COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS TABASCO

POSGRADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS EN EL TRÓPICO

DINÁMICA DE NUTRIMENTOS, ALMACENAMIENTO DE CARBONO E INFLUENCIA DE UN ABONO VERDE EN EL CRECIMIENTO DE PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) EN TABASCO, MÉXICO.

ALBERTO CÓRDOVA SÁNCHEZ

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

DOCTOR EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2023

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **"Dinámica de nutrimentos, almacenamiento de carbono e influencia de un abono verde en el crecimiento de plantaciones de teca *(Tectona grandis* L.f*.) en Tabasco, México***" realizada por el estudiante: "**Alberto Córdova Sánchez**" bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO
DR. JOSÉ JESUS OBRADOR OLÁN

ASESORA
DRA. EUSTOLIA GARCÍA LÓPEZ

ASESOR
DR. MEPIVOSETH CASTELÁN ESTRADA

ASESOR
DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

ASESOR
DR. GILBERTO VILLANUEVA LÓPEZ

H. Cárdenas, Tabasco, México, febrero de 2023.

DINÁMICA DE NUTRIMENTOS, ALMACENAMIENTO DE CARBONO E INFLUENCIA DE UN ABONO VERDE EN EL CRECIMIENTO DE PLANTACIONES DE TECA *(Tectona grandis* L.f*.)* EN TABASCO, MÉXICO.

Alberto Córdova Sánchez, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2023

RESUMEN

La teca es originaria de Asia y fue introducida a América de semillas provenientes de Myanmar. Esta especie es muy importante en las Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) de México, que han sido establecidas con el propósito de incrementar la forestación y por su alto valor comercial. En plantaciones de teca de dos años se aplicó fertilización química y se estableció un abono verde (AV) (*Crotalaria juncea*), mediante un diseño de bloques completamente al azar en un arreglo de parcelas divididas. Después de la aplicación de los tratamientos, se muestrearon arvenses, raíces finas, suelo, hojas senescentes, hojas recientemente maduras y se hicieron mediciones de diámetro y altura. Los resultados obtenidos mostraron una Densidad de Longitud de Raíces Finas (DLRF) en el tratamiento 60-60-60 kg ha^{-1} sin AV y 0-0-0 con AV, alcanzando 0.15 y 0.14 $km.m^{-3}$, respectivamente. La riqueza de especies de arvenses fue más baja en la parcela con cobertura (CC); los valores más bajos de H´ (0.91), y E (0.39) se localizaron en la parcela sin cobertura (SC). *Phyla nodiflora* fue la especie con mayor Índice de Valor de Importancia (IVI), (201.15) y las familias mejor representadas fueron Fabaceae (36%) y Poaceae (29%). El resultado del almacenamiento de carbono en la biomasa total fue de 32.45 y 62.79 t C ha^{-1}, a las edades de 3.2 y 4.7 años, respectivamente; en la hojarasca fue de 0.52 t C ha^{-1}, y en el suelo 16.29 t ha^{-1}. La fertilidad del suelo, de manera general, fue media. Los nutrimentos con mayor traslación fueron el P (23.31%), el K (23.71%) y el Mg (29.58%) y los de menor traslación el nitrógeno (N, 6.75%) y el calcio (Ca, 8.48%).

Palabras clave: árboles, arvenses, fertilización química, raíces finas, suelo

DYNAMICS OF NUTRIENTS, CARBON STORAGE AND INFLUENCE OF A GREEN MANURE ON THE GROWTH OF TEAK PLANTATIONS (*Tectona grandis* L.f.) IN TABASCO, MÉXICO.

Alberto Córdova Sánchez, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2023

ABSTRACT

Teak is native to Asia and was introduced to the Americas with seeds from Myanmar. This species is very important in the Commercial Forest Plantations (CFP) of Mexico, for which have been established with the purpose of increasing afforestation and for his high commercial value. In two-year-old teak plantations, chemical fertilization was applied and a green manure (GM) (*Crotalaria juncea*) was established, through a completely randomized block design in a divided plot arrangement. After the application of the treatments, weeds, fine roots, soil, senescent leaves, and recently mature leaves were sampled, and measurements of diameter and height were made. The results obtained showed a Fine Root Length Density (DLRF) in the 60-60-60 kg ha^{-1} treatment without AV and 0-0-0 with AV, reaching 0.15 and 0.14 $km.m^{-3}$, respectively. The richness of weed species, the one that was lowest, in the plot with cover (CC); the lowest values of H´(0.91), and of E(0.39) were located in the plot without coverage (SC). The Phyla nodiflora species had the highest Importance Value Index (IVI), 201.15) and the most represented families were: Fabaceae (36%) and Poaceae (29%). The results of carbon storage in total biomass were 32.45 and 62.79 t C ha-1, at the age of 3.2 and 4.7 years; 0.52 t C ha-1 was found in the litter, and 16.29 t ha-1 in the soil. Soil fertility is medium; in this study, the nutrients with the highest translation were phosphorus (P, 23.31%), potassium (K, 23.71%), and magnesium (Mg, 29.58%), and those with the lowest translation were nitrogen (N, 6.75%) and calcium (Ca, 8.48%).

Key words: chemical fertilization, fine roots, soil, trees, weeds

AGRADECIMIENTOS

Al **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA (CONACYT),** por el apoyo del financiamiento recibido para que se lograra y concretara esta tesis de investigación doctoral.

Al **COLEGIO DE POSTGRADUADOS (COLPOS) y al Programa de Doctorado en Ciencias Agrícolas en el Trópico (PRODOCAT)**, porque me dio la oportunidad de cumplir esta meta académica, por el conocimiento y experiencias adquiridas en el área de la investigación científica.

A la empresa **AGROPECUARIA SANTA GENOVEVA SAPI DE CV,** por permitirme utilizar sus plantaciones de teca, y por el apoyo en el trabajo de campo.

A mi **CONSEJO PARTICULAR,** que me apoyó en todo el desarrollo de la tesis y a todos los profesores que de una u otra manera nos brindaron sus conocimientos para culminar esta investigación.

A **MIS AMIGOS,** Guillermina Pascual, Alex Ricardo Ramírez y Marcos Antonio Morales, que me apoyaron en los trabajos de campo.

A la **LGAC1. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES** del Colegio de Postgraduados, por el hecho de estar representando esta línea, que seguramente es invaluable en nuestras vidas y medio ambiente.

DEDICATORIA

A DIOS

Por darme la existencia, por permitirme terminar la tesis, por apoyarme incondicionalmente en todas las etapas del doctorado, por el conocimiento y ciencia que nos ha brindado, que lo aprendido, podamos aplicarlo en la vida diaria y en la enseñanza.

A MI FAMILIA

A mis padres Ma. Adelita Sánchez Sánchez y Alberto Córdova Flores, a mis hermanos Samuel Córdova Sánchez, Erik Córdova Sánchez, Madia Córdova Sánchez, Manuel Córdova Sánchez y Midian Córdova Casango, por todo el apoyo moral y sentimental que me dieron.

A MI ESPOSA E HIJOS

A mi esposa Raquel Jiménez Ramírez e hijos Ángel Alberto Córdova Jiménez, Karina Córdova Jiménez y Liam Gadiel Córdova Jiménez, por el cariño brindado, por ellos, lo mejor que me ha pasado en la vida, siendo el motor y la energía que me mantuvo trabajando en este proyecto de tesis doctoral y poder culminarlo.

CONTENIDO

Página

RESUMEN iii

ABSTRACT iv

DEDICATORIA vi

LISTAS DE CUADROS xi

LISTA DE FIGURAS xii

INTRODUCCIÓN GENERAL 1

CAPÍTULO I. DENSIDAD DE LONGITUD DE RAÍCES FINAS DE TECA EN UN Vertisol Léptico DE TABASCO, MÉXICO 4

1.1 RESUMEN 4

1.2 ABSTRACT 5

1.3 INTRODUCCIÓN 6

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS 8

1.4.1 Área de estudio y diseño experimental 8

1.4.2 Caracterización del suelo 9

1.4.3 Densidad de longitud de raíces finas en el perfil 10

1.4.4 Densidad de longitud de raíces finas a tres distancias del árbol 10

1.4.5 Análisis estadístico 11

1.5 RESULTADOS 12

1.5.1 Caracterización del suelo Vertisol Léptico 12

1.5.2 Densidad de longitud de raíces finas en el perfil 12

1.5.3 Densidad de longitud de raíces finas a diferentes distancias del árbol 16

1.6 DISCUSIÓN 20

1.6.1 Caracterización del suelo Vertisol Léptico 20

1.6.2 Densidad de Longitud de Raíces Finas en el perfil 20

1.6.3 Densidad de longitud de raíces finas a diferentes distancias del árbol 21

1.7 CONCLUSIONES 23

CAPÍTULO II. RIQUEZA Y DIVERSIDAD DE ARVENSES EN PLANTACIONES DE TECA CON *Crotalaria juncea* EN BALANCÁN, TABASCO. 24

2.1 RESUMEN 24

2.2 ABSTRACT 25

2.3 INTRODUCCIÓN 26

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS 28

2.4.1 Área de estudio 28

2.4.2 Establecimiento de Crotalaria juncea y diseño experimental 28

2.4.3 Muestreo de arvenses 28

2.5 RESULTADOS 30

2.5.1 Composición florística de la comunidad de arvenses en teca, Balancán, Tabasco. 30

2.5.2 Riqueza, diversidad y uniformidad de la comunidad de arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco 32

2.5.3 Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies de arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco 35

2.6 DISCUSIÓN 39

2.6.1 Composición florística de la comunidad de arvenses en la plantación de teca en Balancán, Tabasco 39

2.6.2 Riqueza, diversidad y uniformidad de la comunidad de arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco 39

2.6.3 Índice de Valor de Importancia (IVI) de las arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco 41

2.6 CONCLUSIONES 44

CAPÍTULO 3. ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA TOTAL Y SUELO DE UNA PLANTACION DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) EN TABASCO, MÉXICO. 45

3.1 RESUMEN 45

3.2 ABSTRACT 46

3.3 INTRODUCCIÓN 47

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS 49

3.4.1 Área de estudio y diseño experimental 49

3.4.2. Cálculo del carbono en la biomasa total y hojarasca seca 50

3.4.3 Cálculo de carbono orgánico del suelo 51

3.4.4 Análisis estadístico 52

3.5 RESULTADOS 53

3.5.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa total 53

3.5.2 Carbono almacenado en la hojarasca seca 55

3.5.3 Almacenamiento de carbono en el suelo 57

3.6 DISCUSIÓN 59

3.6.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa total 59

3.6.2 Carbono almacenado en la hojarasca seca 60

3.6.3 Almacenamiento de carbono en el suelo 60

3.7 CONCLUSIONES 62

CAPÍTULO 4. TRASLACIÓN NUTRIMENTAL E INCREMENTO MEDIO ANUAL EN UNA PLANTACIÓN DE TECA (*Tectona grandis* L.f.), EN BALANCÁN TABASCO. 63

4.1 RESUMEN 63

4.2 ABSTRACT 64

4.3 INTRODUCCIÓN 65

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS 68

4.4.1 Área de estudio 68

4.4.2 Fertilidad de suelos 69

4.4.3 Traslación nutrimental y almacenamiento de hojarasca 69

4.4.4 Incremento medio anual (IMA) 70

4.4.5 Análisis estadístico 71

4.5 RESULTADOS 72

4.5.1 Fertilidad del suelo y concentración foliar por efecto de la fertilización química * AV 72

4.5.2 Traslación nutrimental y acumulación de hojarasca en la superficie del suelo 74

4.5.3 Fertilización química y abono verde en el IMA en plantaciones de teca 76

4.6 DISCUSIÓN 79

4.6.1 Fertilidad del suelo y concentración foliar por el efecto de fertilización química * AV 79

4.6.2 Traslación nutrimental y acumulación de hojarasca en la superficie del suelo 80

4.6.3 Fertilización química y abono verde en el IMA en teca 81

4.7 CONCLUSIONES 83

CONCLUSIONES GENERALES 84

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1.1 Propiedades fisicoquímicas de un suelo Vertisol Léptico con una plantación de Teca (*Tectona grandis L.*) de 24 meses de edad, en Balancán, Tabasco, México…..8
Cuadro 2.1. Lista florística de la comunidad de arvenses registradas en parcelas con cobertura y sin cobertura; con diferentes dosis de fertilización NPK en plantaciones de teca a los 2.7 años (1: 0-0-0, 2: 60-60-60, 3: 90-60-60, 4: 120-60-60 kg ha-1) y 4.3 años (1: 0-0-0, 2: 120-60-60, 3: 150-60-60, 4: 180-60-60 kg ha-1) en Balancán, Tabasco. ...30
Cuadro 2.2. Índice de valor de importancia (IVI) y de los componentes: densidad (DeR), frecuencia (FR) y dominancia (DoR) relativas de las cuatro principales especies de arvenses en una parcela con (CC) y sin cobertura (SC) en una plantación de teca de 2.7 años de edad. 36
Cuadro 2.3. Índice de valor de importancia (IVI) y de los componentes: densidad (DeR), frecuencia (FR) y dominancia (DoR) relativas de las cuatro principales especies de arvenses en una parcela con (CC) y sin cobertura (SC) en una plantación de teca de 4.3 años de edad. 38
Cuadro 4.1. Respuesta de plantaciones jóvenes de teca a la aplicación de fertilizantes en Panamá (Montero, 1995) (Crecimiento anual).....67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Efecto de Crotalaria juncea en la Densidad de Longitud de Raíces Finas de árboles de teca en Tabasco, México. Las líneas en cada barra representan la desviación estándar 13
Figura 1.2. Efecto de los niveles de fertilización de N, P y K en la Densidad de longitud de Raíces Finas de árboles de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar. 13
Figura 1.3. Efecto de los niveles de fertilización y abono verde sobre la Densidad de Longitud de Raíces Finas en una plantación de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar. 14
Figura 1.4. Densidad de Longitud de Raíces Finas en árboles de teca a diferentes profundidades del suelo en Tabasco, México. Las líneas en las barras representan la desviación estándar. 15
Figura 1.5. Efecto de los niveles de fertilización sobre la DLRF en árboles de teca a diferentes profundidades del suelo en Tabasco, México. Las barras verticales representan la desviación estándar. 16
Figura 1.6. Densidad de Longitud de Raíces Finas a diferentes distancias del árbol de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar. 17
Figura 1.7. Densidad de Longitud de Raíces Finas a diferentes profundidades del suelo en plantaciones de teca en Tabasco, México. Las líneas en cada barra representan la desviación estándar. 18
Figura 1.8. Efecto de los niveles de fertilización en la Densidad de Longitud de Raíces Finas de teca a diferentes profundidades del suelo en Tabasco, México. Las barras verticales representan la desviación estándar. 18
Figura 1.9. Densidad de Longitud de Raíces Finas en la interacción profundidad * distancia, en árboles de teca en Tabasco, México. Las líneas en cada barra representan la desviación estándar. 19
Figura 2.1. Familias de plantas representadas en una plantación de teca de 2.7 años de edad, con y sin cobertura (CC, SC). 30
Figura 2.2. Familias representadas en una plantación de teca de 4.3 años. 31

Figura 2.3. Comportamiento de la riqueza (S) de especies de arvenses en una plantación de teca en Balancán, Tabasco. 32
Figura 2.4. Comportamiento de la diversidad (H') en la comunidad de arvenses en una plantación de teca en Balancán, Tabasco. 33
Figura 2.5. Comportamiento de la uniformidad (E) de la comunidad de arvenses en plantaciones de Teca. 34
.....54
Figura 3.1. Efecto de la fertilización química en el almacenamiento de carbono en la biomasa total, en árboles de teca. 54
Figura 3.2. Interacciones de la fertilización * AV en el contenido de carbono en la biomasa total en teca. 55
Figura 3.3. Efecto de la fertilización química en el almacenamiento de carbono en la hojarasca seca en teca. 56
Figura 3.4. Interacciones de la fertilización * AV en el almacenamiento de carbono en la hojarasca seca en teca. 57
Figura 3.5. Almacenamiento de Carbono en el suelo en una plantación de teca. 58
Figura 3.6. Interacción de la fertilización química * AV en el almacenamiento de carbono en una plantación de teca. 58
Figura 4.1. Concentración de N P K, Ca y Mg en el suelo, por el efecto de la fertilización NPK. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas significativas. 72
Figura 4.2. N P K, Ca y Mg en el suelo por el efecto de la interacción Fertilización NPK * AV. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa. 73
Figura 4.3. Efecto de la fertilización química * AV en la concentración foliar en teca. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa. 74
Figura 4.4. Acumulación de materia seca por el efecto de la aplicación de fertilización química * AV. 75
Figura 4.5. Efecto de la fertilización química * AV en la traslación nutrimental en teca. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa. 76
Figura 4.6. Interacciones de la fertilización NPK * AV en el IMA de teca, a la edad de 3.3 años. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa. 77

Figura 4.7. Interacciones de la fertilización NPK * AV en el IMA de teca, a la edad de 4.7 años de edad. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa. 78

INTRODUCCIÓN GENERAL

La mayor superficie forestal a nivel mundial se distribuye en siete países; Federación Rusa (22%), Brasil (15%), Canadá (7%), Estados Unidos de América (6%), China (3.9%), Indonesia (3.2%) y Zaire (3.1%) (Velásquez, 2009; Álvares-López *et al*., 2014). La teca (*Tectona grandis* L.f) es una especie originaria de Asia y fue introducida a América en Trinidad en 1913, utilizando semilla de Birmania (actualmente Myanmar) (Streets, 1962). Se plantó por primera vez en Centroamérica en 1926 en el Jardín Botánico de Summit, antes la Zona del Canal de Panamá. En los dos años siguientes se iniciaron otras plantaciones, en Honduras, Panamá y Costa Rica. En la actualidad se ha plantado en casi todos los países de América tropical (De Camino *et al*., 2002).

Aun cuando México no se encuentra entre los países con mayor superficie forestal, del año 2000 al 2016, se han establecido, con apoyo del gobierno federal, 318,738 hectáreas de plantaciones forestales comerciales (PFC), de las cuales, 197,986 ha corresponden PFC de especies maderables y 120,752 ha a PFC no maderables. Los estados lideres productores de PFC son Veracruz, Tabasco, Campeche, Chiapas y Puebla, con un poco más del 65% del total nacional (CONAFOR, 2014). La superficie plantada con teca en el estado de Tabasco es de 10,525 ha, ocupando el segundo lugar, solo detrás de eucalipto (15,176 ha), sin embargo, en los últimos años la plantación de teca ha cobrado mayor relevancia (CONAFOR, 2016). Las tasas de crecimiento de tecas establecidas, que se han reportado, son tendenciosas, de Camino y Morales (2013) estimaron tasas de crecimiento superiores a 20 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$. El rendimiento de la especie depende de la calidad de las plantas, de las condiciones del medio y de la aplicación de buenas prácticas de manejo forestal (Calvo *et al.,* 2012; Camacho *et al.,* 2013).

Sin embargo, para las condiciones particulares del país, especialmente en el trópico húmedo de Tabasco, la información sobre el rendimiento y productividad de las diferentes especies utilizadas, entre ellas la teca, no es muy abundante. En consecuencia, es necesario generar mecanismos que permitan estimar lo anterior y apoyar el desarrollo de las técnicas agronómicas, además de disminuir los arvenses en las plantaciones de teca.

La teca es una especie importante por el alto precio que alcanza su madera; se le considera de crecimiento intermedio y se han propuesto turnos de 10 a 16 años (Husen y Pal, 2003; Ugalde, 2013; Jha, 2014), aunque la madera de árboles más jóvenes también tiene buena aceptación comercial. El principal problema que tienen las plantaciones de esta especie, es la baja fertilidad de los suelos donde se establecen, como también el alto costo del control de arvenses que interfieren en su desarrollo y disminuyen su rentabilidad (Ugalde, 2013).

Aunque las PFC originalmente fueron encaminadas a sustituir individuos en casos de falla en la regeneración de los bosques naturales y para restaurar algunas áreas afectadas por actividades humanas o accidentes naturales, han crecido como una alternativa de producción intensiva más controlada en cuanto a la uniformidad de sus productos y una mayor productividad por unidad de superficie. Así, los factores más importantes que hacen necesaria la plantación de árboles, son la destrucción del recurso forestal, el crecimiento de la demanda de madera, los problemas de la regeneración natural, la lejanía y poca accesibilidad de los bosques naturales a centros de consumo y el deterioro ambiental (Martínez, 2005).

Con el incremento en la demanda de productos forestales y medios de protección de los bosques naturales, la superficie de PFC a nivel mundial va en aumento y se han convertido en una fuente importante de madera (Camacho *et al.,* 2013). Algunas estimaciones indican que, para finales del presente siglo, los bosques naturales se reducirán en 30% y las plantaciones forestales comerciales, representarán 20% de la superficie forestal del mundo (Brockerhoff *et al.,* 2013).

Por lo anterior en este trabajo de investigación se probaron tres niveles de fertilización de N, y uno de P y K; También se estableció un abono verde como cobertura para mejorar la fertilidad de suelo y facilitar el control de arvenses.

En el capítulo uno se describe la densidad de longitud de raíces finas (km m^{-3}), la cual se relaciona estrechamente con la absorción de nutrientes, es decir, si la densidad es mayor, su función de absorción y conducción de nutrientes será mejor.

En el capítulo dos se discute sobre el control de arvenses, se probó el abono verde *Crotalaria juncea,* como cobertura y se evaluó la riqueza y diversidad de arvenses por el efecto de dicho abono.

En el tercer capítulo se estimó, con modelos alométricos, la captura de carbono por el método indirecto en biomasa aérea y almacenamiento en raíces, y por el método directo el carbono orgánico del suelo (COS), lo anterior con la finalidad de estudiar el flujo C en las plantaciones de teca.

En el capítulo cuatro se describe la traslación nutrimental de nitrógeno (N), fosforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), que se da de las hojas senescentes a las hojas recientemente maduras, se evaluó también el Incremento Medio Anual (IMA) a partir de las variables altura, diámetro, área basal y volumen.

En conjunto, mediante estos trabajos de investigación se esperan aportar información que permita mejorar el manejo silvícola de las plantaciones de teca.

CAPÍTULO I. DENSIDAD DE LONGITUD DE RAÍCES FINAS DE TECA EN UN Vertisol Léptico DE TABASCO, MÉXICO

1.1. RESUMEN

Las raíces finas (≤2 mm de diámetro) en los árboles son de vida corta, en condiciones de sequía y baja fertilidad éstas alcanzan mayor longitud por unidad de volumen de suelo; así, la Densidad de Longitud de Raíces es una variable que indica el potencial de absorción de agua y nutrientes que tiene la planta. El objetivo del presente estudio fue determinar la Densidad de Longitud de Raíces Finas (DLRF) en árboles de teca que crecen en un Vertisol Léptico, con pH medianamente alcalino, contenido medio de N y P, deficiente en K y CIC media. Por el método del cilindro, a los 36 meses de edad de los árboles de teca, se tomaron muestras verticales de suelos, cada 10 cm hasta 40 cm de profundidad en las cuatro caras del perfil; y a los 46 meses se muestreó horizontalmente a tres distancias de la base del árbol: 50, 100 y 175 cm. Los resultados muestran que en los tratamientos con mayor DLRF fueron: la dosis 60-60-60 kg ha^{-1} sin Abono Verde y el testigo con Abono Verde, alcanzando 0.15 y 0.14 $km.m^{-3}$, respectivamente. La distancia de 50 cm de la base del árbol mostró mayor DLRF (0.75 $km.m^{-3}$) disminuyendo en las distancias de 100 y 175 cm (0.57 y 0.55 $km.m^{-3}$, respectivamente). En la interacción distancia*profundidad, la mayor DLRF fue 0.97 $km.m^{-3}$ en la distancia de 50 cm y profundidad de 0-10 cm.

Palabras clave: Abono verde, plantaciones forestales, *Crotalaria*, fertilización química, perfil edáfico

1.2 ABSTRACT

The fine roots (≤2 mm in diameter) in the trees are ephemeral, active, short-lived teak, in conditions of drought and low fertility they reach a greater length per unit volume of soil; Thus, the Root Length Density is a variable that indicates the potential for absorption of water and nutrients by the plant. The aim of this study was to determine the Thin Root Length Density (DLRF) in teak trees growing in a Leptic Vertisol, with moderately alkaline pH, medium N and P content, deficient in K and medium CEC. Using the cylinder method, at 36 months of age of the trees, vertical rhizosphere samples were taken every 10 cm up to 40 cm deep on the four faces of the profile; At 46 months of age, the trees were sampled horizontally at three distances from the base of the tree: 50, 100 and 175 cm. The results show a DLRF of 0.08 km.m-3 in the treatment with Crotalaria juncea L., but the treatments with the highest DLRF were: the 60-60-60 kg ha-1 dose without Green Manure and the control with Green Manure, reaching 0.15 and 0.14 km.m-3, respectively. The distance of 50 cm from the base of the tree showed higher DLRF (0.75 km.m-3), decreasing at distances of 100 and 175 cm (0.57 and 0.55 km.m-3, respectively). In the distance*depth interaction, the highest DLRF was 0.97 km.m-3 in the distance of 50 cm and depth of 0-10 cm.

Keywords: chemical fertilization, *Crotalaria*, edaphic profile, green manure, trees

1.3 INTRODUCCIÓN

La raíz juega un papel muy importante en el crecimiento y rendimiento de los árboles. Su función principal es la absorción de agua y nutrientes (Montagnoli *et al.,* 2018), sirve además para el anclaje al suelo e interviene en el ciclo de los nutrientes (Bardgett *et al*., 2014). A diferencia de las hojas, los atributos que se miden en las raíces finas no están claramente relacionados con las tasas de crecimiento y supervivencia de las plantas (Ma *et al*., 2018; Wang *et al*., 2018).

En los árboles forestales las raíces finas, definidas por un diámetro ≤2 mm (Freschet *et al*., 2017), son efímeras, no leñosas y exudan carbohidratos con los que estimulan a la microflora que descompone la materia orgánica del suelo e induce la respiración y disponibilidad de nutrientes en el mismo (Kaiser *et al*., 2015; Sun *et al*., 2017). Estas raíces son fisiológicamente las más activas del árbol y comúnmente forman simbiosis con hongos micorrícicos, aunque tienen una vida más corta que las raíces con diámetro > 5 mm (Wells y Eissenstat, 2001).

En condiciones de sequía y baja fertilidad, los árboles tienden a producir más raíces finas por unidad de volumen de suelo; esto como una estrategia para mejorar la absorción de agua y nutrientes (Montagnoli *et al*., 2014). Los árboles, al aumentar la longitud de raíces finas, amplían su superficie subterránea de exploración mejorando algunas características del subsuelo como la captación de agua y nutrientes y, en consecuencia, el rendimiento (Weemstra *et al*., 2017).

Los parámetros de densidad de longitud de raíz, longitud de raíz específica, carbono y nitrógeno, permiten estimar cuando el sistema fomenta mayor producción de raíces y una interacción competitiva (Schroeder-Georgi *et al*., 2016), aunque la biomasa de las raíces finas tiende a disminuir cuando aumenta la fertilidad del suelo y la disponibilidad de agua (Burton *et al*., 2000). La densidad de longitud de raíces (DLR) se expresa en km m^{-3} y se define como la longitud total de raíces por metro cúbico (m^3) de suelo (Moreno *et al*., 2005), es una variable que emplea el valor en longitud de las raíces analizadas y refleja mejor el potencial de absorción de agua y nutrientes, que el peso o número de raíces en sí mismos (Craine, 2006). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue estimar la DLRF

en plantaciones de teca de tres años, establecidas en un suelo Vertisol Léptico en Balancán, Tabasco, bajo cuatro tratamientos de fertilización química y un tratamiento con abono verde (AV).

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 Área de estudio y diseño experimental

El experimento se estableció en un terreno con superficie de 2.20 ha, propiedad de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva, en el municipio de Balancán, Tabasco. El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación media anual de la zona es de 1,600 mm y la temperatura media es de 26.5-27°C (Aceves y Rivera, 2019), la altitud es de 42 msnm, con coordenadas UTM 0690555 m E, 1974127 m N (tomada de GPS Garmin ® 30).

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, el suelo es franco arcillo arenoso, con pH de 7.5, medianamente alcalino, el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), de 3.5% es medio, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 23 $cmol_{(c)}\ kg^{-1}$ corresponde a un nivel medio, el nitrógeno total (Nt) y fosforo asimilable (P) con 0.14 % y 8 mg kg^{-1}, respectivamente, corresponden a concentraciones medias, y las bases intercambiables tienen contenido alto (Ca 12.33 $cmol_{(c)}\ kg^{-1}$), bajo (Mg 0.62 $cmol_{(c)}\ kg^{-1}$) y muy bajo (K 0.15 $cmol_{(c)}\ kg^{-1}$) (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 Propiedades fisicoquímicas de un suelo Vertisol Léptico con una plantación de teca (*Tectona grandis* L.) de 24 meses de edad, en Balancán, Tabasco, México.

Parámetro	Unidad	Profundidad (0-30 cm)	Clasificación (NOM-021-RECNAT-2000)
Acidez	pH	7.50	Medianamente alcalino
CIC	$cmol_{(c)}\ kg^{-1}$	22.8	Media
MOS	%	3.50	Media
Nt	%	0.14	Media
P-Olsen	mg kg^{-1}	8.0	Media
K	$cmol_{(c)}\ kg^{-1}$	0.15	Muy bajo
Ca	$cmol_{(c)}\ kg^{-1}$	12.33	Alto
Mg	$cmol_{(c)}kg^{-1}$	0.62	Bajo
DA	g cm^{-3}	1.05	Baja

Clase textural del suelo: Franco arcillo-arenoso

Las plantas de teca provinieron de un clon obtenido en el vivero de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva (ASGv). Cuando se inició el estudio la plantación tenía 24 meses de edad y un arreglo de marco real de 3.5 x 3.5 m. En las parcelas experimentales (P) se consideró un testigo sin fertilización 0-0-0 (P1) y se aplicaron tratamientos de fertilizantes NPK en dosis de 60-60-60 (P2); 90-60-60 (P3) y 120-60-60 (P4) kg ha^{-1}, cuando las plantaciones tenían dos años de edad; a los tres y cuatro años se aplicaron las siguientes dosis: 0-0-0 (P1); 120-60-60 (P2); 150-60-60 (P3) y 180-60-60 (P4), kg ha^{-1}. Como fuente fertilizante se usaron urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60). La aplicación se realizó al suelo, a 20 cm de profundidad, en dos orificios, al norte y sur en la zona de goteo de cada árbol. El diseño experimental fue en bloques al azar con un arreglo de parcelas divididas, el factor utilizado fue un abono verde (*Crotalaria juncea* L.), con densidad de 20 kg de semilla ha^{-1}, sembrándose al voleo en los callejones de la plantación, cuya biomasa fue incorporada al suelo 60 días después de la siembra.

1.4.2 Caracterización del suelo

Para caracterizar la unidad de suelo se describió un perfil en la parcela, siguiendo la metodología de Cuanalo (1990). Se tomaron muestras de aproximadamente 1 kg de suelo en cada horizonte del perfil, las cuales se trasladaron al laboratorio donde, aplicando la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000) se realizaron las siguientes determinaciones físicas y químicas: Materia Orgánica (MO) por el método de Walkley y Black, pH mediante potenciómetro en agua (relación 1:2); textura por el método del hidrómetro de Bouyoucos; conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación, capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método del acetato de amonio (1.0 M, pH 7.0) y Bases Intercambiables mediante absorción atómica de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, y Na^{+}, empleando acetato de amonio 1N a pH 7.0, como solución extractante; y fósforo (P) extractable por el método Olsen. Con los resultados de los análisis y la información de campo se clasificó el suelo siguiendo los criterios de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Grupo de Trabajo-WRB, 2014).

1.4.3 Densidad de longitud de raíces finas en el perfil

El muestreo se realizó en cada tratamiento y en las dos parcelas grandes (con y sin abono verde), a 150 cm del tronco del árbol, cuando las plantas tenían 38 meses de edad. Las raíces finas se estimaron a partir de un perfil donde se tomaron muestras de cada 10 cm hasta una profundidad de 40 cm en las caras norte, sur, este y oeste, mediante el método del cilindro, extrayendo un volumen de 270.5 cm^3 por muestra (Moreno *et al*., 2005), fueron 16 monolitos por cada perfil, dando un total 128 monolitos, que fueron colocados en bolsas de plástico debidamente etiquetadas por fecha, número de perfil, cara, profundidad y tratamiento. Para no confundir las raíces del AV con las de la teca, 15 días antes del muestreo realizado para estimar la DLRF, se extrajeron con todo y raíz las plantas de *Crotalaria*, con el fin de que solo se cuantificaran en todos los tratamientos, las raíces de teca.

1.4.4 Densidad de longitud de raíces finas a tres distancias del árbol

El muestreo se realizó cuando los árboles de teca tenían 46 meses, en este caso las raíces finas solo se estimaron en la parcela sin AV, en cada tratamiento y a tres distancias del pie del árbol, 50, 100 y 175 cm; en cada distancia se consideraron tres profundidades, 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm mediante el método del cilindro (Moreno et *al*., 2005). Extrayendo un volumen de 270.5 cm^3 por muestra (Moreno *et al*., 2005), para un total de 144 monolitos, que fueron colocados en bolsas de plástico debidamente etiquetadas por fecha, número de perfil, cara, profundidad y tratamiento.

Las muestras de suelo tomadas con los cilindros para estimar la densidad de longitud de raíces finas en el perfil y la densidad de longitud de raíces finas a tres distancias del árbol, se secaron a la sombra, se separaron las raíces, se lavaron con agua corriente y se secaron en estufa a 70°C durante 48 horas, posteriormente se pesaron con una balanza analítica marca Ohaus®, modelo Adventure H5276 (420 g * 0.001 g) y se separaron las raíces finas (≤ 2 mm de diámetro), se midieron con un vernier electrónico marca Surtek ® (resolución 0.01 mm), (Tahir *et al*., 2007) y posteriormente se midió su longitud con una

regla de acero inoxidable marca Wescott (Moreno *et al*., 2005) calculándose la DLRF en km m^{-3} suelo, con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{DLRF} = \frac{\text{Longitud de raíces (km)}}{\text{Volumen de suelo (m}^3\text{)}}$$

1.4.5 Análisis estadístico

Los datos de Densidad de Longitud de Raíces finas en los perfiles a diferentes distancias del árbol y profundidades del suelo se analizaron con el procedimiento PROC ANOVA, posteriormente se hizo la comparación de medias con la prueba de Tukey (<0.05), también se analizaron las interacciones entre profundidad y distancia. Todos los análisis se efectuaron mediante el software SAS ® versión 9.1.

1.5 RESULTADOS

1.5.1 Caracterización del suelo Vertisol Léptico

El suelo presentó grietas y más de 34% de arcillas en todos los horizontes del perfil; el primer horizonte, Ap (0-18 cm), tiene color de matriz negro (10YR2/1), con motas tenues, pocas y muy finas, de color rojo oscuro (2.5 YR 3/6); es ligeramente pedregoso, las piedras son pequeñas y medias, con presencia de roca caliza. El horizonte Bw (18-26) presentó color café amarillento oscuro (10 YR 4/4) con motas color negro (10YR2/1) marcadas, comunes muy finas y finas; consistencia dura en húmedo, y pegajosa y plástica en muy húmedo; muy pocas piedras, gravas y piedras pequeñas subangulares. En estos primeros dos horizontes la permeabilidad es lenta, y hay presencia de fauna y deyecciones de lombrices. El horizonte C (26-43 cm) es de color café amarillento (10 YR 5/6) con motas color negro (10 YR 2/1) y amarillo (10 YR 7/8), su consistencia en húmedo es ligeramente dura, y pegajosa y plástica en muy húmedo; muy pocas piedras, gravas y piedras pequeñas, subangulares. Hay un horizonte R (43-47 cm) de color blanco con motas amarillas, donde se encuentra la roca madre o material rocoso, la piedra caliza tiene reacción al HCl a 10% a diferencia de los horizontes anteriores. En los dos últimos horizontes se observa permeabilidad moderada. El relieve es plano con pendientes inferiores a 3%, la flora nativa de esa zona está compuesta por árboles de tinto (*Haematoxylum campechianum* L.), guano redondo (*Sabal mexicana* Mart.), tasiste (*Acoelorraphe wrightii* Griseb y H.Wendl), tachicón (*Curatella americana* L.), encinos (*Quercus* sp) y güiros (*Crescentia cujete* L.); también se tienen plantaciones comerciales de teca (*Tectona grandis* L.f.), melina (*Gmelina arbórea* Roxb*)* y eucalipto (*Eucalyptus* sp).

1.5.2 Densidad de longitud de raíces finas en el perfil

El tratamiento sin abono verde mostró los valores más altos de DLRF mostrando un promedio de 0.14 $km.m^{-3}$ y diferencias estadísticas significativas con el tratamiento con abono verde abono verde, promedio de 0.08 $km.m^{-3}$ (figura 1.1).

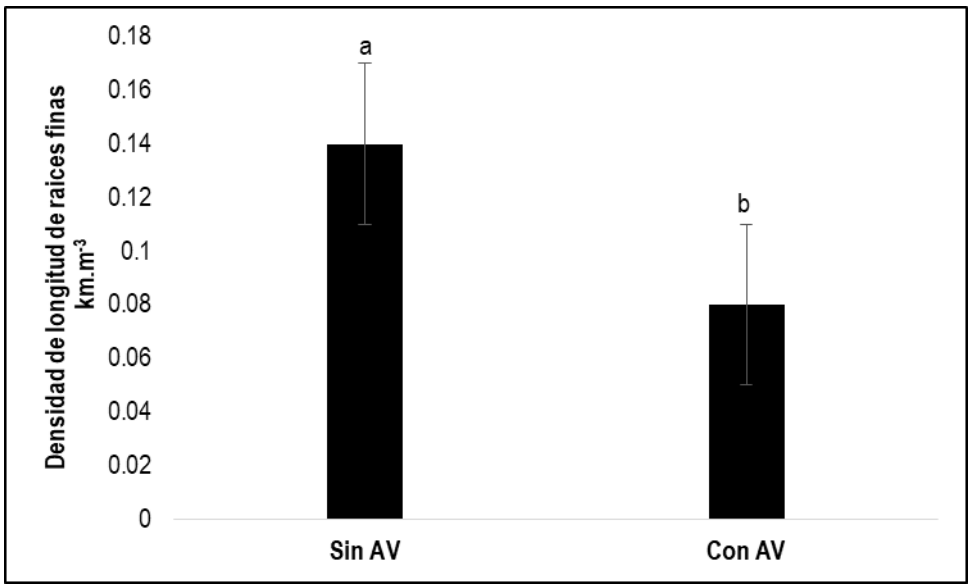

Figura 1.1. Efecto de *Crotalaria juncea* en la Densidad de Longitud de Raíces Finas de árboles de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar.

Contrariamente, los tratamientos con fertilización química no mostraron diferencias significativas sobre esta variable ($p>0.17$), dejando ver que entre más se incrementa la dosis de fertilizantes, la DLRF muestra tendencias de inhibirse; además, es notorio que, aunque no hubo diferencias estadísticas significativas, el testigo 0-0-0 presentó una densidad mayor, con 0.13 $km.m^{-3}$ (figura 1.2).

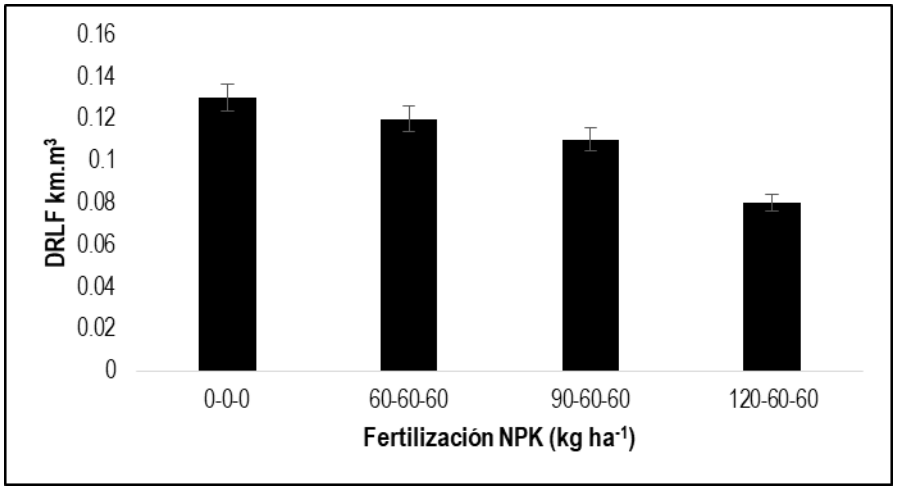

Figura 1.2. Efecto de los niveles de fertilización de N, P y K en la Densidad de longitud de Raíces Finas de árboles de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar.

Las interacciones fertilizantes químico*AV de la DLRF (figura 1.3), muestran que el tratamiento 120-60-60 kg ha^{-1} y AV presentó el menor valor (promedio) 0.03 $km.m^{-3}$ y diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$), con todos los demás tratamientos. Los tratamientos con valores más altos de DLRF fueron testigo con AV y dosis 60-60-60 kg ha^{-1} sin AV. 0.14 km y 0.15 $km.m^{-3}$, respectivamente.

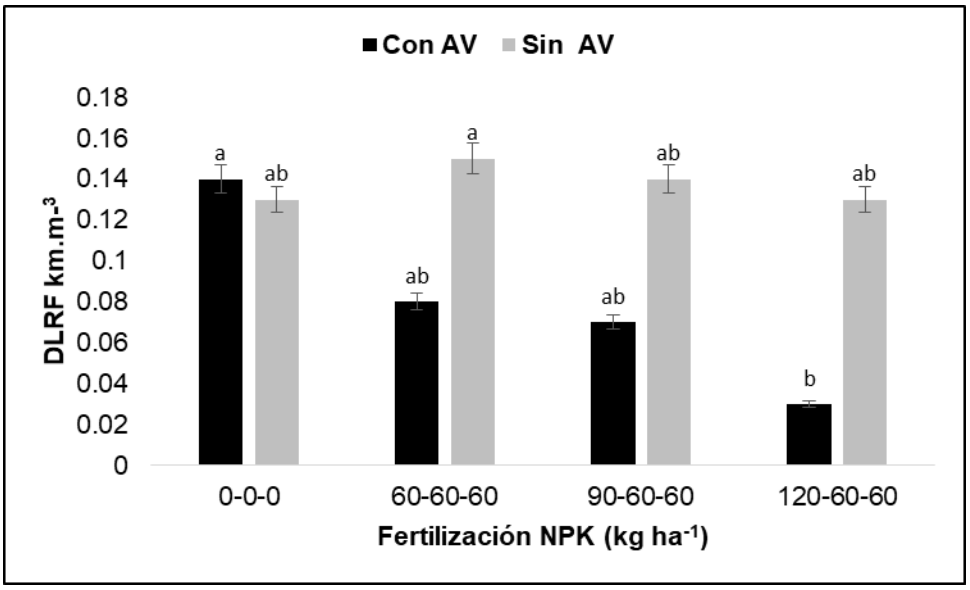

Figura 1.3. Efecto de los niveles de fertilización y abono verde sobre la Densidad de Longitud de Raíces Finas en una plantación de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar.

En la figura 1.4 se muestra la DLRF a varias profundidades, observándose diferencias significativas ($p<0.005$); la mayor DLRF se encontró en la profundidad 20-30 cm con 0.16 km m^3, y la menor, de 0.06 $km.m^{-3}$ a la profundidad de 0-10 cm.

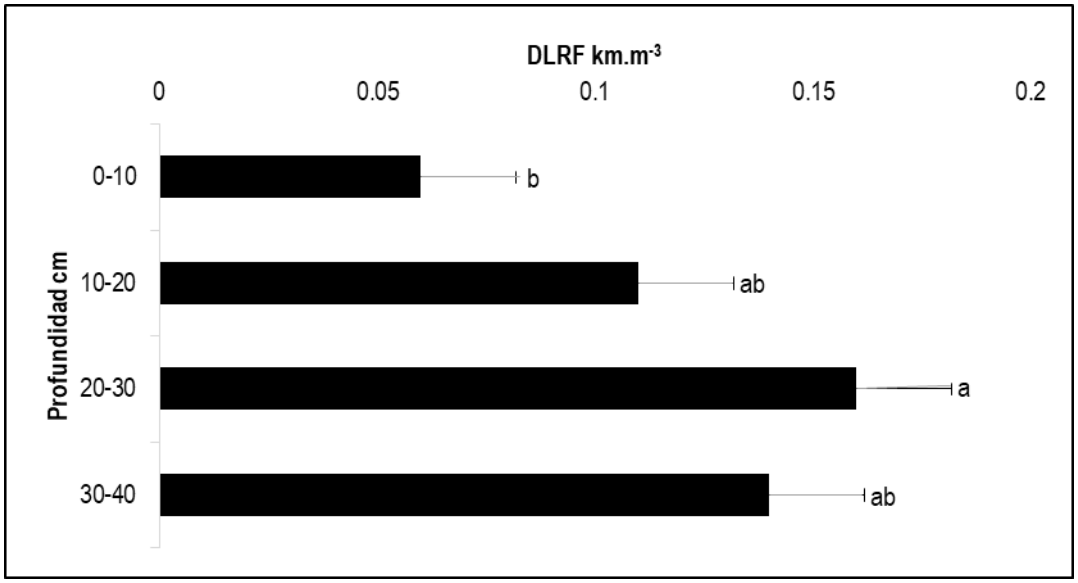

Figura 1.4. Densidad de Longitud de Raíces Finas en árboles de teca a diferentes profundidades del suelo en Tabasco, México. Las líneas en las barras representan la desviación estándar.

En la figura 1.5 se presentan los efectos de las interacciones de los tratamientos de fertilización química con las diferentes profundidades evaluadas; aunque no se observan diferencias significativas ($p>0.05$), el mayor incremento de DLRF se encuentra en el testigo (0-0-0) y en las profundidades de 20-30 y 30-40 cm, disminuyendo la DLRF al aumentar las dosis de fertilización química. En la profundidad de 30-40 cm, en la dosis de fertilización 90-60-60 kg ha^{-1} se encuentra la menor cantidad de DLRF.

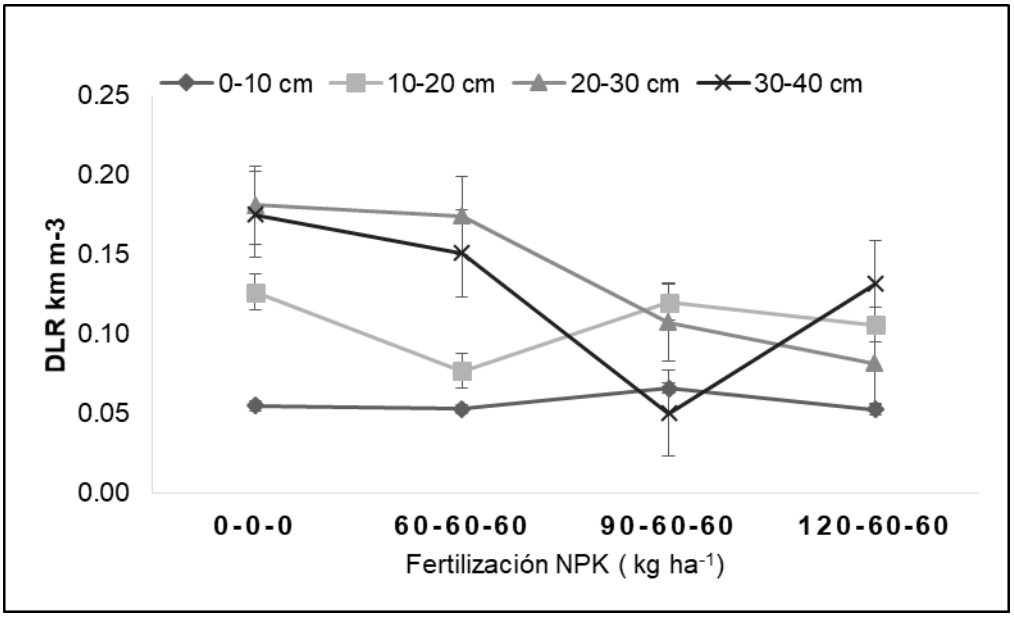

Figura 1.5. Efecto de los niveles de fertilización sobre la DLRF en árboles de teca a diferentes profundidades del suelo en Tabasco, México. Las barras verticales representan la desviación estándar.

1.5.3 Densidad de longitud de raíces finas a diferentes distancias del árbol

Los análisis estadísticos muestran que la DLRF a diferentes distancias de la base del árbol presenta diferencias altamente significativas ($p<0.0017$). En la figura 1.6 se observa que la distancia a 50 cm mostró el mayor valor de DLRF con 0.78 $km.m^{-3}$, disminuye en las distancias de 100 cm y 175 cm, con valores de DLRF de 0.57 y 0.55 $km.m^{-3}$, respectivamente.

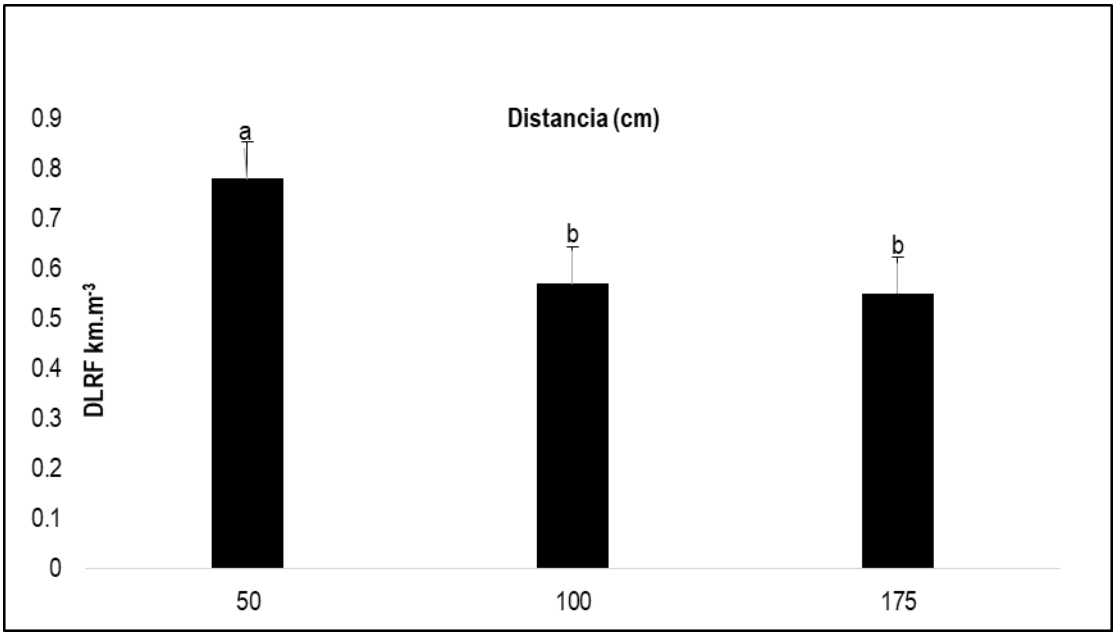

Figura 1.6. Densidad de Longitud de Raíces Finas a diferentes distancias del árbol de teca en Tabasco, México. Las líneas sobre las barras representan la desviación estándar**.**

Contrariamente, la figura 1.7 muestra que la DLRF en las diferentes profundidades no mostró diferencias significativas ($p>0.08$). Sin embargo, se observa que la mayor cantidad de DLRF (0.72 $km.m^{-3}$) se tuvo en la profundidad de 0-10 cm; disminuyendo a 0.56 $km.m^{-3}$ en los 10-20 cm; pero aumentó en la profundidad de 20-30 cm, con 0.62 $km.m^{-3}$.

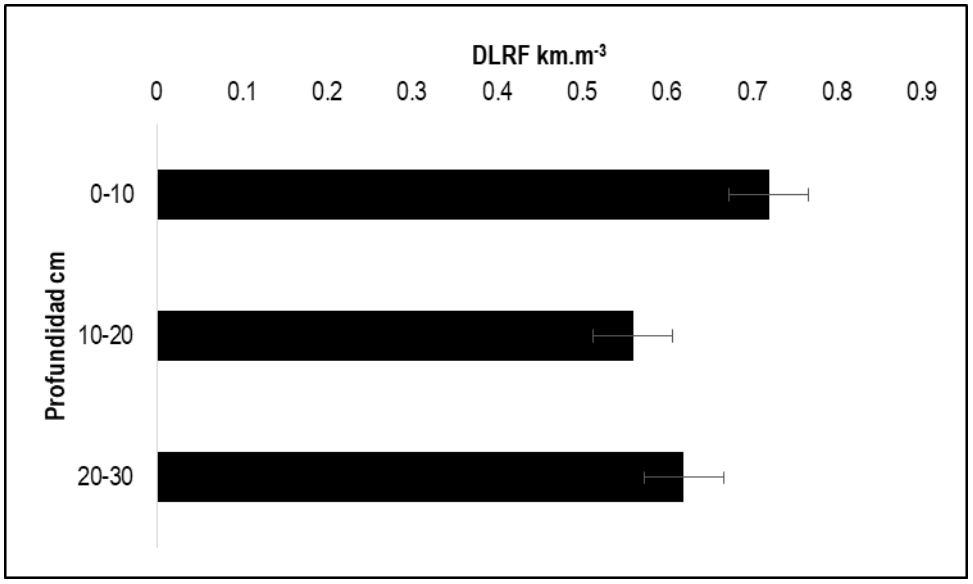

Figura 1.7. Densidad de Longitud de Raíces Finas a diferentes profundidades del suelo en plantaciones de teca en Tabasco, México. Las líneas en cada barra representan la desviación estándar.

En la interacción de los tratamientos fertilización química*profundidad no se encontraron diferencias significativas ($p>0.5$), sin embargo, en la figura 1.8 se observan incrementos altos en los tratamientos 90-60-60 y 120-60-60 kg ha^{-1} en la profundidad de 0-10 cm, con DLRF de 0.78, y 0.80 $km.m^{-3}$ respectivamente; en las profundidades 10-20 cm y 20-30 cm se observan las DLRF más bajas (0.49 y 0.48 $km.m^{-3}$, respectivamente), que corresponden a los tratamientos de fertilización 90-60-60 y 120-60-60 kg ha^{-1}.

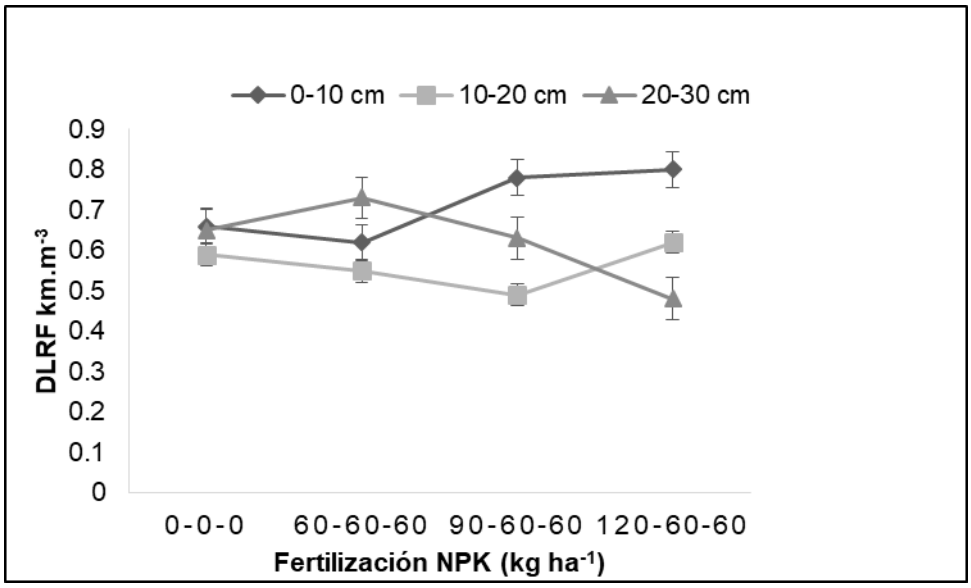

Figura 1.8. Efecto de los niveles de fertilización en la Densidad de Longitud de Raíces Finas de teca a diferentes profundidades del suelo en Tabasco, México. Las barras verticales representan la desviación estándar.

Los análisis estadísticos de la DLRF en las interacciones distancia*profundidad muestran diferencias significativas ($p<0.05$). En la figura 1.9 se observa que, en la distancia de 50 cm del árbol y en la profundidad de 0-10 cm se tiene la mayor DLRF con 0.97 $km.m^{-3}$. A mayor distancia de la base del árbol (100 y 175 cm) disminuye la DLRF hasta 0.66, 0.53 $km.m^{-3}$, respectivamente en la capa superficial, lo que no sucede en las siguientes profundidades (10-20 y 20-30 cm), disminuye a los 100 cm y aumenta a los 175 cm.

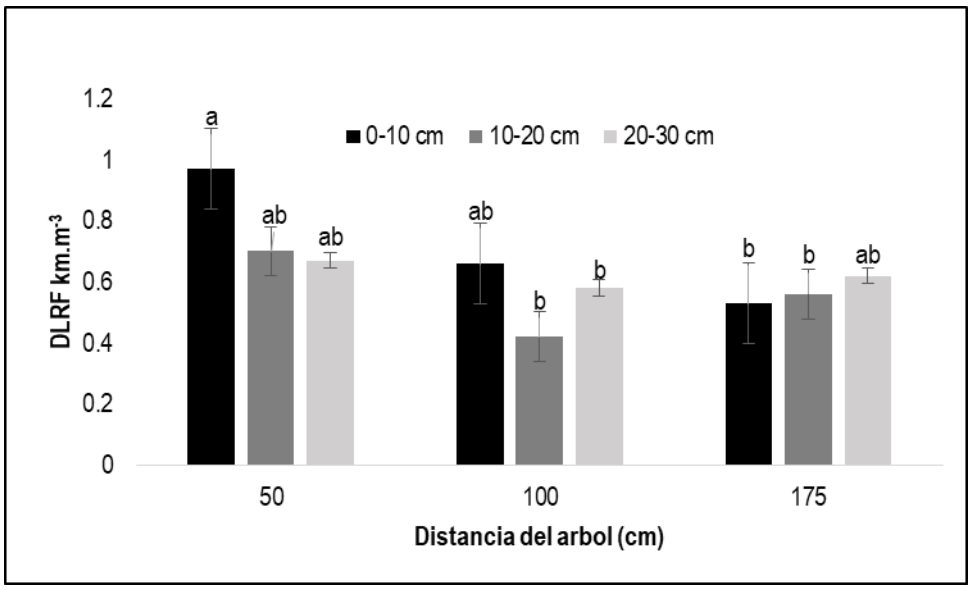

Figura 1.9. Densidad de Longitud de Raíces Finas en la interacción profundidad * distancia, en árboles de teca en Tabasco, México. Las líneas en cada barra representan la desviación estándar.

1.6 DISCUSIÓN

1.6.1 Caracterización del suelo Vertisol Léptico

Los Vertisoles son suelos arcillosos, pesados, que presentan grietas anchas y profundas en temporada seca, se reconocen por el horizonte vértico de diagnóstico, con un espesor de ≥ 25 cm. El calificador Léptico corresponde a la presencia de roca continua o material duro a ≤100 cm de la superficie del suelo (IUSS Grupo de Trabajo-WRB, 2014; Palma-López *et al*., 2017). Es probable que, debido a tales características, estos suelos presenten mala aireación y, en consecuencia, poco desarrollo de raíces de la vegetación natural y de los cultivos; por otro lado, el agrietamiento profundo característico de estos suelos puede causar la ruptura de las raíces durante la temporada seca (Jean *et al*., 2019).

1.6.2 Densidad de Longitud de Raíces Finas en el perfil

Las raíces de los árboles de teca, al disponer más fácilmente de nutrientes suplementarios proporcionados por el abono verde (AV) y los fertilizantes NPK en los tratamientos de fertilización, tienen menor necesidad de crecer y, por tanto, no necesitan explorar más allá del volumen superficial en busca de agua y minerales (Weemstra *et al*., 2017). El AV establecido en este estudio mediante *C. juncea*, fija N atmosférico, pudiendo aportar de 70 a 204 kg de N ha^{-1} (Vera *et al*., 2011). En este estudio, de acuerdo al tratamiento testigo (sin fertilizante), las raíces de los árboles de teca necesitan crecer más para explorar más superficie y encontrar los nutrientes y agua. Esto es consistente con otros estudios, como el de Wang *et al*. (2016) quienes evaluaron la adición de N como fertilizante, en una especie de abeto *(Cunninghamia lanceolata* (Lamb) Hook.) pero no encontraron incremento en la DLRF. Cuando las raíces tienen cerca los nutrientes, no necesitan explorar más volumen de suelo, pero en el caso contrario éstas profundizan para buscar agua y nutrientes (Yang *et al*., 2015; Nardini *et al*., 2016). En la interacción fertilizantes*AV la DLRF fue menor con las concentraciones más altas de fertilizante, esto es similar con lo reportado por diversos autores quienes han encontrado poco crecimiento

de raíces cuando se suministra fertilización, más aún cuando es complementada con AV (Wang *et al.,* 2016, Nardini *et al*., 2016).

En este estudio, los incrementos y distribución de la DLRF en los horizontes del suelo, pueden deberse a que los árboles de teca están en crecimiento y necesitan mayor profundidad para distribuirse, luego se restringen a la zona más fértil y accesible (Weemstra *et al*., 2017; Obrador *et al*., 2021). El 64% de la DLRF encontrada en las profundidades de 20-40 cm a los 36 meses de edad, es similar a lo reportado por Zhang *et al.* (2015) en ecosistemas forestales en tuya oriental (*Platycladus orientalis* L.*)*, encino (*Quercus dentata* Thunb.), sófora del Japón (*Sophora japónica* L.) a los 25-40 cm de profundidad. De igual manera, Prieto *et al*. (2015), en un estudio de los rasgos funcionales de la raíz en comunidades de vegetación a diferentes profundidades del suelo, encontraron plantas con mayor longitud específica de raíces en suelos menos fértiles. Esto puede deberse también al crecimiento de las raíces para la obtención del agua y nutrientes (Versini *et al*., 2014).

1.6.3 Densidad de longitud de raíces finas a diferentes distancias del árbol

La disminución de la DLRF a medida que aumenta la distancia de la base del árbol es consistente a lo reportado por Singh y Srivastava (1985) en plantaciones de teca de 19 y 29 años de edad; y a lo reportado por Moreno *et al*. (2005) en especies de *Quercus ilex* L. Este comportamiento, probablemente se debe a que las raíces profundizan para buscar agua en el suelo e incrementan el aporte de agua a la planta por lo que se extienden poco (Broedel *et al*., 2017; Fan *et al.,* 2017). Al respecto, Clement *et al*. (2019) en plantaciones jóvenes de teca (<10 años) y adultas (>10 años), encontraron que, en los primeros horizontes, hasta 20 cm, los valores de la DLRF eran altos, disminuyendo drásticamente en los siguientes horizontes. En otro estudio en plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* W.Hill*)* en edades de 20 meses, se encontró que la DLRF disminuyó en las profundidades de 10-50 cm (Bordron *et al*., 2019). Resultados similares se han encontrado en vegetación de haya común (*Fagus sylvatica* L.), mayores cantidades de raíces finas en el horizonte orgánico, disminuyendo en las siguientes profundidades

(Kutschera y Lichtenegger, 2002). En la mayoría de los ecosistemas, las raíces finas se concentran cerca de la superficie del suelo y su densidad disminuye potencialmente al aumentar la profundidad del suelo (Schenk, 2008).

Por otra parte, suponemos que la fertilización NPK aplicada a los tratamientos evaluados al momento del muestreo, junto con el carbono producido por las raíces muertas, contribuyó a que la DLRF aumentara (Phillips *et al*., 2012; Tefs y Gleixner, 2012). Además de lo anterior, el incremento en la DLRF puede deberse a que las concentraciones de nutrientes son comúnmente más altas en las capas superiores del suelo al aportar fertilizantes (Schenk *et al*., 2008). Moreno *et al*. (2005) evaluaron la DLRF en la encina (*Quercus ilex* L.) en distancias de 2.5 a 10 m del tronco del árbol y su interacción con la profundidad, no encontrando diferencias significativas. De acuerdo a otros estudios, los nutrientes de las plantaciones de teca a los cuatro y hasta cinco años, se incrementan cuando hay mayor acumulación y mineralización de la hojarasca (Vigulu *et al*., 2017).

1.7 CONCLUSIONES

La Densidad de Longitud de Raíces Finas disminuyó cuando se incrementó la dosis de fertilización química y cuando se estableció abono verde de *Crotalaria juncea* en las parcelas de teca. La mayor concentración de DLRF se encontró en las profundidades de 20-40 cm. A una distancia de 50 cm del tronco de la teca, la mayor DLRF se encuentra en los primeros 0-20 cm. A las distancias de 50 y 100 cm de la base del árbol y en las primeras capas, la DLRF es mayor que en las otras distancias y profundidad. La DLRF disminuye a medida que aumenta la distancia a la base del árbol y en la profundidad de 0-10 cm.

CAPÍTULO II. RIQUEZA Y DIVERSIDAD DE ARVENSES EN PLANTACIONES DE TECA CON *Crotalaria juncea* EN BALANCÁN, TABASCO.

2.1 RESUMEN

Las arvenses son plantas no deseadas, aunque pueden tener algunos usos como fijadoras de nitrógeno, como alimento o medicinal, crecen dentro de los cultivos de interés y pueden afectar su desarrollo y productividad. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de un cultivo de cobertura (*Crotalaria juncea)* sobre la riqueza y diversidad de arvenses, en plantaciones jóvenes de teca. En una plantación de teca de dos años, con tratamientos de fertilización se estableció un cultivo de cobertura en las calles, para el muestreo de arvenses se utilizó un cuadro metálico de 50 cm * 50 cm, de cada especie recolectada se registró el nombre científico, número de individuos y cobertura, para calcular la riqueza de especies (S), el índice de Shannon (H´) el índice de Uniformidad (E) y el índice de valor de importancia (IVI). Las plantaciones de teca a la edad de 4.3 años tuvieron la riqueza de especies (7) más baja, en la parcela con cobertura (CC) y en el tratamiento 150-60-60 kg ha^{-1}, los índices de H´ fueron bajos (0.91) a la edad de 2.7 años, en la parcela con cobertura (SC) y tratamiento testigo, se comportó similar el índice de E en la parcela SC (0.39). La especie *Phyla nodiflora* fue la de mayor Índice de Valor de Importancia (IVI, 201.15) a la edad de 2.7 años. Las familias más abundantes, fueron las Fabáceae (36%) y las Poaceae (29%).

Palabras claves: Cultivo de cobertura, fertilización química, malezas, fijación de nitrógeno.

2.2 ABSTRACT

Weeds are unwanted plants, although they may have some uses as nitrogen fixers, as food or medicinal, they grow within the crops of interest and can affect their development and productivity. The objective of this work is to evaluate the effect of a cover crop (Crotalaria juncea) on the richness and diversity of weeds in young teak plantations. In a two-year-old teak plantation, with fertilization treatments. A cover crop was established in the streets, for the sampling of weeds a 50 cm * 50 cm metal frame was used, for each species collected the scientific name was recorded, calculating the number of species, Shannon index (H´) and Uniformity index (E). Young teak plantations at the age of 4.3 years had the lowest number of species (7), in the plot with coverage (CC) and in the 150-60-60 kg ha-1 treatment, the H indices ´ low (0.91), they were at the age of 2.7 years, in the plot with cover (SC) and control treatment, the E index behaved similarly in the SC plot (0.39). The species Phyla nodiflora had the highest Importance Value Index (IVI, 201.15) at the age of 2.7 years. The most abundant families were the Fabaceae (36%) and the Poaceae (29%).

Keywords: Cover crop, chemical fertilization, weeds, nitrogen fixation.

2.3 INTRODUCCIÓN

La teca es originaria de Asia y fue introducida en México como plantación forestal comercial (PFC) para incrementar la forestación, es una especie apreciada por la dureza de su madera y su valor comercial (Midgley *et al*., 2015). A nivel nacional las PFC para uso maderable ocupan una superficie de 269, 600 ha, de las que, 65% se concentran en Tabasco, Veracruz, Campeche y Chiapas (CONAFOR, 2014).

En plantaciones jóvenes de teca, las arvenses generan una alta competencia por agua, luz, nutrientes y espacio, reduciendo el crecimiento de las mismas, debido a que la altura y cobertura de los árboles son bajas durante su periodo inicial de crecimiento (Garro, 2002; Fernández y Leguizamón, 2015). Las arvenses o "malezas" son plantas no cultivadas, no deseadas, consideradas inapropiadas dentro del cultivo principal; en sentido agronómico no presentan valor económico y generalmente son perjudiciales para éste, ya que compiten con él y tienen efectos negativos (Gliessman, 2002; Blanco y Leyva, 2007; Blanco*,* 2016). Presentan características morfológicas y fisiológicas que les representan algunas ventajas sobre los cultivos, entre las que destacan; su fácil germinación; su gran desarrollo de superficie fotosintética en estado de plántula, dado por un alto número de estomas foliares; su sistema radicular con alta densidad de raíces absorbentes que penetran fácilmente en el suelo, además de rizomas y tallos quebradizos que facilitan su diseminación (Garro, 2002; Blanco y Leyva *et al.,* 2007).

Los cultivos de cobertura (CC) son utilizados principalmente para mantener el suelo cubierto con biomasa viva o muerta, con la finalidad de protegerlo del impacto directo de las gotas de lluvia, la excesiva insolación y la acción del viento; además de reducir la escorrentía y erosión (Valdemar, 2000; da Gama *et al*., 2007, Florentín *et al*., 2011; Mirsky *et al*., 2013). Otra función importante que pueden cumplir los CC es el control de las arvenses que interactúan con el cultivo, las cuales son una de las causas primordiales de la disminución del rendimiento, ya que compiten por espacio, luz, agua y nutrientes (Berlingeri *et al*., 2008; Robačer *et al*., 2015). Entre las especies de plantas que pueden ser utilizadas como cultivos de cobertura destacan las fabáceas, ya que favorecen la sustentabilidad agrícola, mejoran el rendimiento debido a la fijación de nitrógeno del aire,

agregan materia orgánica al suelo, mejorando sus propiedades químicas, físicas y biológicas, y ayudan al control de plagas, enfermedades y arvenses (Peachey *et al*., 2002; Manici *et al*., 2004; Cherr *et al*. 2006; Alonso *et al*., 2018).

En este contexto, *Crotalaria juncea* L. ha sido utilizada como CC por su rápido crecimiento y competitividad, ya que puede acumular de 5.6 a 14 t ha^{-1} de materia seca (Giraldo, 2003; Parenti *et al*., 2021), proporcionando una cobertura eficiente de residuos que permanecen más tiempo en la superficie, en relación con otras leguminosas, debido a la alta relación C/N (29) (Carvalho y Amabile*,* 2006, Skinner *et al.,* 2012); ayuda en el control de arvenses y disminuye el uso de herbicidas (Brust *et al*., 2014; Alonso *et al*., 2018); además de la supresión, inhibe el crecimiento por el efecto de sustancias alelopáticas (Skinner *et al.,* 2012; Reiss *et al*., 2018). Con el uso de *C. juncea* como CC se busca mejorar las condiciones de producción, por los múltiples beneficios que ésta ofrece (Agüero *et al*., 2018): optimiza el manejo de las arvenses, mejora la productividad de la teca y reduce los costos de energía, mano de obra y maquinaria (Chauhan *et al*., 2006; Lawley *et al.,* 2011). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de *Crotalaria juncea* como cultivo de cobertura sobre la riqueza y diversidad de arvenses, en plantaciones jóvenes de teca.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Área de estudio

El presente estudio se realizó en un terreno privado de 2.2 ha, propiedad de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva (ASGv), ubicado en el municipio de Balancán, Tabasco (17°50'47.6'' N y 91°12'06.4'' W). El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2(x). La precipitación y la temperatura media anual de la zona es de 1,500 mm y 26.5-27°C, respectivamente (Aceves y Rivera, 2019), y la altitud de 42 msnm. Las plantas establecidas de teca son clones producidos por la empresa ASGv que, al inicio del estudio tenían dos años de edad y un arreglo topológico de marco real 3.5 x 3.5 m.

2.4.2 Establecimiento de *Crotalaria juncea* y diseño experimental

Para el establecimiento del CC se pasó la chapeadora con el tractor y se dio un paso de rastra. Se usaron semillas de *C. juncea* de un proveedor comercial, las cuales fueron sembradas al voleo en las calles de la plantación de teca. Se utilizaron 20 kg de semilla por hectárea. Posteriormente, a los 60 días de la siembra, se incorporó en el suelo. En las parcelas experimentales (P), se consideró un testigo sin fertilización 0-0-0 (P1) y se aplicaron tratamientos de fertilizantes NPK, 60-60-60 kg ha^{-1} (P2); 90-60-60 (P3) y 120-60-60 (P4) cuando las plantaciones tenían dos años de edad; a los tres y cuatro años se aplicaron los tratamientos, 0-0-0 (P1); 120-60-60 kg ha^{-1} (P2); 150-60-60 (P3) y 180-60-60 (P4) a los tres y cuatro años. Como fuente fertilizante se usaron urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60). La aplicación se realizó al suelo, a 20 cm de profundidad, en dos orificios, al norte y sur en la zona de goteo de cada árbol. El diseño experimental fue de bloques completamente al azar con un arreglo de parcelas divididas, el factor utilizado fue *C. juncea* como CC.

2.4.3 Muestreo de arvenses

Se hicieron dos muestreos de arvenses, uno a los 60 días de la siembra de *C. juncea* y un año y seis meses después de su incorporación al suelo, en cada tratamiento y en ambas parcelas, con (CC) y sin cobertura (SC) hicieron los muestreos usando cuadros

metálicos de 50 x 50 cm. Para cada una de las especies recolectadas, se registró el nombre común y/o científico, número de individuos y porcentaje de cobertura (Mostacedo y Fredericksen, 2000). Los datos registrados fueron sistematizados y analizados a través de Excel, usándose para calcular los índices de: Riqueza (S), que correspondió al número de especies, Índice de diversidad de Shannon (H') y de Uniformidad (E) (Magurran, 1988), mediante las siguientes formulas:

$$H' = -\Sigma[pi * \ln(pi)]$$

$$E = \frac{H'}{\ln S}$$

También se calculó el Índice de valor de importancia (IVI) incluyendo los valores absolutos y relativos de sus componentes: densidad (De), frecuencia (Fr) y dominancia (Do):

De = Número de plantas por especie/Unidad de área (m^2)

Fr = No. de ocurrencias de una especie/ No. total de sitios muestreados

Do = Porcentaje de cobertura de una especie/ Unidad de área (m^2)

$$\mathrm{rDe} = \mathrm{De}/\mathrm{Det}^*$$

$$\mathrm{rFr} = \mathrm{Fr}/\mathrm{Frt}^*$$

$$\mathrm{rDo} = \mathrm{Do}/\mathrm{Dot}^*$$

$$\mathrm{IVI} = \mathrm{rDe} + \mathrm{rFr} + \mathrm{rDo}$$

$$\mathrm{t}^* = \mathrm{total}$$

(Mostacedo Y Fredericksen, 2000).

2.5 RESULTADOS

2.5.1 Composición florística de la comunidad de arvenses en teca, Balancán, Tabasco.

La composición florística de la comunidad de arvenses de la plantación de teca comprendió 23 familias, 45 géneros y 48 especies, 37 son dicotiledóneas, 11 monocotiledóneas, una gimnosperma y un helecho (Cuadro 2.1). Las familias mejor representadas fueron: Fabaceae, Poaceae, Euphorbiaceae, Bignoniaceae y Malvaceae; y los géneros: *Croton*, *Cissus* y *Paspalum*, que presentaron dos especies, el resto estuvo representado por una sola.

Cuadro 2.1. Lista florística de la comunidad de arvenses registradas en parcelas con (CC)y sin cobertura (SC), con diferentes dosis de fertilización NPK en plantaciones de teca de 2.7 años (1: 0-0-0, 2: 60-60-60, 3: 90-60-60, 4: 120-60-60 kg ha^{-1}) y 4.3 años (1: 0-0-0, 2: 120-60-60, 3: 150-60-60, 4: 180-60-60 kg ha^{-1}) en Balancán, Tabasco.

No	Familia	No	Especies	2.7 años				4.3 años			
				1	2	3	4	1	2	3	4
Dicotiledóneas											
1	Acanthaceae	1	*Ruellia harveyana* Stapf								cc
2	Amaranthaceae	2	*Amaranthus hybridus* L.		cc						
3	Apocynaceae	3	*Thevetia ahouai* (L.) Vahl		sc						
4	Asteraceae	4	*Acmella repens* (Walter) Rich.	cc							
		5	*Cyanthillium cinereum* (L.) H.Rob.			sc					
5	Begoniaceae	6	*Begonia decandra* Pav. ex A.DC.	cc							
6	Bignoniaceae	7	*Adenocalymma inundatum* Mart. ex DC.					cc			
		8	*Bignonia capreolata* L.						cc	cc	
		9	*Cydista aequinoctialis* (L.) Miers				cc				
7	Cleomaceae	10	*Cleome viscosa* L.	cc sc	cc sc	cc sc	cc		cc		
8	Convolvulaceae	11	*Ipomea indica* (Burm.) Merr.	sc		sc	cc			cc	
9	Cucurbitaceae	12	*Cionosicys excisus* (Griseb.) C.Jeffrey		sc	sc					
10	Euphorbiaceae	13	*Acalypha arvensis* Poepp.								cc
		14	*Croton ciliatoglandulifer* Ortega	sc							
		15	*Croton draco* Schltdl. & Cham.			sc					
		16	*Euphorbia hirta* L.		cc						

Continúa…

11	Fabaceae	17	*Amphicarpaea bracteata* (L.) Fernald		sc						
		18	*Bauhinia variegata* L.							sc	
		19	*Calopogonium mucunoides* Desv.			cc	sc		cc		cc
		20	*Desmodium incanum* (Sw.) DC.	*sc*	*sc*	cc sc	sc			cc sc	cc
		21	*Grona triflora* (L.) H.Ohashi & K.Ohashi	cc		sc	cc	cc			
		22	*Mimosa púdica* L.						cc		cc sc
		23	*Senna pendula* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)			cc	cc	cc sc	cc sc	sc	
		24	*Vachellia cornigera* (L.) Seigler & Ebinger	cc	cc	cc sc		sc	sc		cc
12	Loganiaceae	25	*Spigelia anthelmia* L.				sc				
13	Malvaceae	26	*Guazuma ulmifolia* Lam.	sc			sc				
		27	*Malachra capitata* (L.) L.	cc		cc sc		cc sc	cc sc	cc sc	sc
		28	*Sida rhombifolia* L.		cc sc	cc	cc sc	cc sc	cc sc	cc	cc
14	Monimiaceae	29	*Mollinedia viridiflora* Tul.			cc					
15	Myrtaceae	30	*Myrcia hylobates* (Standl. ex Amshoff) E.Lucas & K.Samra		cc						
16	Phyllanthaceae	31	*Phyllanthus urinaria* L.	cc sc	sc	sc					
17	Rubiaceae	32	*Spermacoce latifolia* Aubl.	sc	sc	cc sc	sc	cc			
18	Verbenaceae	33	Phyla nodiflora (L.) Greene	cc sc	cc sc	cc sc	cc sc	cc sc	cc	sc	cc sc
		34	*Priva lappulacea* (L.) Pers.	sc			cc				
19	Vitaceae	35	*Cissus cacuminis* standll.	cc	cc		cc				
		36	*Cissus verticillata* (L.) Nicolson & C.E.Jarvis		cc sc	sc	sc				
		37	*Clematicissus opaca (*F.Muell.) Jackes & Rossetto				sc				
Monocotiledonea											
20	Cyperaceae	38	*Cyperus ochraceus* Vahl			sc	sc			cc	sc
		39	*Rhynchospora contracta* (Nees) J.Raynal			sc	sc	cc			
21	Poaceae	40	*Cenchrus echinatus* L.								cc
		41	*Chloris radiata* (L.) Sw.					cc sc	cc sc	cc sc	cc sc
		42	*Digitaria bicornis* (Lam.) Roem. & Schult.						sc		

		43	*Paspalum pectinatum* Nees	cc	cc	cc	cc	cc			
		44	*Paspalum notatum* Flüggé	sc	sc		sc				
		45	*Stapfochloa ciliata* (Sw.) P.M.Peterson			sc					
		46	*Urochloa meziana* (Hitchc.) Morrone & Zuloaga					sc			cc
Helecho											
22	Schizaeaceae	47	*Lygodium venustum* Sw.	sc	sc						
Gimnosperma											
23	Zamiaceae	48	*Zamia prasina* W.bull			cc					

En las plantaciones de 2.7 años la familia de arvenses más importante en las dos parcelas fue Fabaceae con 19% y 20% en SC y CC, respectivamente, en ambos casos destacaron también Malvaceae y Verbenaceae, y en CC Vitaceae, mientras que en parcelas SC se encontraron además Euphorbiacea, Rubiaceae y Cyperaceae (figura 2.1).

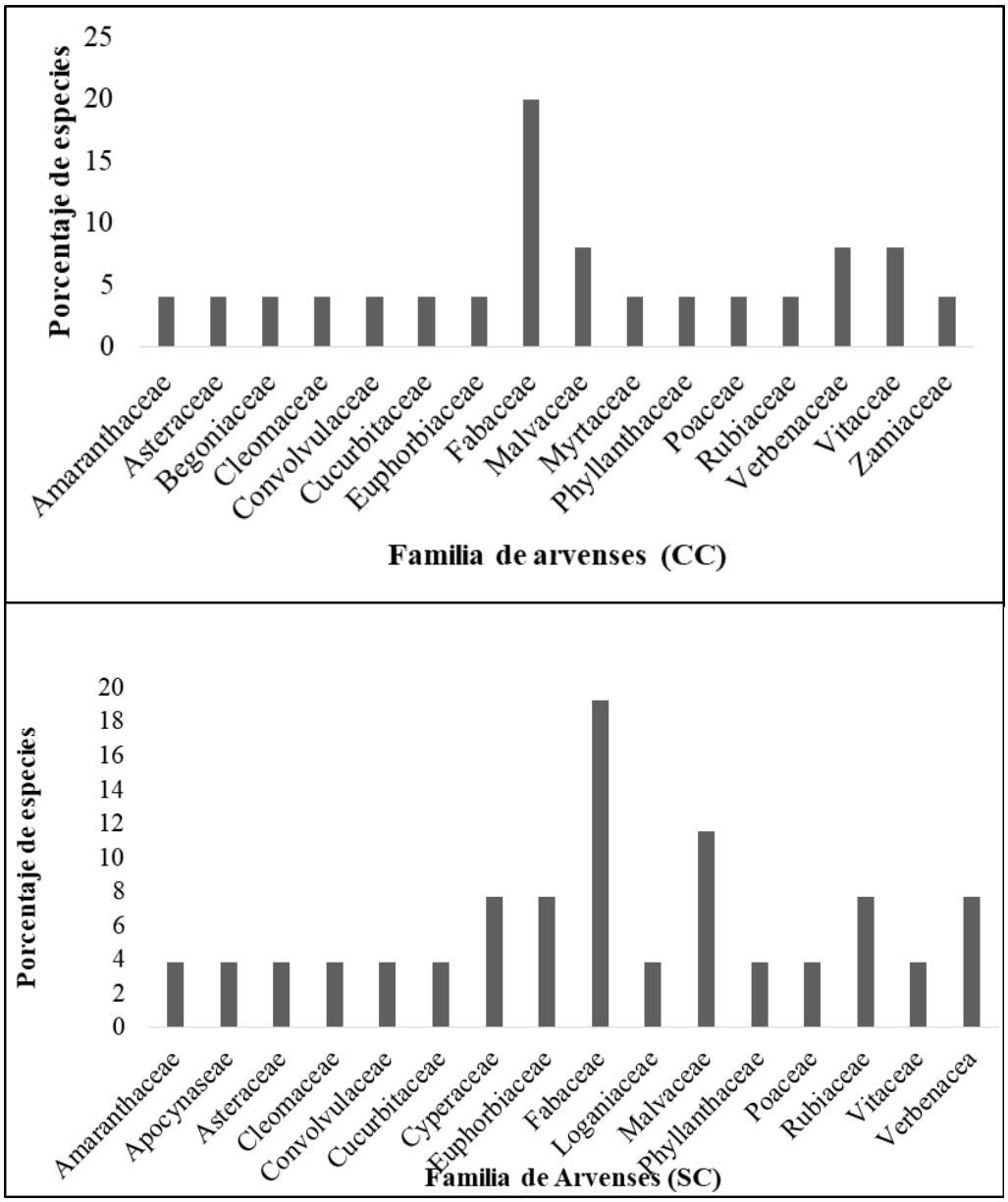

Figura 2.1. Familias de plantas representadas en una plantación de teca de 2.7 años de edad, con y sin cobertura (CC, SC).

Cuando la teca alcanzó 4.3 años se observó una disminución en el número de familias en las dos parcelas, mucho más visible en SC (figura 2.2). En las dos condiciones las fabáceas siguen teniendo los mayores porcentajes, 23% y 36% en CC y SC, respectivamente, aunque Poaceae mostró un importante incremento en la última (29%).

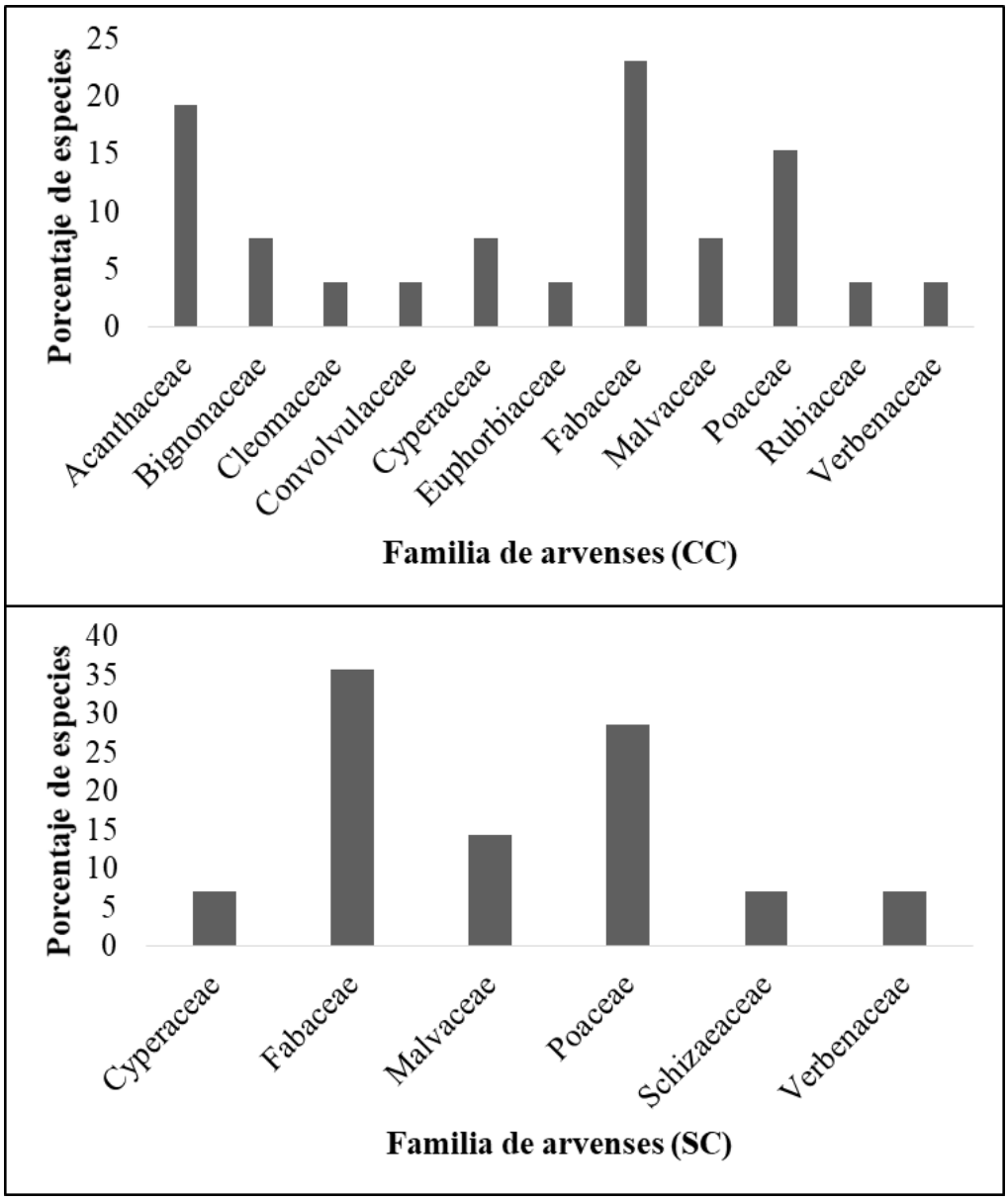

Figura 2.2. Familias representadas en una plantación de teca de 4.3 años.

2.5.2 Riqueza, diversidad y uniformidad de la comunidad de arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco

En la figura 2.3 se muestra el comportamiento de la riqueza de especies en los tratamientos de fertilización NPK y uso de CC en la plantación de teca de 2.7 años de edad. El menor valor se observó en el tratamiento 120-60-60 kg ha^{-1}, y el más alto en 90-60-60 kg ha^{-1}; la riqueza de especies en la parcela SC tuvo el mayor número (S=18) en el tratamiento 90-60-60 kg ha^{-1}.

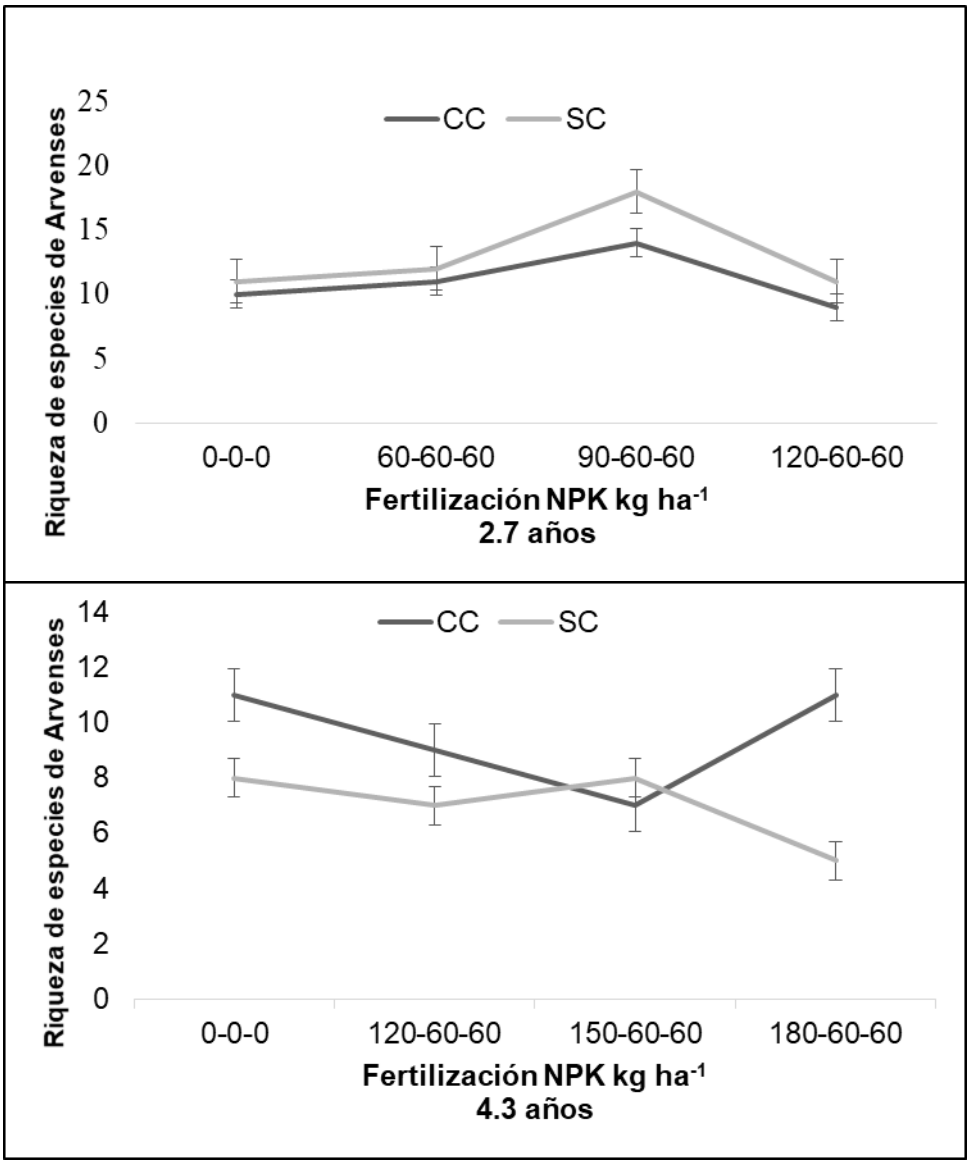

Figura 2.3. Comportamiento de la riqueza (S) de especies de arvenses en una plantación de teca en Balancán, Tabasco.

Para cuando las tecas alcanzaron 4.3 años de edad se observó un descenso general en este parámetro, los tratamientos con CC fueron más ricos en especies, en especial el testigo y el de fertilización más alta (S=11).

A los 2.7 años de las tecas la diversidad (H´) fue más alta en la parcela con CC (figura 2.4), en donde el tratamiento con fertilizante 90-60-60 kg ha^{-1} presentó el valor más alto (2.41); en tanto que en SC los valores más altos se observaron en 60-60-60 y 90-60-60 kg ha^{-1}; en las dos condiciones (CC y SC) el testigo presentó los valores más bajos.

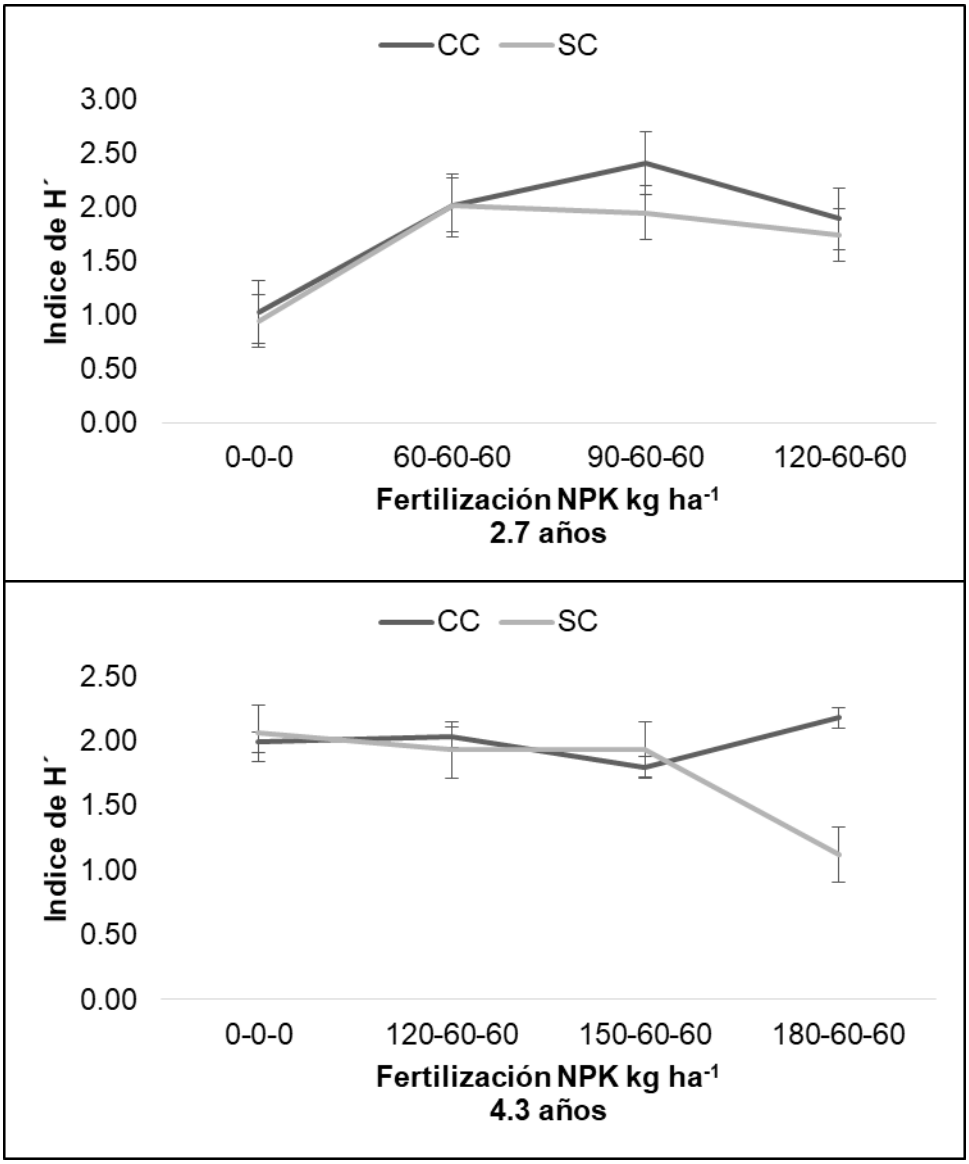

Figura 2.4. Comportamiento de la diversidad (H') en la comunidad de arvenses en una plantación de teca en Balancán, Tabasco.

A la edad de 4.3 años, en el tratamiento 180-60-60 kg ha^{-1} de CC se tuvo el valor más alto (H´=2.18) y el más bajo (H'=1.80), en 150-60-60 kg ha^{-1}. En la parcela SC el testigo fue el que tuvo mayor valor (H´=2.06).

En la figura 2.5 se muestra el comportamiento de la uniformidad (E) de la comunidad de arvenses en la plantación de teca; a los 2.7 años de edad en la parcela CC el tratamiento con fertilización 90-60-60 kg ha^{-1} mostró el valor más alto (E=0.89); el más bajo se observó en el testigo. En la parcela SC el valor más alto se presentó en 60-60-60 kg ha^{-1} y el más bajo en el testigo.

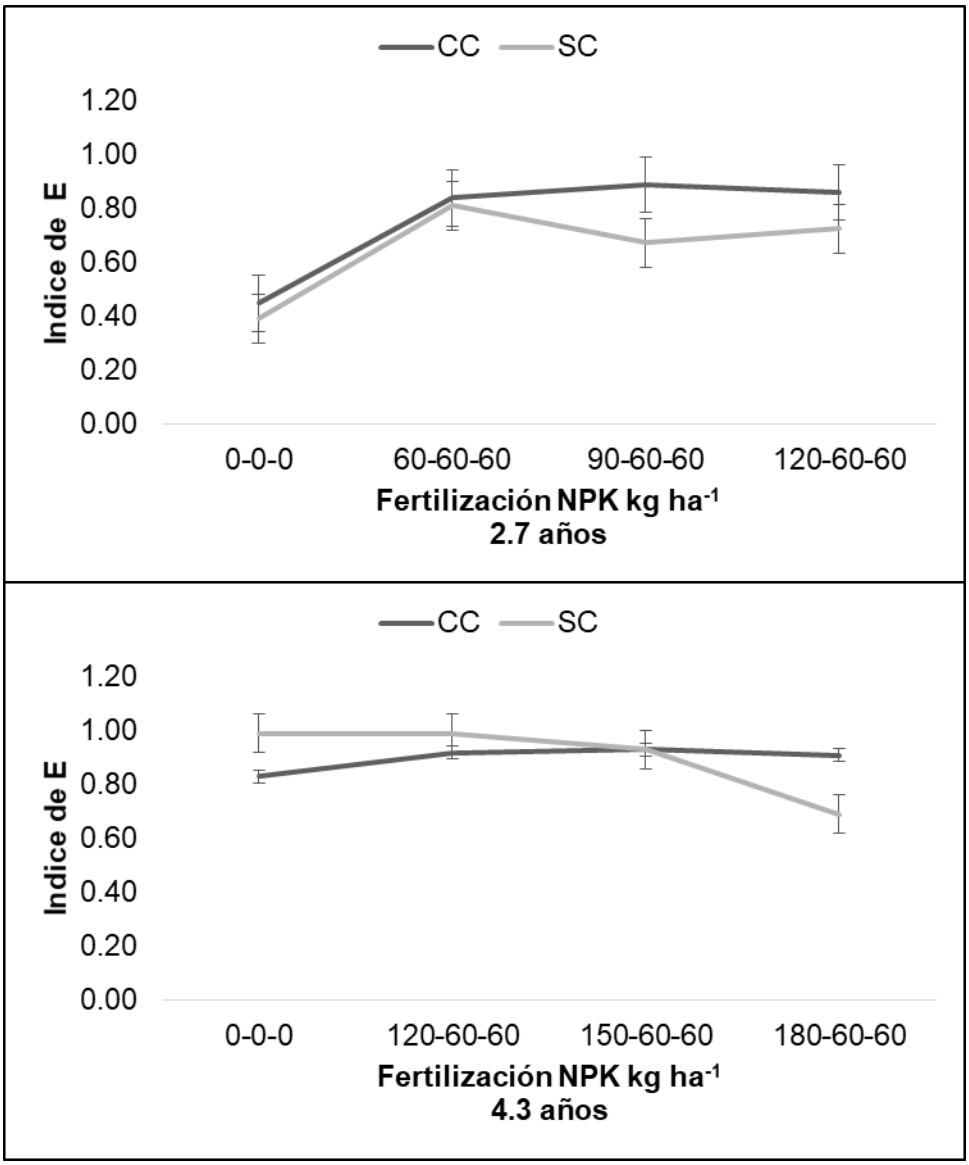

Figura 2.5. Comportamiento de la uniformidad (E) de la comunidad de arvenses en plantaciones de Teca.

Cuando las plantas de teca llegaron a la edad de 4.3 años, los valores de E de las arvenses fueron en general altos, los valores en todos los tratamientos en CC fueron similares, con excepción del testigo, que fue ligeramente más bajo. Un comportamiento similar se observó en parcelas SC, donde el tratamiento con 180-60-60 kg ha^{-1} presentó el menor valor.

2.5.3 Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies de arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco

En el Cuadro 2.2 se muestran los valores del IVI y de sus tres componentes, correspondientes a las cuatro principales especies de arvenses registradas en la plantación de teca de 2.7 años de edad. *Phyla nodiflora* fue la más importante, pues se encontró en la parcela con cobertura en primer lugar en el testigo (0-0-0) y en el tratamiento 90-60-60 kg ha^{-1}, en el primero registró el IVI más alto de todas las especies; en 60-60-60 y 120-60-60 kg ha^{-1} quedó en tercer lugar. En la parcela sin cobertura, se encontró en la primera posición en 0-0-0 y en 120-60-60 kg ha^{-1}, y en segundo en 60-60-60 y 90-60-60 kg ha^{-1}.

Otras especies de importancia en esa edad fueron las del género *Paspalum pectinatum* en CC tuvo el IVI más alto en el tratamiento 60-60-60 kg ha^{-1}, el segundo en 0-0-0 y 90-60-60 kg ha^{-1} y cuarto en 120-60-60 kg ha^{-1}; *Paspalum notatum* en SC se encontró en tercer lugar en 90-60.60 y 120-60-60 kg ha^{-1}.

En CC, *Cissus sicyoides* ocupó el cuarto sitio en 90-60-60 kg ha^{-1}; en SC estuvo en tercero en 60-60-60 kg ha^{-1} y cuarto en 120-60-60 kg ha^{-1}. *Desmodium incanum* en CC estuvo en cuarto lugar en 120-60-60 kg ha^{-1}, mientras que en SC quedó en segundo en 120-60-60 kg ha^{-1} y cuarto en 60-60-60 kg ha^{-1}. *Cleome viscosa* solo se encontró en CC, ocupando el segundo sitio en 60-60-60 kg ha^{-1} y cuarto en 0-0-0. *Ipomea indica* ocupó el segundo puesto, tanto en CC, 120-60-60 kg ha^{-1}, como en SC 0-0-0. En tanto que en CC, *Malachra capitata* estuvo en tercer lugar en 90-60-60 kg ha^{-1} y en SC en cuarto en 90-60-60 kg ha^{-1}.

Cuadro 2.2. Índice de valor de importancia (IVI) y sus componentes: densidad (DeR), frecuencia (FR) y dominancia (DoR) relativas de las cuatro principales especies de arvenses en parcelas con (CC) y sin cobertura (SC) en una plantación de teca de 2.7 años.

Tratamientos	Nombre científico	DeR	FR	DoR	IVI
Parcela de teca con cobertura (CC)					
0-0-0	*Phyla nodiflora* (L.) Greene	73.96	42.86	84.34	201.15
	Paspalum pectinatum Nees	10.42	19.05	3.61	33.08
	Phyllanthus urinaria L.	5.21	4.76	3.61	13.58
	Cleome viscosa L.	4.17	4.76	1.20	10.13
60-60-60	*Paspalum pectinatum* Nees	34.78	19.05	22.22	76.05
	Cleome viscosa L.	13.04	19.05	16.67	48.76
	Phyla nodiflora (L.) Greene	8.70	19.05	11.11	38.85
	Cissus verticillata (L.) Nicolson & C.E.Jarvis	8.70	4.76	5.56	19.01
90-60-60	*Phyla nodiflora* (L.) Greene	21.62	8.00	14.55	44.17
	Paspalum pectinatum Nees	18.92	16.00	7.27	42.19
	Malachra capitata (L.) L.	8.11	4.00	18.18	30.29
	Desmodium incanum (S.W.) DC.	8.11	16.00	3.64	27.74
120-60-60	*Cydista aequinoctialis* (L.) Miers	4.55	3.33	66.67	74.55
	Ipomea indica (Burm.) Merr.	22.73	30.00	7.78	60.51
	Phyla nodiflora (L.) Greene	22.73	30.00	6.67	59.39
	Paspalum pectinatum Nees	13.64	13.33	2.22	29.19
Parcela de teca sin cobertura (SC)					
0-0-0	*Phyla nodiflora* (L.) Greene	74.8	42.11	75.91	182
	Ipomea indica (Burm.) Merr.	3.20	23.68	1.82	28.7
	Paspalum notatum Flüggé	8.39	10.53	5.00	23.91
	Guazuma ulmifolia Lam.	0.65	2.63	11.36	14.64
60-60-60	*Sida rhombifolia* L.	3.39	10.00	37.65	51.04
	Phyla nodiflora (L.) Greene	13.56	22.5	5.56	41.61
	Cissus verticillata (L.) Nicolson & C.E.Jarvis	22.88	10.00	5.56	38.44
	Desmodium incanum (S.W.) DC.	13.56	10.00	14.2	37.76
90-60-60	*Rhynchospora contracta* (Nees) J.Raynal	70.18	2.56	10.92	83.66
	Phyla nodiflora (L.) Greene	25.15	21.43	31.00	77.58
	Cyperus ochraceus Vahl	30.99	9.52	22.27	62.79
	Malachra capitata (L.) L.	4.09	9.52	8.73	22.35
12-60-60	*Phyla nodiflora* (L.) Greene	43.86	20.93	61.84	126.63
	Desmodium incanum (S.W.) DC.	13.16	37.21	12.56	62.93
	Paspalum notatum Flüggé	7.89	20.93	7.73	36.55
	Cissus verticillata (L.) Nicolson & C.E.Jarvis	7.89	2.33	7.73	17.95

Otras especies como *Sida rhombifolia*, *R. contracta* y *Cydista aequinoctialis* aparecieron en CC en primer lugar en 60-60-60 kg ha^{-1}, 90-60-60 kg ha^{-1} y 120-60-60 kg ha^{-1}, respectivamente. En tanto que *Phyllanthus urinaria* y *Cyperus ochraceus* estuvieron en

tercer lugar en 0-0-0 en CC y 90-60-60 kg ha^{-1} en SC, respectivamente. Finalmente, se ubicó a *Guazuma ulmifolia* ocupando el cuarto sitio en 60-60-60 kg ha^{-1} en SC.

En el cuadro 2.3, se enlistan las arvenses identificadas en las plantaciones de teca de 4.3 años de edad, en este caso, la especie más importante resultó ser *Chloris radiata*, que se registró en parcelas CC en el primer lugar en los tratamientos 120-60-60 kg ha^{-1}, 150-60-60 y 180-60-60 kg ha^{-1}, y en cuarto en 0-0-0; en las parcelas SC fue la especie más importante en 180-60-60 kg ha^{-1}, donde registró el IVI más alto de esta fecha, y ocupó el tercer sitio en 0-0-0 y 120-60-60 kg ha^{-1}.

Phyla nodiflora se encontró en CC ocupando el tercer y cuarto puesto en 0-0-0 y 180-60-60 kg ha^{-1}, respectivamente; y en SC en primero en 150-60-60 kg ha^{-1}, tercero en 180-60-60 kg ha^{-1} y cuarto en 0-0-0. *Senna pendula* se registró en CC en segundo lugar en 0-0-0, y en SC en primero, segundo y tercer lugar en 120-60-60, 0-0-0 y 150-60-60 kg ha^{-1}, respectivamente. *Sida rhombifolia* fue la especie más importante en 0-0-0 en CC, y ocupo el tercer y cuarto lugar en 120-60-60 y 180-60-60 kg ha^{-1} en SC. *Malachra capitata* se encontró en tercer lugar en 120-60-60 kg ha^{-1} CC y en 180-60-60 kg ha^{-1} SC. *Urochloa meziana* ocupó el tercer lugar en CC 180-60-60 kg ha^{-1} y primero en SC 0-0-0. Las otras arvenses que se encontraron en CC en esta fecha fueron: *Calopogonium mucunoides* y *Cleome viscosa* en segundo y cuarto lugar, respectivamente en 120-60-60 kg ha^{-1}; *Bignonia capreolata*, *Ipomea indica* y *Cyperus ochraceus* en segundo, tercero y cuarto lugar en 150-60-60 kg ha^{-1}; y *Cenchrus echinatus* en segundo en 180-60-60 kg ha^{-1}. En parcelas SC se localizó a *Digitaria bicornis* en el segundo lugar en 120-60-60 kg ha^{-1}; y *Bignonia variegata* y *Desmodium incanum* en segundo y cuarto sitio en 180-60-60 kg ha^{-1}.

Cuadro 2.3. Índice de valor de importancia (IVI) y sus componentes: densidad (DeR), frecuencia (FR) y dominancia (DoR) relativas de las cuatro principales especies de arvenses en una parcela con (CC) y sin cobertura (SC) en una plantación de teca de 4.3 años.

Tratamiento	Nombre científico	DeR	FR	DoR	IVI
Parcela de teca con cobertura					
0-0-0	*Sida rhombifolia* L.	32.43	11.76	28.57	72.77
	Senna pendula (Humb. & Bonpl. ex Willd.)	10.81	26.47	17.14	54.42
	Phyla nodiflora (L.) Greene	13.51	11.76	14.29	39.56
	Chloris radiata (L.) Sw.	13.51	8.82	8.57	30.91
120-60-60	*Chloris radiata* (L.) Sw.	29.17	34.62	26.92	90.71
	Calopogonium mucunoides Desv.	12.50	15.38	7.69	35.58
	Malachra capitata (L.) L.	8.33	15.38	11.54	35.26
	Cleome viscosa L.	12.50	3.85	15.38	31.73
150-60-60	*Chloris radiata* (L.) Sw.	25.00	26.09	38.24	89.32
	Bignonia Capreolata L.	21.88	13.04	20.59	55.51
	Ipomea indica (Burm.) Merr.	15.63	13.04	8.82	37.49
	Cyperus ochraceus Vahl	18.75	8.70	8.82	36.27
180-60-60	*Chloris radiata* (L.) Sw.	16.67	18.18	34.29	69.13
	Cenchrus echinatus L.	11.11	18.18	14.29	43.58
	Urochloa meziana (Hitchc.) Morrone & Zuloaga	11.11	18.18	8.57	37.86
	Phyla nodiflora (L.) Greene	11.11	13.64	8.57	33.32
Parcela de teca sin cobertura					
0-0-0	*Urochloa Meziana* (Hitchc.) Morrone & Zuloaga	9.09	15.38	53.57	78.05
	Senna pendula (Humb. & Bonpl. ex Willd.)	27.3	30.77	17.86	75.9
	Chloris radiata (L.) Sw.	18.18	15.38	7.14	40.71
	Phyla nodiflora (L.) Greene	9.09	7.69	7.14	23.9
120-60-60	*Senna pendula* (Humb. & Bonpl. ex Willd.)	14.29	33.33	28.57	76.19
	Digitaria bicornis (Lam.) Roem. & Schult.	14.29	16.67	21.43	52.38
	Sida rhombifolia L.	28.57	8.33	14.29	51.19
	Chloris radiata (L.) Sw.	7.14	16.67	7.14	30.95
150-60-60	*Phyla nodiflora* (L.) Greene	26.67	36.36	15.38	78.41
	Bauhinia variegata L.	20.00	9.09	15.38	44.48
	Senna pendula (Humb. & Bonpl. ex Willd.)	6.67	9.09	23.08	38.83
	Desmodium incanum (S.W.) DC.	6.67	9.09	15.38	31.14
180-60-60	*Chloris radiata* (L.) Sw.	79.41	50.00	65.00	194.41
	Malachra capitata (L.) L.	11.76	12.50	12.50	36.76
	Phyla nodiflora (L.) Greene	2.94	12.50	17.50	32.94
	Sida rhombifolia L.	2.94	12.50	2.50	17.94

2.6 DISCUSIÓN

2.6.1 Composición florística de la comunidad de arvenses en la plantación de teca en Balancán, Tabasco

Las familias con mayor número de especies en este estudio fueron Fabaceae y Poaceae, resultados similares a los de Naranjo *et al*. (2020), quienes encontraron a Poaceae con el mayor número de especies en cultivo de caña de azúcar con y sin AV, seguidas por Convolvulaceae y Euphorbiaceae. En tanto, Obrador *et al*. (2017) en caña de azúcar con *C. juncea*, destacaron a las familias Euphorbiaceae, Asteraceae, Poaceae y Scrophulariaceae, que en conjunto sumaron 53.13% del total de arvenses. Sánchez y Guevara (2013) en cultivo de maíz tuvieron mayor número de especies en las familias Compositae, Poaceae, Euphorbiaceae, Solanaceae y Fabaceae con un 63.89%, más de la mitad del total de especies. Jiménez *et al*. (2020) en una plantación de teca en la zona central del litoral de Ecuador, reportaron a Compositae, Cyperaceae y Euphorbiaceae como las familias mejor representadas.

2.6.2 Riqueza, diversidad y uniformidad de la comunidad de arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco

Con respecto a los índices de diversidad en las plantaciones de teca de 2.7 años de edad, el valor más bajo de riqueza (S) de arvenses, se observó en el tratamiento testigo en la parcela CC, lo que puede estar relacionado con un efecto de supresión de *C. juncea,* sobre algunas especies por competencia por nutrientes, luz, agua y un eventual efecto alelopático (Jabran *et al*., 2015; Sturm *et al*., 2018). Lo anterior se corrobora al observar que los valores de este parámetro, en general fueron más altos en la parcela donde no se tuvo cobertura. Mientras que los valores más altos, en las parcelas CC como SC en el tratamiento 90-60-60, probablemente estén relacionados con el aporte de nutrientes vía fertilización mineral, cuya pronta disponibilidad puede estar favoreciendo la presencia y el desarrollo de algunas especies de arvenses (Liebman y Mohler, 2001). Además de la aplicación de fertilizante químico, el N aportado por el cultivo de cobertura, una leguminosa con capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico, puede estar estimulando la germinación de las semillas (Teasdale y Pillai, 2005).

Por otra parte, a los 4.3 años de edad de los árboles de teca, los valores de S en general fueron menores que a los 2.7 años; los más bajos se observaron en SC 180-60-60 y CC 150-60-60 kg ha^{-1}. Esta disminución puede estar relacionada con el hecho de que la cobertura de la biomasa de los árboles haya suprimido el desarrollo de algunas especies que son susceptibles a la sombra, variación de la temperatura y luz solar, ya que las condiciones son desfavorables para la germinación de las semillas de éstas (Alvarado *et al*., 2012; Brust *et al*., 2014).

De igual manera, la diversidad (H´) en la plantación de 2.7 años fue mayor en la parcela CC, en comparación a cuando los árboles alcanzaron los 4.3 años, sobre todo en SC 180-60-60 y CC 150-60-60 kg ha^{-1}, los hallazgos de este estudio son similares a los reportados por Obrador *et al*. (2017) quienes, en una investigación donde se analizó la comunidad de arvenses en cultivo de caña de azúcar con el uso de AV *C. juncea* y con fertilización, aunque en este caso los valores más altos se encontraron en el testigo. El valor de la diversidad de Shannon (H´) se ha calculado en muchos estudios ecológicos, en los que en general, ha mostrado valores que van de 1.5 a 3.5 y que reflejan una diversidad media, siendo este índice sensible a los valores de S (Magurran, 1988).

Por su parte, la uniformidad (E) presentó valores altos en las dos edades y en las dos condiciones estudiadas (CC, SC); a los 2.7 años se registraron los más bajos en los testigos; los más altos se registraron en 90-60-60 en parcelas CC y 60-60-60 en SC. A los 4.3 años los valores fueron similares que en la edad anterior. El valor de E varía de 0 a 1, los más altos corresponden a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Magurran, 1988). Recientemente, diversos estudios han mostrado beneficios de los CC al afectar la riqueza y diversidad de las especies de arvenses, por lo que pueden ser utilizados para suprimirlas de forma eficaz y sostenible, lo que conlleva a una reducción en el uso de herbicidas (Uchino *et al*., 2012; Dorn *et al*., 2015).

2.6.3 Índice de Valor de Importancia (IVI) de las arvenses en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco

Los altos valores de IVI y de los componentes del mismo presentados por *Phyla nodiflora* en plantaciones de teca de las dos edades estudiadas se sustentan en el hecho de ser una planta rastrera con mucho poder invasivo, que puede establecerse en diferentes tipos de suelo y cultivos; se ha documentado su capacidad de inhibir otras especies a través de la generación de sustancias alelopáticas, además de alcanzar una altura entre 30-90 cm y cubrir áreas de hasta 25 m^2 en cinco años (Rodríguez *et al*., 1985; Méndez, 2003; Hernández, 2016).

Dos especies de gramíneas del género *Paspalum*, *P. pectinatum* y *P. notatum*, nativas de América, figuraron también entre las más importantes en la plantación de teca de 2.7 años; fueron más notables en las dosis más altas de fertilización nitrogenada y en CC. Estos pastos son comunes en terrenos pantanosos y abandonados, orillas de cultivos y caminos en el trópico mexicano; se ha documentado su propagación por semillas y vegetativa. Una vez establecidos crecen formando densas matas de estolones, rizomas y raíces gruesas que inhiben el crecimiento y establecimiento de otras plantas. Son persistentes y competitivas, toleran la sequía, inundaciones esporádicas, el pastoreo continuo, y tienen potencial para seguir dominando la comunidad décadas después del abandono (Rojas-Sandoval, 2022; Vibrans, 2009).

Cissus sicioides es una vitácea originaria de México, América Central y el Caribe que, una vez establecida, crece trepando por el dosel, apoyándose en zarcillos enrollados. Si se corta la planta, las ramas y tallos restantes pueden desarrollar raíces aéreas que llegarán al suelo, regenerándose de nuevo. Es considerada una maleza que puede representar un problema potencial en cítricos y otras plantaciones frutales y forestales en el trópico (Rojas-Sandoval, 2020).

Desmodium incanum, leguminosa originaria de los trópicos y subtrópicos americanos, es un arbusto perenne que se desarrolla en bordes de caminos, pastizales, suelos volcánicos y áreas secas a húmedas con vegetación de porte bajo. Es un problema ocasional en cultivos de café, plátano y arroz. Se ha documentado su resistencia a

herbicidas, pastoreo, cultivo y fuego. Su dispersión se basa en la capacidad de sus semillas para adherirse a personas, animales y maquinaria. Compite y persiste con algunas gramíneas dominantes e invasivas y también puede servir de transporte a plagas y enfermedades de cultivos de leguminosas, aunque su capacidad de fijación de N puede ser de utilidad en cultivos intercalados (Buddenhagen, 2014).

Cleome viscosa especie de la familia Cleomaceae originaria de Asia, ahora con distribución pantropical, es una maleza ambiental y agrícola con impacto económico moderado en arrozales y plantaciones de caña de azúcar. Produce una gran cantidad de semillas que pueden dispersarse por el viento, el agua y la maquinaria agrícola; no tienen latencia y germinan fácilmente, para comenzar a florecer de tres a cuatro semanas después de la germinación; el ciclo de vida dura aproximadamente tres meses (Rojas-Sandoval, 2015).

Ipomea indica, especie de la familia Convolvulaceae, es una enredadera perenne y vigorosa de rápido crecimiento, puede extenderse en el suelo o trepar hasta 12 m en los árboles, lo que puede limitar el crecimiento de la teca en etapa juvenil. Se presenta en hábitats perturbados, crece rápidamente a pleno sol, cuando la humedad es abundante y el suelo fértil (Holm *et al.,* 1991; Csurhes, 2016).

Malachra capitata es una malvácea nativa de América, invasora en los trópicos del viejo mundo; tiene frutos esquizocarpos que se descomponen y se dispersan individualmente, además de una gran capacidad de producción de semillas; forma poblaciones densas limitando el crecimiento del pasto; es común en pastizales, orillas de caminos y vegetación secundaria; se desarrolla en suelos compactados, húmedos y arcillosos; es tolerante a inundaciones y a la radiación solar (Vibrans, 2009).

Cydista aequinoctialis es una liana de la familia Bignoniaceae, esta condición puede afectar el crecimiento y manejo de los árboles de teca, crece principalmente en biomas tropicales húmedos y bajo ciertas condiciones de temperatura, donde puede presentar alta incidencia (Gentry, 1991).

Rhynchospora contracta corresponde a la familia Cyperaceae, la tercera más grande de las monocotiledóneas, es una arvense anual que se encuentra en una variedad de

hábitats, sobre todo en zonas húmedas, pero igual está bien representada en áreas secas en muchos tipos de vegetación (Gonzalez *et al*., 2018).

Las arvenses más importantes en las plantaciones de teca de 4.3 años fueron:

Chloris radiata es una monocotiledónea de la familia Poaceae, es una arvense común en algunos cultivos como el arroz; es nativa de América Tropical, donde florece y fructifica todo el año. Se ha documentado que ha desarrollado resistencia a algunos herbicidas como el glifosato (Hoyos *et al*., 2021).

Senna pendula es una planta arbustiva de 2 a 4 m, de rápido crecimiento, de la familia Fabaceae, nativa de América del Sur, se ha dispersado a varias partes del mundo como planta ornamental y es reportada como maleza ambiental en Australia. Se desarrolla en los márgenes de cuerpos de agua y carreteras, vegetación secundaria derivada del bosque tropical mesófilo, y terrenos baldíos; se reproduce por semillas, chupones y desechos del jardín (Rzedowski y Rzedowski, 1997).

Sida rhombifolia es una de las plantas más comunes en el trópico mexicano y una maleza internacionalmente importante, de origen incierto en el Viejo Mundo; prospera en orillas de caminos, sitios urbanos y lugares muy perturbados. La planta florece a 3-4 meses de edad y puede producir más de 10,000 semillas, además de rebrotar fácilmente si se corta o es dañada. Se propaga por semillas, cuya dormancia se rompe fácilmente; éstas se dispersan con agua, maquinaria agrícola, ganado y por contaminación de semillas de siembra. En África se ha observado dispersión por hormigas (Vibrans, 2010).

Urochloa meziana es una especie de la familia Poaceae, nativa y probablemente endémica de México, donde se ha encontrado en pastizales y matorrales xerófilos, como ruderal y márgenes de campos de cultivo y en terrenos inundables (Rzedowski y Rzedowski, 2001).

2.6 CONCLUSIONES

La comunidad de arvenses de la plantación de teca estuvo compuesta por 23 familias, 45 géneros y 48 especies, 37 de ellas son dicotiledóneas. Fabaceae y Poaceae fueron las familias mejor representadas en las dos edades estudiadas, observándose un decremento en el número de éstas a los 4.3 años.

La riqueza de especies de la comunidad de arvenses a los 2.7 años presentó valores más altos en parcelas SC; en cambio los de diversidad y uniformidad fueron más altos en parcelas CC, siendo similares en todos los tratamientos. Para los 4.3 años, los valores de S y E disminuyeron ligeramente con respecto a la primera edad, pero los de H' fueron similares.

Phyla nodiflora fue la especie más importante de la comunidad de arvenses; a los 2.7 años, figuraron también dos especies de *Paspalum*. A los 4.3 años *Chloris radiata* fue la de mayor importancia.

CAPÍTULO 3. ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LA BIOMASA TOTAL Y SUELO DE UNA PLANTACION DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) EN TABASCO, MÉXICO.

3.1 RESUMEN

El problema del cambio climático se debe más que nada a la ruptura del ciclo del carbono. En este contexto, las plantaciones forestales comerciales representan sistemas productivos que ayudan en la captura y almacenamiento de carbono. El objetivo de este trabajo fue estimar en plantaciones jóvenes de teca, el almacenamiento de carbono en la biomasa total, hojarasca seca y suelo por el efecto de los fertilizantes químicos y un abono verde (AV). En las parcelas experimentales (P) se usaron plantas clonales de teca, establecidas en un arreglo de marco real de 3.5 * 3.5. Cuando la teca tenía dos años de edad se aplicaron tratamientos de fertilizante (NPK): testigo 0-0-0 (P1), 60-60-60 (P2), 90-60-60 (P3) y 120-60-60 (P4) kg ha^{-1}. Cuando los árboles tenían tres y cuatro años, se consideraron los tratamientos, 0-0-0 (P1), 120-60-60 (P2), 150 60-60 (P3) y 180-60-60 (P4) kg ha^{-1}. Se usó como abono verde (AV) *Crotalaria juncea,* sembrada al voleo en los callejones de las parcelas. El resultado en el almacenamiento de carbono (C) en la biomasa total fue de 32.45, 62.79 t C ha^{-1}, a la edad de 3.2 y 4.7 años respectivamente. En las interacciones para biomasa total el tratamiento que tuvo mayor efecto en las dos edades fue el testigo * sin AV (sin abono verde). El almacenamiento de C en la hojarasca fue similar en las dos edades 3.2 y 4.7 años, con 0.52 t C ha^{-1}, con las dosis 120-60-60 y 150-60-60 kg ha^{-1}**;** en las interacciones, a la edad de 3.2 años la parcela sin AV y con dosis 90-60-60 kg ha^{-1} se encontró el mayor incremento en el almacenamiento de carbono. El almacenamiento de carbono en el suelo (COS) en este estudio fue de 14.4 t ha^{-1}, con la dosis 150-60-60 kg ha^{-1}, en la interacción con AV * fertilización química si hubo diferencias significativas, aumentando a 16.29 t ha^{-1} de COS.

Palabras clave: abono verde, fertilización, hojarasca, modelo alométrico, suelo.

3.2 ABSTRACT

The problem of climate change is due more than anything to the breaking of the carbon cycle. In this context, commercial forest plantations represent productive systems that help capture and store carbon. The objective of this work was to estimate in young teak plantations, the carbon storage in the total biomass, dry litter and soil due to the effect of chemical fertilizers and a green manure (AV). In the experimental plots (P) clonal teak plants were used, established in a real frame arrangement of 3.5 * 3.5. When the teak was two years old, fertilizer treatments (NPK) were applied: control 0-0-0 (P1), 60-60-60 (P2), 90-60-60 (P3) and 120-60-60. (P4) kg ha-1. When the trees were three and four years old, the treatments were considered: 0-0-0(P1), 120-60-60(P2), 150 60-60(P3) and 180-60-60(P4) kg ha $^{-1}$. Crotalaria juncea was used as green manure (AV), sown broadcast in the alleys of the plots. The result in the storage of carbon (C) in the total biomass was 32.45, 62.79 t C ha-1, at the age of 3.2 and 4.7 years respectively. In the interactions for total biomass, the treatment that had the greatest effect in the two ages was the control * without AV (without green manure). The storage of C in the litter was similar in the two ages 3.2 and 4.7 years, with 0.52 t C ha^{-1}, with the doses 120-60-60 and 150-60-60 kg ha-^{1}; in the interactions, at the age of 3.2 years the plot without AV and the dose 90-60-60 kg ha^{-1}, the greatest increase in carbon storage was found. Soil carbon storage (COS) in this study was 14.4 t ha^{-1}, with the 150-60-60 kg ha^{-1} dose, in the interaction with AV * chemical fertilization if there were significant differences, increasing to 16.29 t ha-^{1} of SOC.

Keywords: allometric model, fertilization, green manure, litter, soil.

3.3 INTRODUCCIÓN

El carbono (C) almacenado en los bosques tropicales húmedos es el resultado del equilibrio, a largo plazo, entre el C asimilado durante la fotosíntesis y su pérdida durante la respiración y mortalidad de los árboles (Brando *et al*., 2019). El problema del cambio climático debido al incremento del CO_2 se origina, más que nada, a partir de la ruptura del ciclo del carbono; la mitigación del cambio climático requiere de políticas públicas congruentes, del uso de tecnologías y medidas racionales que permitan, por una parte, reducir sus emisiones, y por otra, almacenar y mantener un equilibrio tanto en bosques como en plantaciones forestales comerciales (Correa y Romero, 2016; Ávila *et al.*, 2001). El uso de combustibles fósiles genera los gases causantes del cambio climático global (Becerril y Hernández, 2007). Las plantaciones forestales ayudan a mitigar la emisión de esos gases que son ocasionadas por los vehículos motorizados e industrias, medio por el cual estos contaminantes son liberados (Erakhrumen y Inaede, 2018). Las plantaciones forestales comerciales cumplen una función como sumideros de carbono porque secuestran grandes cantidades de CO_2 principalmente en su biomasa radical (Dhillon y Von Wuehlisch, 2013).

Un dato muy importante que se tiene, es que los bosques y plantaciones forestales son reservorios de C y absorben aproximadamente 30% de todas las emisiones de CO_2 en un año (Pan *et al*., 2011); por lo que se han convertido en medios estratégicos para la fijación de CO_2 atmosférico. En el caso de las plantaciones forestales comerciales, la madera se convierte en un sumidero de C de corto y mediano plazo cuando se construyen productos como muebles y viviendas, pero también entre 30% y 40% de la biomasa total queda retenida en los suelos por efecto de la hojarasca incorporada y de la biomasa radical del arbolado (López *et al*., 2018).

La teca es una especie caducifolia que pierde sus hojas durante la temporada seca, lo que le permite aguantar sequías severas donde hay muy poca precipitación hasta por cinco meses del año. Se adapta bien a sitios húmedos y se desarrolla exitosamente en donde hay lluvia durante todo el año y no hay una verdadera temporada seca. Las plantaciones de teca tienen un potencial de producir 26.7 t C ha^{-1} $año^{-1}$, según González

et al. (2014), aunque otros autores han reportado hasta 151.37 t C ha^{-1} $año^{-1}$ (López *et al*., 2018).

Debido a la importancia del almacenamiento de carbono en las plantaciones forestales comerciales y el problema del cambio climático ocasionado por los gases de efecto invernadero, este trabajo tiene como objetivo estimar el almacenamiento de carbono en la biomasa total, hojarasca seca y suelo en plantaciones jóvenes de teca tratadas con fertilizante químico y un abono verde (AV) en Balancán, Tabasco.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 Área de estudio y diseño experimental

El presente estudio se estableció en un terreno privado de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva (ASGv) (coordenadas 0690555 m E, 1974127 m N), donde se ocuparon 2.2 ha, ubicadas en el municipio de Balancán, Tabasco. El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2(x). La precipitación media anual de la zona es de 1,500 mm, la temperatura media es de 26.5-27°C (Aceves y Rivera, 2019) y la altitud es de 42 msnm.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, el suelo es franco arcillo-arenoso, con pH de 7.5, medianamente alcalino, contenido medio de materia orgánica del suelo (MOS, 3.5 %), la capacidad de intercambio catiónico (CIC, 22.85 $Cmol_{(c)}$ kg^{-1}) corresponde a un nivel medio, tiene concentración media de nitrógeno total (Nt, 0.14%), el fosforo (P, 7.65 mg kg^{-1}) tiene contenido medio; las bases intercambiables presentan contenido alto de calcio (Ca, 12.33 $Cmol_{(c)}$ kg^{-1}), bajo de magnesio (Mg, 0.62 $Cmol_{(c)}$ kg^{-1}) y muy bajo de potasio (K, 0.15 $Cmol_{(c)}$ kg^{-1}).

Las plantas de teca son clones de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva (ASGv) que, cuando se inició el estudio tenían dos años de edad, con un arreglo de marco real de 3.5 x 3.5 m. En las parcelas experimentales (P), se aplicaron tratamientos de fertilizantes NPK con las dosis 0-0-0 (P1), 60-60-60 (P2), 90-60-60 (P3) y 120-60-60 (P4) kg ha^{-1} cuando las plantaciones tenían dos años de edad, incrementándose a los tres y cuatro años con los tratamientos 0-0-0 (P1), 120-60-60 (P2), 150-60-60 (P3) y 180-60-60 (P4) kg ha^{-1}. Como fuente de fertilizante se usaron urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60). Los fertilizantes fueron aplicados con espeque a 20 cm de profundidad, en dos orificios localizados al norte y sur, en la zona de goteo de cada árbol. El diseño experimental fue de bloques al azar con un arreglo de parcelas divididas, el factor utilizado fue el abono verde (AV) *Crotalaria juncea*, con densidad de 20 kg ha^{-1} de semilla, sembrándose al voleo en los callejones de la plantación, posteriormente después de los 60 días de siembra se incorporó al suelo.

3.4.2. Cálculo del carbono en la biomasa total y hojarasca seca

Después de la aplicación de los tratamientos con fertilizante y abono verde se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1.30 m) con un vernier, cuando los árboles tenían dos años, y con una forcípula forestal cuando superaron los tres años. Para la altura total (H) se midieron cinco árboles por parcela, con pistola haga (± 0.1 cm).

Para estimar la biomasa aérea del árbol, se utilizó un modelo alométrico general, desarrollada por Kenso *et al*. (2020) para teca:

$$\mathbf{AGB} = 0.0649 \times \mathrm{DBH}^{2.5702}$$

Donde:

AGB: Biomasa aérea del árbol (kg de peso seco)

DBH = Diámetro a la altura del pecho (DBH, 1.30 m)

H = Altura total (m).

La biomasa subterránea de los árboles de teca se cuantificó mediante el siguiente modelo alométrico (Kenso *et al*., 2020):

$$\mathbf{BGB} = 0.0460 \times \mathrm{DBH}^{2.1763}$$

Donde:

BGB: Biomasa de raíces de los árboles (kg de peso seco)

DBH: Diámetro a la altura del pecho (DBH, 1.30 m)

Para el cálculo del carbono de la hojarasca seca, primero se colocaron aleatoriamente trampas biológicas elaboradas de malla fina (plástica) con dimensiones de 1.5 m por 1.5 m. sujetándose a estacas, con la finalidad de que no tocaran la superficie del suelo y evitar cualquier tipo de contaminación o incluso efectos de mineralización (Pulido y Díaz, 2005). El material vegetativo se colectó después de la aplicación de los tratamientos, y se depositó en bolsas de papel horadadas, etiquetándose con los datos del sitio. La

hojarasca se llevó al laboratorio y se secó a 65ºC, en una estufa con circulación forzada de aire, hasta peso constante (Murtinah *et al*., 2016).

Los valores de la hojarasca seca, biomasa aérea y subterránea, se multiplicaron por el factor 0.52 para calcular el carbono, estimado por Jha (2005) para la teca; los resultados de las dos biomasas se sumaron para tener la biomasa total. El factor de conversión de carbono corresponde al porcentaje de carbono en masa, es decir, carbono 50%; oxígeno 41%; hidrógeno 6%; nitrógeno 1% y cenizas 2%. Por tanto, la cantidad de carbono por tonelada de materia seca se aproxima a 500 kg (50%).

3.4.3 Cálculo de carbono orgánico del suelo

Después de la aplicación de la fertilización y del establecimiento de *C. juncea* se realizaron muestreos de suelos, en cada uno de los tratamientos; los muestreos se hicieron a una profundidad de 30 cm, con una barrena de acero inoxidable, las muestras se depositaron en bolsas de plástico rotuladas y se llevaron al laboratorio, secándose a temperatura ambiente, se molieron y tamizaron (2 mm); el carbono orgánico se determinó por el método de Walkley y Black (1934), el cual se basa en la oxidación, por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado.

De los resultados obtenidos en el laboratorio, se calculó la cantidad de carbono orgánico del suelo (COS), con la ecuación propuesta por Rojas *et al*. (2009).

$$\boldsymbol{COS} = CO\ (Da)Pr$$

donde:

COS = Carbono orgánico del suelo (t ha^{-1});

CO = Carbono orgánico (%)

Da = Densidad aparente (g cm^3)

Pr = Profundidad del suelo (cm)

3.4.4 Análisis estadístico

Los datos del almacenamiento de carbono de la biomasa total, hojarasca y del suelo, se analizaron en el software estadístico Infostat 2020, mediante análisis de varianza y prueba de medias por el procedimiento de Tukey ($p<0.05$).

3.5 RESULTADOS

3.5.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa total

La plantación de teca a la edad de 3.2 años presentó un valor estimado de 66.77 t ha^{-1} de biomasa seca total, de ésta el 25% corresponde a biomasa seca radical (16.69 t ha^{-1}); a la edad de 4.7 años la biomasa seca total de teca estimada fue de 104.7 t ha^{-1}, de esto, 22.5% corresponde a biomasa seca radical (23.56 t ha^{-1}). El almacenamiento de carbono en la biomasa total (biomasa aérea y raíz), en la plantación de teca a los 3.2 años mostró diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$), en los tratamientos de fertilización química, el valor más alto 32.45 t C ha^{-1}, se observó en 60-60-60 kg ha^{-1} (figura 3.1), y el almacenamiento más bajo de 27.12 t C ha^{-1}, se encontró en el tratamiento 90-60-60 kg ha^{-1}. En las plantaciones de teca de 4.7 años de edad no hubo diferencias estadísticas ($p>0.05$), sin embargo, se observan ligeros incrementos (62.79 t C ha^{-1}) en respuesta a la fertilización, con el nivel de N más alto en 180-60-60 kg ha^{-1}; mientras que el almacenamiento de carbono más bajo en la biomasa total se encontró en el tratamiento 150-60-60 kg ha^{-1}.

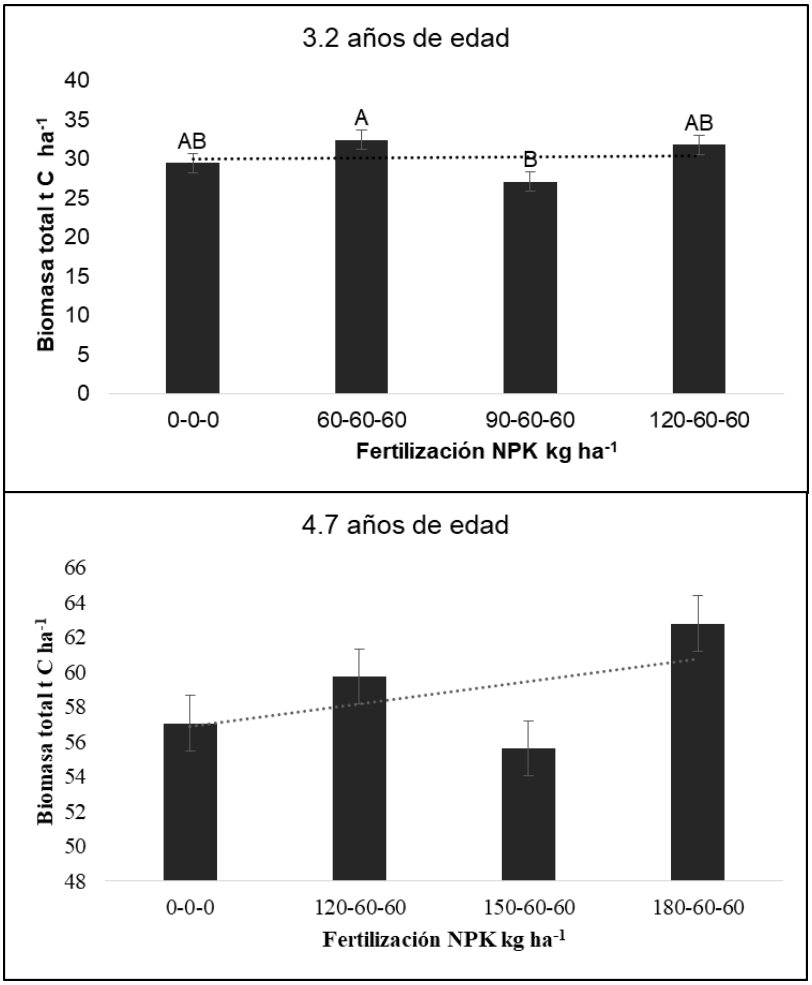

Figura 3.1. Efecto de la fertilización química en el almacenamiento de carbono en la biomasa total, en árboles de teca.

A los 3.2 años, el análisis estadístico de la interacción de la fertilización química * AV si mostró diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$, figura 3.2), el tratamiento testigo en la parcela sin AV, fue el que presentó mayor almacenamiento de carbono (35.05 t C ha^{-1}) disminuyendo paulatinamente conforme aumentó la dosis de fertilización, sucediendo lo contrario en la parcela con AV y fertilización, donde se va incrementando el carbono en la biomasa total.

En la interacción fertilización química * AV a la edad de 4.7 años (figura 3.2), se encontró diferencia estadística significativa ($p<0.05$), se observan incrementos en el carbono al aumentar la fertilización química junto con el AV, en comparación con la fertilización sin AV, donde el almacenamiento de carbono es alto en el tratamiento testigo y disminuye al

aumentar la fertilización con N, hasta 150-60-60 kg ha^{-1}, para luego incrementar en el siguiente tratamiento.

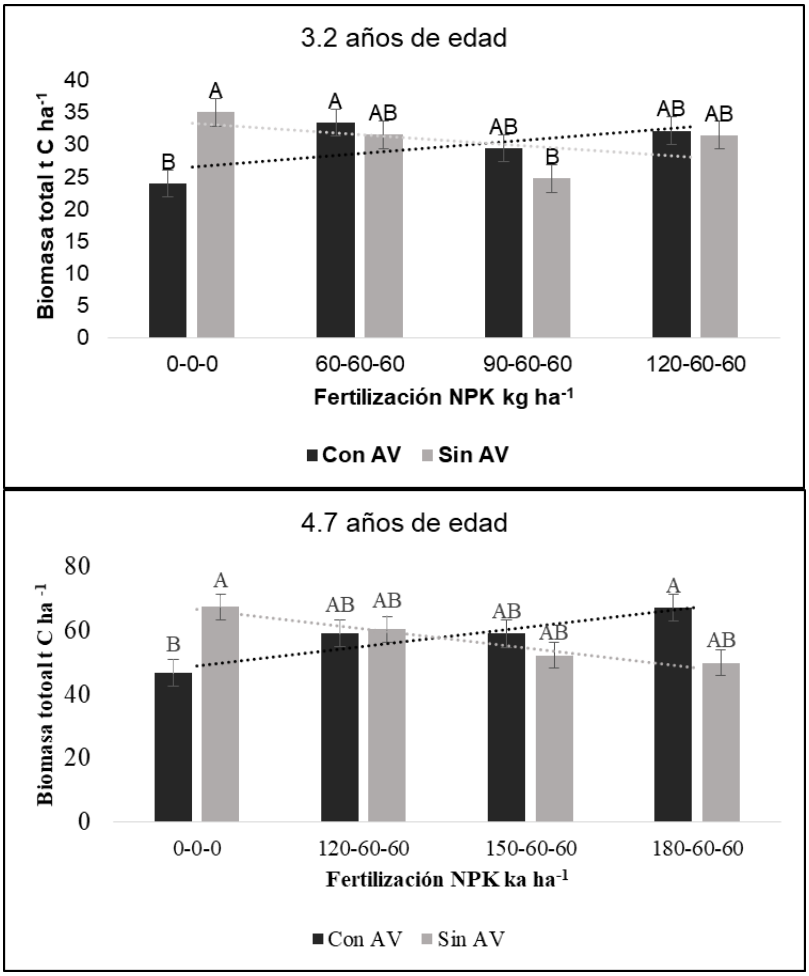

Figura 3.2. Interacciones de la fertilización * AV en el contenido de carbono en la biomasa total en teca.

3.5.2 Carbono almacenado en la hojarasca seca

El carbono almacenado en la hojarasca seca no presentó diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$, figura 3.3) cuando la teca alcanzó 3.2 años de edad, se observa poco incremento cuando aumenta la dosis de fertilización, siendo la dosis 120-60-60 kg ha^{-1} la de almacenamiento mayor (0.52 t C ha^{-1}). Cuando las plantaciones de teca tenían 4.7 años de edad, el almacenamiento de carbono en la hojarasca seca no mostró diferencias significativas ($p>0.05$), respecto a la fertilización química, se observó un

aumento gradual hasta la dosis 150-60-60 kg ha^{-1} con 0.52 t C ha^{-1}, disminuyendo con el tratamiento más alto.

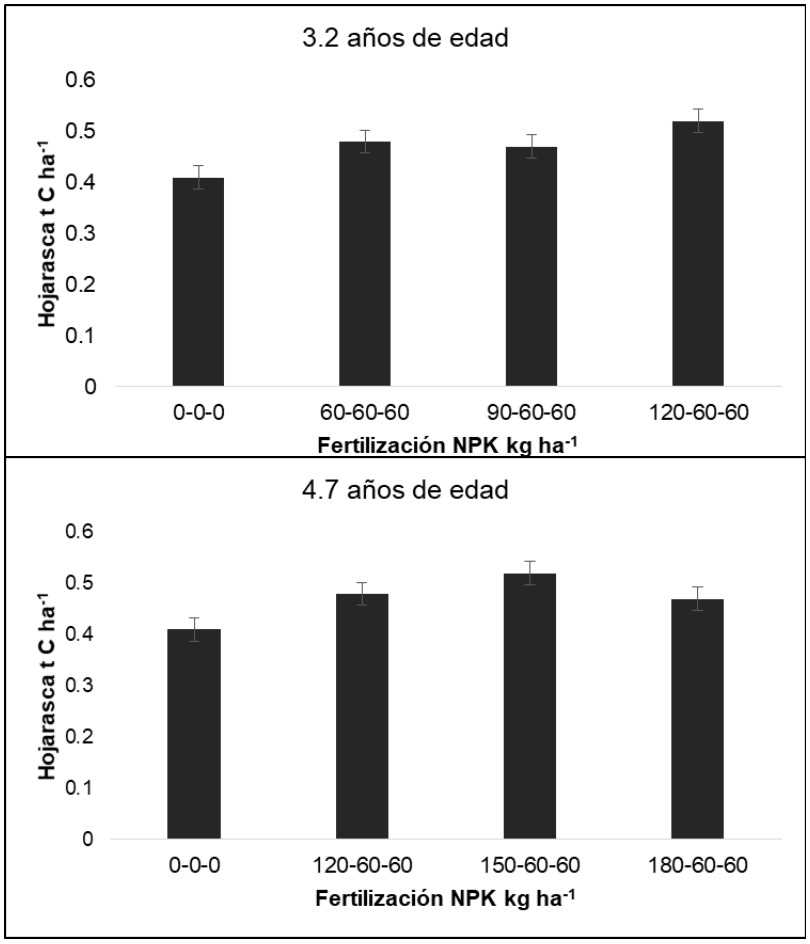

Figura 3.3. Efecto de la fertilización química en el almacenamiento de carbono en la hojarasca seca en teca.

En la interacción fertilización química * AV en la hojarasca tampoco se encontraron diferencias significativas ($p<0.05$, figura 3.4), la dosis 90-60-60 kg ha^{-1} sin AV fue la que mostró el mayor incremento a la edad de 3.2 años, con 0.6 t C ha^{-1}, aunque con AV los incrementos son bajos en comparación a los de los tratamientos sin AV, la dosis más alta, 120-60-60 kg ha^{-1}, fue la que presentó mayor incremento con 0.5 t C ha^{-1}.

En la interacción fertilización química * AV, en la plantación de Teca de 4.7 años de edad (figura 3.4), tampoco se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$), hay un mayor incremento en el testigo * AV, con 0.56 t C ha^{-1}, en lo que respecta a los

tratamientos sin AV, los que tuvieron mejores incrementos fueron las dosis 60-60-60 y 90-60-60 kg ha^{-1} con 0.53 y 0.52 t C ha^{-1}, respectivamente.

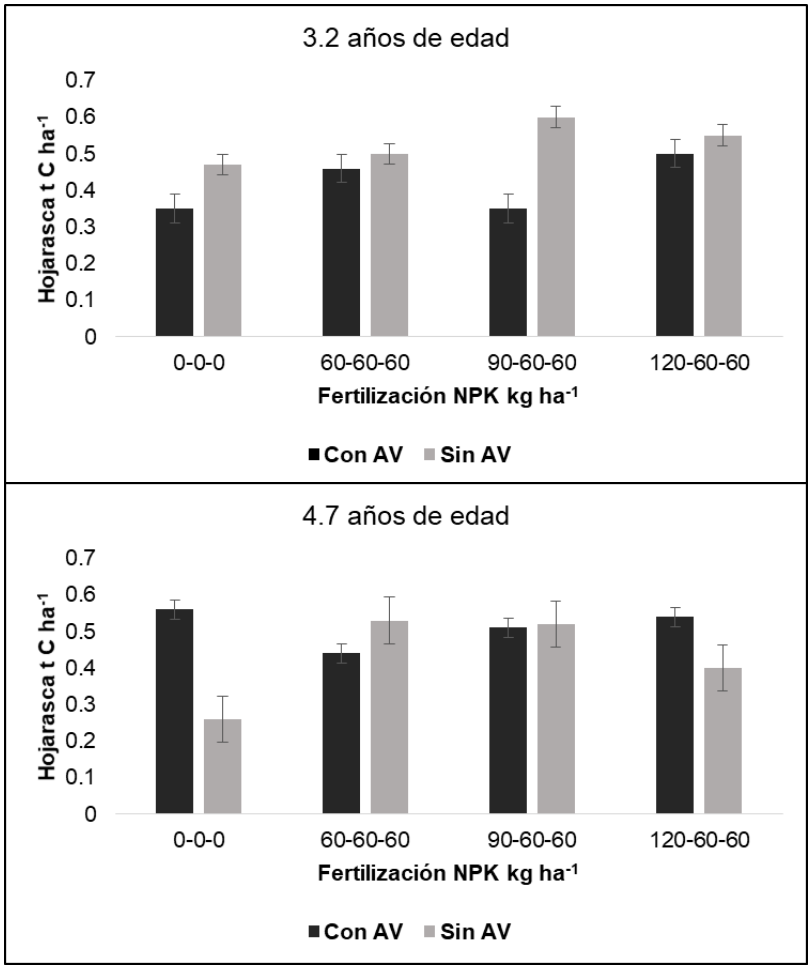

Figura 3.4. Interacciones de la fertilización * AV en el almacenamiento de carbono en la hojarasca seca en teca.

3.5.3 Almacenamiento de carbono en el suelo

El análisis estadístico en el almacenamiento de carbono en el suelo si presentó diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$), en los tratamientos con fertilización química (figura 3.5), el tratamiento 150-60-60 kg ha^{-1}, es el que tuvo mayor almacenamiento de C en el suelo (14.4 COS t ha^{-1}).

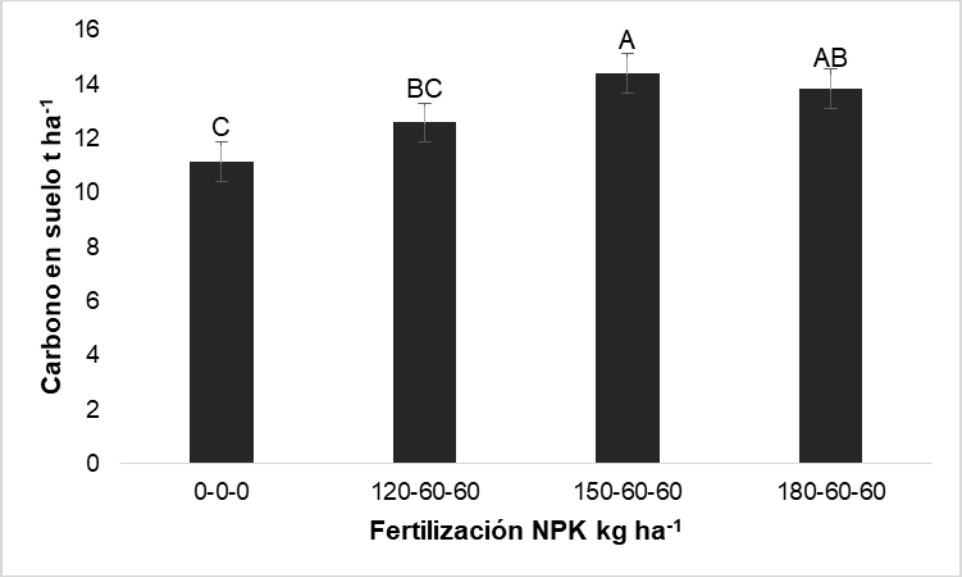

Figura 3.5. Almacenamiento de Carbono en el suelo en una plantación de teca.

En la figura 3.6, se observan las interacciones de la fertilización química * AV, encontrándose diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$) en la parcela con AV en el tratamiento 150-60-60 kg ha^{-1}, con un almacenamiento de 16.29 t C ha^{-1}, aunque en la parcela sin AV fue más bajo, el tratamiento 150-60-60 kg ha^{-1}, fue el que tuvo mayor efecto en esa parcela con 12.52 t C ha^{-1}.

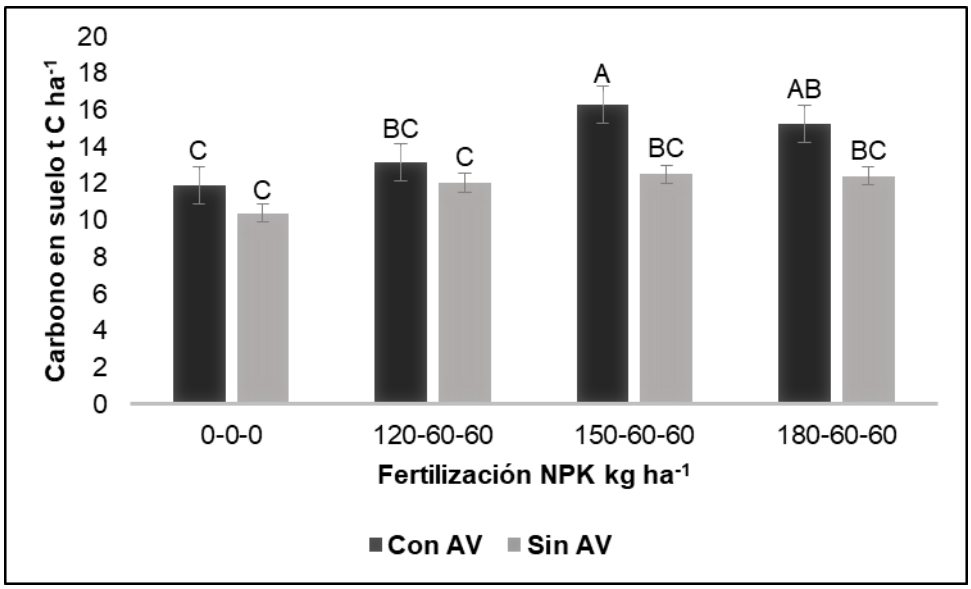

Figura 3.6. Interacción de la fertilización química * AV en el almacenamiento de carbono en una plantación de teca.

3.6 DISCUSIÓN

3.6.1 Almacenamiento de carbono en la biomasa total

La relación raíz-biomasa aérea de las plantaciones de teca (t ha^{-1}) en este estudio fue de 22.5-25%; inferior a la reportada por Jha (2015) y Kenso *et al*. (2020) quienes encontraron una relación raíz-tallo del 28% y 37% respectivamente, en plantaciones de teca menores de 5 años.

Por otra parte, el almacenamiento de C en la biomasa total (aérea y raíces) en las plantaciones de teca, de este estudio resulta ser mayor, comparado con otros estudios (figura 3.2), por ejemplo Jha (2015) en plantaciones jóvenes de teca, encontraron, 1.6, 15.8, 35.5, 39.0, 61.5 y 73.2 t C ha^{-1} en edades de 1, 5, 11, 18, 24 y 30 años. Sreejesh *et al*. (2013) reportaron 21 t C ha^{-1} a una edad de 5 años. Para ambos casos los datos de carbono, son tomados de plantaciones que fueron establecidas por semillas, no dudando igual que el índice de sitio y la fertilidad de suelo son diferentes, razón por la cual el carbono en la biomasa área y total, varía en los diferentes estudios. Otros experimentos de carbono almacenado en teca, en biomasa total en Nuevo Urecho, Michoacán, México, encontraron en edades de 11 años 77 t C ha^{-1} (Jiménez *et al*., 2020). Las plantaciones de teca, tomando en cuenta la cantidad de biomasa, tienen un potencial de producir 26.7 t C ha^{-1} $año^{-1}$ (González *et al*., 2014). En plantaciones adultas se pueden encontrar 151.37 a 214.7 t C ha^{-1} solo en biomasa aérea y 16.6% en raíces (López *et al*., 2018; N'Guessa *et al*., 2017). Las diferencias en la cantidad de carbono almacenado, reportadas por los autores antes mencionados y la del presente trabajo, probablemente se deben al tipo de vegetación y reproducción por semillas, en este experimento, podemos atribuir el mayor almacenamiento de carbono a que se trata de clones muy productivos (ASGv) en edades tempranas. Otras especies con edades de menos de 5 años, como *Gmelina arborea Roxb.* ex Sm. puede almacenar 15.8 t C ha^{-1} en biomasa aérea y 2.37 t C ha^{-1} en biomasa subterránea (Tamang *et al*., 2021) y *Hevea brasiliensis* Muell Arg, puede almacenar 26.28 t C ha^{-1} en la biomasa aérea (López *et al*., 2016). Pompa y Sigala (2017), en otros sistemas de vegetación, encontraron que las áreas naturales protegidas tienen almacenamiento de carbono más altas en la biomasa aérea (135.3 t C ha^{-1}) que los bosques primarios y bosques con manejo (105.1, 115.4 t C ha^{-1}), teniendo las tasas más

bajas de almacenamiento de carbono los bosques secundarios (51.2 t Cha^{-1}) seguidos por áreas de reforestación, plantaciones comerciales y sistemas agroforestales con 45.6, 62.8 y 35.8 t C ha^{-1} respectivamente.

3.6.2 Carbono almacenado en la hojarasca seca

El carbono que se almacena por la contribución de la hojarasca muerta suele ser más lábil y contribuye de forma importante en el incremento de la fertilidad de los suelos forestales. Al respecto Kraencel *et al*. (2003) reportaron que las plantaciones de teca de 20 años de edad pueden almacenar de 2.6 a 3.4 t C ha^{-1}. El almacenamiento por contribución de la hojarasca en teca y bosque secundario en promedio es de 4.7 t C ha^{-1} y 2.3 t C ha^{-1}, respectivamente (N'Guessa *et al*., 2017). Una gran cantidad de carbono en las plantaciones de teca proviene principalmente de hojarasca y raíces (Hansen *et al*., 2013). La cantidad de C almacenada en la hojarasca, depende de la especie vegetal, en una provincia de Sichuan, China, en la reserva natural nacional de Wanglang, en tres tipos de bosques, encontraron más C en los bosques de coníferas (*Picea purpurea* Mast.), seguido por bosque mixto (*Picea purpurea* Mast*, Abies faxoniana* Rehd. y E.H. Wilson, *Betula albosinensis* Burkill*)* y Bosques latifolios (*Tilia tuan* Szysz*., Padus racemose* L., *Salix paraplesi* C.K.Schneid) con 0.4 t ha^{-1}, 0.36 t ha^{-1} y 0.14 t ha^{-1}, respectivamente (Chen *et al*., 2021), los almacenamientos mencionados, fueron menores a los encontrados en el presente estudio.

3.6.3 Almacenamiento de carbono en el suelo

Bajo diferentes prácticas de manejo en plantaciones de teca de 5 años de edad, el almacenamiento de carbono en el suelo puede variar desde 45.84 t C ha^{-1} hasta 39.55 t C ha^{-1}, valores mayores a los encontrados en este estudio (figura 3.6); las diferencias pueden estar relacionadas con la fertilidad del suelo (Agyei *et al*., 2021).

El abono verde, *C. juncea*, ayuda a aumentar la fertilidad de suelo, disminuyendo su degradación y la escorrentía del agua, reduce la densidad aparente, aumenta el COS y la disponibilidad de nutrientes (Ma *et al*., 2021). Al combinar el abono verde y la fertilización química, se aumenta el suministro mineralizable e hidrolizable del C, que mejora la actividad de microbios, fomentando una rápida descomposición del abono

verde (Almagro y Martínez, 2014). En un trabajo realizado por Song *et al*. (2018) en un cultivo de arroz en la provincia de Hunan, en China, después de aplicar el abono verde, se encontró el almacenamiento de carbono orgánico disuelto (COD) de 711.10 mg kg^{-1}, siendo significativo en comparación con la aplicación solo de fertilizantes (428.50 mg kg^{-1}). De igual manera los sistemas agroforestales, como es el caso de la teca y *C. juncea* absorben más CO_2 como carbono orgánico del suelo (COS), por lo que De Stefano y Jacobson (2017) mencionan que estos sistemas pueden almacenar entre 12 y 228 t C ha^{-1}, cantidad mucho mayor que la almacenada en cultivos agrícolas. Tangsinmankong *et al*. (2007) estudiaron el almacenamiento de carbono en suelos de bosque mixto caducifolio y una plantación de teca, encontrando que el carbono orgánico del suelo de todos los sitios disminuye generalmente con la profundidad creciente desde la superficie del suelo hasta su capa inferior, el mayor almacenamiento de carbono en el suelo se presentó en las plantaciones de teca de seis años, seguido por las plantaciones de teca de 24 y 15 años, y el bosque mixto caducifolio, (157.03, 105.67, 78.78 y 70.96 t C ha^{-1} respectivamente), esta diferencia de almacenamiento puede deberse a incendios forestales, manejo forestal y topografía. Otros autores han encontrado almacenamiento de carbono en el suelo en plantaciones de teca de 12 a 20 años de edad, de hasta 40 t C ha^{-1} en Tailandia (Meunpong *et al.,* 2010). El carbono orgánico del suelo influye en muchos procesos físico-químicos y propiedades biológicas (Smith *et al.,* 2013), jugando un papel muy importante en la productividad y calidad del suelo (LaI, 2016). El tipo de bosque igual afecta el almacenamiento de carbono en el suelo, aunado a ello, algunas características, como la especie de los árboles, calidad de la hojarasca y la producción primaria (Bai *et al.,* 2019).

3.7 CONCLUSIONES

En la biomasa total (raíz-biomasa aérea) a la edad de 3.2 años, puede almacenar 35.05 t C ha^{-1}, con el tratamiento testigo y sin AV. A la edad de 4.7 años el almacenamiento aumentó a 67.17 t C ha^{-1}, con fertilización química y AV.

El almacenamiento de carbono en la hojarasca, se incrementa al aumentar la dosis de fertilización química, sin embargo, el testigo en la parcela con AV mostró un mayor almacenamiento de C.

La aplicación de fertilización química con la dosis 150-60-60 kg ha^{-1}, puede aumentar el almacenamiento de C en el suelo en 14.4 t COS ha^{-1}. En las interacciones AV * fertilización química, la parcela con AV mejoró el almacenamiento de C en el suelo en todas las dosis de fertilización química en comparación con la parcela sin AV.

CAPÍTULO 4. TRASLACIÓN NUTRIMENTAL E INCREMENTO MEDIO ANUAL EN UNA PLANTACIÓN DE TECA (*Tectona grandis* L.f.), EN BALANCÁN TABASCO.

4.1 RESUMEN

La traslación nutrimental es la cantidad de nutrientes que son movilizados desde las hojas senescentes a los tejidos perennes (hojas, tallos, ramas y otros órganos). Las plantaciones de teca, requieren para su mejor desarrollo suelos franco-arenosos o arcillosos, fértiles, bien drenados y profundos, ligeramente ácidos o neutros. El presente estudio tuvo como objetivo estimar la traslación nutrimental e incremento medio anual (IMA) por el efecto de la fertilización química y un abono verde en plantaciones de teca, en Balancán, Tabasco. La metodología utilizada fue, bloques completamente al azar con arreglo de parcelas divididas; en las parcelas experimentales (P) se aplicaron tratamientos de fertilizante NPK, 0-0-0 (P1), 60-60-60 (P2), 90-60-60 (P3), 120-60-60 (P4) kg ha^{-1} a los dos años y 0-0-0 (P1), 120-60-60 (P2), 150-60-60 (P3), 180-60-60 (P4) kg ha^{-1} a los tres y cuatro años. Se estableció un abono verde (AV), *Crotalaria juncea*, en los callejones de la plantación en estudio. Se hicieron muestreos de suelo, hojarasca seca (Hs) y hojas recientemente maduras (Hrm), para conocer la fertilidad y el estado nutrimental, respectivamente. A la plantación se le realizaron mediciones de diámetro y altura para estimar el área basal, volumen y sus IMA. Los resultados muestran que la mayoría de los elementos componentes de la fertilidad edáfica tuvieron valores medios, la concentración nutrimental de N en la Hrm tuvo la mayor concentración con el tratamiento más alto 180-60-60 kg ha^{-1} y con AV, las concentraciones de nutrientes en Hs son menores que Hrm, teniendo el abono verde mayor respuesta en la Hs. La traslación nutrimental del N (6.75%) no se ve favorecida por el AV, solo con los tratamientos con fertilización química, siendo el tratamiento 120-60-60 kg ha^{-1} el mejor. La variable altura presentó un IMA de 3.12 m $año^{-1}$, en las dos edades fue mayor con AV y fertilización química (120-60-60 kg ha^{-1}). El tratamiento testigo a los 4.7 años mostró los IMA de diámetro y volumen más altos con 4.02 cm $año^{-1}$, 30.59 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$, respectivamente.

Palabras clave: abono verde, concentración foliar, fertilización, hojarasca, suelo.

4.2 ABSTRACT

Nutrient translation is the amount of nutrients that are mobilized from senescent leaves to perennial tissues (leaves, stems, branches, and other organs). Teak plantations require fertile, well-drained, deep, slightly acid or neutral, sandy-loam or clayey soils for their best development. The objective of this study was to estimate the nutritional translation and mean annual increment (IMA) due to the effect of chemical fertilization and a green manure in teak plantations, in Balancán, Tabasco. The methodology used was completely random blocks with divided plots arrangement, in the experimental plots (P), NPK fertilizer treatments were applied, 0-0-0(P1), 60-60-60(P2), 90- 60-60(P3), 120-60-60(P4) kg ha-1 after two years and 0-0-0(P1), 120-60-60(P2), 150-60-60(P3) , 180-60-60(P4) kg ha-1 at three and four years. A green manure (AV) Crotalaria juncea was established in the alleys of the plantation under study. Soil, dry litter (Hs) and recently mature leaves (Hrm) samples were taken to determine fertility and nutritional status, respectively. Measurements of diameter and height were made to the plantation to estimate the basal area, volume and its IMA. The results show that most of the component elements of edaphic fertility had medium values, the nutritional concentration of N in the Hrm had the highest concentration with the highest treatment 180-60-60 kg ha-1 and with AV, the concentrations of nutrients in Hs are lower than Hrm, with green manure having a greater response in Hs. Nutrient translation of N (6.75%) is not favored by VA, only with treatments with chemical fertilization, the treatment being 120-60 -60 kg ha-1 the best. The height variable, its IMA was 3.12 m year^{-1}, at both ages it was higher with AV and chemical fertilization (120-60-60 kg ha-^{1}). The control treatment at 4.7 years showed the highest IMA diameter and volume with 4.02 cm year-1, 30.59 m3 ha-1 year^{-1}, respectively.

Keywords: fertilization, foliar concentration, green manure, leaf litter, soil.

4.3 INTRODUCCIÓN

La teca puede crecer en diferentes suelos, no obstante, para su óptimo desarrollo, los mejores son profundos, bien drenados y fértiles, especialmente suelos aluviales de diversos orígenes. El crecimiento y la calidad de su madera dependen de la profundidad, estructura, porosidad, drenaje y contenidos de nutrientes en el suelo. El nitrógeno (N), potasio (K) y calcio (Ca) son elementos muy importantes, ya que son los nutrimentos más absorbidos por los árboles (Moya *et al.,* 2013 y 2014; *Zhou et al.,* 2016).

La traslación de nutrientes puede definirse como la cantidad total de elementos movilizados desde las hojas senescentes hacia otros tejidos en desarrollo (Moreno *et al*., 2005; Alcántar y Trejo, 2007). Se trata de una de las estrategias más importantes usadas por los árboles, para la conservación de nutrientes (Coté y Djalilvand, 2002), que permite que éstos estén directamente disponibles para ser utilizados y que las plantas sean menos dependientes de los nutrientes del suelo, reduciendo su pérdida e incrementando la eficiencia de su uso (Aerts y Chapin, 2000). Algunos nutrimentos como N, P, K pueden movilizarse fácilmente desde las hojas maduras hacia las que están en pleno crecimiento (Alcántar y Trejo, 2007).

Para un buen crecimiento, a las plantas se le suministra, sobre todo, macronutrimentos; aunque, los micronutrimentos son imprescindibles, especialmente en suelos ácidos (Basave *et al*., 2016). La mayor concentración de nutrientes en el árbol se encuentra en las hojas, donde se considera que se acumula del 20% al 40% del total; mientras que la concentración en el tronco es baja (Miller 1984, 1995). Alvarado *et al. (*2012a) mencionan que el 50% del total de nutrimentos está en la biomasa foliar. Por lo que Salcedo *et al*. (2014) reafirma que las hojas del estrato superior (más jóvenes) tienen mayor concentración de N, P y K, ya que está relacionado con la movilidad preferencial de éstos, en el sistema vascular; en contraste, los elementos Ca y Mg suelen encontrarse en porcentajes más altos en las hojas de edades avanzadas. Otros autores como Moya *et al*. (2013) han encontrado concentraciones altas de N (1.7-2.3%), y bajas de Mg (0.23-0.34%) y P (0.16%) en el follaje; y concentraciones de Ca (1.9%) y K (0.6-1.6%) en la corteza, por lo que generalmente siguen esta tendencia: N> Ca > K > Mg > P (Moya *et al*., 2013)

La nutrición no solo tiene efecto en la productividad o las tasas de crecimiento; cuando se diseñan dosis de fertilización bien balanceadas se obtiene un mejoramiento del vigor y resistencia a plagas. En la primera etapa de crecimiento de la teca, la nutrición es básica, por lo que la fertilización oportuna ofrece grandes posibilidades de éxito (Alvarado, 2012b).

En condiciones naturales, la teca requiere de temperatura y precipitación medias anuales entre 21°C y 28°C, y entre 760 y 5000 mm, de preferencia de 1000 a 1800 mm, con una estación seca bien definida que dure de tres a siete meses, y sitios con altitudes desde el nivel del mar hasta los 1000 msnm. Generalmente se ve afectada por la aridez y anegamiento. La teca crece en diversos tipos de suelo, su mejor desarrollo se presenta en suelos franco-arenosos a arcillosos, fértiles, bien drenados y profundos, ligeramente ácidos o neutros (Sima, 2010).

Esta especie crece a un ritmo de 2.9 a 3.7 cm año^{-1} en diámetro los tres primeros años, y 2 cm año^{-1} en los siguientes tres años, para luego bajar hasta 1.5 cm en el año nueve. El desarrollo en altura es de 2.8 a 3.6 m año^{-1} los primeros tres años, disminuyendo hasta 1.7 los siguientes tres años y luego baja hasta 1 m año^{-1} a partir del noveno (Vargas *et al*., 2007). En Costa Rica se recomienda que la fertilización de la teca se realice de 15 a 30 días después de la plantación mediante aplicaciones de N, P y K en dosis de 100 a 250 g árbol^{-1} de 17-17-17. También se sugieren dosis pequeñas al inicio (50 g árbol^{-1} el primer año) y luego dosis anuales de 100 a 150 g árbol^{-1} (Alvarado, 2003).

Montero (1995) evaluó la respuesta a la aplicación de dosis de 85, 170 y 255 g árbol^{-1} de la fórmula NPK 12-24-12 y un testigo sin fertilización. La mejor respuesta se obtuvo con la dosis de 255 g árbol^{-1} al medir las variables altura, diámetro, sobrevivencia, incremento medio en altura e incremento corriente anual (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Respuesta de plantaciones jóvenes de teca a la aplicación de fertilizantes en Panamá (Montero, 1995) (Crecimiento anual).

Tratamiento* g árbol^{-1}	Altura media (m)	Diámetro medio (cm)	Área Basal m^2 ha^{-1}	Volumen m^3 ha^{-1}
0	3.2	3	0.78	1.33
85	4	4	1.33	2.89
170	4	3.8	1.22	2.67
255	5.3	5.5	2.67	7.78

* Fertilizante aplicado: Urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue estimar la traslación nutrimental e IMA, por el efecto de fertilización química NPK y un abono verde en plantaciones de teca en Balancán, Tabasco.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1 Área de estudio

El presente estudio se estableció en un terreno privado de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva (ASGv), donde se ocuparon 2.2 ha, ubicadas en el municipio de Balancán, Tabasco (coordenadas 0690555 m E, 1974127 m N). El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2(x). La precipitación media anual de la zona es de 1,500 mm y la temperatura media es de 26.5-27°C (Aceves y Rivera, 2019), la altitud es de 42 msnm. De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, el suelo es franco arcillo arenoso, con pH de 7.5 medianamente alcalino, el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) 3.5% es medio, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 22.85 $mg.kg^{-1}$ corresponde a un nivel medio, El nitrógeno total (Nt) con 0.14% corresponde a una concentración media, el fósforo (P) con 7.6 mg kg^{-1} tiene contenido medio; en las bases intercambiables, el calcio (Ca) tiene contenido alto (12.3 $Cmol^{+}\ kg^{-1}$), el magnesio (Mg) bajo (0.62 $Cmol^{+}\ kg^{-1}$) y el potasio (K) muy bajo (0.15 $Cmol^{+}\ kg^{-1}$).

Las plantas de teca procedieron de clones de la empresa Agropecuaria Santa Genoveva (ASGv). Cuando se inició el estudio, la plantación tenía dos años de edad y un arreglo de marco real de 3.5 x 3.5 m. En las parcelas experimentales (P) se aplicaron tratamientos de fertilizantes NPK, 0-0-0 (P1); 60-60-60 (P2); 90-60-60 (P3) y 120-60-60 (P4), kg ha^{-1}, cuando las plantaciones tenían dos años de edad; aplicándose los tratamientos, 0-0-0 (P1); 120-60-60 (P2); 150-60-60 (P3) y 180-60-60 (P4) kg ha^{-1} a los tres y cuatro años. Como fuente fertilizante se usaron urea (46-00-00), fosfato diamónico (18-46-00) y cloruro de potasio (00-00-60). Los fertilizantes fueron enterrados a 20 cm de profundidad, en dos orificios al norte y sur, en la zona de goteo de cada árbol. El diseño experimental fue de bloques al azar con un arreglo de parcelas divididas, el factor utilizado fue un abono verde (AV) *Crotalaria juncea*, con densidad de 20 kg de semilla ha^{-1}, sembrándose al voleo en los callejones de la plantación, posteriormente a los 60 días de siembra, se incorporó al suelo.

4.4.2 Fertilidad de suelos

Seis meses después de la última aplicación de las dosis de fertilización química, se realizaron muestreos de suelos en cada uno de los tratamientos evaluados, los muestreos se hicieron con una barrena de acero inoxidable, depositándose en bolsas de plástico rotuladas (Salgado *et al*., 2013). Las muestras se llevaron al laboratorio, secándose a temperatura ambiente, fueron molidas y tamizadas (2 mm), para analizar los siguientes parámetros químicos: nitrógeno total (N) por el método Kjeldahl, fosforo (P) por el método Olsen, potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) con acetato de amonio 1 N, pH 7.0, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021 (RECNAT-2000).

4.4.3 Traslación nutrimental y almacenamiento de hojarasca

Para la colecta de hojarasca (Hs), durante el último año de estudio, se colocaron aleatoriamente trampas biológicas elaboradas de malla fina (plástica) con dimensiones de 1.5 m por 1.5 m. sujetándose a estacas, con la finalidad de que no tocaran la superficie del suelo para evitar cualquier tipo de contaminación o incluso efectos de mineralización (Pulido y Díaz, 2005). La colecta de hojarasca se realizó cada tres meses y el material vegetativo se colectó en bolsas de papel horadadas, etiquetándose con los datos del sitio. La hojarasca se llevó al laboratorio y se secó a 70ºC, en una estufa con circulación forzada de aire, hasta peso constante (Murtinah *et al.,* 2016).

La colecta de hoja recientemente madura (Hrm), se realizó cada seis meses, se tomaron muestras de tejido vegetal, en el tercio inferior de la copa de cuatro árboles de cada una de las parcelas experimentales, seleccionados aleatoriamente y cercanos a las trampas de colecta. La hoja muestreada fue la recientemente madura y para su toma se utilizó una tijera forestal de pértiga. Las muestras se colocaron en bolsas de papel horadadas. El material vegetal se trató en el laboratorio y se secó a 70ºC en una estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante (Murtinah *et al.,* 2016).

Las muestras secas del tejido foliar senescente (capturado en las trampas biológicas) y el de la hoja recientemente madura (tomada de los árboles) colectadas en el año, se molieron finamente en molino con aspas de acero inoxidable. A cada muestra se le

realizaron análisis químicos para determinar sus contenidos de Nt (semi-micro-Kjeldahl), P por el método Olsen, K, Ca y Mg por digestión con HNO_3-$HClO_4$ (Salgado *et al*., 2013).

El porcentaje de translación nutrimental (Finzi *et al.,* 2001) se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\%\,\boldsymbol{TN} = \frac{((Hrm\,\% - Hs\,\%)}{Hrm\,\%} * 100$$

Donde:

%TN = Porcentaje de Traslación Nutrimental.

Hrm = Porcentaje de NPK y CaMg de los análisis de hoja recientemente madura.

Hs = Porcentaje de NPK y CaMg de los análisis de hojarasca seca.

4.4.4 Incremento medio anual (IMA)

Se midió después de la aplicación de los tratamientos el diámetro a la altura del pecho (DBH) con una forcípula y la altura total con pistola Haga (± 0.1 cm), estas mediciones se hicieron en 12 árboles de cada tratamiento y parcela, el volumen se calculó por medio de un modelo alométrico desarrollado por Vacharangkura (2012).

$$\mathbf{V} = 0.000100712 \text{ x } \text{DBH}^{1.89445042} \text{ x H}^{0.763796917}$$

V = volumen en m^3 ha^{-1}.

H = altura total en m

DBH = Diámetro a la altura del pecho (DAP, 1.3 m)

La fórmula calcular el Área Basal para arboles individuales (AB) es:

$$\mathbf{AB} = \pi * (\frac{\text{DAP}^2}{4})$$

AB = Área basal (cm^2)

Л = 3.1415

DAP = Diámetro a la altura del pecho (1.3 m)

Con las variables dasométricas altura, diámetro, volumen y AB, se calculó el IMA altura, IMA diámetro, IMA volumen, IMA área basal, calculándose a partir de cada incremento entre su edad.

4.4.5 Análisis estadístico

Se realizó prueba de normalidad con el test de Shapiro Wilk. Las variables analizadas fueron IMA diámetro, IMA altura, IMA área basal e IMA volumen. Se hizo el ANOVA y la comparación de medias por el procedimiento de Tukey ($p<0.05$) en el software estadístico INFOSTAT 2020.

4.5 RESULTADOS

4.5.1 Fertilidad del suelo y concentración foliar por efecto de la fertilización química * AV

Los tratamientos con fertilización química en los elementos mayores del suelo, mostraron, sobre todo con el testigo absoluto, diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$). Los elementos N, P y Mg tuvieron concentraciones medias, el K mostró concentraciones bajas, y el Ca tuvo concentración alta. De manera general las dosis más altas de NPK (150-60-60 y 180-60-60) presentaron los mayores contenidos de nutrientes P y K en el suelo (figura 4.1).

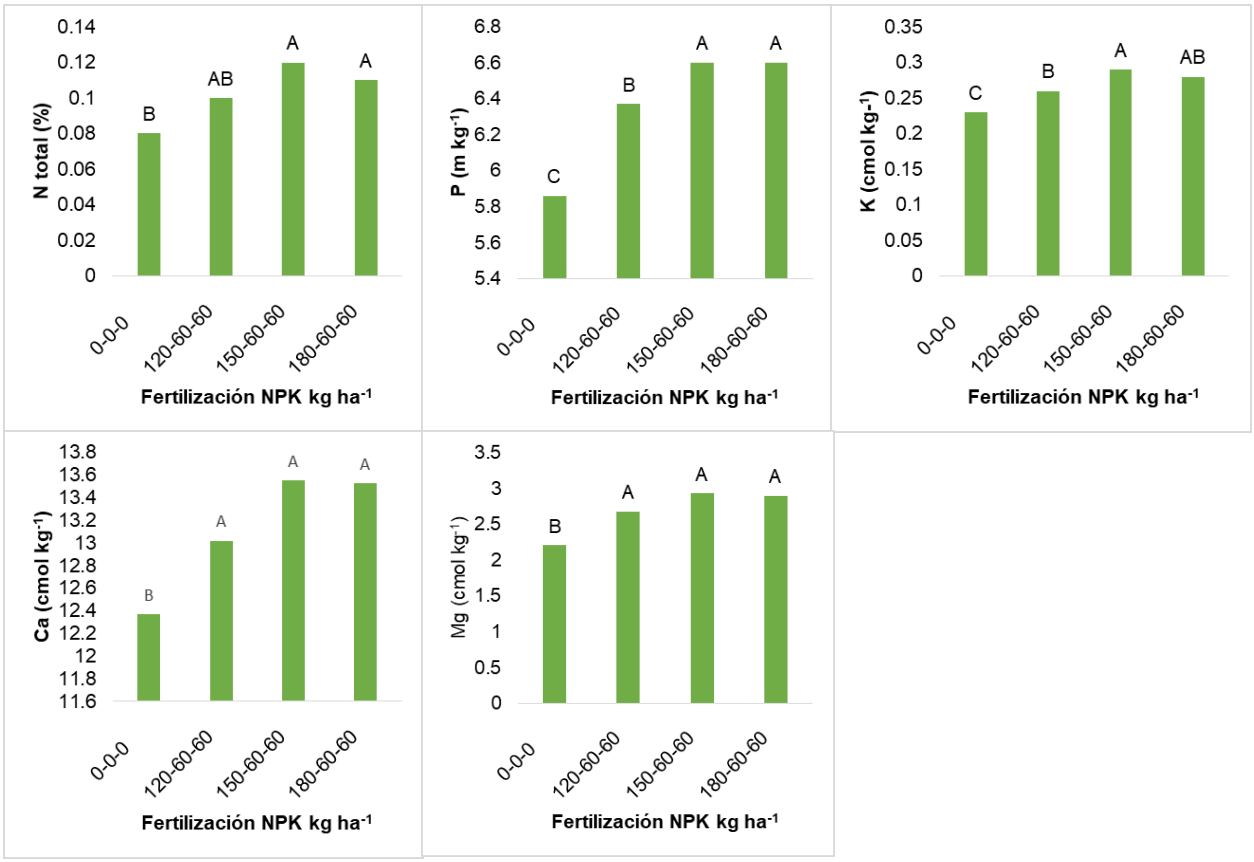

Figura 4.1. Concentración de N P K, Ca y Mg en el suelo, por el efecto de la fertilización NPK. Letras iguales indican que no hay diferencias estadísticas significativas.

En las interacciones de la fertilización química * Abono verde (figura 4.2), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$); las concentraciones de N, P, K y Mg presentaron niveles medios, y solo el elemento Ca mostró niveles altos. El tratamiento

que presentó mejor efecto positivo fue 150-60-60+AV para todos los elementos estudiados.

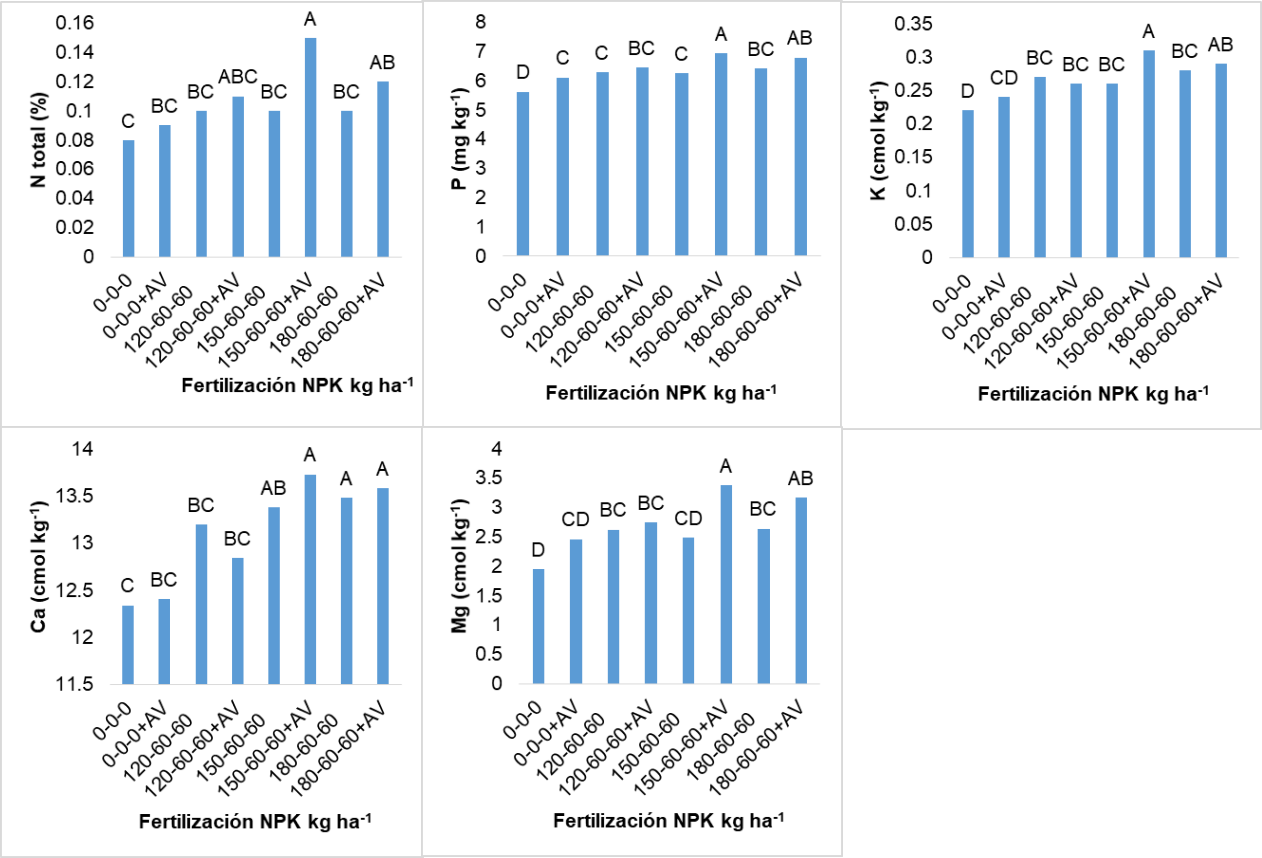

Figura 4.2. N P K, Ca y Mg en el suelo por el efecto de la interacción Fertilización NPK * AV. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

En la figura 4.3 se observan diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$) en las concentraciones foliares y hojarasca seca, en todos los nutrimentos, por los diferentes tratamientos con fertilización química y AV, la concentración nutrimental de N en la Hrm tuvo la mayor concentración con el tratamiento más alto y con AV 180-60-60 kg ha^{-1}, en la Hs la concentración de este elemento es menor que Hrm. El contenido de P presentó su concentración más alta en Hrm y Hs con la fertilización química más alta y con AV. En K el contenido fue mayor en Hrm con el tratamiento con fertilizante 180-60-60 kg ha^{-1} y AV, en Hs los tratamientos testigo, 150-60-60 y 180-60-60 kg ha^{-1} con AV, fueron los que tuvieron mejor contenido nutrimental de este elemento. En los siguientes nutrimentos el

Ca y Mg tuvieron mejores concentraciones en Hrm y Hs con el tratamiento 180-60-60 kg ha^{-1} y AV.

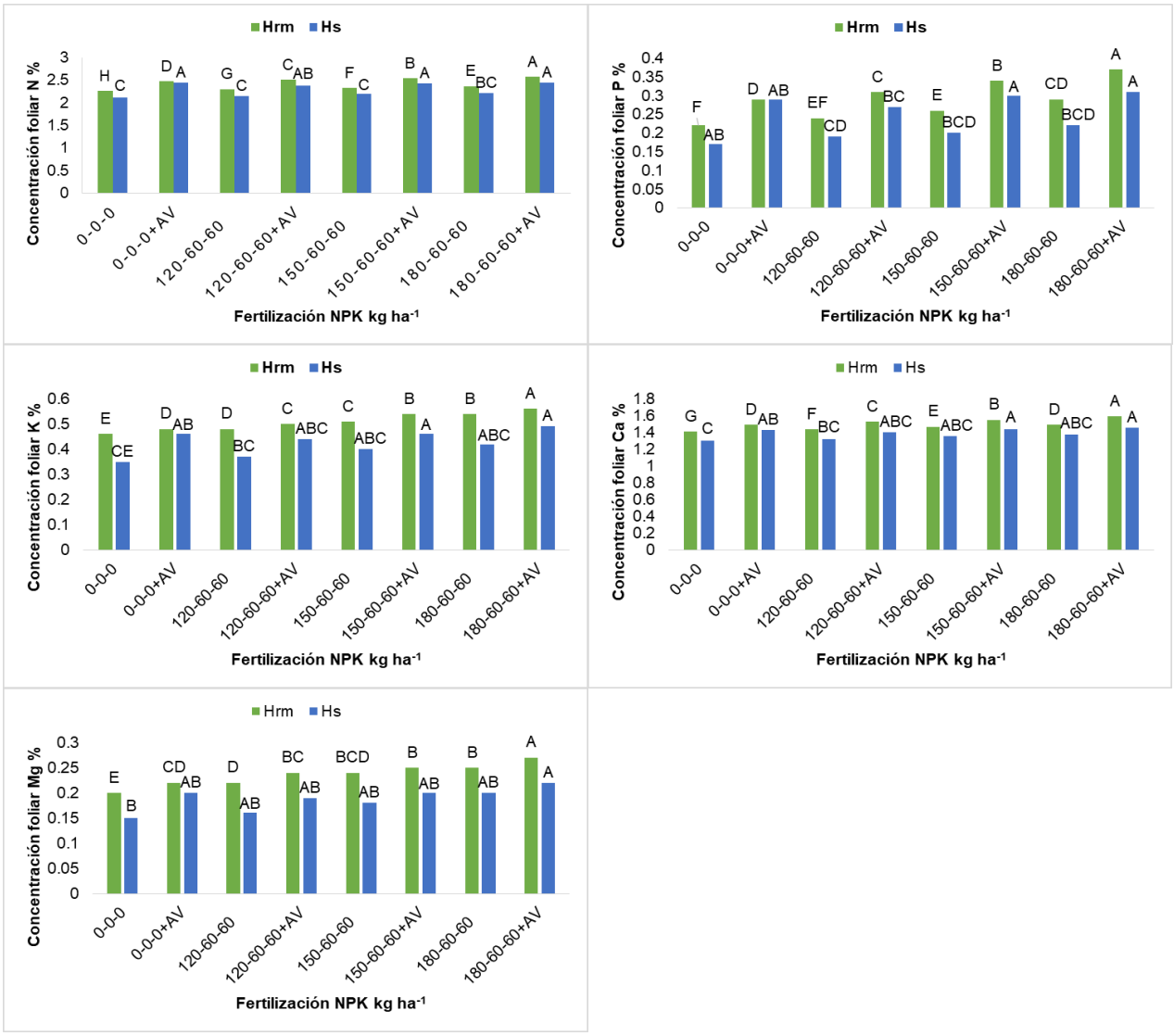

Figura 4.3**.** Efecto de la fertilización química * AV en la concentración foliar en teca. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

4.5.2 Traslación nutrimental y acumulación de hojarasca en la superficie del suelo

No hubo diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$) entre los tratamientos de fertilización y abono verde (AV) en lo que respecta al aporte de hojarasca por año (figura 4.4), en el año dos, antes de la aplicación de los tratamientos el aporte fue de 0.47 t ha^{-1} ms, en el año 3.2 en el tratamiento 90-60-60 kg ha^{-1} la contribución de la hojarasca fue

de 1.16 t ha^{-1} de ms**,** y en el año 3.45 el tratamiento 60-60-60 kg ha^{-1} tuvo el mayor aporte de ms, 1.44 t ha^{-1}.

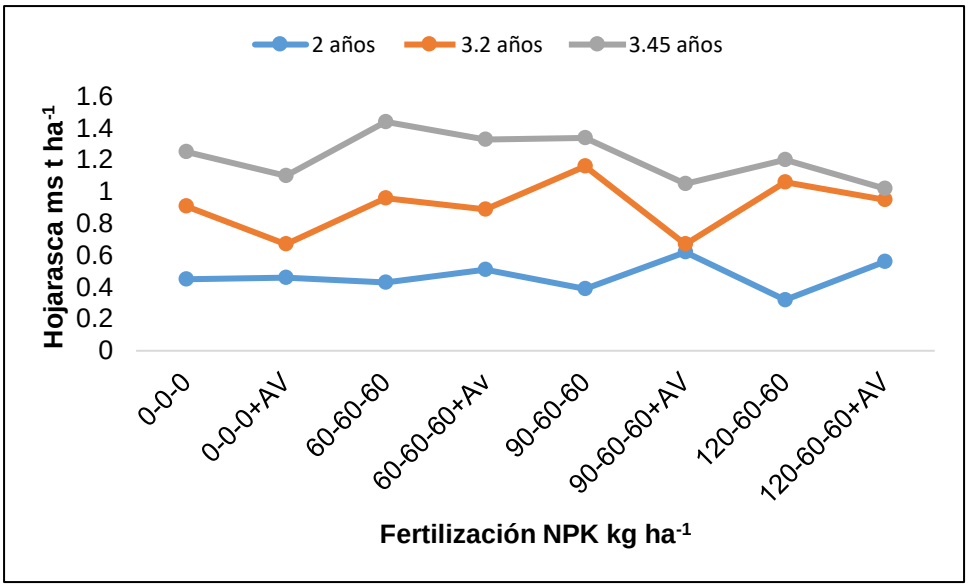

Figura 4.4. Acumulación de materia seca por el efecto de la aplicación de fertilización química * AV.

En la mayoría de los nutrimentos N, P, K y Mg se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$) en lo que a la translación nutrimental se refiere, solo el Ca no presentó diferencias estadísticas significativas ($p>0.05$, figura 4.5). La traslación del N no se ve favorecida por el AV, solo en los tratamientos con fertilización química, siendo mayor en el tratamiento 120-60-60 kg ha^{-1}, con 6.75% de traslación, aunque el testigo y 180-60-60 kg ha^{-1} también tuvieron respuesta positiva. El P tuvo una respuesta similar al N en los mismos tratamientos, siendo la traslación un poco mayor, 23.31%, con el tratamiento 180-60-60 kg ha^{-1}, el testigo y 120-60-60 kg ha^{-1}. El K tuvo mayor respuesta a los tratamientos con fertilización química, siendo los de mayor traslación 180-60-60 kg ha^{-1} y testigo (23.71%). El Ca mostró un incremento en la traslación (8.48%) cuando fue aumentando la fertilización con AV (sin diferencias estadísticas significativas), llegando al máximo en AV y 120-60-60 kg ha^{-1}, para después disminuir. El Mg tuvo mejor respuesta con el tratamiento testigo con una traslación de 30.34%, y el tratamiento 120-60-60 kg ha^{-1} (29.58%).

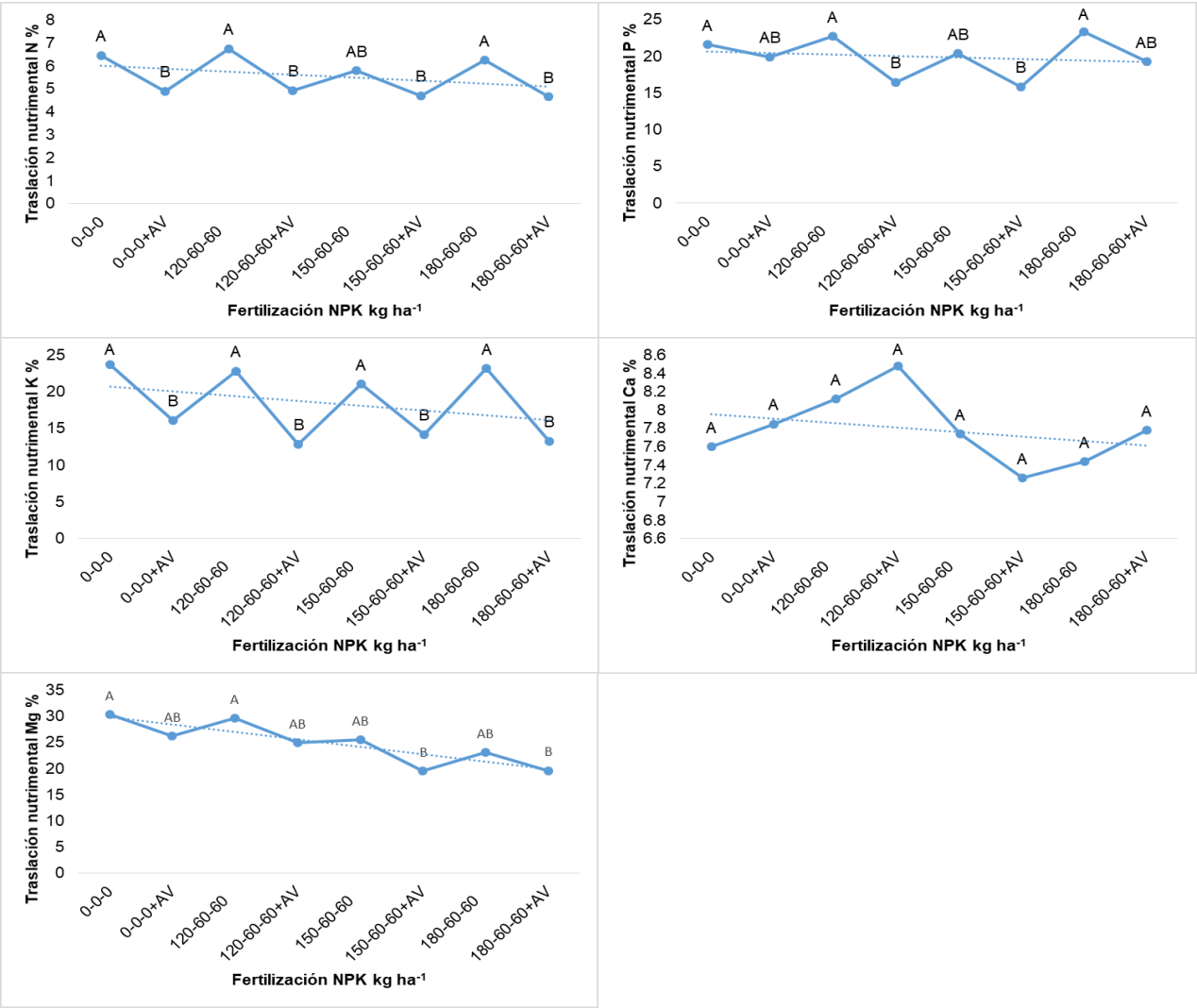

Figura 4.5. Efecto de la fertilización química * AV en la traslación nutrimental en teca. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

4.5.3 Fertilización química y abono verde en el IMA en plantaciones de teca

En la figura 4.6 se observan diferencias significativas ($p<0.05$) en las interacciones de los incrementos por el efecto de los tratamientos de fertilización química, con y sin AV, en plantaciones de 3.3 años de edad. En los incrementos en diámetro, área basal y volumen (4.5 cm año^{-1}, 51.26 cm año^{-1} y 22.07 m^3 año^{-1}) llama la atención que el tratamiento testigo sin AV no mostró, en general, diferencias estadísticas significativas con los demás

tratamientos. Solo en el incremento de la variable altura (3.12 m año^{-1}) el tratamiento con AV y fertilización química 120-60-60 kg ha^{-1} tuvo tendencia a ser el mayor, aunque sin diferencias estadísticas significativas con la mayoría de los tratamientos.

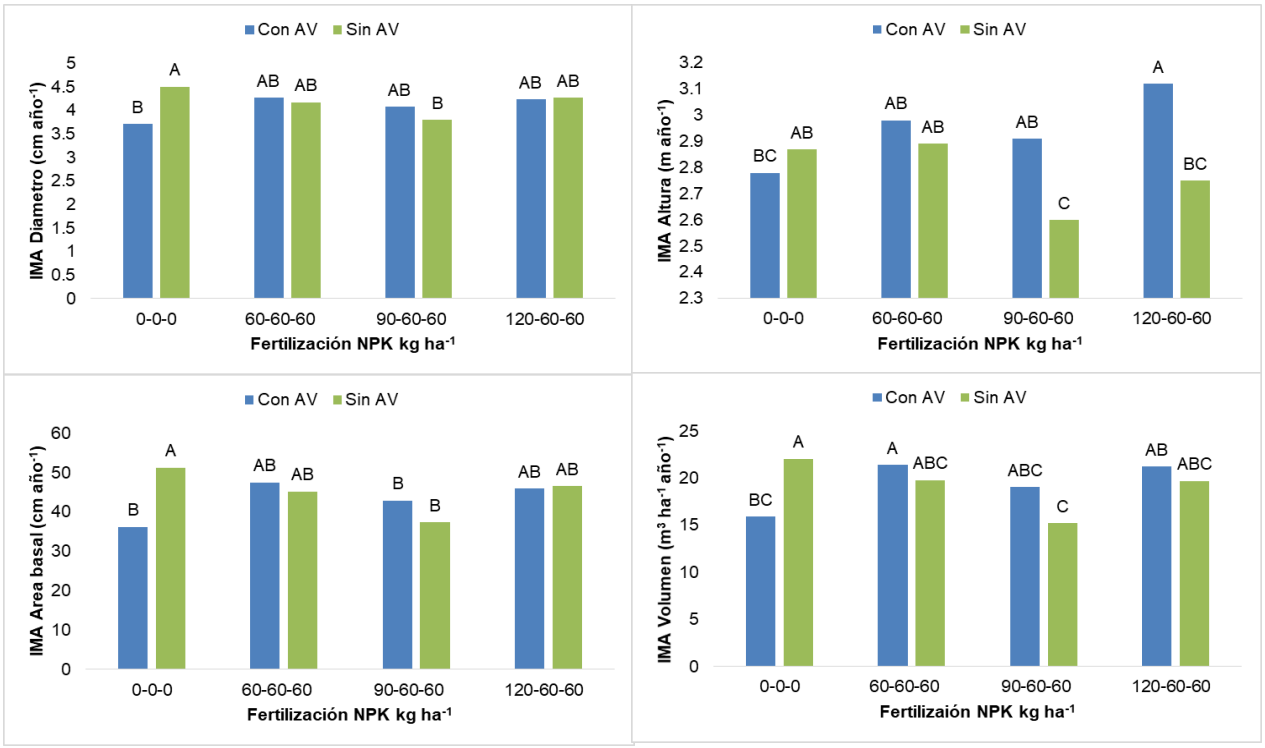

Figura 4.6. Interacciones de la fertilización NPK * AV en el IMA de teca, a la edad de 3.3 años. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

En la figura 4.7 se observa que en las plantaciones de 4.7 años, todas las variables estudiadas (altura, área basal diámetro y volumen), tuvieron diferencias estadísticas significativas (p>0.05). El testigo mostró tendencia a ser el de los mayores valores, sin diferencias estadísticas significativas con la mayoría de los tratamientos.

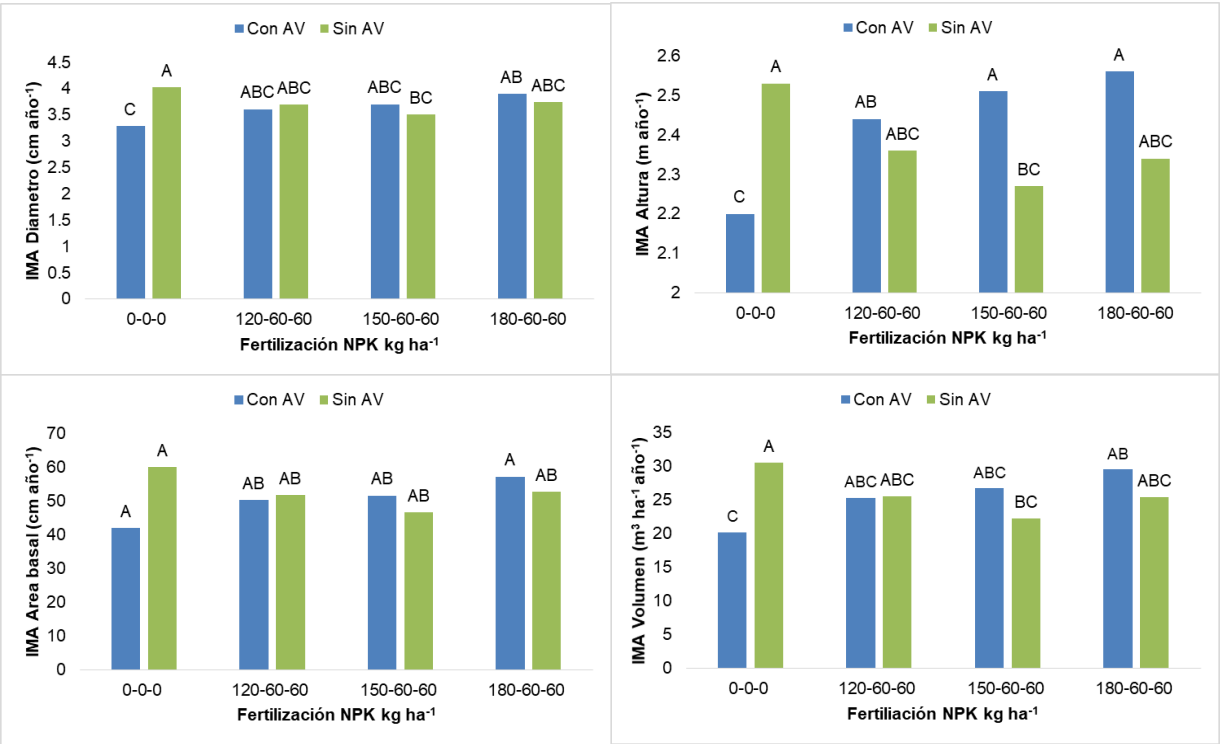

Figura 4.7. Interacciones de la fertilización NPK * AV en el IMA de teca, a la edad de 4.7 años de edad. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa**.**

4.6 DISCUSIÓN

4.6.1 Fertilidad del suelo y concentración foliar por el efecto de fertilización química * AV

Al inicio del experimento el Mg y K del suelo mostraron niveles bajos y muy bajos, sin embargo, después de la aplicación de la fertilización química y el AV (150-60-60+AV) se incrementaron a concentraciones medias, junto con el N y P, solo el Ca permaneció en niveles altos (NOM-021-RECNAT-SEMARNAT-2000). Hui *et al*. (2017) señalan que los fertilizantes minerales (NPK) pueden mejorar la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos si se aplican de manera racional y de forma continua. De igual manera, los abonos verdes se consideran una estrategia eficiente para disminuir la dependencia de fertilizantes químicos y se ha demostrado que aumentan los rendimientos (Dabin *et al*. 2016).

La concentración foliar de nutrimentos en la biomasa aérea (Hrm) fue mayor que de la hojarasca (Hs), variando de mayor a menor concentración en la siguiente secuencia (%, Hrm, Hs): N(2.57, 2.45)>Ca(1.59, 1.46)>K(0.56, 0.49)>P(0.37, 0.31)>Mg(0.27, 0.22), valores adecuados, situados por arriba del nivel crítico (Alvarado *et al.,* 2022). Por su parte, Murtinha *et al*. (2016), al evaluar la secuencia de los nutrimentos en la hojarasca, en una plantación de teca de 12 y 19 años, encontraron que el nutriente más alto fue Ca, y el P el más bajo, el orden de las concentraciones en la plantación de 12 años fue Ca>Mg>K>N>P, mientras que a los 19 años el N pasó a segundo lugar Ca>N>Mg>K>P. Aprile *et al*. (2013) mencionan que el mayor contenido de Ca se debe a que este elemento suele encontrarse en los suelos forestales, en contenidos altos, además de ser menos móvil en la planta que el N, P, K y Mg. Se considera que el Ca no se puede mover del sistema más viejo al más joven. En este sentido, Klinge (1985) encontró en bosques inundables de la amazonia Brasileña, que las hojas viejas son más ricas en Ca y Mg que las hojas jóvenes, y que otros elementos como K, N y P.

Con relación a la concentración foliar en la Hrm, Alvarado *et al.* (2022) encontraron una secuencia similar a la de este estudio N(1.98)>Ca(1.25)>K(0.76)>Mg(0.35)>P(0.14), aunque las concentraciones nutrimentales fueron bajas, excepto en el nutrimento K. De igual manera Raulino *et al*. (2020) mencionan que en los Bosques Húmedos Tropicales

de Pernambuco, Brasil las especies son más eficientes en la utilización de N y Mg mientras que en los Bosques Secos Tropicales las especies son más eficientes en el uso de P y K. Las concentraciones foliares altas del presente estudio pudieron deberse al aporte del AV y fertilización química. Asimismo Murillo *et al*. (2014) en plantaciones de 3-8 años, también encontró el mismo orden de la concentración foliar (%) N(1.9)>Ca (1.06)>K(0.66)>Mg(0.27)>P(0.12) en el canal de Panamá, en suelos ácidos.

4.6.2 Traslación nutrimental y acumulación de hojarasca en la superficie del suelo

En lo referente al aporte de hojarasca de la teca al suelo, ésta se fue incrementando conforme lo hizo la edad (0.51, 1.16 y 1.44 t ha^{-1}) a los 2, 3.2 y 3.45 años. Los árboles de teca conforme van creciendo, requieren de menor aplicación de fertilizantes, dado el incremento de la biomasa radical, el cual permite una mejor exploración y consecuente toma de nutrimentos (Jordan, 1985). Por otro lado, Faisal *et al*. (2009) encontraron aportes de hojarasca de la teca, en edades de 3 y 6 años de 11.64 y 13.20 t ha^{-1}. Otro estudio realizado por Murtinah *et al*. (2016), en un bosque de teca en Indonesia, reporta acumulación de MS 8.56 y 10.21 t ha^{-1} en edades de 12 y 19 años.

Los elementos que tuvieron mayor traslación nutrimental en las plantaciones clonales de teca <5 años estudiadas, fueron el Mg, P y K y los de menor traslación el Ca y N. Algunos autores como Tully *et al*. (2013) mencionan que los nutrientes se translocan a los ápices de crecimiento de diferentes órganos, raíces, ramas, pero sobre todo a las hojas nuevas. El N tiene una traslación a los tejidos leñosos, antes de la senescencia de las hojas, en especies caducifolias se transloca al follaje para formar nuevas hojas y con ello favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas (Samra y Raizada, 2002). Algunos estudios realizados por Mendoza *et al*. (2014), en un ecosistema boscoso, con clima templado en Argentina, encontraron una traslación nutrimental en N(14.5-25.6%), P(11.6-26.1%), K(11.3-55.2%), Ca(4.9-8.7%) y Mg(4.0-13.8%) en un bosque inicial (*Acacia caven*) y bosque maduro (*Celtis tala*). En otro experimento, llevado a cabo por Castellano *et al.* (2010), en plantaciones de *Acacia mangium* de 12 años de edad en un suelo ácido de baja fertilidad, encontraron que los nutrimentos con mayor traslación fueron el N (40.38%), P (74.26%) y K (68.57%) y los de menor Ca y Mg. Por otro lado, Han *et al*. (2012) y Tsujii *et al.* (2017) sostienen que las plantas tienen una traslación relativamente

mayor de un nutriente, si es más limitante en el suelo y en su etapa de crecimiento. La mayoría de los nutrientes estudiados se encontraron en concentraciones medias, el suelo en que se plantó la teca suele ser de baja a mediana fertilidad (Palma *et al*., 2017). Sin embargo, las aplicaciones constantes de fertilizante y el mecanismo de bombeo de nutrientes de las especies forestales favorecen el incremento de la fertilidad química, física y biológica del suelo (Mayor *et al*., 2014; Yuan y Chen 2015; Urbina *et al*., 2021).

4.6.3 Fertilización química y abono verde en el IMA en teca

De acuerdo a lo encontrado en este experimento, los valores del IMA diámetro e IMA altura disminuyen conforme las plantaciones van creciendo, cuando tenían 3.3 años se observaron los incrementos más altos (4.5 cm año^{-1}, 3.2 m año^{-1} en diámetro y altura, respectivamente), los cuales disminuyeron en la misma plantación a la edad de 4.7 años (4.02 cm año^{-1}, 2.56 m año^{-1}). Estos valores son mayores a los reportado por Salcedo *et al*. (2019) a la edad de 6 años en plantaciones de teca en Nayarit, quien obtuvo IMA diámetro e IMA altura bajos (2.2 cm año^{-1}, 2.3 m año^{-1}). Los resultados del presente estudio se asemejan a los reportado por Muñoz *et al*. (2021) en plantaciones de teca de 3 y 7 años, donde los mayores IMA diámetro e IMA altura se presentaron en las plantaciones jóvenes.

El IMA de los diferentes parámetros estudiados mostró estadísticamente que el testigo absoluto y la mayoría de los tratamientos fueron similares. En plantaciones de teca de dos años de edad Balam *et al.* (2015) observaron diferencias estadísticas significativas en el incremento de diámetro (3.8 cm año^{-1}) con aplicaciones de 90 kg ha^{-1} N, en este estudio los incrementos de altura y volumen mostraron respuesta a los tratamientos en los que se aplicó estos tratamientos con fertilizante (60-06-60 y 120-60-60 kg ha^{-1}). Otros trabajos sobre fertilización como el de Abod y Siddiqui (1995) concluyeron que aplicando solo 300 kg ha^{-1} de superfosfato triple y 200 kg ha^{-1} de urea en plantaciones jóvenes de teca, se tienen aumentos importantes en diámetro y altura.

Por otro lado, Moya *et al*. (2017) en trabajos de fertilización en plantaciones de teca de tres, seis y 10 años, encontraron respuesta positiva en las variables diámetro y volumen al aumentar los niveles de N (0, 26.8, 53.6, 73.7 g planta), sin embargo, en la última edad

el nivel de N disminuyó, siendo el testigo el de mayor respuesta. Otro estudio relacionado con la fertilización indica que hay diferencias estadísticas significativas a aplicaciones de fertilizantes a la teca, en los parámetros de altura y volumen (Ugalde, 2013).

Por otra parte, Wittwer *et al*. (2017), están concuerdan en que el uso de abono verde puede incrementar el rendimiento hasta un 24% en sistemas orgánicos de labranza reducida, pero solo en un 2% en un sistema labranza convencional. En ese sentido, O'Reilly *et al*. (2012), mencionan que los abonos verdes pueden acumular N reduciendo las pérdidas en campo. En este estudio solo en la variable altura se ve el efecto positivo del incremento de los niveles de N y el uso de AV. Algunas investigaciones que han usado leguminosas, no han encontrado respuesta en el aumento de N, especialmente en cultivos menores de cinco años (Sainju *et al.,* 2003; Villamil *et al*., 2006).

4.7 CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la fertilidad de suelo, en los nutrimentos Mg y K aumentaron su concentración de nivel muy bajo y bajo, a medio, por el efecto del tratamiento 150-60-60 kg ha^{-1} fertilización química y AV; también hubo mejor efecto en todos los demás elementos estudiados (N, P y Ca). En relación a la concentración foliar en Hrm, el tratamiento 180-60-60+AV presentó mayor efecto en todos los nutrientes evaluados. El N es el nutrimento que se encontró en mayor concentración en la Hrm y Hs (%), teniendo la siguiente secuencia con los demás nutrimentos N(2.57, 2.45)>Ca(1.59, 1.46), K (0.56, 0.49), P (0.37, 0.31) y Mg (0.27, 0.22). Finalmente, la traslación nutrimental más alta se presentó en los elementos deficientes en el suelo, Mg (30.34 %), K (23.71%) y también en P (23.31%), mientras que los tratamientos con mejores efectos fueron 120-60-60 kg ha^{-1}, testigo y 180-60-60 kg ha^{-1} respectivamente. El IMA de los diferentes parámetros estudiados, en la mayoría de los tratamientos presentó similitud estadística con el tratamiento testigo, que mostró tendencias a ser mayor.

CONCLUSIONES GENERALES

La densidad Longitud de Raíces Finas (DLRF) disminuye conforme se incrementa la fertilización química o se usa abono verde. A los 50 cm de distancia del tronco del árbol, la DLRF se incrementa sobre todo en los primeros 20 cm de profundidad.

Respecto a la comunidad de arvenses, la riqueza de especie en la parcela SC presentó valores más altos en comparación con la diversidad y uniformidad, los valores más altos se localizaron en la parcela CC, a la edad de 2.7 años; a los 4.3 años de edad los valores S y E disminuyeron y la H´ fue similar. *Phyla nodiflora* fue la especie más importante en la comunidad, sobre todo a los 2.7 años de edad y *Chloris radiata* a los 4.3 años.

En la relación biomasa radical-biomasa aérea, la última mostró mayor incremento en crecimiento. El carbono orgánico en la hojarasca incrementó al aumentar las dosis de fertilización química. En suelo se puede tener hasta 14.4 t COS ha^{-1}, con una dosis de 150-60-60 kg ha^{-1}. La biomasa total a la edad de 3.2 años almacenó 35.05 t C ha^{-1} en el tratamiento testigo y sin AV. A la edad de 4.7 años el almacenamiento aumentó a 67.17 t C ha^{-1}, con fertilización química y AV.

En cuanto a la fertilidad de suelo, los niveles muy bajos y bajos de Mg y K aumentaron a medios con la fertilización química 150-60-60 kg ha^{-1} y AV. En las concentraciones foliares en Hrm el tratamiento 180-60-60+AV presentó mayor efecto en todos los nutrientes evaluados. El N es el nutrimento que se encontró en mayor concentración en la Hrm y Hs. En la traslación nutrimental, los elementos deficientes en el suelo, fueron los que presentaron los porcentajes más altos: Mg (30.34%), K (23.71%) y P (23.31%). El uso de AV crotalaria y la fertilización se muestran como una alternativa importante para mejorar la fertilidad de los suelos y controlar las arvenses. Sin embargo, se considera necesario continuar esta investigación con la finalidad de registrar el comportamiento del IMA a largo plazo.

LITERATURA CITADA

Abod, S., Siddiqui, M.T. (1998). Growth response of teak (Tectona Grandis L. F.) seedlings to nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. Pertanika J Trop Agric Sci. 25(2): 107-113. http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/3401.

Aceves, N.L.A. y Rivera H.B. (2019). Clima. En: La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado. Vol I. CONABIO, México, pp 61-68. https://bioteca. biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/14868.pdf

Aerts, R. & Chapin, F. S. (2000). The mineral nutrition of wild plants revisited: a reevaluation of processes and patterns. Advances in Ecological Research 30:1-67.

Agüero, A.R., Rodríguez, R.A.M., González, L.M.I., Portuguez, G.P, Brenes, P.S. (2018). Weed abundance and ground cover under conventional or organic management of coffee and banana Agron. Mesoam. 29(1), 85-93.

Agyei K.J., Kyereh B., Ansong M., Asante W. (2021). Influence of management practices on stand biomass, carbon stocks and soil nutrient variability of teak plantations in a dry semi-deciduous forest in Ghana. Trees, Forests and People. 3:100049. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100049.

Alcántar, G. y Trejo, L. I. (2007). Nutrición de Cultivos. Mundi-Prensa. México, D.F. México. 438 p.

Almagro M. & Martínez M. M. (2014). Litter decomposition rates of green manure as affected by soil erosion, transport and deposition processes, and the implications for the soil carbon balance of a rainfed olive grove under a dry Mediterranean climate. Agric. Ecosyst. Environ. 196: 167–177.

Alonso, A.M., Gabriel, J.L., García, G.I., Del Monte, J.P, Quemada M. (2018). Weed density and diversity in a long-term cover crop experiment background. Crop Protection. 112, 103-111. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.04.012.

Alvarado, A. (2003). Escogencia de tierras y manejo de nutrición en plantaciones tropicales. In Memoria del “Seminario y grupo de discusión virtual sobre teca, 26-27 y 28 de noviembre de 2003. Heredia, CR, Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales. ISBN 9968- 9996- 3-6. 1 disco compacto.

Alvarado, A. (2012a). Reciclaje de nutrimentos en plantaciones y bosques tropicales. En nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo, San José costa Rica, pp. 51-96.

Alvarado, A. (2012b). Nutrición y fertilización de Tectona grandis Linn. f. In Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales A, San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de las Ciencias del Suelo. 313-340.

Alvarado, H.A., Chaves, C.R., Chacón, M.E., Rodrigues, H.W., Blanco, M.F. (2022). Diagnóstico foliar de nutrimentos de nueve especies forestales tropicales de tres pisos altitudinales en Centro América. Agronomía Costarricense 46(1): 25-45.

Álvares-López, P.S., Perales, S.A., Trujillo, U.E. (2014). El subsector forestal mexicano y su apertura comercial. Ensayo técnico. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(29):8-23.

Aprile, F., Siqueira, G.W., Darwich, A.J., dos Santos V.C., Ribeiro A.A. (2013). Concentration of Nutrients in Litter as a Function of Soil Type, Climate and Forest Composition in Amazon. Journals Agriculture Science Developments. 2 (8): 59-66.

Ávila, G; Jiménez, F; Beer, J; Gómez, M; Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas 8(30): 32-35.

Bai, Z.; Wu, X.; Lin, J.-J.; Xie, H.-T.; Yuan, H.S. (2019). Liang, C. Litter-, Soil-, and C: N-Stoichiometry-associated shifts in fungal communities along a subtropical forest succession. CATENA, 178, 350-358.

Balam, C. M.; Gómez, G. A.; Vargas, H. J.J.; Aldrete, A.; Obrador, O.J.J. (2015). Fertilización inicial de plantaciones comerciales de teca (*Tectona grandis* L.f*.)* en el sureste de México. Rev. Fitotec. Mex. 38 (2): 205-212.

Bardgett, R.D., Mommer, L., De Vries, F.T. (2014) Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. Trends Ecol Evol. 29: 692-699.

Basave, V.E., García, C.L.C., Castro, R.A., Calixto, V.C.G., Sigala, R.J.A., García, P.J.L. (2016). Calidad de planta de Cedrela odorata L. asociada con prácticas culturales de vivero Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7(36): 65-80.

Becerril, P.R., Gonzáles, S.E. Hernández, S.L. (2007). El semiárido mexicano como sumidero de carbono. Estudio de caso Microcuenca “El Carmen”. Memorias del Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo de Cuencas Hidrográficas. México, D.F. Instituto Nacional de Ecología.

Berlingeri, C., Yuncosa, N., Pérez, T. (2008). Evaluación de cinco leguminosas en barbecho mejorado para el control de malezas en la planicie del Río Motatán, estado Trujillo, Venezuela. Agronomía Trop. 58(2), 117-123.

Blanco, Y. (2016). El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. Cultivos tropicales. 37(4), 34-56. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10964.19844.

Blanco, Y. y Leyva, A. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. Cultivos tropicales. 28(2), 21-28.

Bordron, B., Oliveira, I.R., Guillemot, J., Laclau, J.P., Jourdan, Y.N., Abreu, J.C.H., Trivelin, P.C.O., Goncalves, J.L.M., Plassard, C., Bouillet, J.P. (2019). Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young Eucalyptus grandis tres. Forest Ecology and Management. 431: 6-16. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.018.

Brando, P.M., Paolucci L., Ummenhofer, C.C., Ordway, E.M., Hartman, H., Cattau, M.E., Ratis, L., Medjibe, V., Coe, M.T., Balch, J. (2019). Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 47:555-81.

Brockerhoff, E.G., H. Jactel, J.A. Parrotta, Ferraz, S.F.B. (2013) Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. Forest Ecology and Management 301: 43-50.

Broedel, E., Tomasella, J., Cândido, L.A., Von Randow, C. (2017). Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in central Amazonia: differences between normal years and the 2005 drought. Hydrol. Processes 31: 1749-1759. https://doi.org/10.1002/hyp.11143.

Brust, J., Claupein, W., Gerhards, R. (2014). Growth and weed suppression ability of common and new cover crops in Germany. Crop Prot. 63, 1-8.

Buddenhagen, C.E. 2014. *Desmodium incanum* (cadillo): Datasheet. Compendio CABI. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.10920. Consultado el 01 de diciembre de 2022.

Burton, A.J., Pregitzer, K.S., Hendrick, R.L. (2000). Relationship between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*. 125: 389-399.

Calvo, A.J.; Arias, A.D.; Jiménez, R.C., Solano, M.J.C. (2012). Efecto de cinco sustratos en el contenido foliar de nutrientes y crecimiento inicial de tres especies forestales empleadas en Mesoamérica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. *5*(14): 1-15.

Camacho, L.A., Ramirez, M. H., de los Santos P.H.M., Zamudio S. F. J. (2013). Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.f.) en el estado de Campeche. Revista mexicana de Ciencias Forestales. 4(19): 92-101.

Carvalho, A.M. & Amabile, R.F. (2006). Cerrado: Adubação verde. Brasília, Embrapa Cerrados. 369p.

Castellanos, B.J. y León, P.J.D. (2010). Caída de hojarasca y dinámica de nutrientes en plantaciones de *Acacia magnium* (mimosaceae) de Antioquia, Colombia. Acta Biológica Colombiana. 15(2): 289-308.

Chauhan, B. S., Gill, G., Preston C. (2006). Influence of tillage systems on vertical distribution: Seedling recruitment and persistence of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) seed bank. Weed Science 54, 669-76. https://doi.org/10.1614/ WS-05-184R.1.

Chen, Z., Shen, Y., Tan, B., Li, H., You, C., Xu, Z., Wei, X., Ni, X., Yang, Y., Zhang, L. (2021). Decreased soil organic carbón under litter input in three subalpine forest. Feorest. 12, 1479. https://doi.org//10.3390/f12111479.

Cherr, C.M., Scholberg, J.M.S., McSorley, R. (2006). Green manure approaches to crop production: A synthesis. Agron. J. 98: 302-319. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0035.

Clement, C., Pierret, A, Maeght. J.L., Hartmann, C., Xayyathip, K., Soulileuth, B., Souyafong, P., Latsachack, K., Thammahacksa, C., Sengtaheuanghoung, O. (2019). Linking tree-rooting profiles to leaf phenology: a first attempt on *Tectona grandis* Linn F. Trees. 33: 1491-1504. https://doi.org/10.1007/s00468-019-01876-9

CONAFOR, (2014) México cuenta con 270 mil hectáreas de Plantaciones Forestales Comerciales. Unidad de Comunicación Social. Boletín 77. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 2p.

CONAFOR, (2016). Situación actual de las Plantaciones Forestales Comerciales en el sureste de México. Foro de Innovación y Transferencia de Tecnología en Plantaciones Forestales Comerciales .Villahermosa, Tabasco, 25 de noviembre de 2016.

Correa, G.H.M. y Romero, H.O.M. (2016). Cuantificación de Biomasa aérea total, carbono almacenado y CO2 fijado en árboles de teca, caso de estudio. Revista DELOS desarrollo local sostenible 9(26): 1-14.

Cotê, B. Fyles, W. & Djalilvand, H. (2002). Increasing and P resorption efficiency and proficiency in northern deciduous hardwoods with decreasing foliar N and P concentrations. Annals of Forest Science 59: 275-281.

Craine, J.M. (2006). Competition for nutrients and optimal root allocation. Plant Soil. 285: 171-185.

Csurhes, S. (2016). Blue morning glory *Ipomoea indica.* Department of Agriculture and Fisheries Biosecurity Queensland. State of Queensland, 9.

Cuanalo, C.H. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3ª ed. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Chapingo. 40p.

Da Gama, R. A.C., da Gama, R.E.F., de Brito, E.C. (2007). Decomposição e liberação de nutrientes de residuos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região noroeste fluminense-RJ. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31, 1421-1428.

Dabin, Z., Pengwei, Y., Na, Z., Changwei, Y., Weidong, C., Yajun, G. (2016). Contribution of green manure legumes to nitrogen dynamics in traditional winter wheat cropping system in the Loess Plateau of China. Eur. J. Agron. 72, 47-55.

De Camino, R.V, Alfaro, M.M., Sage, L.F.M. (2002). Teak (*Tectona grandis*) in Central America. Forest plantations working paper 19, Forest Resources Development Service, Forest Resources, Division, FAO, Rome (28 p).

De Camino, R. V. y Morales, J. P. (2013). Las Plantaciones de teca en América Latina: mito y realidades. Turrialba, C.R.: CATIE.

De Stefano, A. & Jacobson, M.G., (2017). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. Agrofor. Syst. 92: 285-299. https://doi.org/10.1007/s10457-017- 0147-9.

Dorn, B., Jossi, W., Van Der Heijden M. G. A. (2015). Weed suppression by cover crops: Comparative on-farm experiments under integrated and organic conservation tillage. Weed Research, 55: 586-597. https://doi.org/10.1111/wre.12175.

Erakhrumen, A.A., Inaede, S. (2018). Heavy Metals Concentration in Teak (*Tectona grandis* Linn. F.) and Topsoil at Roadside in University of Benin, Benin City, Nigeria. J. Appl. Sci. Environ. Manage. 22(10): 1631-1638.

Faisal, (2009). Pengaruh Iklim Mikro Terhadap Laju Dekomposisi Serasah Tegakan Jati (Tectona grandis L.f) pada Umur yang Berbeda. Skripsi. Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia.

Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 114(40): 10572-10577.

Fernández, O. y Leguizamón, E. 2015. Malezas e invasoras de la Argentina. Tomo I: ecología y manejo. Buenos Aires, AR: EdiUNS, 945. Retrieved from http://site.ebrary.com/lib/itcrsp/docDetail.action?docID=11138295&ppg=1.

Finzi, A.C., Allen, A.S., De Lucia, E.H., Ellswotth, D.S., Schlesinger W.H. (2001). Forest litter production, chemistry and decomposition following two years of free-air CO2 enrichment. Ecology. 82:470-484.

Florentín, M.A. Peñalva, M. Calegari, A. & Derpsch, R. (2011). Green manure cover crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms. Integrated Crop Management 12. Plant Production and Protection Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma Italy. 12, 97. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agp/icm12.pdf.

Freschet, G.T., Valverde-Barrantes, O.J., Tucker, C.M., Craine, J.M., Mccormack, M.L., Violle, C., Fort, F., Blackwood, C.B., Urban-Mead K.R., Iversen, C.M., Bonis, A., Comas, L.H., Cornelissen, J.H.C., Dong, M., Guo, D., Hobbie, S.E., Holdaway, R.J., Kembel, S.W., Makita, N., Onipchenko, V.G., Picon-Cochard, C., Reich, P.B., de la Riva, E.G., Smith, S.W., Soudzilovskaia, N.A., Tjoelker, M.G., Wardle, D.A., Roumet, C. (2017). Climate, soil and plant functional types as drivers of global fine-root trait variation. J. Ecol. 105: 1182-1196. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12769.

Garro, A. J. E. (2002). Plantas competidoras: Un componente más de los agroecosistemas, 278, ISBN: 9968312355, 258. Editorial Universidad Estatal a Distancia, 229.

Gentry, A. (1991). The distribution and evolution of climbing plants. In: The biology of vines (Putz, F. and H. Mooney, eds.), Cambridge University Press, Cambridge. 3-50. https://doi:10.1017/CBO9780511897658.003

Giraldo, Á.G. (2003). Abonos verdes, características y especies utilizables. FAO. En: http://teca.fao.org/sites/default/files/ technology files/abonos%20verdes.pdf.

Gliessman, S.R. (2002). Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, costa Rica, 349.

González E.S.M., Reznicek A.A. and Tena F.J.A. (2018). Cyperaceae in México; Diversity and distribution. Botanical Sciences. 96(2), 305-331. https://doi.org/10.17129/botsci.1870.

González, M.A.J., Rojas, H.J., Jimenez, G.R.M., Chavarria, Ñ.F.J. (2014). Evaluación del crecimiento, potencial de secuestro y fijación de carbono de dos especies forestales en el sistema agroforestal Taungya en Rivas Nicaragua. Revista forestal Mesoamericana kurú, Costa Rica. 11(26): 1-7.

Han, W.X., Tang, L.Y., Chen, Y.H., & Fang, J.Y. (2013). Relationship between the relative limitation and resorption efficiency of nitrogen vs phosphorus in woody plants. Plos One 8: e83366.

Hansen, M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. & Townshend J.R.G. (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science, 342(6160):850–853. doi:10.1126/science.1244693

Hernández, A. M. (2016). Potencial alelopático de *Phyla strigulosa* (M.Mart. y Gal.) Mold.*, Sphagneticola trilobata* L. Pruski e *Ipomoea batatas* (L.) Lam sobre arvenses y cultivos. Tesis presentada en opción al grado de doctor en ciencias agrícolas, Santa Clara, 57.

Holm, L.G., Pancho, J.V., Herberger, J.P. & Plucknett, D.L. (1991). A geographical atlas of world weeds*,* Krieger Publishing Company, Florida, 391.

Hoyos, V., Plaza, G., Vázquez, G.JG., Palma, B.C., Rojano, D.A.M. & De prado, R. (2021). Confirmation of Multiple Resistant Chloris radiata Population, Harvested in Colombian Rice Fields. Revista Agronomy, *11*(3), 496; https://doi.org/10.3390/agronomy11030496.

Hui, L.I., Feng, W., He, X., Ping, Z.H.U., Gao, H., Nan, S.U.N., Xu, M., (2017). Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain. J. Integr. Agric. (16):937-946.

Husen, A. & Pal, M. (2003). Effect of nitrogen, phosphorous and potassium fertilizers on growth of stock plants of *Tectona grandis* (Linn. F.) and rooting behaviour of shoot cuttings. Silvae Genetica, 52: 249-254.

IUSS Working Group WRB, (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil. Resources Reports No. 106. FAO. Rome, Italy. 181p. Upgrade 2015.

Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V., Chauhan, B.S. (2015). Allelopathy for weed control in agricultural systems. Crop Protection, 72, 57-65.

Jean, P.T., Tamfuh, P.T., Djakba, S.B., Zame, P.Z., Hamadjida, G., Monique, A., Jean, P.N., Dieudonne, L.B. (2019). Characteristics, classification and genesis of vertisols under seasonally contrasted climate in the Lake Chad Basin, Central Africa. Journal of African Earth Sciences. 150: 176-193.

Jha, K.K. (2005) Storage and flux of organic carbon in young Tectona grandis plantations in moist deciduous forest. Indian For 131: 647-659.

Jha, K.K. (2014) Temporal patterns of storage and flux of N and P in young teak plantations of tropical moist deciduous forest, India Journal of Forestry Research 25:75-86.

Jha, K.K., (2015). Carbon storage and sequestration rate assessment and allometric model development in young teak plantations of tropical moist deciduous forest. India Journal of Forestry Research 26: 589-604.

Jimenez, P.J., Tellez, A.R., Alanís, R.E., Yerena, Y.J.I., Garcia, G.D.A., Gómez, C.M. (2020). Stored carbon estimation of a *Tectona grandis* L. f. plantation using allometric equations. Revista mexicana de ciencias forestales. 11(57): 32-56.

Jiménez, R.E.M., Crespo, G.R.S., Cualquier, F.E. (2020). Relación de arvenses en plantaciones de *Tectona grandis L.f.* (teca) y su banco de semillas en la zona central del litoral ecuatoriano. Centro sur. 1(7): 69-91.

Jordan, C. F. (1985). Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystem. Wiley, Nueva York. 190 p.

Kaiser, C., Kilburn, M.R., Clode, P.L., Fuchslueger, L., Koranda, M., Cliff, J.B., Solaiman, Z.M., Murphy, D.V. (2015). Exploring the transfer of recent plant photosynthates to soil microbes: mycorrhizal pathway vs direct root exudation. New Phytol. 205: 1537-1551.

Kenso, T., Himmapan, W., Yoneda, R., Tedsorn, N., Vacharangkuras, T., Hitsuma, G., Noda, I. (2020). General estimation models for above- and below-ground biomass of teak (*Tectona grandis*) plantations in Thailand. Forest Ecology and Management 457. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117701.

Kimambo N.E., Roe J.L., Naughton T.L., Radeloff V.C. (2020). The role of smallholder woodlots in global restoration pledges – lessons from Tanzania. For. Policy Econ 115: 102:144. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102144.

Klinge, H. (1985). Foliar nutrient levels of native tree species from Central Amazonia. 2. Campina. Amazonia 9(3): 281-295.

Kraenzel, M.; Castillo, A.; Moore, Tim.; Potvin, C. (2003). Carbon storage of harvest- age teak (*Tectona grandis*), plantations Panama. Forest ecology and management 173: 213-225.

Kutschera, L. & Lichtenegger, E. (2002). Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. In. Stocker, Graz.

Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. Food Energy Secur 5, 212-222. https://doi.org/10.1002/fes3.96.

Lawley, Y. E., Weil, R. R., Teasdale J. R. (2011). Forage radish cover crop suppresses winter annual weeds in fall and before corn planting. Agronomy Journal, 103, 137-44. https://doi.org/10.2134/agronj2010.0187.

Liebman, M. & Mohler, C.L. (2001). Ecological Management of Agricultural Weeds, 210-269.

López, H.G., Vaides, E.E., Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en chahal, Alta Verapaz, Guatemala. Agronomía Costarricense. 42(1): 137-153.

López, R.L.Y., Domínguez, D.M., Martínez, Z.P., Zavala, C.J., Gómez, G.A., Posada, C.S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. Madera y Bosque 22(3):49-60.

Ma, D.; Yin, L.; Ju, W.; Li, X.; Liu, X.; Deng, X.; Wang, S. (2021). Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. Field Crops Research. 266.

Ma, Z., Guo, D., Xu, X., Lu, M., Bardgett, R.D., Eissenstat, D.M., Hedin, L.O. (2018). Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. Nature, 555(7694): 94-97. https://doi.org/10.1038/nature25783.

Magurran, A. E. (1988). Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press, New Jersey, 179.

Manici, L.M., Caputo, F., Babini, V. (2004). Effect of Green manure on Pythium spp. Population and microbial communities in intensive cropping systems. Plant and Soil 263: 133-142.

Martínez, R.R. (2005). Reseña “silvicultura de plantaciones forestales comerciales”. Ra Ximhai. 1(2): 421-425.

Mayor, J. R., Wright, S. J., & Turner, B. L. (2014). Species-specific responses of foliar nutrients to long-term nitrogen and phosphorus additions in a lowland tropical forest. Journal of Ecology, *102*(1): 36-44. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12190.

Méndez, S.I.E. (2003). Verbenaceae. En: Flora de la República de Cuba. Serie A. Plantas Vasculares. Fascículo, 7. Königstein, Germany: Koeltz Scientific Books. ISBN: 9783904144971. 7, 187.

Mendoza, C.A., Belén, T.M., Aceñolaza, P.G., Gallardo, J.F., Pando, V. (2014). Retranslocación de nutrientes en especies dominantes de bosques del Espinal Mesopotámico (Argentina). Bosque (Valdivia) 35(2): 85-193 https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000200006.

Meunpong, P., Wachrinrat, C., Thaiutsa, B., Kanzaki, M., Meekaew, K., (2010). Carbon pools of indigenous and exotic tree species in a forest plantation, Prachuap Khiri Khan. Thailand. Kasetsart J. Nat. Sci. 44: 1044-1057.

Midgley, S., Mounlamai, K, Flanagan, A., Phengsopha K. (2015). Global markets for plantation teak: Implications for growers in Lao PDR. 74. Laos: VALTIP2.

Miller, H.G. (1984). Dynamics of nutrient cycling in plantation ecosystems. In: “Nutrition of Plantation Forests” (Bowen GD, Nambiar EKS eds). Academic Press, London, UK, pp. 53-79.

Miller, H.G. (1995). The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. Plant and Soil 168-169 (1): 225-232. https://doi.org/10.1007/BF00029332.

Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Teasdale, J.R., Curran, W.S., Reberg-Horton, C.S., Spargo, J.T., Wells, M.S., Keene, C.L., Moyer, J.W. (2013). Overcoming weed management challenges in cover crop-based organic rotational no-till soybean production in the eastern United States. Weed Technol. 27: 193-203.

Montagnoli, A., Di Iorio A., Terzaghi, M., Trupiano, D., Scippa, G.S., Chiatante, D. (2014). Influence of soil temperature and water content on fine root seasonal growth of European beech natural forest in Southern Alps, Italy. Eur. J. For. Res. 133: 957-968.

Montagnoli, A., Dumroese, R.K., Terzaghi, M., Pinto, J.R., Fulgaro, N., Scippa, G.S., Chiatante, D. (2018). Tree seedling response to LED spectra: implications for forest restoration. Plant Biosyst. 152: 515-523.

Montero, M. (1995). Dinámica de crecimiento de teca (Tectona grandis) bajo fertilización en El Limón de Chupampa, Herrera, Panamá. In. Memorias del Seminario Técnico sobre Fertilización Forestal realizado en Santiago, Veraguas, Panamá. CATIE/ INRENARE. pp. 17-29.

Moreno, G., Obrador, J.J., Cubera, E., Dupraz, C. (2005). Fine Root distribution in dehesas of Central-Western Spain. Plant and soil 277(1): 153-162.

Mostacedo, B. y Frederikcsen, T.S. (2000). Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal. Santa Cruz, Bolivia, 92. Editora El País.

Moya, F.J., Alvarado, A., Fallas, J.L., Ayanzi, A.S.M. Marchamalo, S. (2017). N-P-K fertilisation of teak (*Tectona grandis*) plantations: a case study in Costa Rica. Journal of Trópical Forest Science 29(4): 417-427 https://doi.org/10.26525/jtfs2017.29.4.417427.

Moya, F.J., Murillo, R., Portuguez, E., Fallas, J.L., Ríos, V., Kottman, F., Verjans, J.M., Mata, R., Alvarado, A. (2013). Nutrient concentration age dynamics of teak (Tectona grandis L.f.) plantations in Central America. Forest System 22(1): 123-133.

Moya, F.J., Murillo, R., Portuguez, E., Fallas, J.L., Ríos, V., Kottman, F., Verjans, J.M., Mata, R., Alvarado, A. (2014). Nutrient accumulation and export in teak (Tectona grandis L.f.) Plantations of Central America. iForest- Biogeosciences and Forestry. 8: 33-44.

Muñoz, F.H.J., Sáenz, R.J.T., Barrera, R.R., Hernández, R.J., Gómez, C.M. (2021). Diagnostico de plantaciones comerciales de Tectona grandis L.f. en el trópico seco de Michoacán Ecosist. Recur. Agropec. 8(3): 1-7. http://doi.org/10.19136/era.a8n3.3058.

Murillo, R.A., Alvarado, A., Verjans, J.M. (2014). Concentración foliar de nutrimientos en plantaciones de teca en la cuenca del Canal de Panamá. Agronomía Costarricense 38(1): 11-28.

Murtinah V.; Ruhiyat D; Ruchaemi A; Marjena. (2016). The Litter Production and Nutrients Return of Teak Plantation Forest at East Kalimantan, Indonesia. International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR). 29(2): 99-108.

N´Guessa N. F., Martinez G. A., Ebagnerin T.J. (2017). Carbon stocks in selected tree plantations, as compared with semi-deciduous forests in centre-west Côte d'Ivoire. Agriculture, Ecosystems and Environment. 239: 30-37. http://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.015.

Naranjo, L. S., Obrador, O.J.J. García, L.E., Valdez, B.A., Domínguez, R.V.I. (2020). Arvenses en un suelo cultivado con caña de azúcar con fertilización mineral y abono verde. Polibotánica, 50, 119-135.

Nardini, A., Casolo, V., Dal Borgo, A. (2016). Rooting depth, water relations and non-structural carbohydrate dynamics in three woody angiosperms differentially affected by an extreme summer drought. Plant, Cell Environ 39(3): 618-627. http://doi.org/10.1111/pce.12646.

NOM-021-RECNAT. (2000). Norma oficial mexicana. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. SEMARNAT. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 65p.

O'reilly, K.A., Lauzon, J.D., Vyn, R.J., Van Eerd, L.L., (2012). Nitrogen cycling, profit margins and sweet corn yield under fall cover crop systems. Can. J. Soil Sci. (92): 353-365.

Obrador, O.J.J, García, L.E., Almeyda, S.L.E., Castelán, E.M. (2017). Weeds in a sugar cane soil cultivated with *Crotalaria juncea*. Planta danhina, 37: 10. http://doi.org/10.1590/s0100-83582019370100002.

Obrador OJJ, Castelán EM, Córdova SA, Salgado GS, García LE, Carrillo AE (2021). Root length density (RLD) of oil palm (Elaeis guineensis Jacq) in a haplic Luvisol in Chiapas, Mexico. Rev. FCA UNcuyo 53(2): 157-164 https://doi.org/10.48162/rev.39.049.

Palma-López, D.J., Jiménez, R.R., Zavala, C.J., Bautista, Z.F., Gavi, R.F., Palma, C.D.Y. (2017). Updating the classification of soils in Tabasco, México. Agroproductividad. 10(12): 29-35.

Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, & D. Hayes. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science 333: 988-993.

Parenti, A.; Cappeli, G.; Zegada, L.W.; Martín, S.C.; Christou, M.; Monti, A., Ginaldi, F.; (2021). SunnGro: A new crop model for the simulation of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) grown under alternative management practices. Biomass and bioenergy, 146. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105975.

Peachey, R.E., Moldenke, A., William, R.D., Berry, R., Ingham, E., Groth, E. (2002). Effect of cover crop and tillage systems on symphylan (Simphlya: *Scutigerella immaculate*, Newport) and *Pergamasus quisquiliarum* Canestrini (Acari: Mesostigmata) populations, and other soil organisms in agricultural soils. Appl. Soil Ecol, 21: 59-70.

Pelletier, J., Ngoma H., Mason, N.M., Barrett, C.B., (2020). Does smallholder maize intensi fi cation reduce deforestation? Evidence from Zambia. Global Environ. Change 63: 102-127. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102127.

Phillips, R.P., Meier, I.C., Bernhardt, E.S., Grandy, A.S., Wickings, K., Finzi, A.C. (2012). Roots and fungi accelerate carbon and nitrogen cycling in forests exposed to elevated CO2. Ecology Letters 15: 1042-1049.

Pompa, G.M. & Sigala, R.J.A. (2017). Variation of carbon uptake from forest species in Mexico: a Review. Madera y bosque. 23(2): 225-235. https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321512.

Prieto, I., Roumet, C., Cardinael, R., Dupraz, C., Jourdan, C., Kim, J.H., Maeght, J.L., Mao, Z., Pierret, A., Portillo, N., Roupsard, O., Thammahacksa, C., Stokes, A. (2015). Root functional parameters along a land-use gradient: evidence of a community-level economics spectrum. J. Ecol. 103: 361-373. https://doi.org/10.1111/1365-2745.

Pulido, F., & Díaz, M. (2005). Regeneration of a Mediterranean oak: a whole cycle approach. Ecoscience, 12: 92-102.

Raulino, W.N.C., Freire, F.J., Assunção, E.A.D.A.., Ataide, K.M.P.D., Silva, H.V.D., Silva, A.C.F.D. (2020). Nutrition of tree species in tropical dry forest and rainforest environments. Revista Ceres 67(1): 70-80.

Reiss, A., Fomsgaard, I.S., Mathiassen, S.K., Kudsk, P. (2018). Weed suppressive traits of winter cereals: allelopathy and competition. Biochem Syst Ecol, 76: 35-41.

Robačer, M., Canali, S., Lakkenborg, K.H, Bavec, F., Grobelnik M.S., Jakop M., Bavec M. (2015). Cover crops in organic field vegetable production. Scientia Horticulturae, 208: 104-110.

Rodríguez, S.G., Rodríguez, I.B., Alfonso, O.A., Aloma, J.D., Pérez, C.N., y Romero, C.A. (1985). Manual de malezas de la Caña de Azúcar en Cuba. Inglaterra: Plant Protection Divition.

Rojas, M.J., Ibrahim, M., Ibrahim, M., Andrade, H.J., Andrade, H.J. (2009). Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecuaria 10(2): 214-223.

Rojas-Sandoval J. (2022). *Paspalum notatum* (hierba Bahía): Ficha técnica. Compendio CABI. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.38954. Consultado el 01 de diciembre de 2022.

Rojas-Sandoval, J. (2015). *Cleome viscosa* (flor de araña asiática): Ficha técnica. Compendio CABI. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.14045. Consultado el 01 de diciembre de 2022.

Rojas-Sandoval, J. (2020). *Cissus verticillata* (possum grape vine): Datasheet. Compendium CABI. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.82702108. Consultado el 01 de diciembre de 2022.

Rzedowski J., y Rzedowski, G.C. (1997). *Senna pendula* (Willd.) Irwin y Barneby. Familia Leguminose, Subfamilia Caesalpinoideae. Fascículo 51. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Instituto de Ecología A.C., Centro Regional del Bajío. Pátzcuaro, Michoacán, México. p. 90-93.

Sainju, U., Whitehead, W., Singh, B., (2003). Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. Can. J. Soil Sci. (83): 155-165.

Salcedo, P.E., Ypushima, P.A.L., González, C. R., Zamora, N. J.F., Rodríguez, M.R., Sánchez, H.R. (2014). Efecto de las propiedades edáficas y el contenido nutrimental foliar sobre el crecimiento de teca. Revista mexicana de ciencias forestales. INIFAP, México. 5(24): 80-91.

Salgado, G.S., Palma, L.D.J., Castelán, E.M., Lagunes, E.L.C., Ortiz, L.H. (2013). Manual para muestreo de suelos, plantas y agua e interpretación de análisis para la producción sostenible de alimentos. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco H. Cárdenas, Tabasco, México.101 p.

Samra, J.S. & Raizada, A. (2002) Litter production and nutrient dynamics in tropical forest plantations of India, Chapter 3. In: Reddy MV (ed) Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, New Hampshire, pp 41-71.

Sánchez, B.J. y Guevara, F.F. 2013. Plantas arvenses asociadas a cultivos de maíz de temporal en suelos salinos de la ribera del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. Acta botánica Mexicana 105: 107-129.

Schenk, H.J. (2008). The shallowest possible water extraction profile: a null model for global root distributions. Vadose Zone Journal 7: 1119-1124.

Schroeder-Georgi, T., Wirth, C., Nadrowski, K., Meyer, S.T., Mommer, L. & Weigelt, A. (2016). From pots to plots: hierarchical trait-based prediction of plant performance in a mesic grassland. Journal of Ecology, 104: 206-218.

Sima, G.S.A. (2010). Relación del suelo con el crecimiento inicial y contenido foliar de teca (*Tectona grandis* L.f.), y adaptación de leguminosas para control de arvenses

bajo un sistema fertirriego en Campeche, México. Tesis de Maestría. CATIE, Costa rica. 90 p.

Singh, K.P. & Srivastava, S.K. (1985). Seasonal variations in the spatial distribution of root tips in teak *(Tectona grandis* Linn. f.) plantations in the Varanasi Forest Division, India. Plant and Soil, 84: 93-104.

Skinner, E.M., Diaz-Perez, J.C., Phatak S.C., Schomberg H.H., Vencill, W. (2012). Allelopathic effects of sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) on germination of vegetables and weeds. Hortscience. 47: 138-42.

Smith, P., Ashmore, M.R., Black, H.I.J., Burgess, P.J., Evans, C.D., Quine, T.A., Thomson, A.M., Hicks, K., Orr, H.G., (2013). REVIEW: the role of ecosystems and their management in regulating climate, and soil, water and air quality. J. Appl. Ecol. https://doi.org/ 10.1111/1365-2664.12016.

Song, J.G., Ju S.H., G., Wei, D.C., Chun, Q.Z., Jing, H., Jinshun, B. (2018). Effects of long-term green manure application on the content and structure of dissolved organic matter in red paddy soil. Journal of Integrative Agriculture. 17(8): 1852-1860. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61901-4.

Sreejesh, K., Thomas, T., Rugmini, P., Prasanth, K., Kripa, P. (2013). Carbon sequestration potential of Teak (*Tectona grandis*) plantations in Kerala. Research Journal of Recent Sciences. 2 (ISC- 2012): 167-170.

Streets, R.J. (1962). Exotic trees of the British Commonwealth. Clarendon Press. Oxford, UK, 765 p.

Sturm, D.J., Peteinatos, G. & Gerhards, R. (2018). Contribution of allelopathic effects to the overall weed suppression by different cover crops. Weed Research 58: 331-337.

Sun, L., Ataka, M., Kominami, Y., Yoshimura, K. (2017). Relationship between fine-root exudation and respiration of two Quercus species in a Japanese temperate forest. Tree Physiol. 3: 1011-1020.

Tahir, S.M., Ali, A.S., Adnan, T.M. (2007). Root nutrient concentrations in teak (*Tectona grandis L.f*.) plantations as influenced by fertilization and age. Canadian journal of pure and applied science.1: 45-52.

Tamang, M.; Chettri, R.; Vineeta; Shukla, G.; Bhat, J.A.; Kumar, A.; Kumar, M.; Suryawanshi, A.; Cabral-Pinto, M.; Chakravarty, S. (2021) Stand Structure, Biomass and Carbon Storage in *Gmelina arborea* Plantation at Agricultural Landscape in Foothills of Eastern Himalayas. *Land. 10(4)*: 387. https://doi.org/10.3390/land10040387.

Tangsinmankong, W., Pumijumnong, N. and Moncharoen L. (2007). Carbon stocks in soil of mixed deciduous forest and teak plantation. Environment and Natural Resources *J.* 5(1): 80-86.

Teasdale, J.R. & Pillai, P. (2005). Contribution of ammonium to stimulation of smooth pigweed germination by extracts of hairy vetch residue. Weed Biol. Manag, 5: 19-25.

Tefs, C. & Gleixner, G. (2012). Importance of root derived carbon for soil organic matter storage in a temperate old-growth beech forest - evidence from C, N and 14C content. Forest Ecology and Management 263: 131-137.

Tsujii, Y., Onoda, Y., and Kitayama, K. (2017). Phosphorus and nitrogen resorption from different chemical fractions in senescing leaves of tropical tree species on Mount Kinabalu, Borneo. *Oecologia*, *185* (2), 171-180. https://doi.org/10.1007/s0044 2-017-3938-9.

Tully, K., Wood, T.E., Schwantes, A.M., Lawrence, D. (2013) Soil nutrient availability and reproductive effort drive patterns in nutrient resorption in Pentaclethra macroloba. Ecology 94(4): 930-940.

Uchino, H., Iwama, K., Jitsuyama, Y., Ichiyama, K., Sugiura, E., Yudate, T. & Gopal, J. (2012). Effect of interseeding cover crops and fertilization on weed suppression under an organic and rotational cropping system. Field Crops Research, 127: 9-16. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.10.007.

Ugalde, A. L. A. (2013). Teak: New Trends in Silviculture, Commercialization and Wood Utilization. International Forestry and Agroforestry and FAO. San José, Costa Rica. 552 p.

Urbina, I., Grau, O., Sardans, J., Margalef, O., Peguero, G., Asensio, D., Llusia, J., Ogaya, R., Gargallo, G.A., Langenhove, L.V., Verryckt, L.T., Courtois, E.A., Stahl, C., Soong, J.L., Chave, J., Hérault, B., Janssens, I.A., Sayer, E., Peñuelas, J. (2021). High foliar K and P resorption efficiencies in old-growth tropical forests growing on

nutrient-poor soils. Ecology and Evolution. 11:8969-8982. https://doi.org/10.1002/ece3.7734.

Vacharangkura, T. (2012). Variable density yield model for teak plantations in the Northeast of Thailand. JIRCAS Working Rep. 74: 33-40.

Valdemar, H.F. (2000). Manejo del suelo en pequeñas fincas. Estrategias y métodos de introducción, tecnologías y equipos. Boletín de suelos de la FAO número 77. Roma, Italia, 66 p.

Vargas, M. J., Quezada, H., Morales, M. (2007). Estado actual de las investigaciones de la teca (*Tectona grandis* L.F.) en el valle de sacta, Cochabamba, Bolivia. vol. 3.

Velázquez, M. A. (2009). Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal- Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de Méx., México. 472 p.

Vera, N.J.A., Infante, S.J.P., Velasco, V.V., Salgado, G.S., Palma, L.D.J., Grageda, C.O.A., Cárdenas, R., Pena, C.J.J. (2011). Influence of P Fertilization on Biological Nitrogen Fixation in Herbaceous Legumes Grown in Acid Savannah Soils from the Tabasco State, Mexico. Journal of Sustainable Agriculture, (31)3: 25-42.

Versini, A., Mareschal, L., Matsoumbou, T., Zeller, B., Ranger, J., Laclau, J.P. (2014). Effects of litter manipulation in a tropical Eucalyptus plantation on leaching of mineral nutrients dissolved organic nitrogen and dissolved organic carbon. Geoderma 232-234: 426-436. http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.018.

Vibrans H. 2009. Malezas de México. http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm. (Consultado 19 de diciembre de 2022).

Vigulu, V.W., Blumfield, T.J., Reverchon, F., Xu, Z.H.,Tutua, S.S. (2017). Competition for nitrogen between trees in a mixed-species plantation in the Solomon Islands, Australian Forestry, 80(3): 135-142. http://dx.doi.org/10.1080/00049158.2017.1326093.

Villamil, M., Bollero, G., Darmody, R., Simmons, F., Bullock, D., (2006). No-till corn/soybean systems including winter cover crops. Soil Sci. Soc. Am. J. (70): 1936-1944.

Walkley, A & Black, IA. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38. http://dx.doi.org/10.1097/00010694-19340100000003.

Wang, P., Diao, F., Yin, L., Huo, C.H. (2016). Absorptive roots trait plasticity explains the variation of root foraging strategies in Cunninghamia lanceolata. Environmental and Experimental Botany. 129: 127-135.

Wang, R., Wang, Q., Zhao, N., Xu, Z., Zhu, X., Jiao, C., He, N. (2018). Different phylogenetic and environmental controls of first-order root morphological and nutrient traits: Evidence of multidimensional root traits. Functional Ecology, 32(1): 29-39. http://doi.org/10.1111/1365- 2435.12983.

Weemstra, M., Sterk, F.J., Visser, E.J.W., Kuyper, T.W., Goudzwaard, L., Mommer, L. (2017). Fine-root plasticity of beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) forest on two contrasting soils. Plant and soil. 415: 175-188. http://doi.org/10.1007/s11104-016-3148-y.

Wells, C.E. & Eissenstat, D.M. (2001). Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters. *Ecology.* 82: 882-892.

Wittwer, R.A., Dorn, B., Jossi, W., Van Der Heijden, M.G., (2017). Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. Sci. Rep. 7,41911. https://doi.org/10.1038/srep41911.

Yang, B., Wen, X., Sun, X. (2015). Seasonal variations in depth of wáter uptake for a subtropical coniferous plantation subjected to drought in an East Asian monsoon region. Agric For Meteorol 201:218-228. DOI:10.1016/j.agrfo rmet.2014.11.020.

Yuan, Z. Y., and Chen, H. Y. H. (2015). Decoupling of nitrogen and phosphorus in terrestrial plants associated with global changes. Nature Climate Change, *5*(5): 465-469. https://doi.org/10.1038/nclim ate2549.

Zhang, Y., Niu, J., Yu, X., Zhu, W., Du, X. (2015). Effects of fine root length density and root biomas son soil preferential flow in forest ecosystems. Forest system. 24(1): 1-13. https://doi.org/10.5424/fs/2015241-06048.

Zhou, Z., Liu, S., LiangK, Ma. H. & Huang, G. (2016). Growth and mineral nutrient analysis of teak (*Tectona grandis*) grown on acidic soils in south China. https://doi.org/10.1007/ s11676-016-0324-0.