnSO ₄	-	-	-	-	-	19	-	-	-	32.5	-	-
Sulfato de Zinc	ZnSO ₄	-	-	-	-	-	18	-	-	-	-	-	20

*Estas soluciones contienen 0.4 g molibdato de sodio

Fuente: LANDIS, 1989

Anexo C. Aporte de cada elemento mineral en cada uno de los tratamientos del ensayo de deficiencias nutricionales en *E. grandis* y *P. tecunumanii*

Tratamiento	Elemento Químico (ppm) en 100 litros de agua										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Completo	80,75	21	100	85,5	25	33,26	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
↓N	11	21	100	60	25	33,26	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
-P	69,75	0	100	85,5	25	33,26	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
-K	80,75	21	0	85,5	25	33,26	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
-Ca	78,5	21	100	0	25	33,26	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
-Mg	49,75	21	100	130,9	0	67,48	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
-S	78,75	21	100	85,5	30,64	0,755	0,525	0,075	1,8	1,04	0,12
-B	80,75	21	100	85,5	25	33,26	0	0,075	1,8	1,04	0,12
-Cu	80,75	21	100	85,5	25	33,26	0,525	0	1,8	1,04	0,12
-Fe	80,75	21	100	85,5	25	33,26	0,525	0,075	0	1,04	0,12
-Mn	80,75	21	100	85,5	25	33,26	0,525	0,075	1,8	0	0,12
-Zn	80,75	21	100	85,5	25	33,26	0,525	0,075	1,8	1,04	0

Anexo D. Formato de registro para el control de pH y CE de las soluciones nutritivas evaluadas

Registro de pH y CE de las Soluciones Nutritivas - Ensayo Deficiencias nutricionales en <i>E. grandis</i> y <i>P. tecunumanii</i>														
TANQUE	PREPARACIÓN		APLICACIÓN											
	FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA	
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH
C														
↓N														
-P														
-K														
-Ca														
-Mg														
-S														
-B														
-Cu														
-Fe														
-Mn														
-Zn														

TANQUE	PREPARACIÓN		APLICACIÓN											
	FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA	
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH
C														
↓N														
-P														
-K														
-Ca														
-Mg														
-S														
-B														
-Cu														
-Fe														
-Mn														
-Zn														

TANQUE	PREPARACIÓN		APLICACIÓN											
	FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA		FECHA	
	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH	CE	pH
C														
↓N														
-P														
-K														
-Ca														
-Mg														
-S														
-B														
-Cu														
-Fe														
-Mn														
-Zn														

Anexo E. Formato de registro de las mediciones de altura y diámetro para las plántulas de *E. grandis* y *P. tecunumanii*

ENSAYO DE DEFICIENCIAS NUTRICIONALES - VIVERO RANCHO GRANDE

Fecha: _____
 Especie: _____
 Tratamiento _____
 Subparcela: _____

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Fecha: _____
 Especie: _____
 Tratamiento _____
 Subparcela: _____

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Fecha: _____
 Especie: _____
 Tratamiento _____
 Subparcela: _____

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Fecha: _____
 Especie: _____
 Tratamiento _____
 Subparcela: _____

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

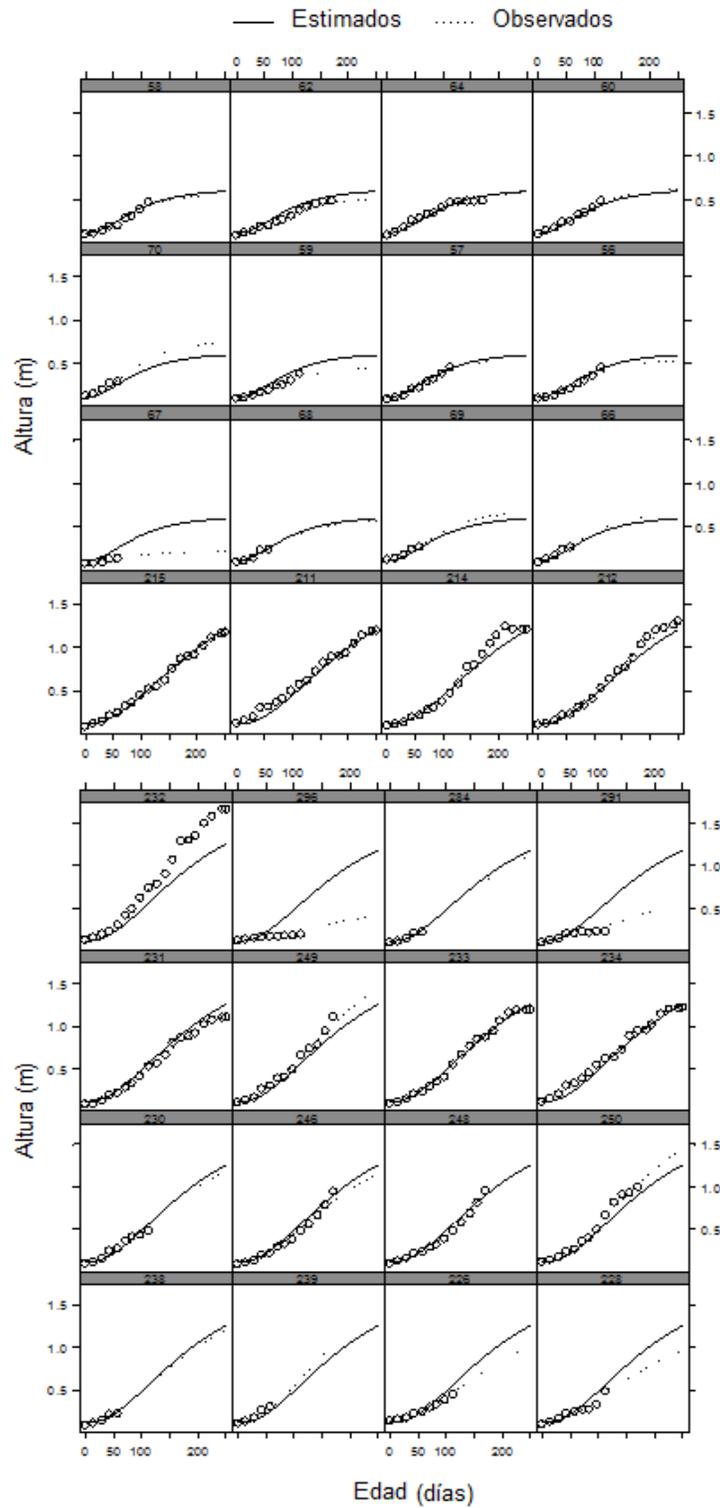
Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Árbol	Alt (cm)	dcr (mm)	Raiz	
			RB	LRP

Anexo F. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en altura en la especie *Pinus tecunimanii*

Efecto fijo	Valor	ES	Df	t-valor	Significancia a un 95%
Intercepto (c)	0.11467	0.001924	2160	59.5859	< 0.0001
Asíntota Testigo	1.61270	0.098716	2160	16.3367	< 0.0001
Asíntota (-B)	-0.59115	0.130494	2160	-4.5301	< 0.0001
Asíntota (-Ca)	-0.17748	0.125571	2160	-1.4134	0.1577
Asíntota (-Cu)	-0.00125	0.130022	2160	-0.0096	0.9923
Asíntota (-Fe)	-0.17262	0.132230	2160	-1.3055	0.1919
Asíntota (-K)	-1.03669	0.119919	2160	-8.6449	< 0.0001
Asíntota (-Mg)	-0.09904	0.128189	2160	-0.7726	0.4398
Asíntota (-Mn)	0.01390	0.140309	2160	0.0991	0.9211
Asíntota (↓N)	-1.11241	0.116782	2160	-9.5255	< 0.0001
Asíntota (-P)	-1.06024	0.116790	2160	-9.0782	< 0.0001
Asíntota (-S)	-0.17137	0.125483	2160	-1.3657	0.1722
Asíntota (-Zn)	-0.34000	0.125108	2160	-2.7177	0.0066
Tasa Control	0.00824	0.000310	2160	26.5980	< .0001
Tasa -B	0.00110	0.000354	2160	3.0979	0.0020
Tasa -Ca	0.00056	0.000274	2160	2.0372	0.0417
Tasa -Cu	-0.00052	0.000271	2160	-1.9092	0.0564
Tasa -Fe	0.00035	0.000300	2160	1.1624	0.2452
Tasa -K	0.00599	0.000477	2160	12.5517	< .0001
Tasa -Mg	0.00114	0.000275	2160	4.1507	< .0001
Tasa -Mn	-0.00060	0.000288	2160	-2.0736	0.0382
Tasa ↓N	0.00818	0.000528	2160	15.4736	< .0001
Tasa -P	0.00712	0.000447	2160	15.9210	< .0001
Tasa -S	0.00040	0.000272	2160	1.4872	0.1371
Tasa -Zn	0.00106	0.000301	2160	3.5260	0.0004
Escala (m)	2.54084	0.060785	2160	41.8006	< .0001

Anexo G. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richards para altura probado en algunas plantas de *P. tecunamnei* de diferentes tratamientos

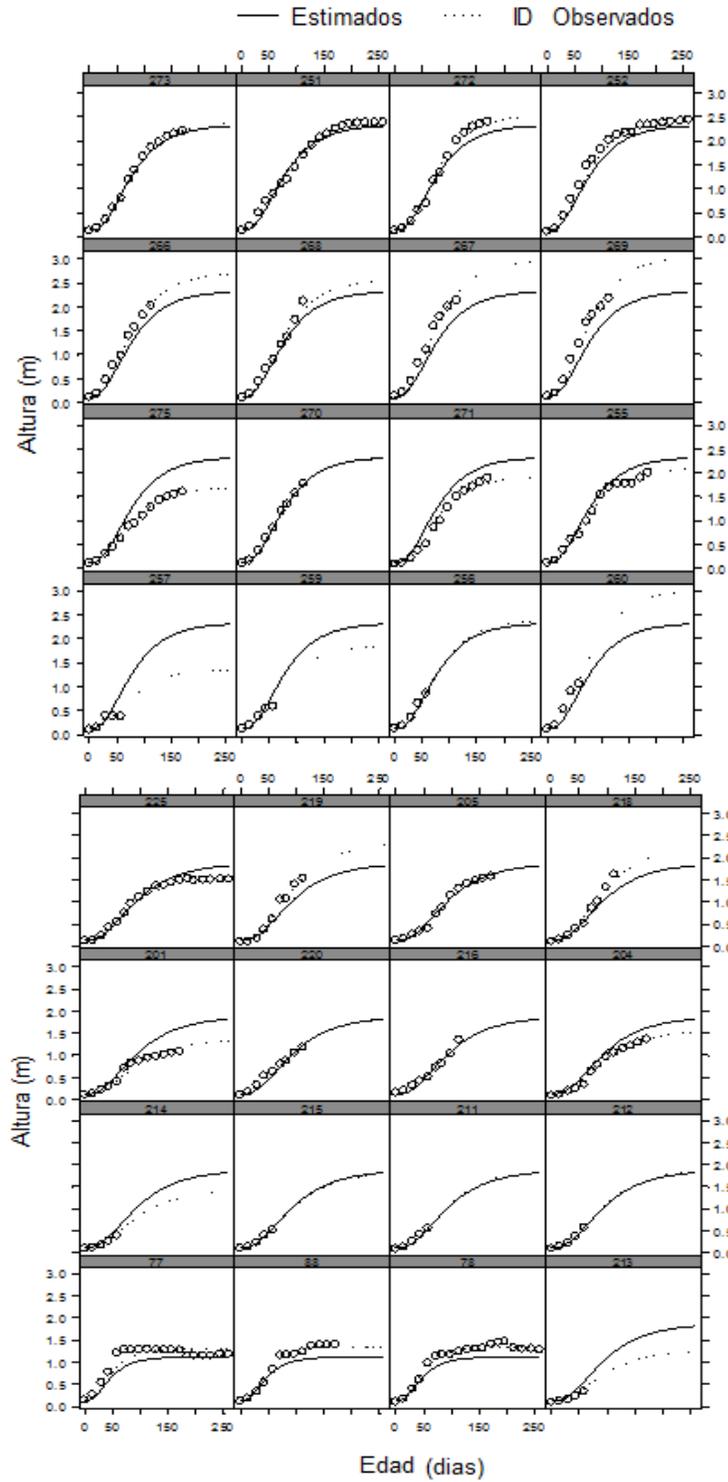


Anexo H. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en altura en la especie *E. grandis*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia a un 95%
Intercepto (c)	0.12586	0.003580	2364	35.1581	< 0.0001
Asíntota Testigo	1.74037	0.087739	2364	19.8357	< 0.0001
Asíntota (-B)	-0.74910	0.119241	2364	-6.2822	< 0.0001
Asíntota (-Ca)	0.19834	0.123640	2364	1.6042	0.1088
Asíntota (-Cu)	0.33374	0.125651	2364	2.6561	0.0080
Asíntota (-Fe)	0.08081	0.120120	2364	0.6727	0.5012
Asíntota (-K)	-0.53149	0.126693	2364	-4.1951	< 0.0001
Asíntota (-Mg)	-0.20155	0.120408	2364	-1.6739	0.0943
Asíntota (-Mn)	0.46950	0.125714	2364	3.7346	0.0002
Asíntota (↓N)	-1.20842	0.126340	2364	-9.5648	< 0.0001
Asíntota (-P)	-0.64218	0.118887	2364	-5.4016	< 0.0001
Asíntota (-S)	0.46358	0.120259	2364	3.8549	0.0001
Asíntota (-Zn)	0.22904	0.121799	2364	1.8805	0.0602
Tasa Control	0.01787	0.000350	2364	50.9866	< 0.0001
Tasa -B	0.01802	0.000821	2364	21.9552	< 0.0001
Tasa -Ca	0.00355	0.000372	2364	9.5607	< 0.0001
Tasa -Cu	0.00274	0.000350	2364	7.8198	< 0.0001
Tasa -Fe	0.00338	0.000363	2364	9.3068	< 0.0001
Tasa -K	-0.00123	0.000494	2364	-2.4890	0.0129
Tasa -Mg	0.00250	0.000388	2364	6.4457	< 0.0001
Tasa -Mn	-0.00078	0.000341	2364	-2.2772	0.0229
Tasa ↓N	-0.00323	0.000877	2364	-3.6797	0.0002
Tasa -P	0.00652	0.000511	2364	12.7649	< 0.0001
Tasa -S	0.00365	0.000344	2364	10.6111	< 0.0001
Tasa -Zn	0.00340	0.000358	2364	9.4931	< 0.0001
Escala (m)	3.17003	0.064774	2364	48.9402	< 0.0001

*Es= Error estándar

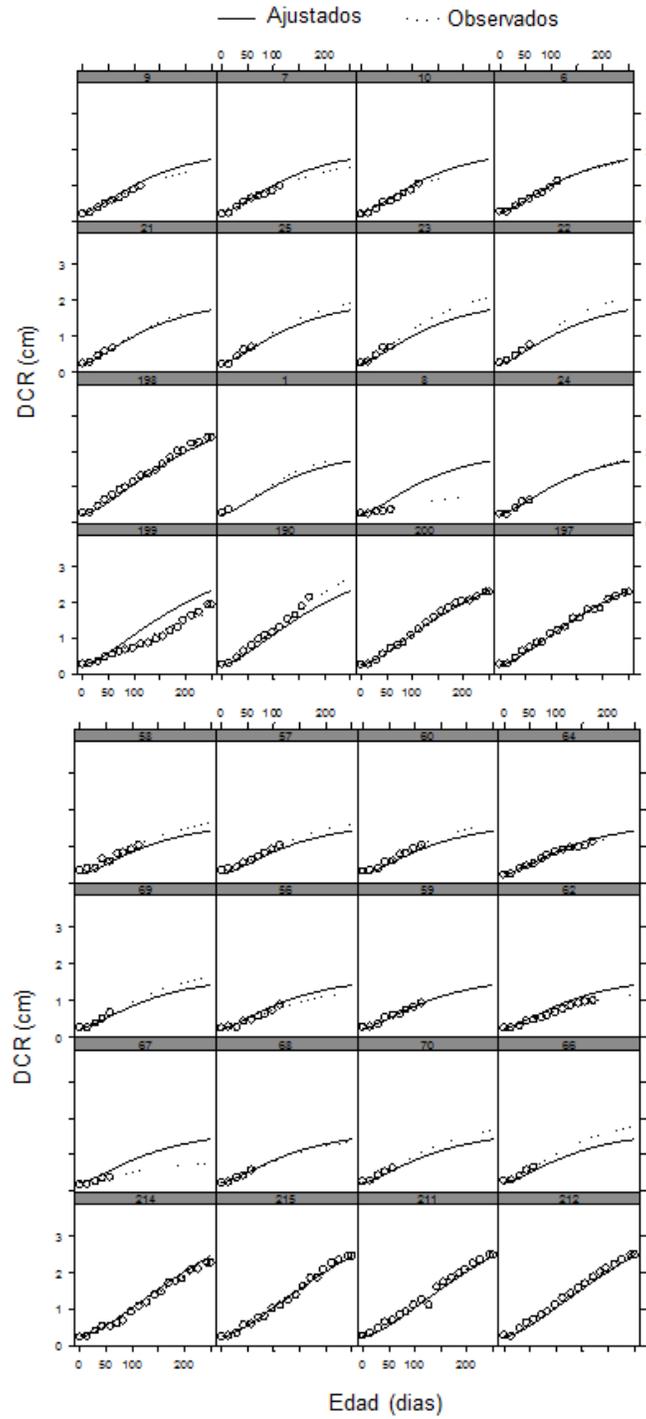
Anexo I. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richard para altura probado en algunas plantas de *Eucalyptus grandis* de diferentes tratamientos



Anexo J. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en DCR en la especie *Pinus tecunimanii*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia a un 95%
Intercepto (c)	0.24084	0.003226	2160	74.6445	< 0.0001
Asíntota Testigo	4.70267	0.331812	2160	14.1727	< 0.0001
Asíntota (-B)	-0.36239	0.408672	2160	-0.8868	0.3753
Asíntota (-Ca)	-0.22771	0.376326	2160	-0.6051	0.5452
Asíntota (-Cu)	-0.57893	0.374414	2160	-1.5462	0.1222
Asíntota (-Fe)	-1.52314	0.370068	2160	-4.1159	< 0.0001
Asíntota (-K)	-2.92890	0.362857	2160	-8.0718	< 0.0001
Asíntota (-Mg)	-0.87374	0.380040	2160	-2.2991	0.0216
Asíntota (-Mn)	-0.41015	0.402065	2160	-1.0201	0.3078
Asíntota (↓N)	-3.29716	0.360127	2160	-9.1555	< 0.0001
Asíntota (-P)	-3.10392	0.359303	2160	-8.6387	< 0.0001
Asíntota (-S)	-0.56818	0.374623	2160	-1.5167	0.1295
Asíntota (-Zn)	-1.21826	0.372268	2160	-3.2725	0.0011
Tasa Control	0.00398	0.000236	2160	16.8514	< 0.0001
Tasa -B	0.00017	0.000232	2160	0.7345	0.4627
Tasa -Ca	0.00071	0.000216	2160	3.2977	0.0010
Tasa -Cu	0.00061	0.000221	2160	2.7694	0.0057
Tasa -Fe	0.00188	0.000247	2160	7.6197	< 0.0001
Tasa -K	0.00506	0.000300	2160	16.8876	< 0.0001
Tasa -Mg	0.00100	0.000232	2160	4.3007	< 0.0001
Tasa -Mn	0.00039	0.000232	2160	1.6689	0.0953
Tasa ↓N	0.00512	0.000350	2160	14.6036	< 0.0001
Tasa -P	0.00554	0.000310	2160	17.8660	< 0.0001
Tasa -S	0.00069	0.000219	2160	3.1409	0.0017
Tasa -Zn	0.00096	0.000236	2160	4.0695	< 0.0001
Escala (m)	1.63165	0.026075	2160	62.5745	< 0.0001

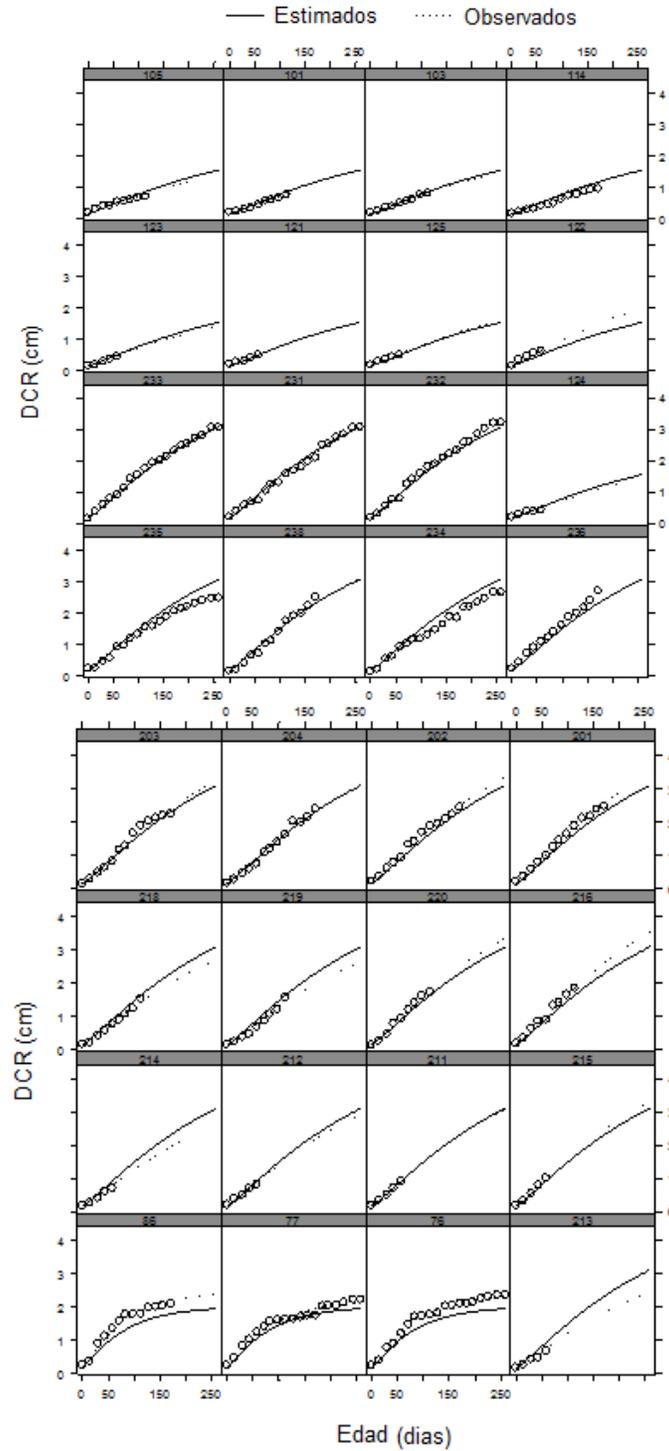
Anexo K. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richard para DCR probado en algunas plantas de *Pinus tecunumanii* de diferentes tratamientos



Anexo L. Estimados para los parámetros del modelo de Richards para el crecimiento en DCR en la especie *E. grandis*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia
Intercepto (c)	0.16587	0.005213	2364	31.8207	< 0.0001
Asíntota Testigo	4.88989	0.261645	2364	18.6890	< 0.0001
Asíntota (-B)	-3.05807	0.288366	2364	-10.6048	< 0.0001
Asíntota (-Ca)	-1.76962	0.293956	2364	-6.0200	< 0.0001
Asíntota (-Cu)	-0.80002	0.301466	2364	-2.6538	0.0080
Asíntota (-Fe)	-0.22887	0.310181	2364	-0.7379	0.4607
Asíntota (-K)	-3.01875	0.292675	2364	-10.3143	< 0.0001
Asíntota (-Mg)	-0.51490	0.320222	2364	-1.6080	0.1080
Asíntota (-Mn)	-0.23631	0.329204	2364	-0.7178	0.4729
Asíntota (↓N)	-2.55141	0.345337	2364	-7.3882	< 0.0001
Asíntota (-P)	-3.00440	0.286589	2364	-10.4833	< 0.0001
Asíntota (-S)	-1.28478	0.289131	2364	-4.4436	< 0.0001
Asíntota (-Zn)	-0.38319	0.322813	2364	-1.1870	0.2353
Tasa Control	0.00412	0.000250	2364	16.4843	< 0.0001
Tasa -B	0.00937	0.000435	2364	21.5137	< 0.0001
Tasa -Ca	0.00308	0.000301	2364	10.2331	< 0.0001
Tasa -Cu	0.00170	0.000261	2364	6.5031	< 0.0001
Tasa -Fe	0.00056	0.000247	2364	2.2707	0.0233
Tasa -K	0.00409	0.000428	2364	9.5690	< 0.0001
Tasa -Mg	0.00030	0.000261	2364	1.1562	0.2477
Tasa -Mn	0.00025	0.000260	2364	0.9436	0.3454
Tasa ↓N	-0.00008	0.000424	2364	-0.1779	0.8588
Tasa -P	0.00589	0.000357	2364	16.5153	< 0.0001
Tasa -S	0.00274	0.000268	2364	10.2368	< 0.0001
Tasa -Zn	0.00062	0.000269	2364	2.3052	0.0212
Escala (m)	1.20712	0.018542	2364	6510.02	< 0.0001

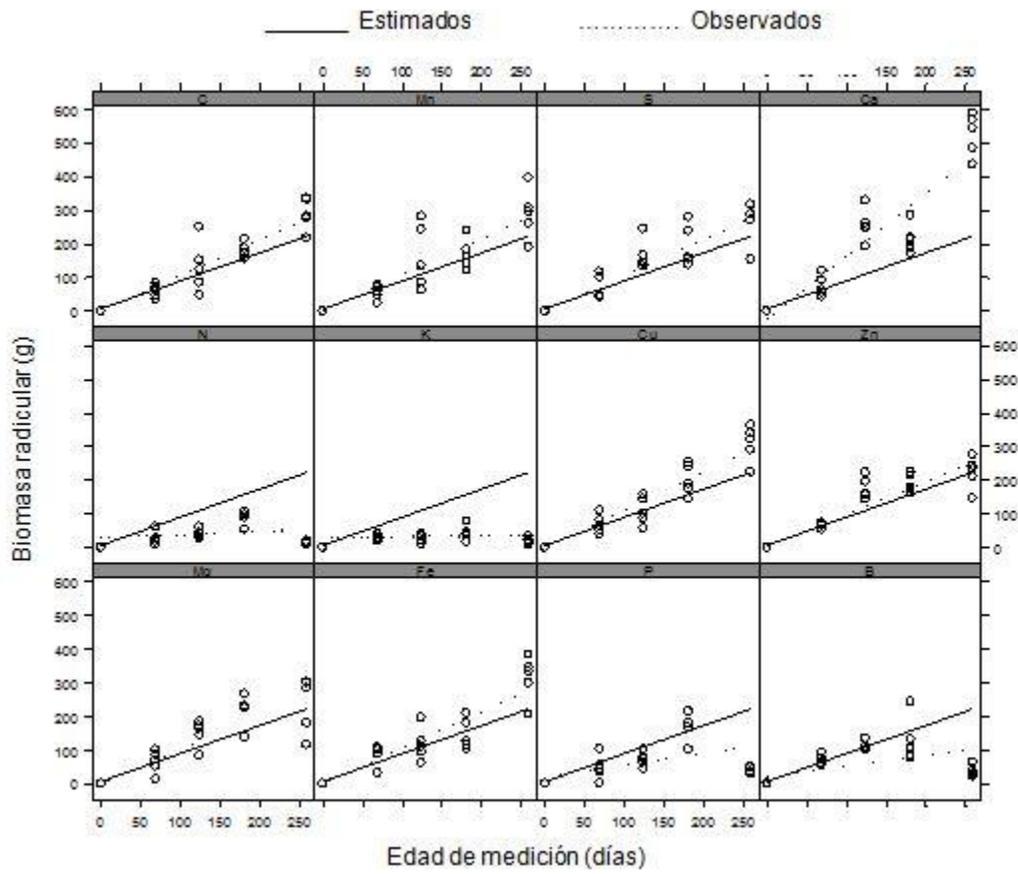
Anexo M. Modelo no lineal de efectos mixtos de Richard para DCR probado en algunas plantas de *Eucalyptus grandis* de diferentes tratamientos



Anexo N. Estimados para los parámetros del modelo lineal para la biomasa radicular en la especie *E. grandis*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia
Intercepto Testigo	-8.0765	17.1307	276	-0.47146	0.6377
Intercepto (-B)	55.2494	24.2263	276	2.28055	0.0233
Intercepto (-Ca)	-19.2064	24.2263	276	-0.79279	0.4286
Intercepto (-Cu)	-4.7993	24.2263	276	-0.19810	0.8431
Intercepto (-Fe)	0.9630	24.2263	276	0.03975	0.9683
Intercepto (-K)	22.4031	24.2263	276	0.92474	0.3559
Intercepto (-Mg)	18.0151	24.2263	276	0.74362	0.4577
Intercepto (-Mn)	4.3285	24.2263	276	0.17867	0.8583
Intercepto (↓N)	26.6288	24.2263	276	1.09917	0.2727
Intercepto (-P)	38.3435	24.2263	276	1.58272	0.1146
Intercepto (-S)	17.1678	24.2263	276	0.70864	0.4791
Intercepto (-Zn)	26.9705	24.2263	276	1.11327	0.2666
Pendiente Control	1.1047	0.1106	276	9.98951	< 0.0001
Pendiente -B	-0.9195	0.1564	276	-5.87926	< 0.0001
Pendiente -Ca	0.8034	0.1564	276	5.13719	< 0.0001
Pendiente -Cu	0.0858	0.1564	276	0.54838	0.5839
Pendiente -Fe	0.0078	0.1564	276	0.05007	0.9601
Pendiente -K	-1.0244	0.1564	276	-6.55003	< 0.0001
Pendiente -Mg	-0.1219	0.1564	276	-0.77923	0.4365
Pendiente -Mn	-0.0027	0.1564	276	-0.01695	0.9865
Pendiente ↓N	-0.9737	0.1564	276	-6.22570	< 0.0001
Pendiente -P	-0.8085	0.1564	276	-5.16985	< 0.0001
Pendiente -S	-0.0768	0.1564	276	-0.49097	0.6238
Pendiente -Zn	-0.2164	0.1564	276	-1.38346	0.1676

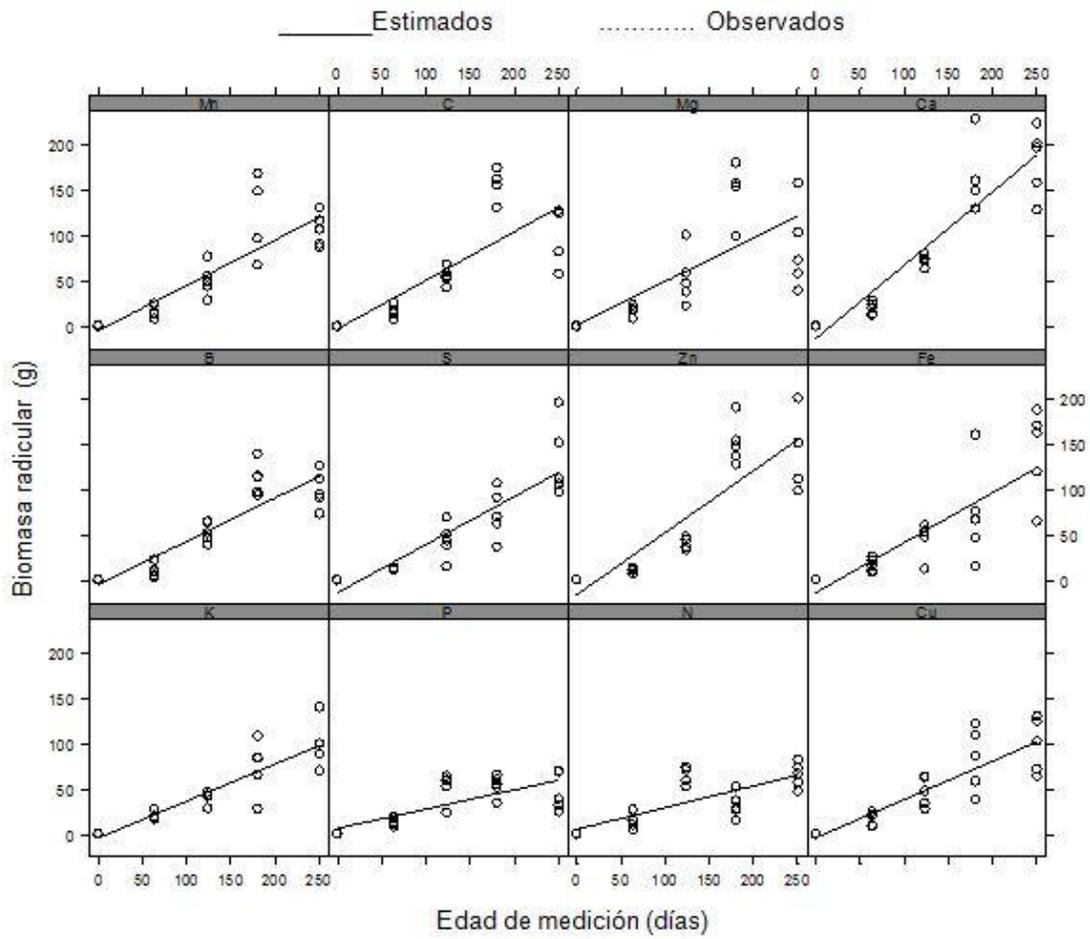
Anexo O. Ejemplo del ajuste del modelo lineal a los datos de biomasa radicular en *E. grandis*



Anexo P. Estimados para los parámetros del modelo lineal para la biomasa radicular en la especie *P. tecunumanii*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia
Intercepto Testigo	-1.8783	9.8519	269	-0.19065	0.8489
Intercepto (-B)	-2.0263	13.8747	269	-0.14604	0.8840
Intercepto (-Ca)	-105149	13.9231	269	-0.75521	0.4508
Intercepto (-Cu)	-.12731	13.8747	269	-0.09175	0.9270
Intercepto (-Fe)	-10.5867	13.8747	269	-0.76302	0.4461
Intercepto (-K)	-1.5935	13.9757	269	-0.11402	0.9093
Intercepto (-Mg)	4.3233	13.8747	269	0.31159	0.7556
Intercepto (-Mn)	-1.8914	13.8747	269	-0.13632	0.8917
Intercepto (↓N)	7.9460	13.8747	269	0.57270	0.5673
Intercepto (-P)	9.0091	13.8747	269	0.64931	0.5167
Intercepto (-S)	-10.7771	13.8747	269	-0.77674	0.4380
Intercepto (-Zn)	-13.0312	13.9326	269	-0.93530	0.3505
Pendiente Control	0.5342	0.0682	269	7.86590	< 0.0001
Pendiente -B	-0.0578	0.0937	269	-0.61708	0.5377
Pendiente -Ca	0.2732	0.0941	269	2.90156	0.0040
Pendiente -Cu	-0.1129	0.0937	269	-1.20435	0.2295
Pendiente -Fe	0.0138	0.0937	269	0.14731	0.8830
Pendiente -K	-0.1281	0.0958	269	-1.33632	0.1826
Pendiente -Mg	-0.0563	0.0937	269	-0.60097	0.5484
Pendiente -Mn	-0.0365	0.0937	269	-0.38987	0.6969
Pendiente ↓N	-0.2957	0.0937	269	-3.15446	0.0018
Pendiente -P	-0.3231	0.0937	269	-.344645	0.0007
Pendiente -S	-0.0071	0.0937	269	-0.07591	0.9395
Pendiente -Zn	0.1473	0.0958	269	1.53639	0.1256

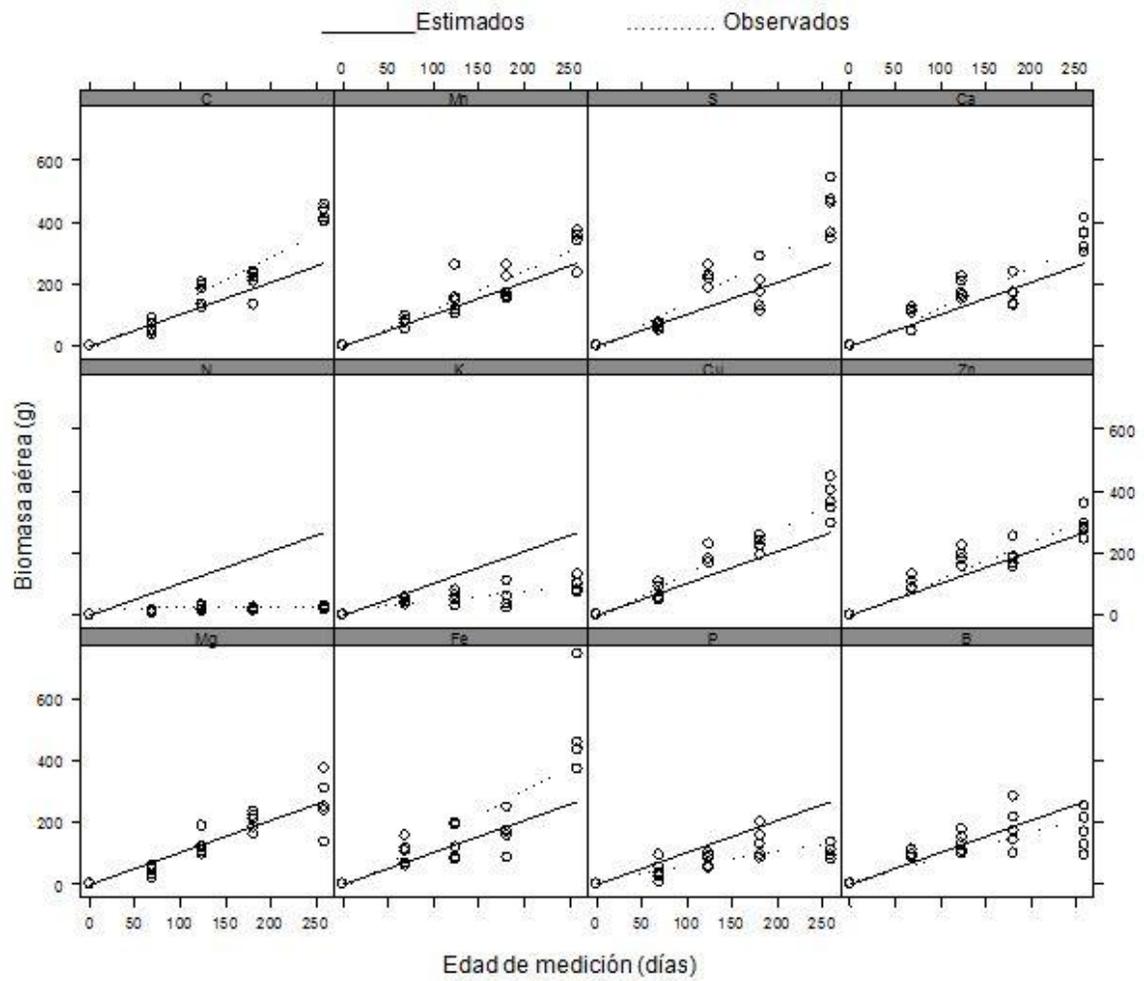
Anexo Q. Ejemplo del ajuste del modelo lineal a los datos de biomasa radicular en *P. tecunumanii*



Anexo R. Estimados para los parámetros del modelo lineal para la biomasa aérea en la especie *E. grandis*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia
Intercepto Testigo	-28.8229	17.2497	276	-1.6709	0.0959
Intercepto (-B)	63.3043	24.3947	276	2.5950	0.0100
Intercepto (-Ca)	34.4006	24.3947	276	1.4102	0.1596
Intercepto (-Cu)	20.9568	24.3947	276	0.8591	0.3910
Intercepto (-Fe)	-6.1417	24.3947	276	-0.2518	0.8014
Intercepto (-K)	38.9528	24.3947	276	1.5968	0.1115
Intercepto (-Mg)	20.7072	24.3947	276	0.8488	0.3967
Intercepto (-Mn)	24.7335	24.3947	276	1.0139	0.3115
Intercepto (↓N)	33.7286	24.3947	276	1.3826	0.1679
Intercepto (-P)	44.3098	24.3947	276	1.8164	0.0704
Intercepto (-S)	9.0466	24.3947	276	0.3708	0.7110
Intercepto (-Zn)	50.2521	24.3947	276	2.0600	0.0403
Pendiente Control	1.5875	0.1114	276	14.2564	< 0.0001
Pendiente -B	-0.9273	0.1575	276	-5.8880	< 0.0001
Pendiente -Ca	-0.3509	0.1575	276	-2.2285	0.0267
Pendiente -Cu	-0.1628	0.1575	276	-1.0336	0.3022
Pendiente -Fe	0.1009	0.1575	276	0.6405	0.5224
Pendiente -K	-1.2683	0.1575	276	-8.0536	< 0.0001
Pendiente -Mg	-0.5174	0.1575	276	-3.2854	0.0011
Pendiente -Mn	-0.3560	0.1575	276	-2.2604	0.0246
Pendiente ↓N	-1.5019	0.1575	276	-9.5367	< 0.0001
Pendiente -P	-1.1460	0.1575	276	-7.2769	< 0.0001
Pendiente -S	0.0062	0.1575	276	0.0394	0.9686
Pendiente -Zn	-0.5208	0.1575	276	-3.3071	0.0011

Anexo S. Ejemplo del ajuste del modelo lineal a los datos de biomasa aérea en *E. grandis*



Anexo T. Estimados para los parámetros del modelo cuadrático para la biomasa aérea en la especie *P. tecunumanii*

Efecto fijo	Valor	ES*	Df	t-valor	Significancia
Intercepto Testigo	-12.4014	13.0413	268	-0.95093	0.3425
Intercepto (-B)	15.9084	18.0391	268	0.88189	0.3786
Intercepto (-Ca)	-3.4764	18.1015	268	-0.19205	0.8478
Intercepto (-Cu)	-6.8001	18.0391	268	-0.37696	0.7065
Intercepto (-Fe)	14.3903	18.0391	268	0.79772	0.4257
Intercepto (-K)	19.9827	18.1701	268	1.09975	0.2724
Intercepto (-Mg)	10.1133	18.0391	268	0.56063	0.5755
Intercepto (-Mn)	9.3307	18.0391	268	0.51725	0.6054
Intercepto (↓N)	37.4573	18.0391	268	2.07645	0.0388
Intercepto (-P)	39.8469	18.0391	268	2.20892	0.0280
Intercepto (-S)	8.0874	18.0391	268	0.44833	0.6543
Intercepto (-Zn)	3.2297	18.1139	268	0.17830	0.8586
Parámetro lineal Control	0.5397	0.1185	268	4.55420	< 0.0001
Parámetro lineal -B	-0.3274	0.1219	268	-2.68609	0.0077
Parámetro lineal -Ca	0.2920	0.1224	268	2.38570	0.0177
Parámetro lineal -Cu	-0.0500	0.1219	268	0.40993	0.6822
Parámetro lineal -Fe	-0.2807	0.1219	268	-2.30324	0.0220
Parámetro lineal -K	-0.5892	0.1246	268	-4.72857	< 0.0001
Parámetro lineal -Mg	-0.3180	0.1219	268	-2.60911	0.0096
Parámetro lineal -Mn	-0.3626	0.1219	268	-2.97511	0.0032
Parámetro lineal ↓N	-0.9793	0.1219	268	-8.03426	< 0.0001
Parámetro lineal -P	-0.9272	0.1219	268	-7.60706	< 0.0001
Parámetro lineal -S	-0.1712	0.1219	268	-1.40464	0.1613
Parámetro lineal -Zn	-0.1092	0.1246	268	-0.87648	0.3816
Parámetro cuadrático	0.0026	0.0003	268	8.15004	< 0.0001

Anexo U. Ejemplo del ajuste del modelo cuadrático a los datos de biomasa aérea en *P. tecunumanii*

