



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

## **PRÁCTICAS CULTURALES DE VIVERO ENFOCADAS A PRODUCIR PLANTA DE CALIDAD EN ESPECIES FORESTALES NATIVAS DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA**

**ERICKSON BASAVE VILLALOBOS**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2021**

La presente tesis titulada: **Prácticas culturales de vivero enfocadas a producir planta de calidad en especies forestales nativas de la Selva Baja Caducifolia**, realizada por el alumno: **Erickson Basave Villalobos**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

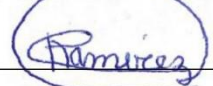
DOCTOR EN CIENCIAS  
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:   
DR. VÍCTOR MANUEL CETINA ALCALÁ

ASESOR:   
DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR:   
DR. CARLOS TREJO LÓPEZ

ASESOR:   
DR. CARLOS RAMÍREZ HERRERA

ASESOR:   
DR. FLORENTINO VÍCTOR CONDE MARTÍNEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2021

**PRÁCTICAS CULTURALES DE VIVERO ENFOCADAS A PRODUCIR PLANTA DE  
CALIDAD EN ESPECIES FORESTALES NATIVAS DE LA SELVA BAJA  
CADUCIFOLIA**

Erickson Basave Villalobos, D.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021

**RESUMEN**

Para contribuir a incrementar la supervivencia de las plantaciones en trabajos de reforestación o restauración ecológica, es necesario mejorar las técnicas de producción de planta en vivero de especies forestales nativas de la selva baja caducifolia en México. En este trabajo de investigación se analizó el efecto de diversas prácticas culturales de vivero en la calidad morfológica o fisiológica de *Caesalpinia coriaria*, *Crescentia alata*, *Enterolobium cyclocarpum* y *Pithecellobium dulce*. En *C. coriaria* se examinó el efecto de la poda aérea como práctica para mejorar su calidad morfológica, en *C. alata* y *E. cyclocarpum* se estudiaron los cambios morfológicos y fisiológicos en diferentes niveles de luz para determinar si el manejo de la luz en vivero tiene potencial para mejorar su calidad morfo-fisiológica. Asimismo, en *P. dulce* también se evaluó el potencial del manejo de la luz como práctica de vivero y se realizó un ensayo de fertilización en vivero para definir dosis y rutinas adecuadas para la especie. Se encontró que la poda aérea no es factible como práctica de vivero para *C. coriaria*. *C. alata* requiere niveles altos de luz para mejorar sus características morfo-fisiológicas, mientras que para *E. cyclocarpum* es necesaria sombra. Por su parte, *P. dulce* también requiere sombra en vivero para mejorar su calidad, pero una supervivencia alta en campo la presentan plantas producidas en completa exposición al sol. De ese modo, el manejo de la luz en vivero tiene potencial para mejorar la calidad de planta de las especies estudiadas. Finalmente, se encontró que la fertilización en vivero con la aplicación de fertilizantes hidrosolubles y de liberación lenta, incrementa la calidad de *P. dulce* y genera reservas nutrimentales que le permiten crecer en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes. Los resultados obtenidos tienen implicaciones importantes para mejorar las prácticas de producción de planta forestal de las especies estudiadas para los futuros proyectos de propagación, reforestación o restauración en el trópico seco.

**Palabras clave:** conservación, propagación, plantaciones forestales, reforestación, restauración ecológica.

# NURSERY CULTURAL PRACTICES FOCUSED ON PRODUCING QUALITY SEEDLINGS OF NATIVE TREE SPECIES FROM THE TROPICAL DRY FOREST

Erickson Basave Villalobos, D.C.  
Colegio de Postgraduados, 2021

## ABSTRACT

There is a need to improve the techniques of nursery plant production of native tree species from the tropical dry forest in Mexico, this in order to contribute to increasing the survival of plantations in reforestation or ecological restoration works. In this research work, the effect of various nursery cultural practices on the morphological or physiological quality of *Caesalpinia coriaria*, *Crescentia alata*, *Enterolobium cyclocarpum*, and *Pithecellobium dulce* was analyzed. In *C. coriaria* the effect of top pruning was examined as a practice to improve its morphological quality, in *C. alata* and *E. cyclocarpum* the morphological and physiological changes at different light levels were studied to determine if light management in the nursery has potential to improve its morpho-physiological quality. Likewise, in *P. dulce* the potential of light management in the nursery as a nursery practice was also evaluated and a fertilization trial was carried out in the nursery to define appropriate doses and routines for the species. It was found that top pruning is not feasible as a nursery practice for *C. coriaria*. *C. alata* requires high light levels to enhance its morpho-physiological characteristics, while shade is necessary for *E. cyclocarpum*. For its part, *P. dulce* also requires shade in the nursery to improve its quality, but a high survival rate in the field is presented by plants produced in full sun exposure. Thus, the management of light in the nursery has the potential to improve the plant quality of the studied species. Finally, it was found that fertilization in the nursery with the application of water-soluble and slow-release fertilizers, increases the quality of *P. dulce* and generates nutritional reserves that allow it to grow in conditions of low nutrient availability. The results obtained have important implications for improving forest plant production practices of the species studied for future propagation, reforestation, or restoration projects in the dry tropics.

**Key words:** conservation, propagation, forest plantations, reforestations, ecological restoration.

## DEDICATORIA

A Domingo Basave Ocampo (Q. E. P. D.) quien seguramente por su gusto en la herbolaria influyó en mi pasión por los árboles de Tierra Caliente. Es triste que quedaron muchas cosas pendientes, pero la vida es así, ahora estoy completamente agradecido el haber elegido realizar este proyecto porque me permitió recorrer contigo diversos parajes en busca de semillas, incluyendo tu querida Macua (Amacuáhuatl), hasta la última vez que estuvimos juntos gracias a esto.

Al Dr. Gustavo Adolfo Ballesteros Patrón (Q. E. P. D.) por ser mi profesor durante mi carrera como biólogo y que gracias a su orientación y palabras de motivación pude forjar mi pasión por la investigación de los recursos naturales de la Tierra Caliente.

A mi esposa Celi: sabes bien de los ánimos, desánimos, desvelos, frustraciones, aspiraciones, decepciones, motivaciones, añoranzas, enojos, sacrificios y alegrías que ha significado esto, y tú has sido mi aliada incondicional en todo momento, ¡te amo tanto, te debo tanto! ...

A mi hijo Erick, mi viejo hermoso, ¡a veces no me creo lo maravillosa y dichosa que ha sido mi vida con tu existencia!

A mi madre Humberta: te causé desvelos, sacrificios y preocupaciones y aunque no encuentro forma como agradecerte por todo, quiero que sepas que todo eso me motivó a seguir adelante en los momentos en que más confundido estuve.

A mis hermanos Whilver, Gamaliel, Guadalupe, Humberto e Imanol: valoro y reconozco el esfuerzo que cada uno ha tenido que hacer para abrirse su propio camino de una u otra manera, aunque a veces distantes o a veces cercanos. ¡Me siento tan dichoso de tenerlos!

Dedico esta tesis a todas las personas que ha perdido su vida o la están arriesgando por salvaguardar la naturaleza.

Aunque era irónico y triste escuchar que se talaban más árboles de los que yo plantaba y llegarían a sobrevivir, no renunciaré a mi compromiso de trabajar por el cuidado de la naturaleza, pues si en algún momento nos arrepentimos del daño que le estamos haciendo, al menos quiero sentir que hice algo para ayudar, aunque el esfuerzo y las voluntades requeridas sean titánicas.

Ojalá que nuestra madre Tierra nos aguante ante esta absurda cultura del desecho que se nos está fomentando para forjar la cruel idea de que el consumismo es bienestar y que nuestra comodidad está por encima de todo...

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos a los miembros de mi consejo particular por todo el apoyo brindado durante mis estudios de doctorado. Estoy completamente agradecido por las asesorías y facilidades que me otorgaron para realizar este trabajo de investigación. Aprecio mucho su dedicación, tiempo y disposición.

Agradezco de forma especial al Dr. Cetina quien desde mis estudios de maestría ha sido una persona clave para mi crecimiento como científico. De él he aprendido mucho, sí, a ser profesional pero también humano.

Asimismo, aprecio el apoyo que me brindó el Postgrado Forestal (profesores y administrativos) durante mi estadía como estudiante de doctorado. Asimismo, doy gracias por las facilidades otorgadas en el vivero y laboratorio del postgrado.

Agradezco enormemente al Colegio de Postgraduados campus Montecillo por ser la institución que me abrió la puerta para cursar mis estudios de posgrado. Se ha convertido en mi segunda *Alma máter* y estoy muy orgulloso de haber pertenecido a ella.

También reitero mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca para cursar mis estudios de doctorado.

Valoro infinitamente la oportunidad que me ha brindado el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para capacitarme a fin de contribuir a alcanzar su objetivo como investigador en el programa de Plantaciones y Sistemas Agroforestales. Agradezco en particular todas las facilidades que se me brindaron en el Campo Experimental Valle del Guadiana y en el Centro de Investigación Regional Norte-Centro.

Extiendo mis agradecimientos al Dr. Escalante y a la Mtra. Teresa (Q. E. P. D.) del laboratorio de Ecofisiología de Cultivos, al Dr. Héctor González Rosas (Q. E. P. D.) del laboratorio de cultivo de tejidos y a Don Severo del laboratorio de Bioquímica del COLPOS campus Montecillo por darme las facilidades con equipo o asesoría para realizar algunas pruebas de mi investigación.

También, quiero agradecer muy especialmente a las familias Calixto Valencia y Calixto Carreño de la comunidad de la Bajada, Coyuca de Catalán, Guerrero, por acompañarme durante mis actividades de campo y creer en este proyecto facilitando los predios para producir la planta y establecer las plantaciones.

Finalmente quiero reiterarles a mis colegas, compañeros y amigos que les estaré siempre agradecido por todo el apoyo emocional, asesorías o ayuda en los trabajos de campo que me brindaron. Sin ello, no podría haber logrado este objetivo.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
Antecedentes .....	1
Planteamiento del problema.....	2
CAPÍTULO I. FERTILIZACIÓN DE <i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth EN VIVERO:	
EFECTOS EN LA CALIDAD DE PLANTA.....	4
1.1 RESUMEN.....	4
1.2 ABSTRACT.....	4
1.3 INTRODUCCIÓN .....	5
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	7
1.4.1 Ubicación del experimento.....	7
1.4.2 Material biológico y condiciones del experimento .....	7
1.4.3 Aplicación de tratamientos y diseño experimental.....	7
1.4.4 Medición de variables morfológicas y fisiológicas .....	8
1.4.5 Prueba de calidad de planta .....	10
1.4.6 Análisis estadístico .....	10
1.5 RESULTADOS .....	11
1.5.1 Índices morfológicos y fisiológicos de calidad .....	11
1.5.2 Prueba de calidad de planta .....	16
1.6 DISCUSIÓN .....	17
1.7 CONCLUSIONES .....	21
CAPÍTULO II. LA PODA AÉREA COMO PRÁCTICA CULTURAL EN VIVERO PARA	
<i>Caesalpineia coriaria</i> (Jacq.) Willd.....	22
2.1 RESUMEN.....	22
2.2 ABSTRACT.....	22
2.3 INTRODUCCIÓN .....	23
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	25

2.4.1 Ubicación del experimento.....	25
2.4.2 Manejo del experimento.....	25
2.4.3 Aplicación de tratamientos y diseño experimental.....	25
2.4.4 Variables morfológicas de calidad evaluadas.....	26
2.4.5 Análisis estadístico.....	26
2.5 RESULTADOS.....	26
2.6 DISCUSIÓN.....	27
2.7 CONCLUSIONES.....	30
CAPÍTULO III. MANEJO DE LUZ EN VIVERO PARA PRODUCIR PLÁNTULAS DE	
<i>Pithecellobium dulce</i> PARA LAS REFORESTACIONES DE TIERRAS	
DEGRADADAS EN BOSQUES TROPICALES CADUCIFOLIOS DEL SUR	
DE MÉXICO.....	
3.1 RESUMEN.....	31
3.2 ABSTRACT.....	32
3.3 INTRODUCCIÓN.....	33
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.4.1 Área de estudio.....	35
3.4.2 Producción de la planta.....	35
3.4.3 Niveles de luz y diseño experimental.....	36
3.4.4 Evaluación de la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento.....	37
3.4.5 Estudio en campo.....	38
3.5 RESULTADOS.....	39
3.5.1 Efecto de la luz en vivero.....	39
3.5.2 Supervivencia en campo.....	42
3. 6 DISCUSIÓN.....	43
3.7 CONCLUSIONES.....	47
CAPÍTULO IV. RESPUESTAS MORFO-FISIOLÓGICAS DE PLANTAS DE <i>Crescentia</i>	
<i>alata</i> Y <i>Enterolobium cyclocarpum</i> EN NIVELES DE LUZ	
CONTRASTANTES: IMPLICACIONES PARA SU MANEJO EN VIVERO Y	
CAMPO.....	
4.1 RESUMEN.....	48



4.2 ABSTRACT .....	48
4.3 INTRODUCCIÓN .....	49
4.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	52
4.4.1 Área de estudio .....	52
4.4.2 Producción de la planta .....	52
4.4.3 Niveles de luz y diseño experimental .....	52
4.4.4 Variables de respuesta evaluadas .....	53
4.5 RESULTADOS .....	55
4.6 DISCUSIÓN .....	62
4.7 CONCLUSIONES .....	66
CONCLUSIONES GENERALES .....	67
LITERATURA CITADA .....	68

## LISTA DE CUADROS

### CAPÍTULO I

- Cuadro 1.1. Descripción de los niveles o regímenes de fertilización aplicados para evaluar su efecto en la calidad de planta de *Pithecellobium dulce* en vivero. .... 8
- Cuadro 1.2. Valores promedio  $\pm$  desviación estándar de variables relacionadas con índices morfológicos y fisiológicos de calidad de planta de *Pithecellobium dulce*, en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero. .... 13

### CAPÍTULO II

- Cuadro 2.1. Valores promedio  $\pm$  error estándar de plantas de *Caesalpinea coriaria* sujetas a podas aéreas en vivero. .... 27

### CAPÍTULO III

- Cuadro 3.1. Valores promedio de las variables climáticas monitoreados en cada condición de luz en vivero ..... 36
- Cuadro 3.2. Análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) del efecto de los niveles de luz en vivero en las variables morfológicas y fisiológicas evaluadas en *Pithecellobium dulce*..... 40
- Cuadro 3.3. Valores promedio  $\pm$  desviación estándar de las variables morfológicas y fisiológicas evaluadas en *Pithecellobium dulce*, en respuesta a niveles de luz en vivero ..... 41

### CAPÍTULO IV

- Cuadro 4.1. Valores promedio de las variables climáticas monitoreadas en cada condición de luz en vivero ..... 53
- Cuadro 4.2. Significancia estadística y promedios en variables de morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de plantas *Crescentia alata* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero..... 57
- Cuadro 4.3. Significancia estadística y promedios en variables de morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de plantas de *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero ..... 58
- Cuadro 4.4. Significancia estadística y valores promedio en variables relacionadas con el estatus nutricional de plantas de *Crescentia alata* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero ..... 61

Cuadro 4.5. Significancia estadística y valores promedio en variables relacionadas con el estatus nutrimental de plantas de *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero..... 61

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 1.1. Contenido (valores promedio  $\pm$  desviación estándar) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en plantas de *Pithecellobium dulce* de cuatro meses de edad, en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero. .... 14
- Figura 1.2. Nomogramas de vectores del estado nutrimental de nitrógeno (A), fósforo (B) y potasio (C) en plantas de *Pithecellobium dulce* de cuatro meses de edad, en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero. .... 15
- Figura 1.3. Número de rebrotes (valores promedio  $\pm$  desviación estándar) de plantas de *Pithecellobium dulce* trasplantadas en un medio infértil y sometidas a pérdida de biomasa aérea (poda severa) como prueba para evaluar su calidad en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero..... 16
- Figura 1.4. Crecimiento en diámetro (valores promedio  $\pm$  desviación estándar) de plantas de *Pithecellobium dulce* trasplantadas en un medio infértil y sometidas a pérdida de biomasa aérea (poda severa) como prueba para evaluar su calidad en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero..... 17

### CAPÍTULO III

- Figura 3.1. Patrones de asignación de biomasa en hojas, tallo y raíz de plantas de *Pithecellobium dulce* en niveles distintos de luz en vivero. .... 42
- Figura 3.2. Curvas de supervivencia en campo según el estimador Kaplan-Meier, de plantas de *Pithecellobium dulce* producidas bajo condiciones diferentes de luz en vivero (20 %, 40 %, 60 % y 100 % de radiación fotosintéticamente activa [PAR]). ..... 43

### CAPÍTULO IV

- Figura 4.1. Patrones de asignación de biomasa de plantas de A) *Crescentia alata* y B) *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz. .... 59
- Figura 4.2. Concentración de carbohidratos totales en plantas de *Crescentia alata* expuestas a diferentes niveles de luz. .... 60
- Figura 4.3. Concentración de carbohidratos totales en plantas de *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz..... 60

## INTRODUCCIÓN GENERAL

### Antecedentes

México, es uno de los países con mayor biodiversidad y endemismo de recursos genéticos forestales, pues dentro de su superficie con cobertura vegetal de 144 529 211 ha, alberga la mayor representatividad de ecosistemas forestales del mundo (Sarukhán *et al.*, 2009; FAO, 2010). Sin embargo, también es uno de los más deforestados. Anualmente, se reporta una tasa de deforestación alrededor de 500 000 ha (Rosete-Vergés *et al.*, 2014). Los altos índices de pobreza, el cambio en el uso del suelo por actividades agrícolas y ganadería extensiva, y los problemas asociados al cambio climático, son uno de los principales factores que han provocado este problema (Sarukhán *et al.*, 2009). Tal panorama de fragmentación y pérdida acelerada de cobertura forestal ha conducido a severos problemas de degradación que amenazan la integridad y funcionalidad de los ecosistemas, al grado de que la capacidad para proveer bienes y servicios ecosistémicos, de la cual depende el bienestar humano, se esté reduciendo (EEM, 2005 [Evaluación de los Ecosistema del Milenio]).

Particularmente, la selva baja caducifolia o bosque tropical caducifolio, caracterizado por su biodiversidad y endemismo elevados, es uno de los ecosistemas más amenazados por la deforestación (Janzen, 1988; Ceballos *et al.*, 2010). De modo que en las regiones en las que se encuentra este tipo de vegetación es prioritario impulsar estrategias de reforestación y restauración ecológica para mantener la funcionalidad de este ecosistema.

Los viveros forestales, desempeñan un papel preponderante en los programas de reforestación y restauración. Ellos son los principales proveedores del material vegetal, por lo que deben garantizar que la planta forestal que producen tiene las características genéticas, morfo-fisiológicas y sanitarias adecuadas para un desempeño favorable en el sitio de plantación. Para asegurar tales atributos, durante el proceso de producción de planta, se debe utilizar germoplasma de alta calidad, aplicar las prácticas culturales apropiadas en función de los requerimientos de cada especie y definir los estándares de calidad con base en las condiciones del sitio a reforestar (Grossnickle, 2012; Vallejo *et al.*, 2012).

Las prácticas culturales ejercen un efecto determinante en la promoción de características morfológicas y fisiológicas de calidad en las plantas. Diversos estudios se han enfocado en mejorar la calidad de las plantas para incrementar la supervivencia de las plantaciones (Grossnickle y Macdonald, 2018). Son diversas las prácticas que se emplean en vivero para tal propósito, algunas de ellas son: la fertilización, las podas y el manejo de la luz con mallas sombra. Sin embargo, el efecto de las prácticas está en función de la especie, de cómo se implementen y de su interacción con otras prácticas. Por lo tanto, una valoración de su efecto en la calidad de planta de una especie determinada es crucial para definir prácticas adecuadas para cada especie a producir en vivero.

### **Planteamiento del problema**

Estadísticas nacionales evidencian el fracaso de las reforestaciones. La tasa de supervivencia no supera el 50% durante el primer año y la mortalidad se incrementa en años posteriores (CONAFOR, 2012). Las condiciones adversas en el sitio de plantación (sequía, temperaturas extremas, escasa disponibilidad de nutrientes, plagas y enfermedades, competencia con malezas, etc.) son el principal factor que limita el desempeño de las plantas.

El problema radica en que las plantas utilizadas no disponen de las características para superar esas condiciones adversas en campo. De acuerdo con diversos diagnósticos realizados en viveros forestales del país, la mala calidad del germoplasma y las prácticas culturales inadecuadas que se implementan en los sistemas de producción de planta, son una de las principales causas por las cuales la calidad no se satisface (Benítez *et al.*, 2002; Orozco *et al.*, 2012). El hecho de que las prácticas culturales son inadecuadas se debe a su empleo indistinto para la producción de especies con distinta autoecología, ejemplo de ello son los esquemas de fertilización en vivero, que se basan en formulaciones generales N-P-K aplicadas en niveles similares para una amplia variedad de especies. Además las prácticas no se definen en función de los principios del concepto de planta objetivo, en donde la calidad de la planta dependerá en gran medida de las condiciones del sitio a reforestar (Rose y Haase, 1995). Esta última falla tiene su origen en el enfoque multipropósito con el que se han definido los estándares de calidad de planta en viveros forestales de México, cuyos criterios e indicadores están en la norma NMX-AA-170-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016).

El problema de la mala calidad de planta es común cuando se propagan en vivero especies de la selva baja caducifolia. Lo anterior se debe a varios factores, uno de ellos es la escasa o nula

disponibilidad de información sobre cómo propagar este tipo de especies. En un estudio realizado por Bonfil y Trejo (2010), se señala que aunque existen algunos reportes sobre cómo propagar este tipo de especies, como la reportada por Cervantes y Sotelo (2010), la información aún no es suficiente porque sólo se ha generado para algunas especies de un cierto número de géneros y familias. Además las guías de propagación no cubren el enfoque de calidad de planta, lo cual limita la posibilidad de definir prácticas culturales adecuadas para promover características morfológicas o fisiológicas con las que las plantas puedan tener un desempeño satisfactorio en campo ante una condición determinada. Este último aspecto también es constatado por Bonfil y Trejo (2010) al mencionar que tampoco existen reportes suficientes sobre el desempeño que han tenido las plantas en campo cuando se han utilizado para trabajos de reforestación y restauración, puesto que el seguimiento que se ha dado no ha sido suficiente para definir su comportamiento en función de las condiciones edafoclimáticas de los sitios (especialmente en aquellos degradados) y de la calidad de la planta.

# CAPÍTULO I. FERTILIZACIÓN DE *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth EN VIVERO: EFECTOS EN LA CALIDAD DE PLANTA<sup>1</sup>

## 1.1 RESUMEN

La fertilización en vivero es una práctica cultural con potencial para mejorar la calidad de planta, pero es necesario definir niveles de fertilización adecuados para cada especie. Este estudio evaluó el efecto de niveles de fertilización en la calidad de planta de *Pithecellobium dulce* durante la etapa de vivero. Los niveles aplicados fueron nueve; consistieron en regímenes en los que se combinó un fertilizante de liberación controlada (FLC) 18-6-12, en tres dosis (4, 6 y 8 g L<sup>-1</sup> de sustrato) con un fertilizante hidrosoluble (FHS) 20-20-20, en concentraciones de 0, 75 y 150 mg N L<sup>-1</sup>. El efecto de los regímenes de fertilización se determinó analizando índices morfológicos de calidad, tasas de asimilación neta (TAN) y estado nutrimental N-P-K en plantas de cuatro meses de edad. Una prueba de calidad fue diseñada para someter a las plantas a estrés en una condición de escasa fertilidad y pérdida de biomasa aérea, para evaluar capacidad de rebrote y crecimiento. Hubo diferencias estadísticas por efecto de los regímenes de fertilización. En general, la combinación de 8 g de FLC con 150 mg N L<sup>-1</sup> del FHS propició un incremento en la calidad morfológica y en la TAN de las plantas, aunque nutrimentalmente las respuestas principales fueron de suficiencia y dilución. En la prueba de calidad las plantas tuvieron limitaciones para favorecer su rebrote o crecimiento según la cantidad de reservas nutrimentales. La fertilización con FLC y FHS, tiene potencial para incrementar la calidad de planta de *P. dulce* en vivero.

**Palabras clave:** nutrición mineral; restauración ecológica; reforestación; selva baja caducifolia.

## 1.2 ABSTRACT

Nursery fertilization is a cultural practice with potential to improve seedling quality, but it is necessary to define adequate fertilization levels for each species. This study evaluated the effect of fertilization levels on seedling quality of *Pithecellobium dulce* during the nursery stage. The applied levels were nine; they consisted of regimes in which a controlled-release fertilizer (CRF) 18-6-12, in three doses (4, 6, and 8 g L<sup>-1</sup> of substrate) was mixed with a water-soluble fertilizer

---

<sup>1</sup> Artículo publicado: Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá, V. M., López-López, M. Á., Trejo, C., Ramírez-Herrera, C., & Conde-Martínez, V. (2020). Fertilización de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth en vivero: efectos en la calidad de planta. *Madera y bosques*, 26(3), e2632059.



(WSF) 20-20-20, in concentrations of 0, 75, and 150 mg N L<sup>-1</sup>. The fertilization regimes effects were determined by assessing morphological attributes of seedling quality, net assimilation rates (NAR), and nutrient status of N-P-K on four-month-old seedlings. A seedling-quality test was designed in order to undergo the seedlings to a stress condition of both nutrient deficiencies and biomass loss, thereby measuring their resprouting capacity and growth. Statistical differences were observed among fertilization regimes. Overall, an increase of the morphological quality and NAR was promoted by mixing 8 g of CRF with 150 mg N L<sup>-1</sup> of WSF, although the main responses in relation to the nutrient status were of deficiency and dilution. According to the seedling-quality test, the seedlings showed limitations to induce either their resprouting or their growth according to the amount of nutrient reserves. The fertilization with CRF and WSF have potential to enhance the seedling quality of *P. dulce* during nursery culture.

**Key words:** mineral nutrition; ecological restoration; reforestation; tropical dry forest.

### 1.3 INTRODUCCIÓN

En México, la reforestación es la principal actividad que se promueve para recuperar e incrementar la cobertura arbórea que se pierde a una tasa aproximada de 217 000 ha por año (Global Forest Watch, 2019). Cada año diversos proyectos se emprenden con ese propósito, en donde los viveros forestales tienen una participación determinante como proveedores de la planta (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2014).

A la fecha, la supervivencia baja es la problemática que prevalece en los programas de reforestación. Las estadísticas señalan que la mortalidad oscila en 50% en el primer año después de la plantación (CONAFOR, 2014). Algunos factores que influyen en la supervivencia baja son sequías, competencia con vegetación, pastoreo y baja fertilidad en los suelos. Además, la calidad deficiente de la planta es otra causa que contribuye a esos niveles bajos de supervivencia (CONAFOR, 2014). A este segundo aspecto se ha dado mayor atención debido a que es posible modificar con prácticas culturales las características morfológicas y fisiológicas de las plantas para aumentar la probabilidad de supervivencia en campo (S. C. Grossnickle, 2012; S. Grossnickle & MacDonald, 2018).

La fertilización en vivero es reconocida como una práctica esencial para mejorar la calidad de la planta que se produce en un sistema de envase con sustratos inertes (Chirino *et al.*, 2009; Cortina, Vilagrosa, & Trubat, 2013). La fertilización ha sido evaluada en diversas especies forestales y los resultados confirman que esta mejora las características morfológicas y fisiológicas de las plantas y aumenta la probabilidad de un desempeño favorable en campo (Luis *et al.*, 2009; Villar-Salvador, Peñuelas, Nicolás-Peragón, Benito, & Domínguez-Lerena, 2013; Villar-Salvador *et al.*, 2012). Sin embargo, un manejo nutrimental adecuado depende de las necesidades de la especie, el tipo de fertilizante y la dosis, para propiciar un estado nutrimental que incremente las reservas nutrimentales para el crecimiento de las plantas sin provocar toxicidad (J. A. Oliet, Puértolas, Planelles, & Jacobs, 2013); por lo tanto, es importante determinar regímenes de fertilización para una nutrición correcta de las plantas (J. A. Oliet *et al.*, 2013; Rose, Haase, & Arellano, 2004). Actualmente, la mayoría de los viveros forestales usan fertilizantes hidrosolubles de liberación controlada. Sin embargo, no se conocen los niveles adecuados de fertilizantes que se deben aplicar a una especie en particular. Aunque existe información sobre los niveles óptimos de fertilización en vivero para varias especies forestales, la información es escasa para las especies de la Selva Baja Caducifolia, lo cual limita el conocimiento para su propagación en el contexto de calidad de planta (Bonfil y Trejo, 2010).

Este trabajo se enfoca a *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth porque esta especie es un elemento arbóreo característico de la selva baja caducifolia de la cuenca del Balsas (Fernández N., Rodríguez J., Arreguín S. & Rodríguez J., 1998) con la cual se pretende intensificar las reforestaciones porque es una leguminosa pionera de crecimiento rápido con usos múltiples. Los usos principales de *P. dulce* son como árbol de sombra, leña, cerco vivo, forraje y madera. También es fuente de alimento para el humano y vida silvestre (Olivares-Pérez, Avilés-Nova, Albarrán-Portillo, Rojas-Hernández, & Castelán-Ortega, 2011; Palma García & González-Rebeles Islas, 2018).

El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de regímenes de fertilización sobre la calidad de planta de *Pithecellobium dulce* en vivero. La hipótesis fue que los regímenes de fertilización en los que se emplean dos tipos de fertilizante, de liberación controlada e

hidrosolubles, en distintas dosis, incrementan la calidad de las plantas de *P. dulce* a través de la modificación de las características morfológicas y fisiológicas de estas.

## **1.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.4.1 Ubicación del experimento**

El estudio se realizó en condiciones controladas en un invernadero ubicado en el vivero forestal del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo (Montecillo, Texcoco, Estado de México, México). La temperatura máxima y mínima promedio fue 35 °C y 18 °C, respectivamente, dentro del invernadero. La humedad relativa osciló entre 25% durante el día y 70% en la noche.

### **1.4.2 Material biológico y condiciones del experimento**

Se recolectaron semillas de árboles de *P. dulce* en la comunidad La Bajada, Coyuca de Catalán en la Región de Tierra Caliente, Guerrero, México. Posteriormente, en el laboratorio, las semillas se seleccionaron con base en el tamaño y morfología similares. Las semillas, previamente desinfectadas en una solución de hipoclorito de sodio al 0.5%, y remojadas durante 18 h como tratamiento pregerminativo, se sembraron directamente en tubetes de plástico rígido (polipropileno) de 380 mL en un sustrato que se elaboró con una mezcla de turba de musgo (“peat moss”), perlita y vermiculita en proporciones 2:1:1, y se adicionó 4, 6 y 8 g L<sup>-1</sup> de fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12+2MgO+ME (Haifa Chemicals Ltd.). Durante la etapa de crecimiento rápido, se aplicó una dosis de 0, 375 y 750 mg de fertilizante hidrosoluble de propósito general 20-20-20+microelementos (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose) con el riego, para obtener una concentración de nitrógeno de 0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Se aplicaron tres riegos complementarios a capacidad de campo por semana. El pH se mantuvo entre 5.5 y 6.5, y la conductividad eléctrica entre 2.0 y 3.0 dS m<sup>-1</sup>.

### **1.4.3 Aplicación de tratamientos y diseño experimental**

Nueve regímenes de fertilización se evaluaron con base en el fertilizante de liberación controlada (FLC) en tres dosis (4, 6 y 8 g L<sup>-1</sup> de sustrato) y una fertilización complementaria con el material hidrosoluble (FHS) en la etapa de crecimiento rápido en las dosis previamente descritas para obtener una concentración de nitrógeno de 0, 75 y 150 mg L<sup>-1</sup> (Cuadro 1.1). El crecimiento rápido,

considerado en el momento en que las plántulas perdieron sus cotiledones, fue a partir de la cuarta semana que se sembró. Dos aplicaciones de FHS por semana se realizaron durante ocho semanas.

**Cuadro 1.1. Descripción de los niveles o regímenes de fertilización aplicados para evaluar su efecto en la calidad de planta de *Pithecellobium dulce* en vivero.**

Régimen de fertilización	Descripción		
	Dosis de FLC (g L <sup>-1</sup> de sustrato)	Dosis de FHS (mg)	Concentración de nitrógeno aplicada con el FHS (mg L <sup>-1</sup> )
R1	4	0	0
R2	4	375	75
R3	4	750	150
R4	6	0	0
R5	6	375	75
R6	6	750	150
R7	8	0	0
R8	8	375	75
R9	8	750	150

FLC= fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12; FHS= fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose).

El R1 fue el tratamiento testigo por ser el nivel menor de fertilización. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones, la unidad experimental estuvo constituida por 15 plantas, dispuestas en mesas de plástico diseñadas para los tubetes de 380 mL. Se colocaron algunas plantas extras para descartar el efecto borde. Los tratamientos se establecieron en un diseño completamente al azar con arreglo factorial.

#### 1.4.4 Medición de variables morfológicas y fisiológicas

A plantas de cuatro meses de edad de *P. dulce* se les determinó diversas variables morfológicas y fisiológicas relacionadas con índices de calidad de planta. Un tamaño de muestra de 15 plantas por tratamiento fue utilizado. Las variables morfológicas fueron: altura de la parte aérea (APA; cm) y el diámetro al cuello de la raíz (DCR; mm), la primera se determinó con una regla milimétrica y la segunda con un calibrador Mitutoyo<sup>®</sup> Digimatic CD-4" AX; el peso seco de la parte aérea de las plantas (PSA), su raíz (PSR) y el total (PST) se registraron con una balanza analítica (AND GR-120, A&D Company, Ltd), previo secado de cada parte en una estufa de aire forzado (FELISA<sup>®</sup> FE291-D) a 70 °C durante 72 h. Con los datos anteriores, índices morfológicos de calidad, como la Relación Parte Aérea/Raíz (R: PA/R) y el Índice de Calidad de Dickson (ICD)

fueron determinados, este último a partir de la fórmula siguiente (Birchler, Rose, Royo, & Pardos, 1998):

$$ICD = \frac{\text{Peso seco total (g)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Peso seco de la parte aérea (g)}}{\text{Peso seco de la raíz (g)}}}$$

En cuanto a las variables fisiológicas, se determinó la eficiencia fotosintética en términos de tasa de asimilación neta (TAN; mg cm<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>). El cálculo de la TAN requirió el muestreo destructivo de 15 plantas de cada tratamiento, al primer mes de edad y al final del experimento. En cada muestreo, a las plantas, además de registrarles su peso seco siguiendo el procedimiento señalado anteriormente, también se les determinó su área foliar utilizando un medidor de área foliar (LI 3100C, LI-COR, Inc.). Los datos obtenidos se utilizaron para estimar la TAN conforme a la siguiente ecuación (Hunt, Causton, Shipley, & Askew, 2002):

$$TAN = \frac{PST_2 - PST_1}{AF_2 - AF_1} * \frac{\ln AF_2 - \ln AF_1}{T_2 - T_1}$$

Donde:

PST= peso seco total (g) de las plántulas.

AF= área foliar (cm<sup>2</sup>) de las plántulas en valores absolutos y logarítmicos (ln).

T= tiempo. En todos los casos 1 y 2 se refiere a la evaluación inicial y final respectivamente, con un intervalo entre ellas de 88 días.

También se analizó el estado nutrimental de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), valorado mediante la concentración (%) y el contenido (mg planta<sup>-1</sup>) de cada nutriente. El análisis nutrimental se hizo en hojas. Se analizaron tres muestras por tratamiento. La concentración del N se determinó mediante el método de micro-Kjeldahl; la concentración del P a través de determinación colorimétrica con complejo amarillo vanadato-molibdato y la concentración del K con espectrofotometría de emisión de flama. El contenido se estimó con los valores de concentración y peso seco total de las plantas. El estado nutrimental de las plántulas se diagnosticó con el método gráfico de vectores. La construcción de los gráficos se hizo con base en el procedimiento descrito por Haase y Rose (1995) donde se emplean valores relativos normalizados a 100 con respecto a los valores de referencia de concentración, contenido y biomasa del tratamiento testigo (R1). La interpretación de los nomogramas de vectores se respaldó en los trabajos de López-López & Alvarado-López (2010) y Timmer (1997).

### **1.4.5 Prueba de calidad de planta**

Al término de la etapa de producción planta; es decir, a los cuatro meses de edad de las plantas, se estableció una prueba para evaluar la calidad de las plantas en el invernadero. La prueba consistió en trasplantar las plantas en un medio con baja o nula disponibilidad de nutrientes y posteriormente someterlas a estrés por pérdida de biomasa aérea (poda severa). Las plantas se enfrentan, comúnmente, a este tipo de condiciones cuando se reforestan sitios degradados por el alto pastoreo. Grossnickle y MacDonald (2018) establecieron que para evaluar el potencial de desempeño de una planta se deben considerar los atributos que corresponden a una condición anticipada del sitio. Para simular las condiciones descritas, el trasplante se hizo en bolsas negras de polietileno de 15 L. Estas bolsas se llenaron con piedra volcánica (tezontle) de granulometría de 3-5 mm. Dos semanas después del trasplante, el 50% de la biomasa de cada planta se removió para simular herbivoría. Durante la prueba, las plantas se regaron únicamente dos veces por semana.

El desempeño de las plantas se determinó en función de la capacidad de rebrote y crecimiento. Los rebrotes se contaron después de un mes de haberse podado. También, se calcularon las tasas de crecimiento absoluto en diámetro (TCAD) en un intervalo de cuatro y nueve meses con la fórmula  $TCAD = \frac{\text{diámetro a la base del tallo en la evaluación final} - \text{diámetro a la base del tallo en la evaluación inicial}}{\text{tiempo}}$  (4 y 9 meses). En esta prueba, las plantas se colocaron en hileras de nueve plantas conforme a un diseño experimental de bloques completos al azar con seis repeticiones. La unidad experimental fue una planta.

### **1.4.6 Análisis estadístico**

El efecto de los regímenes de fertilización en las variables morfológicas y fisiológicas de calidad de planta se determinó con un análisis de varianza no paramétrico con la prueba Kruskal-Wallis, mientras que, para la prueba de calidad, se hizo un análisis de varianza no paramétrico con la prueba de Friedman. La prueba de hipótesis utilizó un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ . En casos de diferencias estadísticas, se hizo una comparación de las medias de los rangos de a pares conforme al procedimiento descrito en InfoStat versión 2012 (Di Rienzo *et al.*, 2012), el cual fue el software utilizado para los análisis estadísticos. Las medias de las variables se representan con los valores originales.

## 1.5 RESULTADOS

### 1.5.1 Índices morfológicos y fisiológicos de calidad

A los cuatro meses de edad, la prueba Kruskal-Wallis indicó diferencias ( $p \leq 0.0001$ ) entre regímenes de fertilización para los índices morfológicos de calidad (APA, DCR, PSA, PSR, PST, ICD y R: PA/R) y TAN (característica fisiológica) de las plantas de *P. dulce*. Además, esta prueba mostró diferencias ( $p < 0.01$ ) entre tratamientos para el contenido de N, P y K.

Con base en las medias de los tratamientos se tuvieron dos grupos de respuestas. Valores inferiores correspondieron a los regímenes R1, R2 y R3, y valores superiores al resto (R4-R9). De este segundo grupo, en las variables morfológicas cuyos valores altos se relacionan con características mejores de calidad, se tuvo un efecto sobresaliente con el R9, este incrementó en las plantas los valores de DCR, PSA, PST e ICD (Cuadro 1.2). En DCR ese régimen propició, al tener un valor de 5.66 mm, una diferencia de 1.74 mm en comparación con el valor de 3.92 mm obtenido por las plantas del R1, que fue el más bajo. Asimismo, para las variables PSA y PST las diferencias entre los valores del R9 (3.60 y 4.70 g, respectivamente) fueron superiores en más de 200% al compararlos con los valores de las plantas del R2 que presentaron los valores más bajos en dichas variables (1.12 g en PSA y 1.56 g en PST). En ICD, las plantas del R9 tuvieron un índice de 0.39, mismo que fue 2.2 veces mayor al índice más bajo de 0.17 mostrado por las plantas del R2. Con respecto a las variables APA y PSR en las que también valores altos denotan características mejores de calidad, la respuesta mayor perteneció al R4. Para el caso de altura de planta, con el R4 las plantas presentaron un tamaño de 49.50 cm, el cual es 81% superior a las plantas testigo (R1) las cuales obtuvieron una altura de 27.28 cm. En la raíz, la cantidad de biomasa formada por las plantas del R4 (1.15 g) fue 159% superior a los valores de biomasa obtenidos en el R2 cuyo valor promedio fue de 0.44 g. Finalmente, para el índice R: PA/R, que, a diferencia de las otras variables, valores bajos significan mejor calidad, las plantas del R1 (testigo) tuvieron el valor más bajo (2.59) dentro de un intervalo en el que el valor mayor fue de 3.33 registrado en las plantas del R8.

Por otra parte, en la tasa de asimilación neta (TAN), se registró un efecto positivo con el R5, con un valor de  $0.62 \text{ mg cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , mismo que al compararse con el valor mínimo de TAN obtenido en el R2 ( $0.27 \text{ mg cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) se tuvo una diferencia de 130% (Cuadro 1.2).

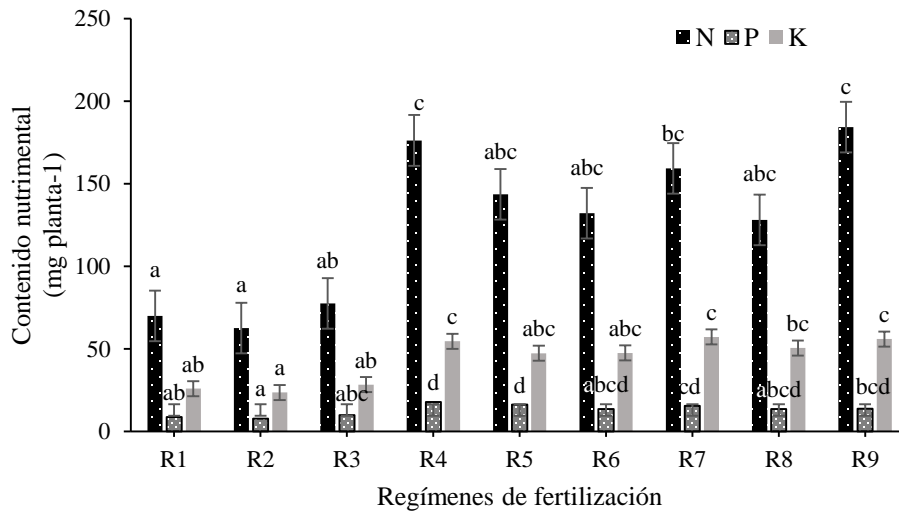


**Cuadro 1.2. Valores promedio  $\pm$  desviación estándar de variables relacionadas con índices morfológicos y fisiológicos de calidad de planta de *Pithecellobium dulce*, en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero.**

Variables <sup>¶</sup>	Regímenes de fertilización <sup>¶¶</sup>								
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
APA (cm)	27.28 $\pm$ 6.15 a	27.43 $\pm$ 4.81 a	27.55 $\pm$ 8.14 a	49.50 $\pm$ 8.27 c	47.33 $\pm$ 8.45b c	39.68 $\pm$ 6.68 b	49.45 $\pm$ 7.86 c	45.95 $\pm$ 8.62b c	48.45 $\pm$ 8.05b c
DCR (mm)	3.92 $\pm$ 0.44a	4.17 $\pm$ 0.62a	4.39 $\pm$ 0.48a b	5.36 $\pm$ 0.53d	4.85 $\pm$ 0.64bc	5.09 $\pm$ 0.60c d	5.55 $\pm$ 0.48d	5.28 $\pm$ 0.69cd	5.66 $\pm$ 0.94d
PSA (g)	1.26 $\pm$ 0.26a	1.12 $\pm$ 0.33a	1.48 $\pm$ 0.50a	3.36 $\pm$ 0.98b	2.92 $\pm$ 0.69b	2.67 $\pm$ 0.63b	3.49 $\pm$ 0.69b	3.18 $\pm$ 0.99b	3.60 $\pm$ 0.77b
PSR (g)	0.50 $\pm$ 0.14a	0.44 $\pm$ 0.13a	0.56 $\pm$ 0.13a	1.15 $\pm$ 0.29b	1.04 $\pm$ 0.31b	0.96 $\pm$ 0.23b	1.09 $\pm$ 0.22b	0.98 $\pm$ 0.36b	1.10 $\pm$ 0.20b
PST (g)	1.76 $\pm$ 0.38a	1.56 $\pm$ 0.45a	2.04 $\pm$ 0.55a	4.51 $\pm$ 1.18b	3.96 $\pm$ 0.95b	3.63 $\pm$ 0.79b	4.58 $\pm$ 0.8b	4.16 $\pm$ 1.33b	4.70 $\pm$ 0.80b
ICD	0.19 $\pm$ 0.04a	0.17 $\pm$ 0.06a	0.23 $\pm$ 0.06a	0.37 $\pm$ 0.09b	0.32 $\pm$ 0.10b	0.34 $\pm$ 0.07b	0.38 $\pm$ 0.08b	0.35 $\pm$ 0.14b	0.39 $\pm$ 0.08b
R: PA/R	2.59 $\pm$ 0.42a	2.62 $\pm$ 0.46a	2.73 $\pm$ 1.06a	2.94 $\pm$ 0.62a b	2.89 $\pm$ 0.49ab	2.84 $\pm$ 0.63a b	3.21 $\pm$ 0.41b c	3.33 $\pm$ 0.38c	3.14 $\pm$ 0.54bc
TAN (mg cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.32 $\pm$ 0.07a	0.27 $\pm$ 0.13a	0.38 $\pm$ 0.08a	0.59 $\pm$ 0.09b	0.62 $\pm$ 0.28b	0.56 $\pm$ 0.07b	0.59 $\pm$ 0.06b	0.55 $\pm$ 0.09b	0.59 $\pm$ 0.07b

<sup>¶</sup>APA: altura de la parte aérea; DCR: diámetro al cuello de la raíz; PSA: peso seco aéreo; PSR: peso seco de raíz; PST: peso seco total; ICD: índice de calidad de Dickson; R: PA/R: relación parte aérea/raíz; TAN: tasa de asimilación neta. <sup>¶¶</sup>R1= 4 g de FLC+ 0 mg de FHS; R2= 4 g de FLC+ 375 mg de FHS; R3= 4 g de FLC+ 750 mg de FHS; R4= 6 g de FLC+ 0 mg de FHS; R5= 6 g de FLC+ 375 mg de FHS; R6=6 g de FLC+ 750 mg de FHS; R7=8 g de FLC+ 0 mg de FHS; R8=8 g de FLC+ 375 mg de FHS; R9=8 g de FLC+ 750 mg de FHS. FLC= fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12; FHS= fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose). Dentro de una variable, valores con una letra común no son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ).

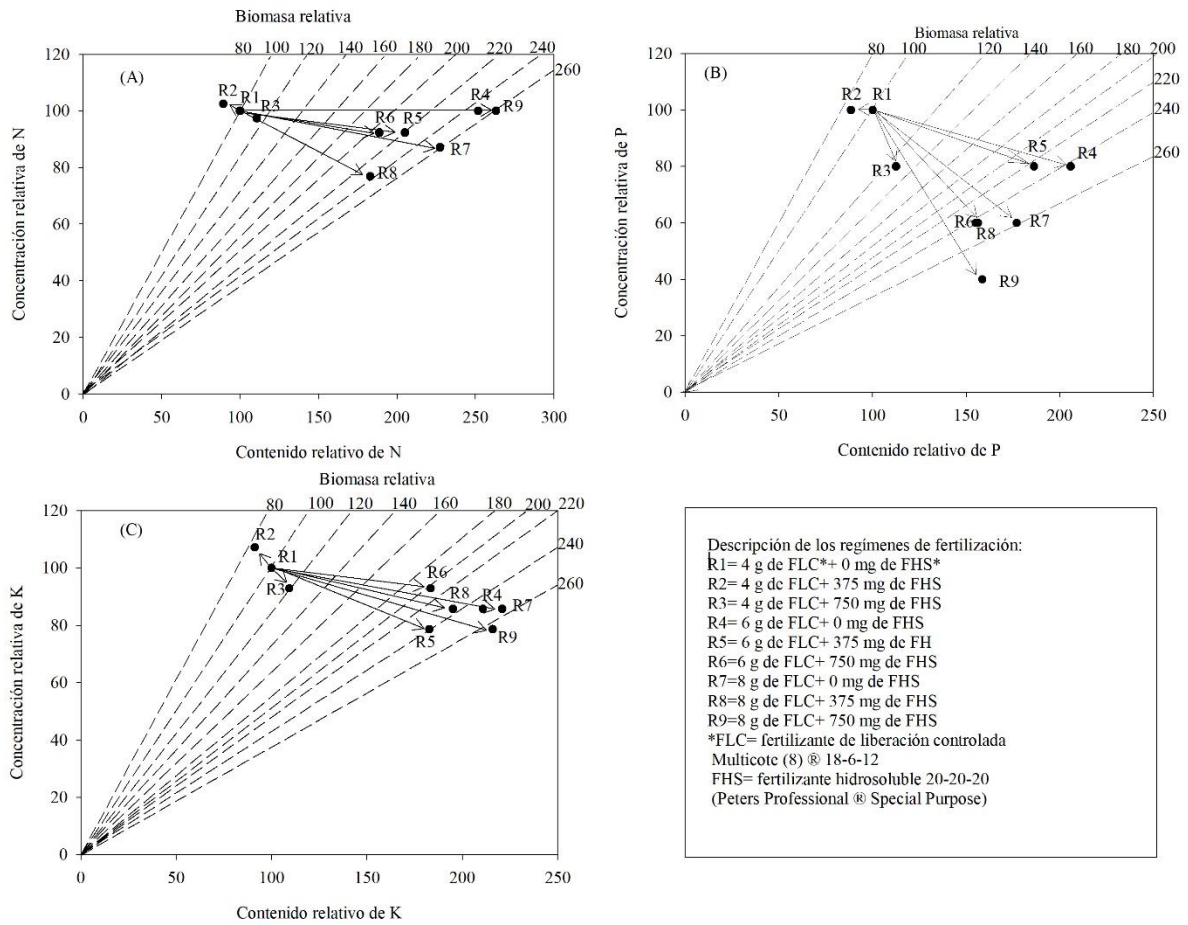
En lo referente al estado nutricional, los valores de concentración no presentaron diferencias estadísticas y oscilaron entre 3 y 4% para N, 0.2 y 0.5% para P y 1.1 y 1.5% para K. En el contenido de los nutrimentos, donde sí se presentaron diferencias (N,  $p=0.0021$ ; P,  $p=0.0018$ ; K,  $p=0.0021$ ), los valores mayores fueron obtenidos en el R9 para N ( $184.2 \text{ mg planta}^{-1}$ ), el R4 para P ( $17.9 \text{ mg planta}^{-1}$ ) y el R7 para K ( $57.2 \text{ mg planta}^{-1}$ ) (Figura 1.1). En general, en esos regímenes de fertilización las plantas presentaron más del doble en cantidad de nutrimentos en comparación con las plantas tanto del tratamiento testigo y de los tratamientos R2 y R3 (Figura 1.1).



**Figura 1.1.** Contenido (valores promedio  $\pm$  desviación estándar) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en plantas de *Pithecellobium dulce* de cuatro meses de edad, en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero. R1= 4 g de FLC+ 0 mg de FHS; R2= 4 g de FLC+ 375 mg de FHS; R3= 4 g de FLC+ 750 mg de FHS; R4= 6 g de FLC+ 0 mg de FHS; R5= 6 g de FLC+ 375 mg de FHS; R6=6 g de FLC+ 750 mg de FHS; R7=8 g de FLC+ 0 mg de FHS; R8=8 g de FLC+ 375 mg de FHS; R9=8 g de FLC+ 750 mg de FHS. FLC= fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12; FHS= fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose). Barras del mismo nutrimento con letras iguales no son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ).

En los nomogramas de vectores destacaron dos tipos de respuestas: 1) un incremento en el contenido del nutrimento y en la formación de biomasa pero manteniéndose estable la concentración del elemento y 2) un aumento de biomasa pero sin incrementos en la concentración y contenido del nutrimento (Figura 1.2; A, B, C). Para el caso del N, la primera respuesta se tuvo con los regímenes 4 y 9, mientras que la segunda con los regímenes 5, 6, 7 y 8 (Figura 1.2 A). En

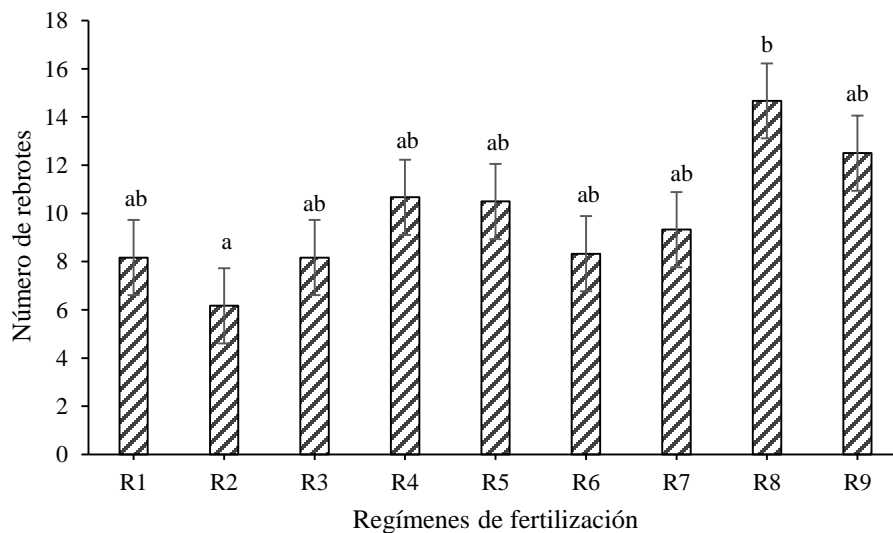
P y K, todos los regímenes, excepto el 2, causaron la segunda respuesta aunque en diferente magnitud (Figura 1.2 B y C).



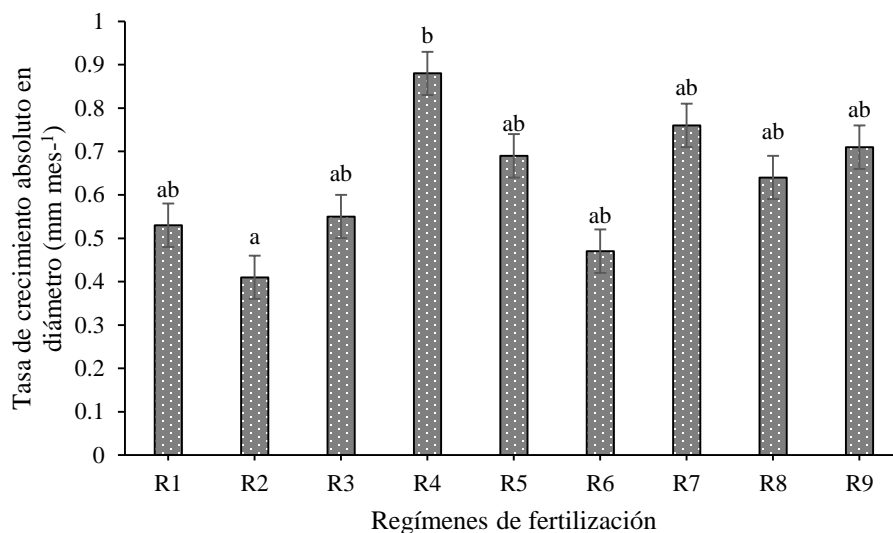
**Figura 1.2.** Nomogramas de vectores del estado nutricional de nitrógeno (A), fósforo (B) y potasio (C) en plantas de *Pithecellobium dulce* de cuatro meses de edad, en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivo.

### 1.5.2 Prueba de calidad de planta

Los resultados obtenidos en la prueba de calidad presentaron diferencias significativas en el número de rebrotes ( $p=0.0072$ ) y en la tasa de crecimiento absoluto en diámetro solo durante los primeros cuatro meses después de plantado ( $p=0.0156$ ). Las plantas con capacidad mayor de rebrote fueron las del R8, con un número promedio de 14.67 rebrotes; por el contrario, el régimen con número menor de rebrotes fue el R2, cuyo valor promedio fue de 6.17 (Figura 1.3). El crecimiento mayor en diámetro se tuvo en plantas del R4 con 0.88 mm por mes, siendo este valor 115% superior a los 0.41 mm por mes registrado por el R2, cuyo crecimiento fue mínimo (Figura 1.4).



**Figura 1.3.** Número de rebrotes (valores promedio  $\pm$  desviación estándar) de plantas de *Pithecellobium dulce* trasplantadas en un medio infértil y sometidas a pérdida de biomasa aérea (poda severa) como prueba para evaluar su calidad en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero. R1= 4 g de FLC+ 0 mg de FHS; R2= 4 g de FLC+ 375 mg de FHS; R3= 4 g de FLC+ 750 mg de FHS; R4= 6 g de FLC+ 0 mg de FHS; R5= 6 g de FLC+ 375 mg de FHS; R6=6 g de FLC+ 750 mg de FHS; R7=8 g de FLC+ 0 mg de FHS; R8=8 g de FLC+ 375 mg de FHS; R9=8 g de FLC+ 750 mg de FHS. FLC= fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12; FHS= fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose). Barras con letras iguales no son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ).



**Figura 1.4.** Crecimiento en diámetro (valores promedio  $\pm$  desviación estándar) de plantas de *Pithecellobium dulce* trasplantadas en un medio infértil y sometidas a pérdida de biomasa aérea (poda severa) como prueba para evaluar su calidad en respuesta a nueve regímenes de fertilización en vivero. R1= 4 g de FLC+ 0 mg de FHS; R2= 4 g de FLC+ 375 mg de FHS; R3= 4 g de FLC+ 750 mg de FHS; R4= 6 g de FLC+ 0 mg de FHS; R5= 6 g de FLC+ 375 mg de FHS; R6=6 g de FLC+ 750 mg de FHS; R7=8 g de FLC+ 0 mg de FHS; R8=8 g de FLC+ 375 mg de FHS; R9=8 g de FLC+ 750 mg de FHS. FLC= fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12; FHS= fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose). Barras con letras iguales no son significativamente diferentes ( $\alpha=0.05$ ).

## 1.6 DISCUSIÓN

La fertilización en vivero es necesaria para el crecimiento y desarrollo de las plantas, principalmente cuando se producen en contenedores que limitan el desarrollo radical y con sustratos en los que el aporte de nutrimentos puede ser bajo o nulo y no cubren sus necesidades metabólicas. Por lo tanto, la fertilización como práctica cultural tiene potencial para modificar positivamente las características morfológicas y fisiológicas como lo señala Cortina *et al.* (2013). Los resultados de este trabajo ratifican lo anterior, ya que los regímenes de fertilización afectaron los índices morfológicos y fisiológicos de calidad de planta de *P. dulce* durante su producción en vivero. En general, un incremento de las características de calidad evaluadas estuvo asociada con los regímenes cuyo aporte de nutrimentos fue mayor (Cuadro 1.2, Figura 1.1). Este efecto coincide con resultados reportados en otros trabajos, en donde la práctica de fertilización ha tenido un efecto positivo en mejorar la calidad de planta de otras especies tropicales como *Cassia grandis* L. f.,

*Peltophorum dubium* Spreng. Taub. (Soares *et al.*, 2017) y *Plathymenia foliolosa* benth. (Freitas *et al.*, 2017).

Resultados con fertilizantes de liberación controlada ya se han reportado en algunas especies por ejemplo *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg, *Schinus terebinthifolius* Raddi (Rossa *et al.*, 2015), *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart. (Carpenedo Aimi *et al.*, 2016) y *Tectona grandis* L. f. (Escamilla-Hernández *et al.*, 2015). En las dos primeras especies, se evaluó el efecto de la aplicación de Basacote® 6 M (13-6-16) en un intervalo de 0-10 kg m<sup>-3</sup>, y se encontró que dosis de 6-10 kg m<sup>-3</sup> favorecen un crecimiento mayor de las plantas durante 189 días de producción en vivero. Los resultados de Rossa *et al.* (2015), coinciden con los de este trabajo, ya que en el intervalo evaluado (4-8 g L<sup>-1</sup>), los regímenes con las dosis mayores en general derivaron en plantas de calidad mejor (Cuadro 1.2). En contraste, las plantas de las dos últimas especies mejoraron su calidad, pero con dosis que están por encima de las aplicadas en las plantas de *P. dulce* y en las de *Anadenanthera peregrina* y *Schinus terebinthifolius*. En *Tectona grandis*, la morfología de plantas de dos meses de edad se mejoró con la aplicación de 20-30 Kg m<sup>-3</sup> de Osmocote® 8 M (18-6-12) y en plantas de siete meses de *Cabralea canjerana* la mejor respuesta en variables morfológicas se consiguió con el aporte de 11.5 g L<sup>-1</sup> de Osmocote® 6 M (15-9-12). Esta discrepancia podría deberse a las diferencias en las necesidades de cada especie de acuerdo con sus ciclos de crecimiento, a la variedad de formulaciones de los fertilizantes y a las condiciones de cultivo, particularmente las del medio de crecimiento, puesto que la disponibilidad de los nutrientes en los fertilizantes de liberación controlada es sensible a la temperatura y humedad del sustrato (Wilkinson *et al.*, 2014).

Por otro lado, el hecho de que el régimen 9 (R9=8 g de FLC+ 750 mg de FHS [20-20-20]), haya presentado los valores mayores y con significancia estadística en la mayoría de las variables morfológicas evaluadas (DCR, PSA, PST e ICD [Cuadro 1.2]), sustenta la idea de que la adición de fertilizante hidrosoluble durante el crecimiento exponencial contribuyó a mejorar la calidad de las plantas de *P. dulce*. Esta respuesta coincide con las ventajas que se atribuyen en el diseño de rutinas fertilización involucrando tanto materiales solubles como sólidos (Rose *et al.*, 2004). Al respecto, un trabajo realizado por Reyes *et al.* (2018) en plantas de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl ex Wild. M. C. Johnst. confirma que una mejora de las características morfológicas de

plántulas de cuatro meses se logra combinando 6 g L<sup>-1</sup> de un FLC Multicote® 8-9 M (18-6-12) con un hidrosoluble 19-19-19 en dosis constante de 100 mg L<sup>-1</sup>. La respuesta positiva documentada con el estudio de Reyes *et al.* (2018) y con lo reportado en este trabajo en cuanto al uso de ambos tipos de materiales, podría derivarse de la complementariedad entre las ventajas y desventajas que presentan ambos fertilizantes en factores tales como: tasa de liberación de nutrientes, uniformidad de aplicación, ajuste de tasas y relaciones de nutrientes, y eficiencia en el consumo de nutrientes (Oliet *et al.*, 1999; Wilkinson *et al.*, 2014), los cuales son aspectos que convendría fueran analizados más a detalle en trabajos de este tipo.

En relación con las variables fisiológicas, las plantas del R5 tuvieron la eficiencia fotosintética mayor al tener un valor de TAN de 0.62 mg cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>; no obstante, este valor no difirió estadísticamente con las cifras presentadas por los regímenes 4 a 9 con valores superiores (Cuadro 1.2). La respuesta en TAN ejercida por los regímenes en los que el aporte de fertilizante fue más elevado, ratifica la importancia, ampliamente aceptada que tienen los nutrientes minerales en los procesos fisiológicos de las plantas, especialmente la fotosíntesis, tanto en ambientes de vivero (Luis *et al.*, 2009) como de campo (Pasquini & Santiago, 2012). Tasas altas de fotosíntesis derivan en una ganancia mayor de carbono que propician la producción de plantas grandes, las cuales según Luis *et al.* (2009) y Villar-Salvador *et al.* (2012) tienen oportunidad mayor de sobrevivir en campo. Sin embargo, para tener un crecimiento elevado las plantas deben destinar los suficientes recursos para soportar el continuo crecimiento tanto de raíces como de biomasa aérea, y esto se consigue con niveles suficientes de reservas nutrimentales que deben ser generadas por un adecuado aporte de nutrientes (Villar-Salvador *et al.*, 2012; Basave Villalobos *et al.*, 2014), ya que la formación de reservas compite por recursos con el crecimiento (Berendse *et al.*, 2007). En este trabajo se observó que los contenidos de reservas nutrimentales mayores en las plantas de *P. dulce* se lograron con el R9 para el caso del nitrógeno, con el R4 para fósforo y con el R7 para potasio (Figura 1.1); no obstante, al observar los nomogramas de vectores, las condiciones que en general presentaron las plantas fueron de suficiencia y dilución (Figura 1.2 A, B, C). La suficiencia se registró en N con los regímenes 4 y 9. Un aporte extra de este nutrimento podría haber derivado en un consumo de lujo, lo cual a menudo se trata de propiciar con los programas de fertilización (Timmer, 1997; Oliet *et al.*, 2013; Uscola *et al.*, 2015), debido a las ventajas que se tienen en crecimiento de las plantas cuando estas se establecen en ambientes de escasa fertilidad (Basave

Villalobos *et al.*, 2015). En cambio, la dilución manifestada en P y K por la mayoría de los regímenes sugiere que hubo un desbalance de P y K con respecto a N, en el que los nutrientes presentaron concentraciones subóptimas en el sustrato, que condujeron a una condición de deficiencia (López-López & Alvarado-López, 2010).

Según la prueba de calidad (Figura 1.3 y 1.4), las reservas generadas por los regímenes en cuestión soportaron el rebrote y crecimiento de las plantas tras haber experimentado pérdida de biomasa y trasplante en un medio pobre de nutrientes, pero estas agotaron sus reservas, lo cual se explica por la ausencia de diferencias estadísticas en crecimiento a los nueve meses de evaluación. El R9 mostró un rebrote mayor pero una tasa menor de crecimiento por el contrario, el R4 si tuvo un crecimiento mayor aunque a expensas de un rebrote menor (Figura 1.3 y 1.4). Este efecto indica una competencia entre la formación de reservas para el rebrote y el crecimiento, lo cual concuerda con la ecología del almacenamiento (F. Stuart, Ernst-Detlef, & Harold A., 1990). A menudo, las plantas no acumulan la suficiente cantidad de reservas debido a que el aporte de nutrientes no excede las demandas del crecimiento, y esto puede darse cuando las raíces tienen una capacidad alta de absorción y la disponibilidad de nutrientes en el medio es baja o hay pérdidas de nutrientes a través de abscisión o herbivoría y no se aprovechan por retraslocación (F. Stuart Chapin III, 1980; Berendse *et al.*, 2007). Experimentalmente, este fenómeno se presentó en una plantación de *Cedrela odorata* L. en donde se evaluó la influencia de la fertilización en el crecimiento y susceptibilidad de la especie en presencia del barrenador *Hypsipyla grandella* Zeller (Calixto *et al.*, 2015). Probablemente, las condiciones simuladas a las que fueron sometidas las plantas de *P. dulce* en la prueba de calidad ejercieron un efecto similar de poca disponibilidad y pérdida de nutrientes, y de ahí las limitaciones presentadas en crecimiento o rebrote.

Finalmente, dado que el establecimiento de plantas con características de alta calidad incrementa la oportunidad de un mejor desempeño en campo como lo puntualizan Grossnickle y MacDonald (2018), los valores obtenidos en los índices de calidad determinados, son una base referencial para proyectos de producción o de investigación con la especie, principalmente por la falta de antecedentes como los hay en otras especies forestales, varias de ellas incluidas en la norma NMX-AA-170-SCFI-2016 "Certificación de la operación de viveros forestales" (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2016), donde numéricamente se pretenden definir las características que una



planta debe reunir para ser consideradas como de calidad buena para proyectos de reforestación o restauración.

## 1.7 CONCLUSIONES

Los regímenes de fertilización diseñados a partir de materiales de liberación controlada e hidrosoluble muestran potencial para modificar las características morfológicas y fisiológicas en plantas de *P. dulce* durante la etapa de vivero. Particularmente, la adición de 8 g de fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12 y fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose) en una concentración base de nitrógeno de 150 mg L<sup>-1</sup>, promueve en general la producción de plantas con las mejores respuestas en índices morfológicos de calidad evaluados. Fisiológicamente, también en ese nivel de fertilización las plantas mejoraron su eficiencia fotosintética y estado nutrimental de nitrógeno, fósforo y potasio, aunque en este último caso sólo se tiene un efecto de suficiencia en nitrógeno y de dilución en el resto de los nutrimentos, condición que podría mejorarse con un aporte extra de fertilizante. En la prueba de calidad donde las plantas fueron sometidas a estrés por pérdida de biomasa y trasplante en un medio con disponibilidad limitada de nutrientes, las reservas nutrimentales generadas por los niveles de fertilización no son suficientes para cubrir ambas demandas del rebrote y crecimiento.

## CAPÍTULO II. LA PODA AÉREA COMO PRÁCTICA CULTURAL EN VIVERO PARA *Caesalpinea coriaria* (Jacq.) Willd<sup>2</sup>

### 2.1 RESUMEN

Las prácticas culturales de vivero tienen como objetivo mejorar la calidad de las plantas e incrementar la supervivencia de las reforestaciones; sin embargo, para cada especie debe examinarse el efecto de las diversas prácticas para definir su factibilidad de implementación. Este estudio analiza el efecto de la poda aérea en la calidad morfológica de plantas de *Caesalpinea coriaria* para determinar su potencial como práctica cultural. En condiciones de invernadero, tres niveles de poda fueron evaluados: 0 %, 25 % y 50 %. El efecto de las podas se examinó en plantas de seis meses midiendo atributos e índices morfológicos de calidad, tales como: altura de la parte aérea, diámetro del tallo, peso seco aéreo, de raíz y total, relación entre peso seco aéreo y raíz, índice de esbeltez e índice de calidad de Dickson. No hubo un efecto significativo de la poda, excepto en la altura y en el índice de esbeltez ( $p < 0.05$ ). Los valores mayores de 37.08 cm de altura y 12.81 de índice de esbeltez, correspondieron a plantas sin poda, mientras que los valores menores los presentaron plantas podadas al 25 % (29.06 cm y 10.75, para altura e índice de esbeltez, respectivamente). Con base en los resultados se concluye que la poda aérea no mejora la calidad morfológica de plantas de *C. coriaria*, por lo que no es recomendable como práctica cultural para producir plantas de esta especie en vivero.

**Palabras clave:** árbol multipropósito, cascalote, trópico seco, reforestación, sistemas agroforestales, viveros forestales.

### 2.2 ABSTRACT

Nursery cultural practices are aimed both to enhance seedling quality and to increase survival of reforestations, however the effects of diverse cultural practices should be examined for each species in order to define their feasibility of implementation. This study analyses the effects of top pruning on morphological quality of *Caesalpinea coriaria* seedlings to determine its potential as a cultural practice. In greenhouse conditions, three levels of top pruning were evaluated: 0 %, 25

---

<sup>2</sup> Artículo publicado: Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá, V. M., López-López, M. Á., Ramírez-Herrera, C., Trejo, C., & Conde-Martínez, V. (2020). La poda aérea como práctica cultural en vivero para *Caesalpinea coriaria* (Jacq.) Willd. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(63). <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.799>

% y 50 %. The effects of pruning were examined on six-month old seedlings by measuring several morphological attributes and quality indexes such as: shoot height, stem diameter, shoot, root, and total dry weight, shoot-to-root ratio, slenderness index, and Dickson quality index. There was not a significant effect of pruning, except on the shoot height and the slenderness index ( $p < 0.05$ ). The greatest values of 37.08 cm for shoot height and 12.81 of slenderness index belonged to no-pruned seedlings, while the lowest values were found for the pruned-seedlings at 25 % (29.06 cm and 10.75 for shoot height and slenderness index, respectively). Based on the results it is concluded that top pruning does not enhance the morphological quality of plants of *C. coriaria*, therefore it is not recommended as a cultural practice to produce plants of *C. coriaria* in nursery.

**Key words:** multipurpose tree, cascalote, tropical dry forest, reforestation, agroforestry systems, forest nurseries.

### 2.3 INTRODUCCIÓN

Las prácticas culturales de vivero desempeñan un papel determinante en la producción de planta de calidad para los proyectos de reforestación; con ellas se manipulan atributos morfológicos y fisiológicos que regulan el desempeño de las plantas en campo, en términos de supervivencia y crecimiento (Grossnickle y MacDonald, 2018).

En México, la baja supervivencia de las reforestaciones es una problemática que persiste; por ello, mejorar la calidad de las plantas para reforestación, mediante prácticas de vivero, continúa siendo necesario (Burney *et al.*, 2015). La mayoría de las investigaciones están dirigidas a producir planta de calidad para clima templado (Burney *et al.*, 2015); no obstante, es evidente la necesidad de generar información sobre prácticas culturales de manejo en vivero para otras especies, como las del trópico seco, las cuales son requeridas en diversos proyectos de reforestación o restauración (CONAFOR, 2014; Riikonen y Luoranen, 2018). El uso de especies forestales del trópico seco está limitado por la falta de información suficiente para su producción en vivero, particularmente bajo el enfoque de producción de planta de calidad (Bonfil y Trejo, 2010).

En el contexto de definir prácticas culturales para producir planta de calidad, conviene explorar aquellas cuyos antecedentes con otras especies han mostrado resultados satisfactorios en la mejora de la calidad de la planta. Al respecto, la poda aérea o poda de tallo es un ejemplo de ello. Se

argumenta que la poda como práctica cultural en vivero favorece el mantenimiento de especies leñosas pues estimula el crecimiento de las plantas y permite dirigirlo en una forma determinada (Wade y Westerfield, 2009). En la producción de planta en vivero, la poda ha mostrado potencial como práctica cultural para incrementar la calidad de algunas especies forestales. Por ejemplo, plantas de *Pinus greggii* Engelm. mejoraron su calidad morfológica e incrementaron la tasa fotosintética y el contenido de carbohidratos tras podar el 50 % de su biomasa aérea (Cetina-Alcalá *et al.*, 2001, 2002). Otro sustento experimental lo aporta un estudio con plantas de *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. (Donoso *et al.*, 2009). Esta especie también mejoró su desempeño en campo tras recibir podas en vivero.

Sin embargo, la implementación apropiada de la poda aérea depende de la comprensión de cómo y cuándo podar, puesto que las respuestas pueden variar entre especies (Wade y Westerfield, 2009). Por ejemplo, en dos especies tropicales, *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. y *Swietenia humillis* Zucc., sujetas a tres intensidades de poda (0 %, 25 % y 50 %), la poda aérea no es factible como práctica de vivero porque no mejoró la calidad de las plantas (Basave Villalobos *et al.*, 2014, 2015).

Las diferencias reportadas por la evidencia experimental anteriormente señalada, en torno a la factibilidad de la poda aérea, sugieren la necesidad de evaluar sus efectos en un número mayor de especies, especialmente en aquellas con valor ecológico y social alto como lo es *Caesalpinea coriaria* (Jacq.) Willd, comúnmente conocida como cascalote. El cascalote es una especie leguminosa arbórea multipropósito del trópico seco presente en los agostaderos, en donde se le aprovecha como sombra, forraje, cercos vivos y leña (Olivares-Pérez *et al.*, 2011; Palma-García y González-Rebeles Islas, 2018). En los últimos años, se ha resaltado la importancia de este tipo de especies para reforestar y rehabilitar agostaderos degradados por la ganadería extensiva mediante el fomento de sistemas silvopastoriles (Murgueitio *et al.*, 2011). Este aspecto justifica la necesidad de generar información relevante en la producción de planta en vivero de *C. coriaria*, con relación a prácticas culturales que mejoren su calidad. Por tal motivo, el presente en el estudio se evalúa el efecto de la poda aérea en la calidad morfológica de plantas de *C. coriaria*.

## **2.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1 Ubicación del experimento**

El estudio se realizó bajo condiciones controladas de invernadero con cubierta de plástico en el vivero forestal del Colegio de Postgraduados campus Montecillo Texcoco, Estado de México, México. Se registraron temperaturas máximas y mínimas promedio de 35 °C y 18 °C, respectivamente. La humedad relativa fue de 25 % durante el día y 80 % en la noche.

### **2.4.2 Manejo del experimento**

Un lote de 500 plantas se produjo por semillas en sistema de contenedor. La producción inició el 24 de mayo de 2018. La siembra fue directa dentro de envases de plástico rígido de 380 mL que contenían una mezcla de sustrato elaborada con turba de musgo (peat moss), perlita y vermiculita en proporciones 2:1:1. La densidad de plantas fue de 128 por m<sup>2</sup>. Al sustrato se le agregó fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12+2Mgo+ME (Haifa Chemicals Ltd.), en dosis de 6 g L<sup>-1</sup> de sustrato. Previo a la siembra, las semillas se remojaron durante 18 h en agua corriente como tratamiento pregerminativo (Cervantes *et al.*, 2014). Se utilizó semilla de tamaño similar, prefiriendo la de mayor tamaño de un lote que se recolectó en marzo de 2018 de árboles localizados en la comunidad de la Bajada, Coyuca de Catalán (Región Tierra Caliente, Guerrero, México). Las plántulas emergieron en su totalidad a la tercera semana de haberse sembrado. Las plantas se regaron tres veces por semana a capacidad de campo. Los valores de pH y conductividad eléctrica se monitorearon mediante el método Pourthru (Cavins *et al.*, 2008) cada 15 días con un medidor de combo de pH y conductividad (HI98130 Hanna Instruments Inc.). El pH se mantuvo entre 5.5 y 6.5, y la conductividad eléctrica entre 2.0 y 3.0 dS m<sup>-1</sup>.

### **2.4.3 Aplicación de tratamientos y diseño experimental**

En un lote de 300 plantas de tres meses de edad con alturas entre 15 y 20 cm se realizaron los tratamientos de poda aérea en tres intensidades: 0 % (sin poda), 25 % y 50 %. La poda aérea consistió en la remoción de la fracción de biomasa aérea conforme a la intensidad de cada tratamiento, para esto se tomó como referencia la longitud del tallo con follaje, desde las primeras hojas hasta el ápice principal. La poda se realizó solo una vez. Cada tratamiento tuvo cinco repeticiones, la unidad experimental estuvo constituida por 20 plantas. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar.

#### 2.4.4 Variables morfológicas de calidad evaluadas

Las mediciones se realizaron después de tres meses de efectuar la poda aérea, se evaluaron variables relacionadas con estándares e índices morfológicos de calidad de planta en una muestra de 50 plantas por tratamiento. Las variables fueron: altura de la parte aérea (APA; cm), diámetro del tallo en el cuello de la raíz (DCR; mm), peso seco aéreo (PSA; g), peso seco de raíz (PSR; g) y peso seco total (PST; g). La altura se midió con regla milimétrica y el diámetro con calibrador Mitutoyo® Digimatic CD-4". Los pesos secos se registraron con balanza analítica (AND® GR-120, A&D Company, Ltd), después de secar cada componente en la estufa de aire forzado (FELISA® FE291-D) hasta obtener un peso constante, el cual se tuvo a 70 °C durante 72 h. Con las observaciones anteriores, se determinaron índices morfológicos de calidad, como la Relación peso seco aéreo/peso seco de raíz (PSA/PSR), el Índice de Esbeltez (IE; altura/diámetro) y el Índice de Calidad de Dickson (ICD), este último a partir de la fórmula siguiente (Birchler *et al.*, 1998):

$$ICD = \frac{Peso\ seco\ total\ (g)}{\frac{Altura\ (cm)}{Diámetro\ (mm)} + \frac{Peso\ seco\ de\ la\ parte\ aérea\ (g)}{Peso\ seco\ de\ la\ raíz\ (g)}}$$

#### 2.4.5 Análisis estadístico

Un análisis de varianza paramétrico fue realizado para determinar los efectos de la poda aérea en la calidad morfológica de las plantas de *C. coriaria*. La prueba de hipótesis se basó en un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ . Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron validados. En casos de diferencias estadísticas se realizó una prueba post-hoc de comparación de medias con la prueba Tukey a un nivel de confianza de 95 %. El análisis estadístico se realizó en infoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008).

### 2.5 RESULTADOS

En general, la poda aérea no afectó la calidad morfológica de las plantas de *C. coriaria* ( $p > 0.05$ ), pues únicamente en las variables altura de la parte aérea (APA) e índice de esbeltez (IE) se tuvieron diferencias significativas ( $p = 0.0001$  y  $0.02$ , respectivamente). La altura mayor (37.08 cm) se registró en plantas sin poda, mientras que la menor (29.06 cm) en plantas podadas al 25 %. Al comparar ambos valores, se destaca una reducción de 28 % en la altura de las plantas tras recibir la poda al 25%. En el IE el valor mayor también correspondió a las plantas sin poda, con 12.81, el

cual fue 29 % superior al valor bajo de 10.75 registrado por las plantas podadas al 25 %. La poda aérea al 50 % resultó ser el peor tratamiento al presentar en la mayoría de las variables valores inferiores a los de las plantas no podadas (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1. Valores promedio  $\pm$  error estándar de plantas de *Caesalpinea coriaria* sujetas a podas aéreas en vivero.**

Variable <sup>1</sup>	Intensidades de poda (%)		
	0	25	50
APA (cm)	37.08 $\pm$ 1.32b	29.06 $\pm$ 1.32a	30.71 $\pm$ 1.32a
DCR (mm)	2.92 $\pm$ 0.09a	2.77 $\pm$ 0.09a	2.72 $\pm$ 0.09a
PSA (g)	1.61 $\pm$ 0.16a	1.67 $\pm$ 0.16a	1.51 $\pm$ 0.16a
PSR (g)	0.68 $\pm$ 0.06a	0.69 $\pm$ 0.06a	0.62 $\pm$ 0.06a
PST (g)	2.29 $\pm$ 0.19a	2.36 $\pm$ 0.19a	2.13 $\pm$ 0.19a
PSA/PSR	2.43 $\pm$ 0.20a	2.66 $\pm$ 0.20a	2.43 $\pm$ 0.2a
IE	12.81 $\pm$ 0.53b	10.75 $\pm$ 0.53a	11.36 $\pm$ 0.53ab
ICD	0.16 $\pm$ 0.02a	0.18 $\pm$ 0.02a	0.16 $\pm$ 0.02a

<sup>1</sup>APA: altura de la parte aérea; DCR: diámetro al cuello de la raíz; PSA: peso seco aéreo; PSR: peso seco de raíz; PST: peso seco total; PSA/PSR: relación peso seco aéreo/peso seco de raíz; IE: índice de esbeltez; ICD: índice de calidad de Dickson. Letras diferentes en la misma línea son significativamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ).

## 2.6 DISCUSIÓN

En la producción de planta forestal en vivero, se ha propuesto que la poda aérea o de tallo tiene potencial como práctica cultural para mejorar la calidad de la planta para trabajos de reforestación (South, 2016). Este planteamiento ha sido ratificado en un estudio con plantas de *Pinus greggii*. En esta especie la poda mejoró la calidad morfológica, incrementó la tasa de asimilación neta y el contenido de carbohidratos, estas características en conjunto contribuyeron a un desempeño favorable de las plantas en campo ante una condición de sequía (Cetina-Alcalá *et al.*, 2001, 2002). Contrario a *P. greggii*, las plantas de *C. coriaria* del presente estudio no presentaron resultados que sustenten el potencial de la poda aérea como práctica cultural. La divergencia entre los resultados obtenidos en *P. greggii* y en *C. coriaria*, sugiere un efecto diferencial de la poda entre especies, atribuido a los diferentes patrones de crecimiento y ramificación que son controlados por mecanismos de dominancia y control apical (Wilson, 2000; Cline y Harrington, 2007). En esta diferencia podrían también estar implicados efectos de hormonas involucradas en el crecimiento apical (Pallardy, 2008). Las respuestas de *C. coriaria* concuerdan con las reportadas en otras especies latifoliadas tropicales. Por ejemplo, en plantas de *Swietenia humilis* (Basave Villalobos

*et al.*, 2015) y *Enterolobium cyclocarpum* la poda aérea redujo la esbeltez de las plantas al disminuir la relación entre la altura de la parte aérea y el diámetro del tallo. Este efecto es una de las respuestas generales de las plantas a la poda (Wade y Westerfield, 2009) y coincide con lo registrado en las plantas podadas de *C. coriaria*.

En vivero, plantas esbeltas no son deseables, por lo que es preferible que sean robustas, pues se asume que son más vigorosas, por lo tanto, durante la producción de planta en vivero esta característica trata de promoverse (Orozco Gutiérrez *et al.*, 2010). Se ha demostrado en varias especies forestales que a mayor robustez mejor probabilidad de supervivencia en campo (Tsakaldimi *et al.*, 2013). Sin embargo, en vivero es preferible que la robustez se induzca con un crecimiento mayor en diámetro y no por una relación baja definida por la altura de las plantas como sucedió en las plantas podadas al 25 %.

En *C. coriaria*, el efecto de la poda fue nulo en el estímulo al crecimiento de la planta como comúnmente se asume (Wade y Westerfield, 2009; South, 2016), de modo que las plantas se mostraron sin incrementó en el diámetro del tallo. La anterior respuesta es negativa en varias especies forestales, debido a que se conoce que un diámetro grueso es un atributo determinante en la supervivencia en campo ante variadas condiciones ambientales (Grossnickle, 2012; Tsakaldimi *et al.*, 2013). Por ejemplo, en plantas de *Prunus avium* L. se demostró que la supervivencia en campo aumenta al incrementar el diámetro inicial del tallo las plantas en vivero a una medida de 7-8 mm (Esen *et al.*, 2012).

El diámetro del tallo de las plantas de *C. coriaria* no superó los 3 mm en ninguno de los tratamientos. Este valor bajo en diámetro se podría atribuir a que la especie es de crecimiento lento (Palma-García y González-Rebeles Islas, 2018); no obstante, la morfología de plantas producidas en contenedor también está determinada por el periodo de producción en vivero y por el efecto de varias prácticas culturales, según conclusiones derivadas de un estudio con plantas de *Acacia macrostachya* Reichenb. ex Benth y *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Zida *et al.*, 2008).

En ese sentido, posiblemente el tiempo de producción fue insuficiente y las condiciones de producción en el invernadero fueron poco adecuadas para optimizar el crecimiento de las plantas



de *C. coriaria*. Sin embargo, esta hipótesis en torno al tiempo de producción es contradictoria si se compara, por un lado, con el crecimiento en diámetro que presentan en vivero *Caesalpinia platyloba* S. Watson, *C. eriostachys* Benth. y *C. velutina* Standl., cuyas plantas tienen valores en el diámetro del tallo que oscilan entre 2.5 y 4.4 mm a los tres meses de edad (Ngulube, 1989; Orozco Gutiérrez *et al.*, 2010), y, por otro lado, si se contrasta con el tiempo de cuatro a cinco meses en el que comúnmente se producen otras especies tropicales de la misma familia (Fabaceae), por ejemplo *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnston (Prieto *et al.*, 2012; Basave-Villalobos *et al.*, 2017) y *Enterolobium cyclocarpum* (Basave Villalobos *et al.*, 2014). Es conveniente que estudios posteriores mejoren el crecimiento de *C. coriaria* en vivero.

Finalmente, se podría atribuir la falta de efectos significativos de la poda en la calidad morfológica de *C. coriaria*, al hecho de que la poda pudo haber limitado la fotosíntesis debido a la pérdida de tejido fotosintético (hojas), como sucede en plantas sujetas a pérdida de biomasa foliar por herbivoría (Nabity *et al.*, 2009), provocando un balance negativo de carbono (Kitajima, 2007) que limitó la capacidad de las plantas para producir carbohidratos suficientes que propiciaran un rebrote vigoroso ante el daño inducido por las podas. Además, este efecto pudo haber sido acentuado por el hecho de que previo a las podas, las plantas no disponían de suficientes carbohidratos de reserva, lo cual provocó mayor competencia de recursos para el crecimiento según como se discute en la teoría del almacenamiento (Lambers *et al.*, 2008).

En este estudio se omitió medir el contenido de carbohidratos, pero los planteamientos anteriores se fundamentan en la importancia de los carbohidratos de reserva sobre la capacidad de rebrote de las plantas (Von Fircks y Sennerby-Forsse, 1998), aspecto que se corroboró en plantas de *Quercus crispula* Blume (Kabeya y Sakai, 2005). Además, en otras especies la capacidad de rebrote está determinada por las mismas diferencias interespecíficas e intraespecíficas de estas (Umeki *et al.*, 2018), según su edad, tamaño (Vesk, 2006), o estado nutrimental (Kabeya y Sakai, 2005), los cuales son factores que podrían ser analizados a mayor detalle en estudios posteriores de esta índole.

## 2.7 CONCLUSIONES

La poda aérea en las intensidades evaluadas de 25 % y 50 % no tiene potencial como práctica cultural para mejorar la calidad de planta de *C. coriaria* en vivero. Los efectos en las plantas son la reducción de altura y su relación con el diámetro en el cuello de la raíz, lo que deriva en plantas menos robustas. Se recomienda analizar la interacción de las podas con otras prácticas culturales.

# **CAPÍTULO III. MANEJO DE LUZ EN VIVERO PARA PRODUCIR PLÁNTULAS DE *Pithecellobium dulce* PARA LAS REFORESTACIONES DE TIERRAS DEGRADADAS EN BOSQUES TROPICALES CADUCIFOLIOS DEL SUR DE MÉXICO<sup>3</sup>**

## **3.1 RESUMEN**

Las prácticas culturales en vivero son relevantes para producir planta de alta calidad e incrementar la supervivencia de las reforestaciones en regiones tropicales estacionalmente secas, pero es necesario definir prácticas adecuadas particularmente para especies nativas cuya información sobre su producción es escasa. En este estudio se plantea que el manejo de luz solar en vivero tiene potencial como práctica cultural por los cambios morfofisiológicos que las plantas usualmente presentan en ambientes diferentes de luz. Para determinar el potencial del manejo de la luz como práctica de vivero, se examinaron los cambios en la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de plantas de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth producidas en niveles diferentes de luz, y se evaluó la supervivencia de las plantas en campo en función de las condiciones de luz en que fueron producidas. Se evaluaron cuatro niveles de luz: 20 %, 40 %, 60 % y 100 % de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). En plantas de tres meses de edad se examinaron variables relacionadas con la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento. En campo, una plantación se estableció con las plantas de cada nivel de luz y se registró la supervivencia mensualmente durante 17 meses. En vivero, los niveles de luz afectaron significativamente la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de las plantas de *P. dulce*. El nivel 60 % de PAR fue el que promovió los valores más altos en la mayoría de las variables evaluadas, en cambio los valores más bajos se tuvieron en plantas producidas en 20 % de PAR. En campo la supervivencia de las plantas difirió significativamente según el nivel de luz en que se produjeron. En general, se encontró una supervivencia de 77 %. La supervivencia fue mayor a medida que incrementó el nivel de luz en vivero. Una supervivencia de 100 % se registró en plantas producidas en 100 % de PAR, mientras que la supervivencia más baja (53 %) se encontró en plantas producidas en 20 % de PAR. La supervivencia disminuyó en los primeros nueve meses. El manejo de la luz en vivero tiene potencial como práctica cultural para producir planta de alta calidad de *P. dulce*. Un 60 % de PAR es el nivel de luz que incrementa la calidad morfo-fisiológica. No obstante, una supervivencia

---

<sup>3</sup> Artículo aceptado: Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá, V. M., López-López, M. Á., Trejo, C., Ramírez-Herrera, C., Antúnez, P., & Conde-Martínez, V. (2021). Nursery light management to produce *Pithecellobium dulce* seedlings for reforestation of degraded lands in tropical dry forests of Southern Mexico. *Bois et Forêts des Tropiques*.

mejor en campo se tiene con plantas producidas en 100 % de PAR. Los primeros nueve meses corresponden al tiempo crítico para la supervivencia de las plantas de *P. dulce* en campo.

**Palabras clave:** plantación en campo, planta de calidad, pinzán, Rio Balsas, restauración ecológica, ribera.

### 3.2 ABSTRACT

Nursery practices are relevant to produce high-quality seedlings and to increase the survival of reforestations in the dry tropics, but adequate practices should be established for native species whose propagation information is scarce. This study proposes that light management in nursery is a potential cultural practice due to the morpho-physiological changes that plants usually undergo in different light environments. Changes in the morphology, photosynthetic efficiency, and growth of *Pithecellobium dulce* plants produced under four levels of light in nursery (20 %, 40 %, 60 %, and 100 % of photosynthetically active radiation [(PAR)]) were examined. Survival after outplanting as a function of the light conditions under which plants were grown was also appraised. Morpho-physiological variables were examined on three-month-old plants. A plantation was established in field using the nursery plants, and their survival was recorded monthly for 17 months. In the nursery, the light levels exerted significant effects on morphology, photosynthetic efficiency, and growth. The 60 % PAR level favored the best results in most of the variables, whereas the worst results were found in plants grown at 20 % PAR. Plant survival differed significantly as a function of the nursery light level, being higher as light intensity increased in the nursery during the seedling production. Survival of 100 % was observed in plants produced under 100 % PAR, whereas the lowest survival rate (53 %) was found in plants under 20 % PAR. Light management show potential as a cultural practice, thereby affecting the seedling quality of *P. dulce*, which is improved in nursery at 60 % of PAR. However, better survival after outplanting is obtained with plants produced under full sun. The results contribute to improve the nursery management and the establishment in the field of *P. dulce* in restoration activities of degraded lands in the dry tropics.

**Keywords:** outplanting, seedling quality, pinzán, Balsas River, ecological restoration, riverbank.

### 3.3 INTRODUCCIÓN

En el trópico seco de Latinoamérica, el Bosque Tropical Caducifolio o estacionalmente seco tiene una cobertura amplia y se caracteriza por su biodiversidad y endemismo elevados (Ceballos et al., 2010). En México, este tipo de vegetación está representado mayormente en la provincia biogeográfica denominada “la depresión del Balsas”, una ecorregión prioritaria para la conservación a escala global (Olson & Dinerstein, 2002).

Sin embargo, algunas áreas de la depresión del Balsas han sido afectadas por desastres naturales (Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED], 2015). Por ejemplo, en septiembre de 2013, en la cuenca baja del Río Balsas, que abarca varios municipios del estado de Guerrero (México), lluvias torrenciales a causa del ciclón tropical Manuel, provocaron el desbordamiento y cambio del cauce del río, afectando grandes extensiones de tierra en las zonas adyacentes a esta cuenca (CENAPRED, 2015). Las áreas ribereñas perdieron cobertura arbórea y el arrastre de sedimentos (arena y grava) afectó la productividad de los agroecosistemas en las poblaciones rurales que ahí se encuentran (CENAPRED, 2015). Estadísticas nacionales reportan para Guerrero una afectación de 55 781 ha de cultivos anuales y perenes, con pérdidas económicas en el sector primario que ascendieron a los 1000 millones de pesos mexicanos (CENAPRED, 2015).

A raíz de ese acontecimiento, realizar estudios focalizados a la recuperación de las zonas degradadas cobra relevancia. La reforestación con especies forestales nativas pioneras es el esquema de trabajo definido para tal propósito. Esa decisión se fundamenta en que el establecimiento de plantaciones con ese tipo de especies acelera la sucesión de la vegetación e incrementa la tasa de recuperación de las áreas degradadas en las diferentes etapas de la restauración ecológica (Lamb, Erskine & Parrotta, 2005). No obstante, de acuerdo con Bonfil & Trejo (2010), una de las limitantes importantes en las reforestaciones es la cantidad insuficiente de planta en vivero de especies forestales nativas del bosque tropical caducifolio. Esta escasez de planta, en parte, se atribuye al conocimiento limitado de cómo propagar plantas de alta calidad. Producir plantas de calidad es crucial para incrementar la supervivencia de los individuos plantados en las reforestaciones (Riikonen & Luoranen, 2018). Para este fin, las prácticas culturales son primordiales (Vallejo et al., 2012); por ello, es necesario mejorar las prácticas

existentes e implementar otras prácticas novedosas con un mayor número de especies incluidas las especies del bosque tropical caducifolio.

En el enfoque de implementar nuevas prácticas culturales, podría ser factible explorar el potencial del manejo de la luz solar en vivero. El planteamiento del manejo de la luz como práctica de vivero se sustenta en la preponderancia de la luz solar en el crecimiento y desarrollo de las plantas, y en las respuestas de aclimatación a nivel morfo-fisiológico que estas presentan para eficientizar el uso de la luz cuando su disponibilidad es heterogénea (Lambers, Chapin, & Pons, 2008; Pallardy, 2008). Varios estudios con especies forestales tropicales se han conducido para proporcionar información que optimice el establecimiento y crecimiento de las plantas en trabajos de reforestación o restauración, definiendo los ambientes y requerimientos de luz solar factibles para su desempeño adecuado (Cheng, Yu, Wang, Wu, & Zhang, 2013; Guzmán Q., Cordero S., & Corea A., 2016; Kelly, Jose, Nichols, & Bristow, 2009; Kenzo, Yoneda, Matsumoto, Azani, & Majid, 2011; Tang, Hu, Yu, Song, & Wu, 2015; Yang, Liu, Zhou, Zhang, & An, 2013). Usualmente, a las plantas de los estudios anteriormente citados, se les analiza su crecimiento y los patrones de asignación de biomasa, así como su capacidad fotosintética en condiciones contrastantes de luz. Este planteamiento experimental a menudo es realizado en vivero, de modo que hay sustento para examinar el manejo de la luz en vivero, con un enfoque de práctica cultural con potencial para producir planta forestal de alta calidad para trabajos de reforestación, según requerimientos específicos de calidad definidos por las condiciones del sitio de plantación, lo que incrementa la probabilidad de supervivencia en campo (Grossnickle & MacDonald, 2018).

Con base en los planteamientos anteriores, analizar los cambios morfológicos y fisiológicos que plantas de especies del bosque tropical caducifolio podrían presentar ante niveles de luz en vivero, y de la supervivencia que estas tendrían en campo después de la etapa de vivero, sería idóneo para desarrollar técnicas de manejo con la luz que propicien la producción de planta de alta calidad para trabajos de reforestación en la cuenca del Balsas. El presente estudio se enfoca a *P. dulce* porque esta especie es un elemento arbóreo característico del bosque tropical caducifolio de la cuenca del Balsas (Fernández N., Rodríguez J., Arreguín S. & Rodríguez J., 1998), con la cual se pretende intensificar las reforestaciones porque es una leguminosa pionera de crecimiento rápido con usos múltiples. Los usos principales de *P. dulce* son como árbol de sombra, leña, cerco vivo, forraje y

madera. También es fuente de alimento para el humano y vida silvestre (Olivares-Pérez, Avilés-Nova, Albarrán-Portillo, Rojas-Hernández, & Castelán-Ortega, 2011; Palma García & González-Rebeles Islas, 2018). Por ello, se han planteado los siguientes objetivos: 1) examinar los cambios en la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de plantas de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth, producidas en niveles de luz en vivero y 2) analizar la supervivencia de las plantas en campo, en función de los niveles de luz en el vivero.

### **3.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.4.1 Área de estudio**

El experimento de vivero se estableció en un predio particular ubicado en la localidad de La Bajada, Municipio de Coyuca de Catalán, Región Tierra Caliente, Guerrero, México, coordenadas 18° 19' 01" N y 100° 40' 19.83" W. Durante el periodo de estudio que compendió los meses de mayo-agosto de 2018, en la zona se registraron temperaturas máximas y mínimas promedio de 41 °C y 29 °C, respectivamente, una humedad relativa promedio de 32 % y una irradiancia de 498 W m<sup>-2</sup>. La información anterior se obtuvo de los registros de la Estación Agrometeorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], que se localiza en Cutzamala del Pinzón, Guerrero, México.

#### **3.4.2 Producción de la planta**

La planta de *P. dulce* se produjo por semilla en un sistema tradicional de bolsa. La semilla se recolectó en marzo de 2018 de árboles dispersos en los municipios de Arcelia y Coyuca de Catalán (Tierra Caliente del estado de Guerrero, México). Se seleccionaron árboles vigorosos, con producción abundante de frutos y libres de plagas o enfermedades. Se utilizó bolsa negra de polietileno tipo tubo 10 x 20 cm calibre 400. El sustrato se elaboró con turba de musgo (peat moss), perlita y vermiculita en proporciones 2:1:1. Se adicionaron 6 g L<sup>-1</sup> de fertilizante de liberación controlada (Multicote 8<sup>®</sup> 18N: 6P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:12K<sub>2</sub>O+2MgO+ME; Haifa Chemicals Ltd.). La producción inició en mayo de 2018 con la siembra directa en las bolsas. Un lote de 300 semillas con 95 % de viabilidad se utilizó. Se sembraron las semillas de mayor tamaño y sin daños aparentes por insectos u hongos. Estas se remojaron en agua a temperatura ambiente durante 12 h para promover una germinación rápida y uniforme. La etapa de germinación transcurrió en una condición de 20 % de sombra. Las plántulas emergieron 15 días después de la siembra. Los riegos se aplicaron tres veces

por semana a capacidad de campo. También, se aplicó un insecticida piretroide a base de Cipermetrina (CIMA® 19.6 % CE; Química Sagal S. A.) a una dosis de 50 mL L<sup>-1</sup>, para controlar piojo harinoso (*Planococcus sp.*) cuando las plantas tenían dos meses de edad.

### 3.4.3 Niveles de luz y diseño experimental

Un mes después de la siembra, 256 plantas de *P. dulce* con alturas promedio de 15 cm se sometieron a cuatro niveles de luz en vivero: 20 %, 40 %, 60 % y 100 % de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), en un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada unidad experimental se formó con 16 plantas.

Se utilizaron mallas sombras negras de monofilamento para restringir la luz solar en los niveles de 20 %, 40 % y 60 % de PAR. Estos niveles de luz solar se definieron tras determinar la transmitancia (T; %) de mallas comerciales con porcentajes distintos de sombreo, a partir de mediciones simultáneas de la PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) arriba y debajo de ellas. Para esto se utilizó un medidor de luz (LightScout® Light Sensor Reader (Spectrum Technologies, Inc., USA) y se empleó la fórmula  $T = \text{PAR}_{\text{debajo}} / \text{PAR}_{\text{arriba}}$ . Domos individuales se construyeron con la malla sombra para cada unidad experimental según el nivel de PAR requerido. En cada condición se monitoreó la temperatura máxima y mínima (°C), y la humedad relativa (%) con un termohigrómetro digital (TER-150 Steren). La irradiancia PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), se calculó a partir de los valores de radiación global en  $\text{W m}^{-2}$  de la estación agrometeorológica que se mencionó líneas arriba y se aplicó un factor de conversión de 2.02 (M. G. Reis, 2019). Se obtuvieron para cada condición de luz los siguientes valores promedio (Cuadro 3.1):

**Cuadro 3.1. Valores promedio de las variables climáticas monitoreados en cada condición de luz en vivero.**

Variable climática	Condición de luz (PAR; %)			
	20	40	60	100
Temperatura máxima (°C)	40	38.7	40.1	41.4
Temperatura mínima (°C)	23	23.8	22.7	21.8
Humedad relativa (%)	40.1	39.6	34.9	32.8
Irradiancia PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	51.7	258.6	646.5	1077.5



### 3.4.4 Evaluación de la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento

Se realizó un muestreo en plantas de tres meses de edad. A plantas sin cepellón, de cada nivel de luz, se les midió la altura de la parte aérea (cm) con una regla milimétrica, el diámetro del tallo en el cuello de la raíz (mm) con un calibrador Mitutoyo® Digimatic CD-4" AX, y el área foliar (cm<sup>2</sup>) con un medidor de área foliar LI-3100C (LI-COR Inc., USA). A las plantas, también se les determinó la biomasa (g) de hojas, tallo, raíz y total con balanza analítica (AND GR-120, A&D Company, Ltd.), previo secado de cada parte en una estufa de aire forzado (FELISA® FE-291AD) a 70 °C durante 72 h. Con los valores de biomasa se determinó la proporción de biomasa asignada a hojas (PBH; biomasa de hojas/biomasa total\*100), tallo (PBT; biomasa de tallo/biomasa total\*100) y raíz (PBR; biomasa de raíz/biomasa total\*100).

Asimismo, se determinó el área foliar específica (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) a partir del área foliar y de la biomasa de las hojas.

En cuanto a las variables fisiológicas, se analizó la eficiencia fotosintética medida en tasas de asimilación neta (TAN; mg cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) conforme a la ecuación (Hunt, 1990):  $TAN = [(BST_{O_2} - BST_{O_1}) * (\ln AF_2 - \ln AF_1)] / [(AF_2 - AF_1) * (T_2 - T_1)]$

Donde:

BST<sub>O</sub>= biomasa total de las plantas.

AF= área foliar de las plantas en valores absolutos y logarítmicos (ln).

T= tiempo. En todos los casos 1 y 2 se refiere a una evaluación inicial y otra final respectivamente, con un lapso entre ellas de 60 días.

Además, se evaluó el crecimiento (incremento de biomasa en planta completa) en términos de tasas de crecimiento relativo (TCR; en mg g<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) y absoluto (TCA; g día<sup>-1</sup>), siguiendo las ecuaciones que a continuación se muestran (Hunt, 1990):  $TCR = (\ln BST_{O_2} - \ln BST_{O_1}) / \Delta t$  (días),  $TCA = (BST_{O_2} - BST_{O_1}) / \Delta t$  (días)

Donde:

BST<sub>O</sub> 1 y 2= biomasa total de las plantas en valores logarítmicos (ln) y absolutos en una evaluación inicial y otra final, respectivamente.

Δt= tiempo transcurrido entre ambas evaluaciones (60 días).

El cálculo de las variables de respuesta requirió del muestreo destructivo de una muestra de 16 plantas de cada condición de luz. El muestreo inicial requerido para la evaluación de las variables TAN, TCR y TCA, se hizo al momento de someter las plantas a los niveles de luz (junio de 2018). El efecto de los niveles de luz se examinó mediante un análisis de varianza no paramétrico con la prueba Kruskal-Wallis a un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ . En casos de diferencias estadísticas, se hizo una comparación de a pares de los rangos medios conforme al procedimiento descrito en InfoStat versión 2012 (Di Rienzo *et al.*, 2012), el cual fue el software utilizado para los análisis estadísticos. Las medias de las variables se representan con los valores originales.

### **3.4.5 Estudio en campo**

En agosto de 2018, se estableció una plantación con las plantas de *P. dulce* de cada condición de luz examinada en vivero. Previamente, las plantas que crecieron bajo malla sombra se endurecieron paulatinamente a completa exposición de la luz del sol durante una semana. La plantación se hizo en la comunidad de la Bajada, Coyuca de Catalán, Guerrero, México, en un predio adyacente a la ribera del Río Balsas a una altitud de 256 msnm y coordenadas geográficas 18° 19' 15" N y 100° 40' 18" W. El terreno tuvo un uso agroforestal hasta 2013 (año del acontecimiento de la inundación). Posteriormente, la mayor parte de la superficie se cubrió por regeneración natural con plantas de *Ricinus communis* L. y *Muntingia calabura* L. El clima de la zona, según la clasificación de Köpen, modificada por García (2004), es cálido subhúmedo (Aw0) con lluvias en verano de junio a septiembre (García, 2004). La precipitación acumulada por año es de 978 mm. Julio y agosto son los meses con mayor precipitación, cuyo promedio oscila entre 220 y 240 mm. La temperatura media anual es de 28.6 °C (García, 2004). Mayo es el mes con las temperaturas máximas de 40 °C.

La plantación se realizó bajo un esquema de cerco vivo. El suelo presentó una textura franco-arenosa con 58.2 % de arena, 22.3 % de limo y 19.4 % de arcilla, además una densidad aparente de 1.25 g cm<sup>-3</sup>, pH de 7.4, 1.87 % de materia orgánica y una conductividad eléctrica de 0.14 dS m<sup>-1</sup>. Se plantaron 80 individuos en un arreglo lineal y espaciamiento de tres metros entre plantas. El método de plantación fue cepa común de 20 x 20 x 40 cm. Las malezas se controlaron con machete y azadón, conforme a su presencia. No se aplicaron riegos de auxilio, el agua solo provino de la temporada de lluvias. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro

repeticiones y cinco plantas por unidad experimental. El criterio de bloqueo fue la variabilidad de humedad en el suelo.

Durante 17 meses, se registró la supervivencia mensualmente. La variable supervivencia se consideró como dicotómica y se asignaron valores de 0 y 1 para plantas muertas y vivas, respectivamente. Las diferencias de supervivencia entre los niveles de luz se analizaron con la prueba Log-Rank a partir de curvas de supervivencia mediante el método de Kaplan-Meier en el que se define la función de supervivencia como:

$$S(t)=P(T\geq t)$$

Donde  $S(t)$  es la probabilidad de que una planta muera en un tiempo  $T$  mayor o igual que el tiempo  $t$  que dura el estudio (Kaplan y Meier, 1958). Este análisis se efectuó con el procedimiento LIFETEST del programa SAS (Statistical Analysis System) versión 9.2 (SAS, 2009).

## 3.5 RESULTADOS

### 3.5.1 Efecto de la luz en vivero

Al examinar los cambios en la morfología, la eficiencia fotosintética y el crecimiento de plantas de *P. dulce* producidas en niveles diferentes de luz en vivero, la prueba de Kruskal-Wallis demostró diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los niveles de radiación fotosintéticamente activa en todas las variables evaluadas (Cuadro 3.2). Los valores de las variables altura, diámetro, biomasa de hojas, tallo, raíz y total, y sus respectivas proporciones, así como el área foliar, área foliar específica, tasa de asimilación neta y las tasas de crecimiento relativo y absoluto tendieron a incrementar conforme aumentó el nivel de luz para las plantas. Esta tendencia se mantuvo hasta el nivel de 60 % de PAR (Cuadro 3.3), pues en el nivel más alto de luz (PAR; 100 %), las cifras disminuyeron, aunque sin ser estadísticamente diferentes a las registrados en el 60 % de PAR (Cuadro 3.3). De ese modo, el 60 % de PAR fue la mejor condición de luz en vivero al promover los valores mayores en las variables evaluadas, excepto en la tasa de asimilación neta. En cambio, el 20 % de PAR indujo los valores más bajos (Cuadro 3.3). Las plantas producidas bajo 60 % de PAR tuvieron una altura y un diámetro 41 % y 70 %, respectivamente, superiores a los de las producidas con 20 % de PAR (Cuadro 3.3). En el nivel de 60 % de PAR, la cantidad de biomasa formada también incrementó. Comparado con plantas del 20 % de PAR, la cantidad de biomasa en hojas y tallos casi se triplicó, mientras que en raíz fue cuatro veces mayor (Cuadro 3.3). A nivel

de planta completa, los valores en biomasa fueron tres veces superiores al contrastar plantas del 20 % contra las del 60 % de PAR. Esta tendencia de incrementos se mantuvo en el área foliar, ya que la cifra de esta variable en plantas del 60% de PAR (967.54 cm<sup>2</sup>) tuvo una superioridad de 300 % con relación a la cifra menor de 237.68 cm<sup>2</sup> registrada por plantas producidas con solo el 20 % de PAR; sin embargo, en el área foliar específica, las diferencias entre los valores de ambas condiciones de luz, 365.66 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> para plantas del 60 % de PAR y 320. 98 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> para las del 20 % de PAR, solo oscilaron en 16 % (Cuadro 3.3).

En los patrones de asignación de biomasa se encontró que la inversión de biomasa en la parte aérea (hojas y tallo) incrementó conforme menor fue la cantidad de luz que las plantas recibieron, pero este efecto fue a expensas de una reducción de la biomasa asignada a la raíz; no obstante, en general, las plantas de *P. dulce* destinaron más del 80 % de su biomasa a la parte aérea (Figura 3.1).

**Cuadro 3.2. Análisis de varianza no paramétrico (Kruskal-Wallis) del efecto de los niveles de luz en vivero en las variables morfológicas y fisiológicas evaluadas en *Pithecellobium dulce*.**

VARIABLES	Valor H <sup>1</sup>	Valor P
Altura de la parte aérea	14.76	0.0020
Diámetro del tallo	23.29	<0.0001
Biomasa de hojas	24.58	<0.0001
Biomasa de tallos	26.14	<0.0001
Biomasa de raíz	26.42	<0.0001
Biomasa total	25.17	<0.0001
Proporción de biomasa de hojas	16.78	0.0008
Proporción de biomasa de tallo	10.57	0.0143
Proporción de biomasa de raíz	19.68	0.0002
Área foliar	24.58	<0.0001
Área foliar específica	24.58	<0.0001
Tasa de asimilación neta	26.36	<0.0001
Tasa de crecimiento relativo	25.17	<0.0001
Tasa de crecimiento absoluto	25.17	<0.0001

1: estadístico de prueba para la prueba Kruskal-Wallis.

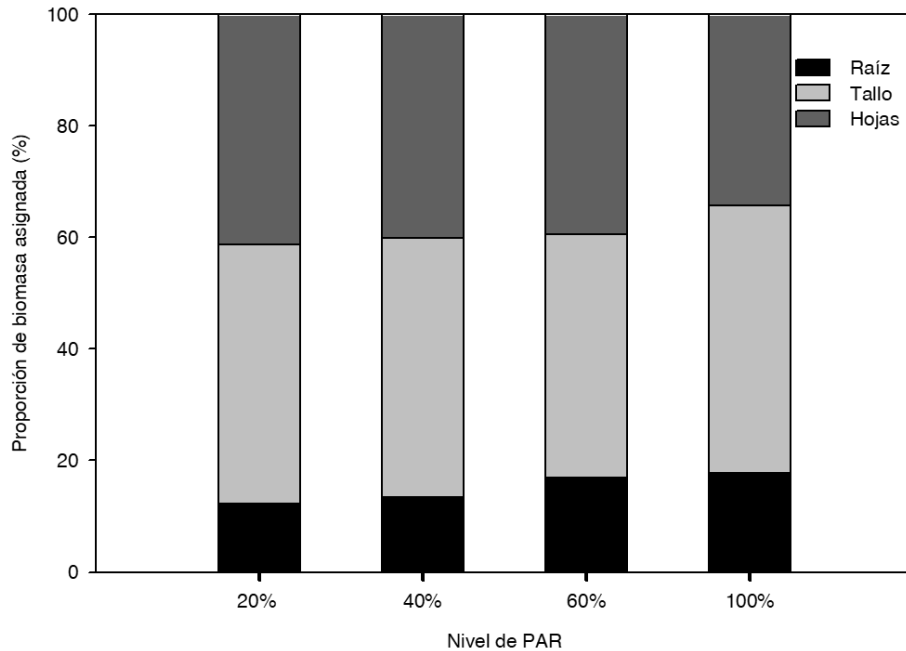
Adicionalmente, la eficiencia fotosintética de las plantas también se redujo conforme disminuyó la disponibilidad de luz. En este sentido, los valores de TAN de las plantas con el mayor sombreado (20 % de PAR) se redujeron en una proporción de 2:3, en relación con la TAN presentada por plantas, tanto del 60 % como del 100 % de PAR, las cuales tuvieron valores similares y altos

(Cuadro 3.3). Finalmente, este efecto concuerda con lo obtenido en los crecimientos relativo y absoluto, en donde las mayores tasas de crecimiento se promovieron en plantas sujetas a los niveles más altos de luz (60 % y 100 % de PAR); específicamente, los valores de las plantas de *P. dulce* producidas bajo 60% de PAR fueron, en TCR, 100 % superiores, mientras que los de TCA fueron 300 % más elevados en comparación con las tasas registradas por las plantas del 20 % de PAR (Cuadro 3.3).

**Cuadro 3.3. Valores promedio  $\pm$  desviación estándar de las variables morfológicas y fisiológicas evaluadas en *Pithecellobium dulce*, en respuesta a niveles de luz en vivero.**

Variables <sup>1</sup>	Nivel de radiación fotosintéticamente activa (PAR; %)			
	20	40	60	100
APA (cm)	46.67 $\pm$ 8.7a	48.75 $\pm$ 9.2a	65.59 $\pm$ 15.4b	59.75 $\pm$ 4.6b
DT (mm)	3.10 $\pm$ 0.7a	3.34 $\pm$ 0.5a	5.26 $\pm$ 0.8b	4.42 $\pm$ 0.8b
BSH (g)	0.71 $\pm$ 0.44a	0.76 $\pm$ 0.26a	2.63 $\pm$ 1.18b	1.61 $\pm$ 0.6b
BST (g)	0.8 $\pm$ 0.4a	0.91 $\pm$ 0.4a	2.86 $\pm$ 1.2b	2.23 $\pm$ 0.8b
BSR (g)	0.23 $\pm$ 0.2a	0.27 $\pm$ 0.1a	1.13 $\pm$ 0.6b	0.83 $\pm$ 0.3b
BSTo (g)	1.73 $\pm$ 1.09a	1.94 $\pm$ 0.8a	6.62 $\pm$ 2.9b	4.67 $\pm$ 1.8b
Área foliar (cm <sup>2</sup> )	237.68 $\pm$ 167.4a	257.47 $\pm$ 100.6a	967.54 $\pm$ 450.1b	582.12 $\pm$ 256.9b
AFE (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	320.98 $\pm$ 30.4a	335.22 $\pm$ 10.2a	365.66 $\pm$ 7.6b	357.89 $\pm$ 7.92b
TAN (mg cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.27 $\pm$ 0.0a	0.30 $\pm$ 0.0a	0.44 $\pm$ 0.0b	0.45 $\pm$ 0.0b
TCR (mg g <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	0.30 $\pm$ 0.0a	0.40 $\pm$ 0.0a	0.60 $\pm$ 0.0b	0.50 $\pm$ 0.0b
TCA (g día <sup>-1</sup> )	0.03 $\pm$ 0.00a	0.03 $\pm$ 0.0a	0.12 $\pm$ 0.0b	0.08 $\pm$ 0.0b

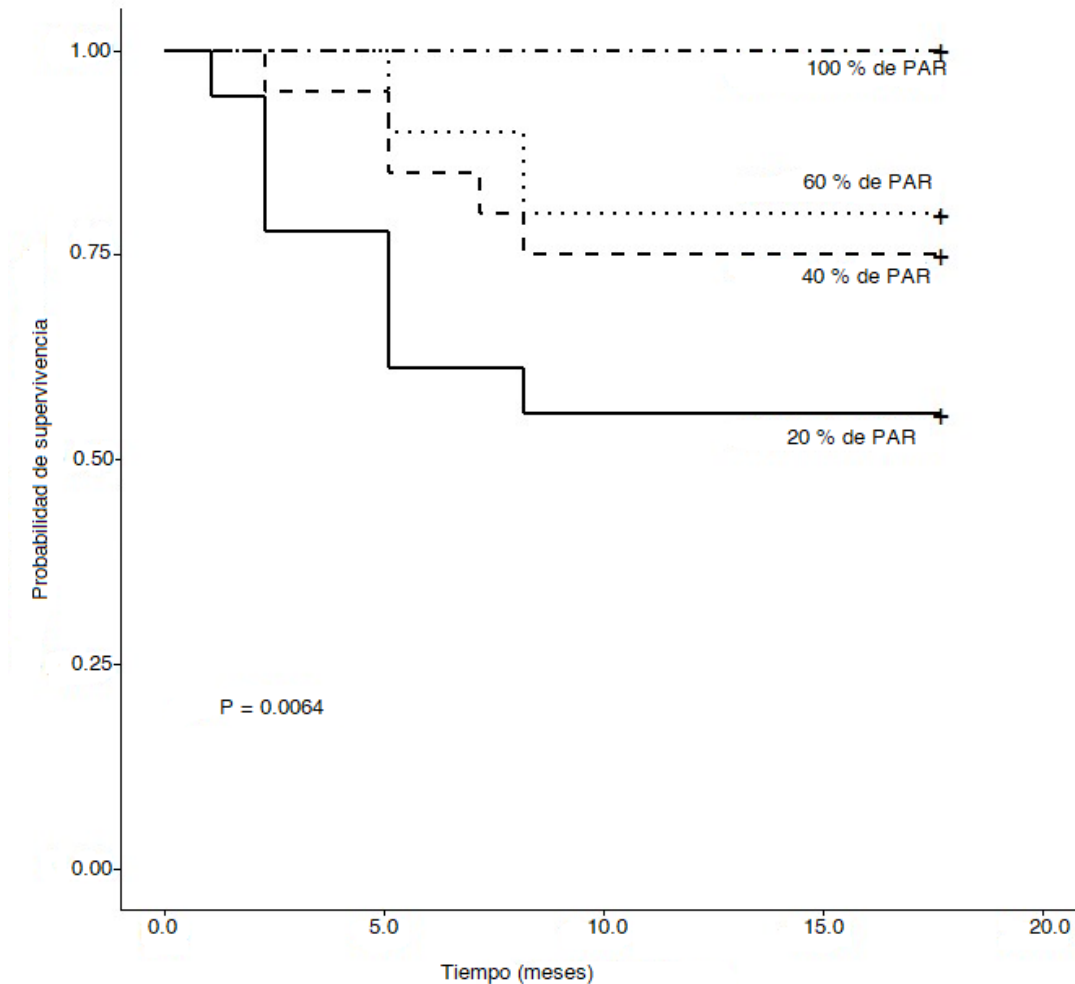
<sup>1</sup>APA: altura de la parte aérea; DT: diámetro del tallo; BSH: biomasa de hojas; BST: biomasa del tallo; BSR: biomasa de la raíz; BSTo: biomasa total; AFE: área foliar específica; TAN: tasa de asimilación neta; TCR: tasa de crecimiento relativo; TCA: tasa de crecimiento absoluto. Para una variable medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ).



**Figura 3.1.** Patrones de asignación de biomasa en hojas, tallo y raíz de plantas de *Pithecellobium dulce* en niveles distintos de luz en vivero.

### 3.5.2 Supervivencia en campo

Los niveles de luz (PAR) en vivero presentaron diferencias significativas en la supervivencia ( $P = 0.0064$ ). La supervivencia general de la plantación a los 17 meses fue de 77 %. La supervivencia incrementó conforme se incrementó el nivel de luz en la producción de las plantas en vivero; de ese modo, un 100 % de probabilidad de supervivencia se presentó en plantas producidas con el nivel más alto de PAR (100 %), en cambio, la menor probabilidad de supervivencia (53 %) se observó en las plantas con el 20% de PAR (Figura 3.2). Durante el lapso de estudio, la mayoría de los eventos de mortalidad se presentaron dentro de los primeros nueve meses (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Curvas de supervivencia en campo, según el estimador Kaplan-Meier, de plantas de *Pithecellobium dulce* producidas bajo condiciones diferentes de luz en vivero (20 %, 40 %, 60 % y 100 % de radiación fotosintéticamente activa [PAR]).

### 3. 6 DISCUSIÓN

La morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de las plantas de *P. dulce* varió conforme al nivel de luz en vivero. En general, los cambios exhibidos por *P. dulce* se asocian con efectos funcionales de aclimatación a la luz, similar a los cambios que se observaron en *Enterolobium contortisiliquum* (Naves, Rambal, Barbosa, de Castro, & Pasqual, 2018). Estos cambios se atribuyen al grado de plasticidad fenotípica de la especie (Gong, Wang, Jiao, & Cai, 2016). En las plantas de *P. dulce*, niveles altos de luz incrementaron los valores en cada atributo morfológico evaluado como resultado de mayores ganancias de biomasa considerando la planta completa. Este efecto sugiere que la especie demanda altos niveles de luz para su crecimiento. La respuesta

observada de *P. dulce* es coherente con los planteamientos de Khurana & Singh (2001), de que las especies tropicales caducifolias, en especial las pioneras, alcanzan tasas altas de crecimiento en niveles elevados de luz. Cada especie presenta un nivel óptimo de luz para un crecimiento favorable en función de su grado de tolerancia a la sombra, fase de sucesión y capacidad de aclimatación (Cheng et al., 2013; Kelly et al., 2009; Tang et al., 2015). Particularmente para *P. dulce*, 60 % de PAR fue el nivel de luz que propició la producción de plantas en vivero con la mejor morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento. Al igual que *P. dulce* en la presente investigación, *Elaeocarpus grandis* y *Flindersia brayleyana*, mostraron una capacidad fotosintética y crecimiento elevados bajo un nivel de luz de 60 % (Kelly et al., 2009). Esto se asemeja con las respuestas que plantas de *Copaifera langsdorffii* tienen bajo un 50 % de luz, nivel donde crecen mejor e incrementan su calidad morfológica (S. M. Reis et al., 2016). En contraste, plantas de *Torreya grandis*, una especie tolerante a la sombra, tuvieron un crecimiento mayor y una capacidad fotosintética alta con 25% de luz (Tang et al., 2015).

En niveles bajos de luz, las plantas suelen destinar mayor biomasa a la parte aérea y reducen la destinada a la raíz para incrementar la adquisición de luz con la que puedan mantener un balance positivo de carbono (Masarovičová, Májeková, & Vykouková, 2016). Esto se demostró en un estudio con *Cedrela salvadorensis* (Guzmán Q. et al., 2016) y se corroboró con las respuestas que las plantas de *P. dulce* presentaron en los patrones de asignación de biomasa en los niveles de 20% y 40 % de PAR. No obstante, a nivel foliar cambios importantes también se inducen. Las plantas incrementan su área foliar y su área foliar específica (AFE) como un ajuste plástico a la disponibilidad de la luz (Masarovičová et al., 2016). Este ajuste plástico en hojas se registró en *Cedrela salvadorensis* (Guzmán Q. et al., 2016), pero no en plantas de *P. dulce* sujetas a 20 % y 40 % de PAR porque la baja disponibilidad de luz limitó la formación y crecimiento de las hojas. En cambio, el incremento en área foliar y en el área foliar específica se documenta al comparar plantas de *P. dulce* del 100 % contra las del 60 % de PAR. En estas últimas el sombreo provocó incrementos en el área foliar y en el área foliar específica, posiblemente como una estrategia de aclimatación para utilizar más eficientemente la luz disponible, lo cual es una respuesta modulada por la plasticidad morfológica de la especie (Masarovičová et al., 2016). Este efecto a nivel foliar en *P. dulce* fue semejante al efecto que se observó en plántulas de *Prosopis laevigata* (Basave-Villalobos, Rosales-Mata, Sigala-Rodríguez, Calixto-Valencia, & Sarmiento-López, 2017).



El crecimiento menor que mostraron las plantas de los niveles bajos de luz (20 % y 40 % de PAR) contra las de altos (60 % y 100 % de PAR), se atribuye al impacto que tuvo la restricción de luz en su capacidad fotosintética, pues este es un factor determinante en la fotosíntesis (Pallardy, 2008). Las tasas fotosintéticas del mismo tipo de plantas son mayores cuando crecen en altas intensidades de luz, que cuando estas crecen en intensidades bajas (Pallardy, 2008). Las tasas bajas de asimilación neta de las plantas de 20 % y 40 % de PAR sugieren una eficiencia fotosintética limitada, atribuida al tamaño menor del aparato fotosintético que no promovió un balance positivo de carbono para destinar recursos suficientes al crecimiento (Lambers et al., 2008). Además, la heterogeneidad de las condiciones de luz en las que las plantas de *P. dulce* crecieron, podrían haber ejercido efectos en otros procesos fisiológicos de las plantas como en el uso del agua y nutrientes, los cuales son también factores importantes en el crecimiento (Lambers et al., 2008). Aunque metodológicamente se aportó nutrientes y agua en los mismos niveles para todas las plantas, probablemente, la eficiencia en el uso de estos recursos fue variable y los ambientes microclimáticos generados en cada condición de luz a su vez podrían haber tenido un impacto como se observó en *Pinus pinaster* (Rodríguez-García & Bravo, 2013), ya que los efectos de la intensidad de luz son modificados por interacciones con otros factores ambientales (Pallardy, 2008). Por ejemplo, un estudio con cinco especies tropicales contrastantes en su grado de tolerancia a la sombra (Gong et al., 2016) sustenta este supuesto en cuanto a la adquisición y uso de nutrimentos. Por otra parte, en plantas de *Enterolobium contortisilliquum* el nivel de luz afectó la efectividad del hidrogel empleado para mejorar el estado hídrico de estas (Pontes Filho, Gondim, & Costa, 2018). En estudios posteriores con *P. dulce* sería conveniente elucidar el efecto del nivel de luz sobre la eficiencia en el uso del agua y nutrimentos, mediante la evaluación de sus parámetros fisiológicos.

En *P. dulce*, los resultados de vivero ratifican el potencial que el manejo de la luz tiene como práctica para manipular la calidad morfológica y fisiológica de las plantas. Esto influyó en el desempeño de las plantas en campo así como se corrobora con el análisis de supervivencia. En general, la supervivencia de las plantas de *P. dulce* de este estudio fue mayor que la supervivencia de 50% registrada en los programas de reforestación en México (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2019). En primera instancia, hay sustento para recomendar a *P. dulce* como una especie idónea para trabajos de reforestación en el sitio de estudio u otros con características

edafoclimáticas similares. Por otra parte, destacan los resultados de 100 % de supervivencia de las plantas que crecieron en el 100 % de PAR. Esta respuesta implica que las mejores plantas de vivero no tuvieron la mejor supervivencia en campo bajo las condiciones que el sitio de plantación tenía, por lo que el uso de mallas sombra en vivero podría no ser una práctica pertinente para *P. dulce* como comúnmente se hace en los viveros forestales en sitios con alta radiación solar y baja humedad relativa (Pimentel, 2009); sin embargo, es probable que en sitios con otras condiciones la respuesta pudiera ser diferente y en este sentido no se descarta la relevancia del uso de mallas sombra sobre todo por la evidencia experimental en la fase de vivero que demuestra una mejora en la calidad de las plantas. Estudios posteriores son requeridos para analizar la supervivencia de las plantas en otras condiciones de campo. La supervivencia alta de plantas del 100 % de PAR en el área de estudio, se atribuye al hecho de una aclimatación completa desde vivero en donde permanecieron a la intemperie. Las hojas de las plantas del 100 % de PAR eran más gruesas según sus valores de área foliar específica. Un grosor mayor de las hojas se traduce en incrementos de las capas de células en el parénquima de empalizada, aspecto que funciona como protección contra las irradiancias altas (Lambers et al., 2008). De esta forma, se podrían haber reducido daños por fotoinhibición, a los cuales las plantas que crecieron bajo sombra en vivero podrían haber estado más propensas después de establecerse en campo. Aunque previo a la plantación las plantas bajo sombra fueron sujetas a una fase de endurecimiento, esta podría no haber sido suficiente para aclimatarlas, y el estrés en campo por completa irradiación, y, por ende temperaturas altas, pudo haber contribuido a la mortalidad que las plantas de los niveles de 20 %, 40 % y 60 % de PAR presentaron durante los primeros nueve meses. Las plantas de 20 % y 40 % de PAR aunque registraron valores menores en el área foliar específica, no precisamente tuvieron hojas gruesas con los beneficios en la aclimatación que esta característica confiere (Lambers et al., 2008). Además, otros mecanismos protectores del foto-daño podrían haber sido diferentes entre las plantas a consecuencia del nivel de luz en el que crecieron en vivero, así como lo formula Lambers et al. (2008).

Finalmente, la disminución de la supervivencia en los primeros nueve meses de establecer la plantación, tiene implicaciones importantes para los programas de reforestaciones. Los resultados sugieren que esos primeros nueve meses son críticos para la supervivencia de las reforestaciones con *P. dulce* en el área de estudio; por tal razón, se sugiere implementar acciones de manejo y

cuidado intensivo durante los primeros nueve meses tras establecerse una plantación, para incrementar el porcentaje de supervivencia de las plantas. Así mismo, partiendo de los antecedentes de este estudio, es deseable realizar otros ensayos para examinar con mayor detalle la respuesta de las plantas según sus características morfológicas o fisiológicas iniciales para definir los atributos que en particular inciden en una respuesta determinada de supervivencia.

### **3.7 CONCLUSIONES**

El manejo de la luz en vivero tiene potencial como práctica cultural para mejorar la calidad de planta de *Pithecellobium dulce*. Los niveles de luz afectan la morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de las plantas de *P. dulce* en vivero. Un nivel de 60 % de PAR en vivero mejora la calidad morfológica y fisiológica de las plantas de *P. dulce*. En campo, la supervivencia general de las plantas es alta, siendo las plantas producidas a completa irradiación (100 % de PAR) las que tienen una probabilidad superior de sobrevivir. El periodo crítico de supervivencia en campo comprende los primeros nueve meses de establecida la plantación.

## **CAPÍTULO IV. RESPUESTAS MORFO-FISIOLÓGICAS DE PLANTAS DE *Crescentia alata* Y *Enterolobium cyclocarpum* EN NIVELES DE LUZ CONTRASTANTES: IMPLICACIONES PARA SU MANEJO EN VIVERO Y CAMPO<sup>4</sup>**

### **4.1 RESUMEN**

En ambientes diferentes de luz, las plantas exhiben cambios morfo-fisiológicos para aclimatarse. Es importante examinarlos porque afectan su crecimiento y establecimiento. Esto es útil en *Crescentia alata* y *Enterolobium cyclocarpum* para mejorar su manejo en vivero y campo en prácticas de restauración y agroforestería en el trópico seco. El objetivo de este estudio fue determinar cuáles son los cambios morfo-fisiológicos que presentan las plantas de *C. alata* y *E. cyclocarpum* en niveles de luz diferentes y definir qué nivel de luz favorece su crecimiento. Este estudio se realizó en invernadero entre mayo y agosto de 2019. Plántulas de un mes de edad producidas en contenedor se sometieron a cuatro niveles de luz: 25, 35, 55 y 70 % de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante tres meses utilizando mallas sombra. Se examinaron cambios en la morfología, eficiencia fotosintética, estado nutrimental, concentración de carbohidratos y crecimiento. *C. alata* mejoró su morfología, eficiencia fotosintética, estado nutrimental y crecimiento con 70 % de PAR. *E. cyclocarpum* incrementó su biomasa aérea y mejoró su estado nutrimental de nitrógeno y concentración de carbohidratos en hojas al disminuir la cantidad de luz hasta un nivel de 25 % de PAR. Niveles altos de luz favorecen el crecimiento de *C. alata*. *E. cyclocarpum* requiere niveles menores. Estos resultados tienen implicaciones importantes. El manejo en vivero y campo de *C. alata* es factible en condiciones de irradiancia alta, en cambio *E. cyclocarpum* requiere mayor sombreo.

**Palabras clave:** agroforestería, bosque tropical seco, restauración ecológica, reforestación, viveros forestales.

### **4.2 ABSTRACT**

In different light environments, plants undergo morpho-physiological changes to acclimate. It is important to examine them because they affect growth and establishment. This is useful for

---

<sup>4</sup> Artículo enviado: Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá, V. M., Conde-Martínez, V., López-López, M. Á., Trejo, C. & Ramírez-Herrera, C. (2021). Respuestas morfo-fisiológicas de plantas de *Crescentia alata* y *Enterolobium cyclocarpum* en niveles de luz contrastantes: implicaciones para su manejo en vivero y campo. Botanical Sciences.

*Crescentia alata* and *Enterolobium cyclocarpum* to improve their nursery and field management in restoration and agroforestry practices in the dry tropics. The aim of this study was to determine the morpho-physiological changes that *C. alata* and *E. cyclocarpum* plants show under different light levels and to define what light level favors their growth. This study was carried out in greenhouse from May to August 2019. One-month-old container seedlings were submitted to four light levels: 25, 35, 55, and 70 % of the photosynthetically active radiation (PAR) for three months by using shading nets. Changes in the morphology, photosynthetic efficiency, nutrient status, carbohydrate concentration, and growth were examined. *C. alata* improved its morphology, photosynthetic efficiency, nutrient status, and growth with 70 % of PAR. *E. cyclocarpum* increased its aboveground biomass and enhanced its nitrogen status and carbohydrate concentrations in leaves with decreasing the amount of light up to a level of 25 % of PAR. High light levels favor the growth of *C. alata*. *E. cyclocarpum* requires lower light levels. These results have important implications. The nursery and field management of *C. alata* is feasible under high irradiance conditions, while *E. cyclocarpum* requires higher shading.

**Key words:** agroforestry, tropical dry forest, ecological restoration, reforestation, forest nurseries.

#### 4.3 INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica, se han impulsado proyectos de restauración ecológica en bosques tropicales secos, debido a los impactos de la deforestación en este ecosistema (Newton 2008). Para cumplir los objetivos de esos proyectos, es fundamental acelerar los procesos de recuperación en las áreas dañadas según su historial de disturbio (Lamb *et al.* 2005). Al respecto, el enfoque de restauración activa, mediante plantaciones forestales con especies nativas, ha sido uno de los más empleados para acelerar la recuperación de los sitios degradados, esto a través del proceso de sucesión secundaria (Lamb *et al.* 2005, Aerts & Honnay 2011).

A menudo, las plantaciones enfrentan limitantes ambientales en los sitios degradados en donde son establecidas. Nivel de irradiancia excesivo y escasa disponibilidad de recursos como agua y nutrimentos son condiciones adversas que afectan el desempeño de las plantas en campo (Santos *et al.* 2006). Ante ello, es importante identificar especies con mayor grado de aclimatación; por ejemplo, especies que puedan aprovechar los recursos disponibles eficientemente y prosperar en

las condiciones edafológicas y ambientales que predominan en los sitios de plantación (Santos *et al.* 2006).

La luz es uno de los factores principales que afecta la supervivencia y crecimiento de las plantas. En los bosques tropicales secos, la luz es uno de los recursos más heterogéneos espacial y temporalmente (Lebrija-Trejos *et al.* 2011). Esto se debe a la apertura estacional del dosel (debido al carácter caducifolio de la mayoría de las especies) y a los claros de tamaños diferentes que se abren recurrentemente por diversos factores de disturbio, entre ellos los incendios forestales y las prácticas frecuentes de explotación por productos como leña que modifican constantemente la estructura de la vegetación (Laborde & Corrales-Ferrayola 2012).

En ambientes heterogéneos de luz las plantas se modifican morfológica y fisiológicamente a nivel de hoja y planta completa para aclimatarse y optimizar su fotosíntesis y crecimiento (Masarovičová *et al.* 2016). Por ejemplo, si prevalece una irradiancia elevada se incrementa el espesor o densidad de las hojas y se ajusta el crecimiento de las plantas para modificar los patrones de asignación de biomasa en el aparato fotosintético y mantener así tasas de asimilación de carbono en niveles adecuados, minimizando la fotoinhibición (Valladares *et al.* 2004, Masarovičová *et al.* 2016, Mathur *et al.* 2018). En cambio, de limitarse la cantidad de luz disponible se optimiza su intercepción, absorción y procesamiento, incrementando la superficie foliar y reduciendo los costos de mantenimiento del aparato fotosintético (Masarovičová *et al.* 2016, Mathur *et al.* 2018). Algunas especies forestales presentan habilidades diferentes de aclimatación en comparación con otras, dependiendo del grado de plasticidad fenotípica (Gong *et al.* 2016) o si se trata de especies demandantes de luz o tolerantes a la sombra (Kelly *et al.* 2009).

En los proyectos de restauración, el conocer la habilidad de aclimatación a diferentes niveles de luz de las especies forestales es básico para elegir las más competentes para un determinado sitio de plantación (Calzavara *et al.* 2017). Esto es determinante en el éxito de las plantaciones, especialmente en las primeras etapas de establecimiento donde se define la supervivencia (Naves *et al.* 2018). Pero en contraste, a menudo las plantaciones registran tasas bajas de supervivencia y crecimiento porque en la elección de especies no se valoran los niveles de irradiancia que predomina en los sitios de plantación y la habilidad de aclimatación que las plantas puedan tener

en esas condiciones (Santos *et al.* 2006). En las plantaciones del trópico seco prevalecen ambientes de incidencia de luz alta, por lo que los daños que a menudo las plantas registran son por fotoinhibición (Alves *et al.* 2002, Santos *et al.* 2006). Esto ocurre principalmente cuando se establecen especies sin conocer sus requerimientos de luz o que no fueron producidas en las condiciones adecuadas de luz en vivero, repercutiendo en la calidad morfológica y fisiológica de las plantas. Este resultado es consecuencia, en parte, de que muchas especies del trópico seco carecen de información suficiente sobre su propagación y manejo (Bonfil & Trejo 2010).

El análisis de los cambios morfológicos y fisiológicos de las plantas en ambientes con diferentes niveles de luz, es uno de los enfoques experimentales que se abordan para mejorar el manejo en vivero o en campo de especies forestales para su producción o establecimiento (Kenzo *et al.* 2011). Por ejemplo, un estudio con plantas de *Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex DC.) Standl. permitió definir que la especie requiere al menos el 50 % de la radiación fotosintéticamente activa para incrementar su crecimiento, calidad morfológica y actividad fotosintética (Endres *et al.* 2010); en cambio, para *Carpotroche brasiliensis* (Raddi) A. Gray, los niveles de luz más adecuados son inferiores a 35 % (Cerqueira *et al.* 2018), pero a diferencia de ambas especies, *Cedrela fissilis* Vell. es capaz de establecerse en ambientes con irradiancia alta y baja (Sanchez *et al.* 2017).

En las regiones tropicales secas de México, *Crescentia alata* Kunth y *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. son dos especies forestales de usos múltiples muy importantes ecológica y socioeconómicamente, con potencial para restaurar áreas degradadas por la ganadería extensiva (Palma García & González-Rebeles Islas 2018). En estas especies, según el contexto anteriormente planteado, es fundamental determinar los cambios morfológicos y fisiológicos que conllevan a una aclimatación en ambientes diferentes de luz, pues se asume que éstas también responden a niveles de luz contrastantes con modificaciones morfo-fisiológicas que repercuten en su calidad. Lo anterior mejorará las prácticas de producción y manejo de las plantas en vivero y campo. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue determinar los cambios en la morfología, eficiencia fotosintética, estatus nutricional, reservas de carbohidratos y crecimiento de plantas de ambas especies creciendo en ambientes diferentes de luz.

## 4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.4.1 Área de estudio

El experimento se realizó en condiciones de invernadero dentro de las instalaciones del vivero forestal del Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. El invernadero está cubierto con una película plástica transparente de calibre 800 con un coeficiente de transmisividad del 70 %.

### 4.4.2 Producción de la planta

Las plantas de *C. alata* y *E. cyclocarpum* se produjeron por semillas en sistema de contenedor. Las semillas se recolectaron en árboles dispersos en la región Tierra Caliente del estado de Guerrero, México. Estas se sembraron en tubetes de polipropileno dispuestos en mesas de 25 cavidades. Para *C. alata*, se emplearon tubetes con capacidad de 310 mL y para *E. cyclocarpum* de 380 mL. El sustrato se elaboró con turba de musgo (peat moss), perlita y vermiculita en proporciones 2:1:1. A la mezcla se agregaron 6 g L<sup>-1</sup> de fertilizante de liberación controlada (Multicote 8<sup>®</sup> 18 N: 6 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:12 K<sub>2</sub>O+2 MgO+ME; Haifa Chemicals Ltd.). La siembra de las semillas se realizó en mayo de 2019. Las semillas se colocaron directamente en los tubetes. Sólo se sembraron semillas de tamaño homogéneo y sin daños aparentes por insectos u hongos. Las semillas de *C. alata* se remojaron en agua a temperatura ambiente durante 24 h, mientras que las de *E. cyclocarpum* se lijaron y remojaron durante 12 h en agua a temperatura ambiente. Las plántulas de *E. cyclocarpum* emergieron en la primera semana después de la siembra y las de *C. alata* en la segunda.

### 4.4.3 Niveles de luz y diseño experimental

Plántulas de un mes de edad se sometieron a cuatro niveles de luz en el invernadero: 25, 35, 55 y 70 % de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés), en un diseño experimental de bloques completamente aleatorizados con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental se formó con 16 plantas. El factor de bloqueo fue la variabilidad de las condiciones climáticas dentro del invernadero, principalmente en las zonas cercanas a las cortinas.

El 70 % de PAR es la cantidad de luz que prevalece en el invernadero por la transmisividad de la película plástica. Los niveles de 25, 35 y 55 % de PAR se generaron utilizando mallas sombras negras de monofilamento para restringir la luz solar a esos niveles. Esta malla es comercial y tiene



diferentes niveles de sombra. Los porcentajes de PAR de los tratamientos se comprobaron con mediciones simultáneas de PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) arriba y debajo de ellas. Para esto se utilizó un Ceptómetro AccuPAR modelo LP-80 (Decagon Devices, Inc., Washington, EE. UU.). Cubiertas en forma de triángulo se construyeron con las mallas sombra para cada unidad experimental según el nivel de PAR requerido. En cada condición se monitoreó la temperatura máxima y mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), y la humedad relativa (%) con un termohigrómetro digital TER-150 Steren<sup>®</sup> (Electrónica Steren S. A. de C. V., México). Adicionalmente, se calculó la luz diaria integrada ( $\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$ ) mediante el procedimiento descrito por Torres & Lopez (2016). Los niveles de luz se midieron con un sensor cuántico de PAR LightScout<sup>®</sup> conectado a una micro estación WatchDog<sup>®</sup> (Spectrum Technologies, Inc. Illinois, EE. UU.). Para cada condición de luz se obtuvieron los siguientes valores promedio (Cuadro 4.1):

**Cuadro 4.1. Valores promedio de las variables climáticas monitoreadas en cada condición de luz en vivero.**

Variable climática	Condición de luz (PAR; %)			
	25	35	55	70
Temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )	36.0	36.4	36.6	42.6
Temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ )	15.9	14.1	15.5	13.7
Humedad relativa (%)	27.4	28.3	28.5	26.5
Luz diaria integrada ( $\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$ )	9.6	13.5	21.2	27.0

#### 4.4.4 Variables de respuesta evaluadas

Se evaluaron plantas de tres meses de edad. Las variables se midieron en 12 plantas de cada nivel de luz. Estas se extrajeron de los tubetes y se retiró cuidadosamente el sustrato de las raíces con agua corriente. Se midió la altura de la planta (APA; cm) con una regla graduada en mm, el diámetro del tallo (DT; mm) en el cuello de la raíz con un calibrador Mitutoyo<sup>®</sup> Digimatic CD-4” AX, y el área foliar (AF;  $\text{cm}^2$ ) con un medidor de área foliar LI-3100C (LI-COR Inc., Nebraska, EE. UU.); también, se cuantificó la biomasa (g) de hojas (BH), tallo (BT), raíz (BR) y total (BTo) con una balanza analítica (AND<sup>®</sup> GR-120, A&D Company, Ltd. Tokio, Japón), previo lavado con agua destilada y secado de cada parte en una estufa de aire forzado (FELISA<sup>®</sup> FE-291AD) a  $70^{\circ}\text{C}$  durante 72 h. Con los valores de biomasa se determinó la proporción de biomasa de hojas (PBH; biomasa de hojas/biomasa total), tallo (PBT; biomasa de tallo/biomasa total) y raíz (PBR; biomasa de raíz/biomasa total). Asimismo, se determinó el área foliar específica (AFE;  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) a partir del

área foliar y la biomasa de las hojas, y la relación de área foliar (RAF;  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) considerando el área foliar y la biomasa total. Se determinaron las tasas de asimilación neta (TAN;  $\text{mg cm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) conforme a la ecuación (Hunt *et al.* 2002):  $TAN = [(BST_{02} - BST_{01}) * (\ln AF_2 - \ln AF_1)] / [(AF_2 - AF_1) * (T_2 - T_1)]$

Donde:

BST<sub>0</sub>= biomasa total de las plantas.

AF= área foliar de las plantas en valores absolutos y logarítmicos (ln).

T= tiempo. En todos los casos 1 y 2 se refiere a una evaluación inicial y otra final respectivamente, con un lapso entre ellas de 60 días.

El estatus nutrimental se evaluó mediante el análisis de la concentración (%) y el contenido ( $\text{mg planta}^{-1}$ ) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El análisis nutrimental se hizo en plantas completas. La concentración del N se determinó mediante el método de micro-Kjeldahl; la concentración del P a través de determinación colorimétrica con complejo amarillo vanadato-molibdato y la concentración del K con espectrofotometría de emisión de flama. El contenido se calculó con los valores de concentración y biomasa de las plantas. Asimismo, se determinó la eficiencia en el consumo de los nutrimentos a partir de la siguiente ecuación (1) (Uscola *et al.* 2015):

$$ECN = \frac{CNP - CNP \text{ sin fertilizar}}{\text{tasa de fertilización del nutrimento}} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

ECN = Eficiencia en el consumo de nutrimentos

CNP = Contenido nutrimental de plantas

Para obtener los valores del contenido nutrimental de plantas sin fertilizar se realizó un análisis químico en plantas recién germinadas. La tasa de fertilización del nutrimento (N, P, K) se determinó por planta conforme a la cantidad de fertilizante suministrado y la concentración de cada nutrimento según el análisis garantizado por el fabricante.

También, se determinó la concentración de carbohidratos totales por el método Antrona en hojas y raíz por cuatuplicado. Los azúcares se extrajeron con etanol al 80 % utilizando un equipo Soxhlet. La cuantificación de los azúcares totales se hizo por el método ácido sulfúrico-Antrona con una longitud de onda de 625 nm y la absorbancia fue con un espectrofotómetro UV/visible

(Jenway™ 6305, Cole-Parmer Ltd., OSA, Reino Unido). Los cálculos de los azúcares totales ( $\text{mg g}^{-1}$  de peso fresco) se realizaron con base en una curva de calibración de glucosa ( $2.5 \text{ mg mL}^{-1}$ ) en un rango de concentración de 10 a 150  $\mu\text{g}$ .

Finalmente, se examinó el crecimiento (incremento de biomasa en planta completa) en términos de tasas de crecimiento relativo (TCR; en  $\text{mg g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) siguiendo la ecuación que a continuación se muestra (Hunt *et al.* 2002):

$$\text{TCR} = (\ln \text{BST}_{02} - \ln \text{BST}_{01}) / \Delta t \text{ (días)}.$$

Donde:

BST<sub>01</sub> y 2= biomasa total de las plantas en valores logarítmicos (ln) en las evaluaciones inicial y final, respectivamente.

$\Delta t$ = tiempo transcurrido entre ambas evaluaciones (60 días).

El muestreo inicial requerido para la evaluación de las variables TAN y TCR se hizo al momento de iniciar los tratamientos de niveles de luz (junio de 2019).

A las variables de morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento se les realizó un análisis de varianza de una vía a un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ , previa la validación de los supuestos de homogeneidad de la varianza y normalidad. En casos de diferencias estadísticas ( $P < 0.05$ ), las medias se compararon por pares mediante la prueba de la diferencia mínima significativa (LSD, por sus siglas en inglés) de Fisher. Al estado nutrimental y la concentración de carbohidratos se les hizo un análisis de varianza no paramétrico con la prueba de Friedman ( $\alpha = 0.05$ ). En casos de diferencias estadísticas, se hizo una comparación de las medias de los rangos de a pares conforme al procedimiento descrito en InfoStat versión 2012 (Di Rienzo *et al.* 2008), el cual fue el software utilizado para los análisis estadísticos. Las medias de las variables se representan con los valores originales.

## 4.5 RESULTADOS

Los niveles de luz afectaron en diferente magnitud la morfología, eficiencia fotosintética, estado nutrimental, contenido de carbohidratos y crecimiento de las plantas de *C. alata* y *E. cyclocarpum*. Por su parte, *C. alata* en general incrementó los valores de las variables evaluadas de morfología,

eficiencia fotosintética, crecimiento y estado nutrimental a medida que aumentó la cantidad de luz; de este modo, con diferencias significativas entre niveles de luz ( $P > 0.05$ ), se destaca que 70 % de PAR fue el nivel de luz con los valores mayores en la mayoría de las variables evaluadas: APA, DT, BH, BT, BTo, AFE, TAN, TCR (Cuadro 2), contenido de N y P, y eficiencia en el consumo de N y P (Cuadro 4.4). En las proporciones de biomasa hubo similitud en la cantidad de biomasa asignada entre las plantas del 70 % de PAR y las del 25 % de PAR. En ambos casos, más de la mitad de la biomasa de la planta fue asignada a la parte aérea (hojas y tallo) y el resto a la raíz (Figura 4.1A). En el área foliar específica el nivel 35 % de PAR obtuvo el valor mayor, similar a lo determinado en la relación de área foliar con el 25 % de PAR. En comparación con los valores menores del 70 % de PAR, las diferencias oscilaron en 23 % y 16 % para cada variable, respectivamente (Cuadro 4.2).

En el contenido de nitrógeno se tuvo una diferencia de 74 % entre el nivel de 70 % de PAR y 35 % de PAR, que registraron los valores mayores y menores, respectivamente (Cuadro 4.4). En ese mismo sentido, en el contenido de fósforo la diferencia fue 69 % al comparar el nivel de 70 % de PAR contra el 25 % de PAR (Cuadro 4.4). La eficiencia en el consumo de N en el nivel mayor de PAR (70 %) registró una superioridad de 77 % en contraste con el valor menor reportado por el nivel de 35 % de PAR (Cuadro 4.4). En la eficiencia en el consumo de P el porcentaje de cambio fue de 69 % entre la cifra del 70 % de PAR y la del 25 % de PAR, que de igual manera reportaron los valores mayores y menores, respectivamente (Cuadro 4.4). Finalmente, aunque en el contenido de carbohidratos se manifestó una tendencia de incremento en el contenido de azúcares tanto en el nivel menor de luz como en el mayor, no se encontraron diferencias significativas entre niveles de luz ni en hojas ni en raíz (Figura 4.2).

En *E. cyclocarpum* los niveles de luz afectaron significativamente ( $P > 0.05$ ) la altura, biomasa de raíz, proporciones de biomasa (hojas, tallo y raíz), relación de área foliar (Cuadro 4.3), concentración de N, contenido de N y eficiencia en el consumo de N (Cuadro 4.5). Adicionalmente el contenido de carbohidratos sólo difirió en hojas (Figura 4.3).

En el nivel menor de luz (25 % de PAR), la altura y la relación de área foliar de las plantas aumentaron 40 % y 16 %, respectivamente, comparado con el nivel de 70 % de PAR (Cuadro 4.3).

La biomasa de raíz fue mayor en el nivel 55 % de PAR con un incremento de 35 % con relación al nivel de 25 % de PAR (Cuadro 4.3). Esta respuesta propició que las plantas del nivel menor de luz (25 % de PAR) destinaran 73 % de biomasa a la parte aérea (hojas y tallo) (Figura 4.1B). En cambio, en el nivel mayor de luz (70 % de PAR) esa cantidad de biomasa a la parte aérea se redujo 11 %, por lo que se favoreció la biomasa asignada a la raíz a casi 40 % del total de la planta (Figura 4.1B).

Con relación al estado de nitrógeno, los valores de concentración, contenido y eficiencia en el consumo del nutrimento fueron altos para plantas en 25 % de PAR y decrecieron a medida que la radiación fue mayor, registrándose el menor valor en las plantas con 70 % de PAR. Las diferencias entre los tratamientos de 25 % y 70 % de PAR oscilaron en 57 % para la concentración, 68 % para el contenido y 96 % para la eficiencia en el consumo del nutrimento (Cuadro 4.5).

Finalmente, la concentración de carbohidratos fue 27 % superior en hojas de las plantas en 25 % de PAR con relación a las plantas en 70 % de PAR, de este modo el contenido de carbohidratos incrementó con la restricción de luz, aunque los niveles intermedios de luz (35 % y 55 % de PAR) fueron los que presentaron los valores menores (Figura 4.3).

**Cuadro 4.2. Significancia estadística y promedios en variables de morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de plantas *Crescentia alata* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero.**

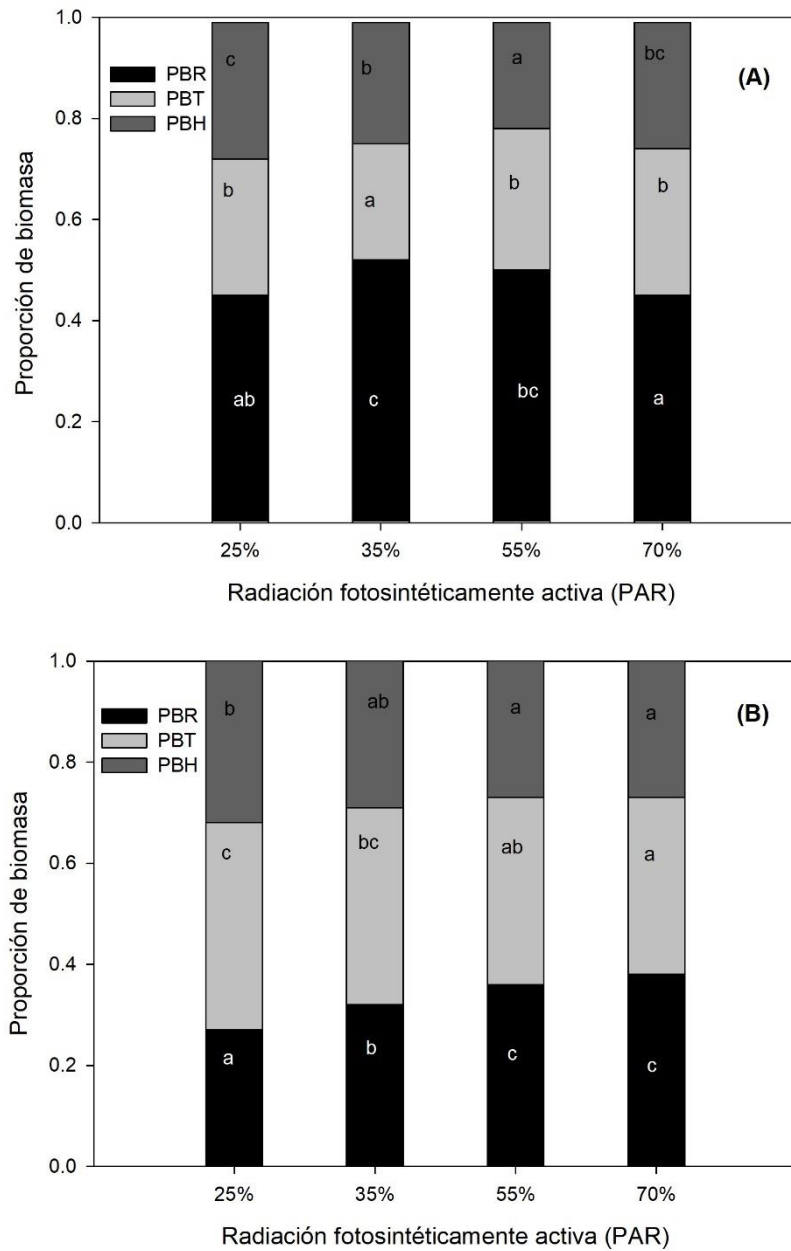
Variable	Valor <i>P</i>	Nivel de luz (PAR; %)			
		25	35	55	70
APA (cm)	0.0001	10.88 b	8.71 a	10.75 b	12.29 c
DT (mm)	0.0389	4.85 a	5.19 ab	5.15 ab	5.75 b
BH (g)	0.0015	0.52 a	0.43 a	0.47 a	0.63 b
BT (g)	0.0001	0.52 ab	0.42 a	0.59 b	0.71 c
BR (g)	0.0918	0.89	0.93	1.06	1.12
BTo (g)	0.0030	1.93 a	1.78 a	2.12 ab	2.45 b
AF (cm <sup>2</sup> )	0.0015	146.72 a	134.01 a	139.09 a	163.23 b
AFE (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	0.0203	287.41 ab	325.16 b	313.84 b	264.48 a
RAF (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	0.0038	77.71 b	77.28 b	67.27 a	67.21 a
TAN (mg cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.0044	0.14 ab	0.14 a	0.16 bc	0.17 c
TCR (mg g <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	0.0055	26.88 a	26.14 a	27.59 ab	28.94 b

APA: altura de la parte aérea; DT: diámetro del tallo; biomasa de hojas (BH), tallo (BT), raíz (BR) y total (BTo); AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: relación de área foliar; TAN: tasa de asimilación neta; TCR: tasa de crecimiento relativo. Para una variable de respuesta, medias con letra en común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) conforme a la prueba LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

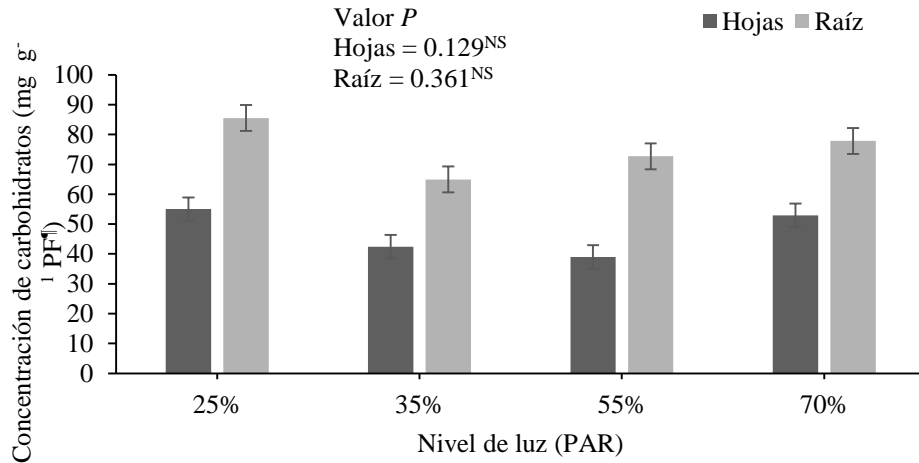
**Cuadro 4.3. Significancia estadística y promedios en variables de morfología, eficiencia fotosintética y crecimiento de plantas de *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero.**

Variable	Valor <i>P</i>	Nivel de luz (PAR; %)			
		25	35	55	70
APA (cm)	<0.0001	50.75 c	45.00 b	40.08 ab	36.25 a
DT (mm)	0.1977	5.17	5.65	5.40	5.35
BH (g)	0.3821	1.48	1.37	1.33	1.22
BT (g)	0.2028	1.89	1.86	1.78	1.52
BR (g)	0.0042	1.24 a	1.48 ab	1.68 b	1.60b
BTo (g)	0.7046	4.62	4.70	4.79	4.33
AF (cm <sup>2</sup> )	0.3821	220.31	203.12	198.21	181.02
AFE (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	0.3220	148.58	148.71	148.76	149.36
RAF (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	0.0445	47.37 b	43.07 ab	41.17 a	40.73 a
TAN (mg cm <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.1278	0.39	0.42	0.43	0.40
TCR (mg g <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> )	0.4892	19.84	19.92	20.03	18.88

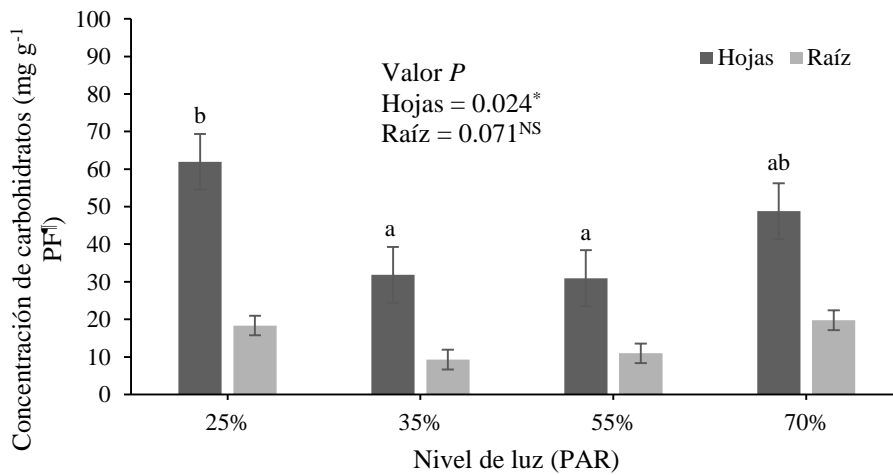
APA: altura de la parte aérea; DT: diámetro del tallo; biomasa de hojas (BH), tallo (BT), raíz (BR) y total (BTo); AF: área foliar; AFE: área foliar específica; RAF: relación de área foliar; TAN: tasa de asimilación neta; TCR: tasa de crecimiento relativo. Para una variable de respuesta, medias con letra en común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) conforme a la prueba LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).



**Figura 4.1.** Patrones de asignación de biomasa de plantas de A) *Crescentia alata* y B) *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz. PBH, PBT y PBR: proporción de biomasa de hojas, tallo y raíz, respectivamente. Barras con letras iguales en la misma proporción de biomasa no son estadísticamente diferentes ( $P > 0.05$ ) conforme a la prueba LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).



**Figura 4.2.** Concentración de carbohidratos totales en plantas de *Crescentia alata* expuestas a diferentes niveles de luz. <sup>1</sup>PF: peso fresco. Barras indican promedio  $\pm$  desviación estándar. NS: no significativo ( $P > 0.05$ ).



**Figura 4.3.** Concentración de carbohidratos totales en plantas de *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz. <sup>1</sup>PF: peso fresco. Barras indican promedio  $\pm$  desviación estándar. Una letra en común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) conforme a la prueba LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ). \* significativo al nivel 0.05 de probabilidad, NS: no significativo.



**Cuadro 4.4. Significancia estadística y valores promedio en variables relacionadas con el estatus nutrimental de plantas de *Crescentia alata* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero.**

Nivel de luz (PAR; %)	Concentración nutrimental (%)			Contenido nutrimental (mg)			Eficiencia en el consumo de nutrimentos (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
25	2.08	0.26	0.90	40.08 ab	4.99 a	13.63	11.04 ab	4.45 a	6.08
35	1.88	0.29	0.71	33.43 a	5.08 a	14.69	9.05 a	4.53 a	6.55
55	1.88	0.28	0.83	39.82 ab	5.90 ab	15.00	10.96 ab	5.26 ab	6.69
70	2.38	0.34	0.71	58.27 b	8.45 b	22.08	16.47 b	7.54 b	9.86
Valor <i>P</i>	0.05	0.103	0.306	0.032	0.043	0.086	0.032	0.043	0.086

Dentro de una variable de respuesta, medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) conforme a la prueba LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

**Cuadro 4.5. Significancia estadística y valores promedio en variables relacionadas con el estatus nutrimental de plantas de *Enterolobium cyclocarpum* expuestas a diferentes niveles de luz en vivero.**

Nivel de luz (PAR; %)	Concentración nutrimental (%)			Contenido nutrimental (mg)			Eficiencia en el consumo de nutrimentos (%)		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
25	2.92 b	0.27	0.95	134.75 b	12.65	44.07	27.14 b	7.57	14.06
35	2.23 ab	0.27	0.82	104.73 ab	12.57	38.58	19.82 ab	7.51	12.05
55	1.93 a	0.27	0.80	92.21 a	12.98	38.41	16.77 a	7.81	11.99
70	1.86 a	0.30	0.94	80.32 a	13.04	40.59	13.88 a	7.86	12.79
Valor <i>P</i>	0.024	0.644	0.281	0.018	0.826	0.546	0.018	0.826	0.546

Dentro de una variable de respuesta, medias con una letra en común no son significativamente diferentes ( $P > 0.05$ ) conforme a la prueba LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

## 4.6 DISCUSIÓN

Los diferentes niveles de luz utilizados en esta investigación modificaron la morfología, eficiencia fotosintética, estatus nutricional, concentración de carbohidratos y crecimiento de plantas de *C. alata* y *E. cyclocarpum* durante su etapa de vivero. Ante condiciones heterogéneas de luz, las plantas, según su grado de plasticidad fenotípica y capacidad de aclimatación, suelen exhibir modificaciones morfológicas y fisiológicas para utilizar eficientemente este recurso (Valladares *et al.* 2004, Valladares & Niinemets 2008, Mathur *et al.* 2018); de ese modo, los cambios que las plantas de *C. alata* y *E. cyclocarpum* experimentaron, principalmente en las variables morfológicas medidas, sugieren una capacidad de ajuste para aprovechar la luz eficientemente cuando su disponibilidad es heterogénea, como una posible estrategia para optimizar la fotosíntesis (Mathur *et al.* 2018). En este sentido, similar a lo registrado en dos especies de *Dalbergia* (Barros *et al.* 2012), las plantas de *C. alata* y *E. cyclocarpum* en niveles de luz bajos, mostraron un ajuste plástico para interceptar mayor cantidad de luz mediante el incremento del área foliar específica y la relación de área foliar, mientras que en niveles de luz altos, estas desarrollaron aparentemente una estrategia de foto-protección incrementando la densidad o el grosor de las hojas (menor área foliar específica) (Robakowski 2016) y reduciendo la superficie foliar expuesta a la luz (Alves *et al.* 2002). De acuerdo con dos Anjos *et al.* (2015), los ajustes morfológicos en las hojas son una de las respuestas funcionales clave que determinan la plasticidad fotosintética de las plantas a la luz. Especies con una plasticidad fotosintética elevada tienen ventajas competitivas por luz y otros recursos necesarios para la fotosíntesis, contra aquellas de menor plasticidad (Robakowski 2016). Asimismo, otras variables morfológicas expresaron una capacidad de ajuste de las plantas para utilizar la luz más eficientemente cuando su disponibilidad fue baja. Por ejemplo, *E. cyclocarpum* incrementó la altura y promovió una mayor producción de biomasa en la parte aérea a costa de la asignada en la raíz ante la restricción de luz, esto como un mecanismo para aumentar el tamaño del aparato fotosintético y así captar mejor este recurso (Guzmán Q. *et al.* 2016). Este comportamiento coincide con el reportado en *Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex DC.) Standl. (Endres *et al.* 2010) y en *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Will.) M. C. Johnst. (Basave-Villalobos *et al.* 2017).

En *C. alata*, niveles altos de luz favorecieron su crecimiento, de ahí que con 70 % de PAR se mejoró la morfología de las plantas a nivel de hojas, tallo y raíz. En contraste, poca luz redujo significativamente su crecimiento. Otra especie de *Crescentia* (*Crescentia cujete* L.) también incrementa su calidad morfológica cuando crece en un ambiente de luminosidad alta y no de sombra (Piña & Arboleda 2010). La sombra es considerada como un estrés que limita la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas (Valladares *et al.* 2004), al grado que sólo producen una fracción de la biomasa total comparado con aquellas creciendo con mayor luz (Mathur *et al.* 2018). Para *C. alata*, setenta por ciento de PAR fue suficiente para promover una eficiencia fotosintética mayor, que explica, en parte, las mayores tasas de crecimiento en esta condición de luz. Khurana & Singh (2001) refieren que las especies forestales del trópico seco alcanzan elevadas tasas de crecimiento y de asimilación neta en niveles de luz altos. Esta idea se sustenta con los resultados del presente estudio y con lo presentado en *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (Naves *et al.* 2018). La capacidad de las especies demandantes de luz para mantener tasas elevadas de crecimiento y de fotosíntesis suele atribuirse a la habilidad que tienen para mantener un balance positivo de carbono en condiciones de elevada radiación solar (Hall 2018). Para ello, las plantas modulan estrategias para maximizar su fotosíntesis, en parte, incrementando la eficiencia del fotosistema II (PSII). Esto permite utilizar la energía abundante de la luz, al tiempo que ejecutan mecanismos para evitar fotoinhibición y estrés oxidativo (Mathur *et al.* 2018). Conveniente es que estudios posteriores diluciden a mayor detalle la plasticidad fotosintética y vulnerabilidad de fotoinhibición de *C. alata* y *E. cyclocarpum*. Por ello, sería factible analizar diversos parámetros fotosintéticos con un enfoque similar a los trabajos de Calzavara *et al.* (2017) y Cerqueira *et al.* (2018), involucrando plantas creciendo bajo un tratamiento de luz solar completa o 100 % de PAR, condición que no fue posible explorar en este estudio, debido a que el experimento se realizó en un invernadero cuya cubierta no permitió una exposición completa a la luz solar.

Por otra parte, las respuestas en el estatus nutrimental por efecto de los niveles de luz, en lo general pueden explicarse por la influencia que la luz tiene en la disponibilidad de otros recursos, en este caso nutrientes (Baligar *et al.* 2020). En plantas de *C. alata*, a medida que incrementó la cantidad de luz se aumentó el contenido y la eficiencia en el consumo de nitrógeno y fósforo, al punto que con 70 % de PAR se tuvieron las plantas con el mejor estado nutrimental de ambos elementos.

Hay una relación estrecha entre la asimilación de nutrientes y carbono mediante la fotosíntesis, así que la adquisición de nutrientes, su transporte dentro de las plantas y su asimilación en compuestos orgánicos, están determinados por la eficiencia con la que las plantas usen los nutrimentos para su fotosíntesis (Hiremath 2000, Berendse *et al.* 2007). Para *E. cyclocarpum*, las respuestas en el estado nutrimental fueron diferentes a las de *C. alata*. El estatus del nitrógeno no mejoró en los niveles de mayor luz sino en los de menores. Los valores más altos en concentración, contenido y eficiencia en el consumo del nutrimento encontrados en plantas creciendo solo con 25 % de PAR, sugiere que en luz elevada probablemente se limitó la capacidad fotosintética de las plantas por posibles efectos de fotoinhibición, y, por ende, la capacidad de asimilar los nutrientes. Esta respuesta es demostrada en *Chrysophyllum sanguinolentum* (Pierre) Baehni (Santos *et al.* 2006). Sin embargo, la falta de diferencias estadísticas en la tasa de asimilación neta y la ausencia de evaluaciones de parámetros precisos asociados con la eficiencia del PSII como se señala en párrafos anteriores, no da sustento suficiente a la hipótesis de efectos negativos por fotoinhibición. Otra posible explicación, aunque también no concluyente, es que la cantidad de luz pudo haber afectado el estado hídrico de las plantas. Las pérdidas de agua por transpiración podrían haber sido mayores en aquellas sometidas a niveles mayores de PAR. Dado que la asimilación de nutrientes en las plantas depende también del estado hídrico (Müller *et al.* 2017), es probable que las plantas expuestas a una cantidad de luz mayor sufrieron episodios de estrés hídrico, lo que limitó su capacidad para aprovechar los nutrientes suministrados, y aunque se procuró mantener el mismo contenido de humedad en el sustrato mediante riegos frecuentes y uniformes, probablemente las plantas con mayor sombreado no experimentaron déficit de agua y ello les permitió aprovechar mejor el fertilizante. Por último, una tercera hipótesis es que en condiciones de sombra las plantas incrementaron sus contenidos de clorofila, lo cual permite aumentar la eficiencia para capturar la luz cuando su disponibilidad es baja (Rozendaal *et al.* 2006), y, debido a esto, fue prioritario invertir mayor concentración de nitrógeno a medida que la cantidad de luz recibida por las plantas fue menor. Esta explicación se sustenta al corroborar los valores mayores en el área foliar específica y en la relación de área foliar de las plantas expuestas a mayor sombreado, ya que esto está asociado con un incremento en el contenido de clorofila (Poorter *et al.* 2000).

En relación con los carbohidratos totales, la concentración mayor en hojas de plantas de *E. cyclocarpum* que crecieron en el nivel menor de luz sugiere que esta condición favoreció la

formación de reservas y almacenamiento de los recursos, aspecto que también ocurrió con el nitrógeno. Este efecto suele darse cuando las tasas de adquisición son altas y el crecimiento es lento, puesto que a menudo el crecimiento compite por recursos con el almacenamiento (Chapin *et al.* 1990). Sin embargo, el crecimiento de las plantas del 25 % de PAR fue estadísticamente similar al de las demás plantas. Este comportamiento sugiere que otras características, por ejemplo, la asignación elevada de biomasa foliar propició una mejor eficiencia fotosintética en las plantas aunado a su mejor estado de nitrógeno, el cual es uno de los principales elementos involucrados en la fotosíntesis como un componente de enzimas fotosintéticas y clorofila (Chapin 1980). Almacenar reservas de carbohidratos incrementa la probabilidad de supervivencia de las plantas durante periodos de estrés. Ellas pueden disponer de recursos durante episodios de balance negativo de carbono y limitada disponibilidad de nutrientes del suelo (Lambers *et al.* 2008). Este efecto tiene implicaciones importantes para la producción de planta en vivero. El manejo de la luz puede implementarse como una práctica cultural con la que se manipule la calidad fisiológica de las plantas, pues el contenido de carbohidratos es un atributo determinante en el desempeño de las plantaciones (Cetina-Alcalá *et al.* 2001).

Finalmente, al comparar las respuestas de *C. alata* contra las de *E. cyclocarpum* es notable que las especies difieren en su requerimiento de luz, a pesar de que ambas demandan niveles altos de esta. *E. cyclocarpum* creció mejor en niveles entre 35 % y 55 % de PAR, mientras que en *C. alata*, 70 % de PAR fue la cantidad de luz que favoreció su crecimiento. Esta divergencia coincide con lo reportado con *Dalbergia nigra* y *Dalbergia miscolobium*, especies que aunque incluso son del mismo género, difieren en sus requerimientos de luz (Barros *et al.* 2012). Estas diferencias se atribuyen a la influencia de la interacción de otros factores ambientales que afectan el crecimiento de las plantas (Valladares *et al.* 2004). Sin embargo, enfocándose sólo en la luz, es relevante la capacidad alta de aclimatación de plantas demandantes de luz, de las cuales hay especies como *Cedrela fissilis* Vell. que tienen una capacidad elevada de prosperar tanto en sombra como en completa luz (Sanches *et al.* 2017). Probablemente, *E. cyclocarpum* tenga un comportamiento similar al de *C. fissilis* y la falta de diferencias estadísticas en la mayoría de las variables evaluadas se atribuya a su capacidad de prosperar en ambientes heterogéneos de luz. Esta especie se encuentra en etapas intermedias y avanzadas de sucesión secundaria tanto en selvas bajas caducifolias como en medianas subcaducifolias, siempre y cuando haya claros que favorezcan su reclutamiento (Laborde & Corrales-Ferrayola 2012). En cambio, *C. alata* por ser una especie de

sabana prefiere niveles altos de luz y de ahí los mejores resultados reportados en plantas del 70 % de PAR.

#### 4.7 CONCLUSIONES

En conclusión, los cambios morfológicos y fisiológicos que cada especie presenta contribuyen a definir mejores estrategias de producción y manejo, tanto en vivero como en plantación. En vivero, el manejo de la luz tiene potencial como práctica cultural para producir planta de calidad. *C. alata* puede producirse en vivero y establecerse en campo en condiciones de alta irradiancia, mientras que para *E. cyclocarpum* es crucial que en vivero se utilice malla sombra durante su producción. *C. alata* es una especie idónea para reforestar campos abiertos sin cobertura vegetal, pero *E. cyclocarpum* podría requerir plantas nodrizas o que se establezca en plantaciones de enriquecimiento con la presencia de cobertura vegetal para que tenga sombra durante las etapas iniciales de la plantación.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Los regímenes de fertilización diseñados a partir de materiales de liberación controlada e hidrosoluble tienen potencial para mejorar la calidad morfológica y fisiológica de plantas de *P. dulce* durante la etapa de vivero. Particularmente, esta condición se logra con la adición de 8 g de fertilizante de liberación controlada Multicote (8)<sup>®</sup> 18-6-12 y fertilizante hidrosoluble 20-20-20 (Peters Professional<sup>®</sup> Special Purpose) en una concentración base de nitrógeno de 150 mg L<sup>-1</sup>.
- La poda aérea no mejora la calidad morfológica de plantas de *C. coriaria*, por lo que no es recomendable como práctica cultural para producir plantas de esta especie en vivero.
- El manejo de la luz en vivero tiene potencial como práctica cultural para mejorar la calidad de planta de *Pithecellobium dulce*. Un nivel de 60 % de PAR en vivero mejora la morfología, la eficiencia fotosintética y el crecimiento de las plantas de *P. dulce* en vivero lo que se traduce en un incremento de su calidad morfológica y fisiológica.
- En *C. alata* y *E. cyclocarpum* vivero, el manejo de la luz también tiene potencial como práctica cultural para producir planta de calidad. *C. alata* puede producirse en vivero y establecerse en campo en condiciones de alta irradiancia, mientras que para *E. cyclocarpum* es crucial que en vivero se utilice malla sombra durante su producción. *C. alata* es una especie idónea para reforestar campos abiertos sin cobertura vegetal, pero *E. cyclocarpum* podría requerir plantas nodrizas o que se establezca en plantaciones de enriquecimiento con la presencia de cobertura vegetal para que tenga sombra durante las etapas iniciales de la plantación.
- El análisis del efecto de las prácticas culturales en vivero contribuye a generar y definir mejores estrategias de producción y manejo, tanto en vivero como en plantación, en las especies forestales nativas de la selva baja caducifolia, para su uso en proyectos de reforestación o restauración ecológica en el trópico seco.

## LITERATURA CITADA

- Benítez, G., Equihua, M., & Pulido S. M. T. (2002). Diagnóstico de la situación de los viveros oficiales de Veracruz y su papel para apoyar programas de reforestación y restauración. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 8(1), 51-2.
- Bonfil, C., & Trejo, I. (2008). Plant propagation and the ecological restoration of Mexican Tropical Deciduous Forests. *Ecological Restoration*, 28(3), 369-376. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.369>
- Ceballos G., Martínez, L., García, A., Espinoza, E., Bezaury-Creel, J., & Dirzo, R. (2010). *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del pacífico de México* (1ª ed.). México, D.F.: Fondo de Cultura Económica-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Cervantes-Sánchez, M. A., & Sotelo-Boyas, M. E. (2002). *Guías técnicas para la propagación sexual de diez especies latifoliadas de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos*. Publicación Especial 30. México: INIFAP-SAGARPA, Campo Experimental Zacatepec.
- Evaluación de los Ecosistema del Milenio [EEM]. (2005). *Ecosistemas y bienestar humano: Síntesis sobre Desertificación*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe Nacional México*. Roma, Italia: FAO.
- Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43, 711-738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S., & MacDonald, J. (2018). Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. *Forests*, 9(5), 283. <https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Janzen, D. (1988). Tropical dry forests: The most endangered major tropical ecosystem. *Biodiversity*. 130-137. En E. O. Wilson (Ed.), *Biodiversity* (pp. 130-137). Washington: National Academic Press.
- Orozco, G. G., Muñoz, F. H. J., Rueda, S. A., Sigala, J. A., Prieto, J. A., & García, M. J. (2010). Diagnóstico de la calidad de planta en los viveros forestales del estado de Colima. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2): 134-145.
- Rose, R., & Hasse, D. L. (1995). The target seedling concept: implementing a program. En T. D. Landis, B. Cregg (Tech. Coord.) *National Proceedings, Forest and Conservation Nursery Associations-1995*. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-365 (pp. 124-130). Portland, OR: USDA-Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E. & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21-35.



Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente, J. Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S., Maza, J., Pisanty, I., Urquiza-Haas, T., Gonzalez, S., & Méndez, G. (2017). *Capital natural de México. Síntesis: evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Secretaría de Economía. (2016). *Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016. Certificación de la Operación de Viveros Forestales*. México: Comisión Nacional Forestal.

Vallejo, V. R., Smanis, A., Chirino, E., Fuentes, D., Valdecantos, A., & Vilagrosa, A. (2012). Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forests*, 43, 561-579. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9325-9>

## CAPÍTULO I

Basave Villalobos, E., Cetina Alcalá, V. M., López López, M. A., Aldrete, A., & Del Valle Paniagua, D. H. (2015). Nursery practices increase seedling performance on nutrient-poor soils in *Swietenia humilis*. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 8(4), 552-557. <https://doi.org/10.3832/ifor1179-007>

Basave Villalobos, E., López López, M. Á., Cetina Alcalá, V. M., Aldrete, A., & Almaraz Suárez, J. J. (2014). Prácticas culturales en vivero que influyen en la calidad de planta de *Enterolobium cyclocarpum*. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 301-309. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300005>

Berendse, F., de Kroon, H., & Braakhekke, W. G. (2007). Acquisition, use, and loss of nutrients. En F. I. Pugnaire & F. Valladares (Eds.), *Functional Plant Ecology* (2 nd ed., pp. 259-283). Boca Raton FL: CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420007626.ch8>

Birchler, T., Rose, R., Royo, A., & Pardos, M. (1998). La planta ideal: Revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 7, 1-10.

Bonfil, C., & Trejo, I. (2010). Plant propagation and the ecological restoration of Mexican tropical deciduous forests. *Ecological Restoration*, 28(3), 369-376. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.369>

Calixto, C. G., López, M. A., Equihua, A., Lira, D. E., & Cetina, V. M. (2015). Crecimiento de *Cedrela odorata* e incidencia de *Hypsipyla grandella* en respuesta al manejo nutrimental. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 265-273. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002015000200012>

Carpenedo Aimi, S., Machado Araujo, M., Benítez León, E., Gomez de Oliveira, G., & da Silva Cunha, F. (2016). Volumen de contenedores y dosis de fertilizante de liberación controlada en el crecimiento de plantas de *Cabralea canjerana* producidas en vivero. *Bosque (Valdivia)*, 37(2), 401-407. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000200018>

Chirino, E., Vilagrosa, A., Cortina, J., Valdecantos, A., Fuentes, D., Trubat, R., Luis, V. C., Simón,

- J. P., Bautista, S., Baeza, J., Peñuelas, J. L., & Vallejo, V. R. (2009). Ecological restoration in degraded drylands: the need to improve the seedling quality and site conditions in the field. En S. P. Grossberg (Ed.), *Forest Management* (pp. 85-158). Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers.
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2014). *Monitoreo de Restauración Forestal y Reconversión Productiva 2014*. Zapopan: CONAFOR.
- Cortina, J., Vilagrosa, A., & Trubat, R. (2013). The role of nutrients for improving seedling quality in drylands. *New Forests*, *44*(5), 719-732. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9379-3>
- Diario Oficial de la Federación [DOF]. (2016). Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI2016. Certificación de la Operación de Viveros Forestales. Secretaría de Economía. Comisión Nacional Forestal. México, D.F., México. 172 p. Recuperado de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5464460&fecha=07/12/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464460&fecha=07/12/2016)
- Di Rienzo, J. A., Casanoves F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2012). InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar> (16/10/ 2019).
- Escamilla-Hernández, N., Obrador-Olán, J. J., Carrillo-Ávila, E., & Palma-López, D. J. (2015). Uso de fertilizantes de liberación controlada en plantas de Teca (*Tectona grandis*), en la etapa de vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *38*(3), 329-333.
- Fernández N., R., Rodríguez J., C., Arreguín S., M. L. & Rodríguez J., A. (1998). Listado florístico de la cuenca del Río Balsas, México. *Polibotánica*, *9*, 1-151. Recuperado de <http://www.polibotanica.mx/pdf/pb9/ListadoBalsas.pdf>
- F. Stuart, C. I. (1980). The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *11*, 233-260.
- F. Stuart, C. I., Ernst-Detlef, S., & Harold A., M. (1990). The ecology and economics of storage in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *21*, 423-447.
- Freitas, E. C. S. de, Paiva, H. N. de, Leite, H. G., & Oliveira Neto, S. N. de. (2017). Effect of phosphate fertilization and base saturation of substrate on the seedlings growth and quality of *Plathymenia foliolosa* Benth. *Revista Árvore*, *41*(1), 1-9. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000100011>
- Global Forest Watch. (2019). "Tree Cover Loss in Mexico". Accessed on 10/16/2019 from [www.globalforestwatch.org](http://www.globalforestwatch.org).
- Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, *43*(5-6), 711-738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S., & MacDonald, J. (2018). Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. *Forests*, *9*(5), 283. <https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Haase, D. L., & Rose, R. (1995). Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. *Forest Science*, *41*(1), 54-66.

- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., & Askew, A. P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*, 90(4), 485-488. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf214>
- López-López, M. Á., & Alvarado-López, J. (2010). Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera Bosques*, 16(1), 99-108.
- Luis, V. C., Puértolas, J., Climent, J., Peters, J., González-Rodríguez, Á. M., Morales, D., & Jiménez, M. S. (2009). Nursery fertilization enhances survival and physiological status in Canary Island pine (*Pinus canariensis*) seedlings planted in a semiarid environment. *European Journal of Forest Research*, 128(3), 221-229. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0257-7>
- Olivares-Pérez, J., Avilés-Nova, F., Albarrán-Portillo, B., Rojas-Hernández, S., & Castelán-Ortega, O. A. (2011). Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 739-748.
- Oliet, J. A., Puértolas, J., Planelles, R., & Jacobs, D. F. (2013). Nutrient loading of forest tree seedlings to promote stress resistance and field performance: A Mediterranean perspective. *New Forests*, 44(5), 649-669. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9382-8>
- Oliet, J., Segura, M. L., Dominguez, F. M., Blanco, E., Serrada, R., Lopez, M., & Artero, F. (1999). Los fertilizantes de liberación controlada lenta aplicados a la producción de planta forestal de vivero. Efecto de dosis y formulaciones sobre la calidad de *Pinus halepensis* mill. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 8(1), 207-228.
- Palma García, J. M., & González-Rebeles Islas, C. (2018). *Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable*. (J. M. Palma García & C. González-Rebeles Islas, Eds.). Colima: Universidad de Colima. Recuperado de [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales\\_462.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales_462.pdf)
- Pasquini, S. C., & Santiago, L. S. (2012). Nutrients limit photosynthesis in seedlings of a lowland tropical forest tree species. *Oecologia*, 168(2), 311-319. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-2099-5>
- Reyes, G. D. J., Prieto Ruíz, J. Á., Vazquez Cisneros, I., López López, M. Á., Hernández Díaz, J. C., & Chávez Simental, J. A. (2018). Alternativas de fertilización para producir *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.175>
- Rose, R., Haase, D. L., & Arellano, E. (2004). Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque (Valdivia)*, 25(2), 89-100. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002004000200009>
- Rossa, Ü. B., Angelo, A. C., Westphalen, D. J., Oliveira, F. E. M. de, Silva, F. F. da, & Araujo, J. C. de. (2015). Fertilizante de liberação lenta no desenvolvimento de mudas de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. (Angico-Vermelo) e *Schinus terebinthifolius* Raddi

(Aroeira-Vermelha). *Ciência Florestal*, 25(4), 413-421.  
<https://doi.org/10.5902/1980509820582>

- Soares, C. B., Freitas, E. C. S. de, Paiva, H. N. de, & Neves, J. C. L. (2017). Nitrogen sources and doses on growth and quality of seedlings of *Cassia grandis* and *Peltophorum dubium*. *Revista Árvore*, 41(2). <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000200014>
- Timmer, V. R. (1997). Exponential nutrient loading: A new fertilization technique to improve seedling performance on competitive sites. *New Forests*, 13(1-3), 279-299. <https://doi.org/10.1023/A:1006502830067>
- Uscola, M., Salifu, K. F., Oliet, J. A., & Jacobs, D. F. (2015). An exponential fertilization dose-response model to promote restoration of the Mediterranean oak *Quercus ilex*. *New Forests*, 46(5-6), 795-812. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9493-5>
- Villar-Salvador, P., Peñuelas, J. L., Nicolás-Peragón, J. L., Benito, L. F., & Domínguez-Lerena, S. (2013). Is nitrogen fertilization in the nursery a suitable tool for enhancing the performance of Mediterranean oak plantations? *New Forests*, 44(5), 733-751. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9374-8>
- Villar-Salvador, P., Puértolas, J., Cuesta, B., Peñuelas, J. L., Uscola, M., Heredia-Guerrero, N., & Rey Benayas, J. M. (2012). Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations. Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests*, 43(5-6), 755-770. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9328-6>
- Wilkinson, K. M., Landis, T. D., Haase, D. L., Daley, B. F., & Dumroese, R. K. (2014). *Tropical Nursery Manual- A Guide to Starting and Operating a Nursery for Native and Traditional Plants*. En K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley, & R. K. Dumroese, (Eds.), *Agriculture Handbook: 732*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.

## CAPÍTULO II

- Basave-Villalobos, E., Rosales-Mata, S., Sigala-Rodríguez, J. Á., Calixto-Valencia, C. G., & Sarmiento-López, H. (2017). Cambios morfo-fisiológicos de plántulas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. ante diferentes ambientes de luz en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 112-131. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.107>
- Basave Villalobos, E., Cetina Alcalá, V. M., López López, M. A., Aldrete, A., & Del Valle Paniagua, D. H. (2015). Nursery practices increase seedling performance on nutrient-poor soils in *Swietenia humilis*. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 8, 552-557. <https://doi.org/10.3832/ifor1179-007>.
- Basave Villalobos, E., López López, M. Á., Cetina Alcalá, V. M., Aldrete A., & Almaraz Suárez, J. J. (2014). Prácticas culturales en vivero que influyen en la calidad de planta de

- Enterolobium cyclocarpum*. *Bosque (Valdivia)*, 35(3), 301-309. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000300005>.
- Birchler, T., Rose, R., Royo, A., & Pardos, M. (1998). La planta ideal: Revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 7(1-2), 110-121.
- Bonfil, C., & Trejo, I. (2010). Plant propagation and the ecological restoration of Mexican tropical deciduous forests. *Ecological Restoration*, 28 (3), 369-376. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.369>.
- Burney, O., Aldrete, A., Álvarez Reyes, R., Prieto Ruíz, J. A., Sánchez Velázquez J. R., & Mexal J. G. (2015). México—Addressing Challenges to Reforestation. *Journal of Forestry*, 113 (4), 404–413. <https://doi.org/10.5849/jof.14-007>.
- Cavins, T. J., Whipker, B. E., & Fonteno, W. C. (2008). Pourthru: a method for monitoring nutrition in the greenhouse. *Acta Horticulturae*, 779, 289-298. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.779.35>.
- Cervantes, M., Ceccon, E., & Bonfil, C. (2014). Germination of stored seeds of four tree species from the tropical dry forest of Morelos, Mexico. *Botanical Sciences*, 92(2), 281-287. <https://doi.org/10.17129/botsci.96>
- Cetina-Alcalá, V. M., González-Hernández, V. A., Ortega-Delgado, M. L., Vargas-Hernández J. J., & Villegas-Monter, Á. (2002). Supervivencia y crecimiento en campo de *Pinus greggii* Engelm. previamente sometido a podas o sequía en vivero. *Agrociencia*, 36(2), 233-241.
- Cetina-Alcalá, V. M., Ortega-Delgado, M. L., González-Hernández, V. A., Vargas-Hernández J. J., Colinas-León M. T., & Villegas-Monter, A. (2001). Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm. en respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. *Agrociencia*, 35(6), 599-607.
- Cline, M. G., & Harrington, C. A. (2007). Apical dominance and apical control in multiple flushing of temperate woody species. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(1), 74-83. <https://doi.org/10.1139/x06-218>
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2014). *Monitoreo de Restauración Forestal y Reconversión Productiva 2014*. Zapopan: Comisión Nacional Forestal.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2012). InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar> (16/10/ 2019).
- Donoso, P. J., Soto, D. P. & Gerding, V. (2009). Efectos de la poda de tallo y fertilización de liberación controlada en vivero sobre el comportamiento de plántulas de *Nothofagus nervosa* en terreno. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 48-53. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002009000100007>.
- Esen, D., Yildiz, O., Esen, U., Edis, S., & Çetintas, C. (2012). Effects of cultural treatments, seedling type and morphological characteristics on survival and growth of wild cherry

- seedlings in turkey. *iForest–Biogeosciences and Forestry*, 5, 283-289. <https://doi.org/10.3832/ifor0639-005>.
- Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5–6), 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S., & MacDonald, J. (2018). Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. *Forests*, 9(5), 283. <https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Kabeya, D., & Sakai, S., (2005). The relative importance of carbohydrate and nitrogen for the resprouting ability of *Quercus crispula* seedlings. *Annals of Botany*, 96(3), 479-488. <https://doi.org/10.1093/aob/mci200>.
- Kitajima, K. (2007). Seed and Seedling Ecology. En F. I. Pugnaire, & F. Valladares (Eds.), *Functional Plant Ecology* (2 nd ed., pp. 549-566). Boca Raton FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420007626.ch8>
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. New York, USA: Springer-Verlag.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B. (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1654-1663. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>.
- Nabity, P. D., Zavala, J. A., & DeLucia, E. H. (2009). Indirect suppression of photosynthesis on individual leaves by arthropod herbivory. *Annals of Botany*, 103(4), 655-663. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn127>.
- Ngulube, M. R. (1989). Seed germination, seedling growth and biomass production of eight Central-American multipurpose trees under nursery conditions in Zomba, Malawi. *Forest Ecology and Management*, 27(1), 21-27. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90079-0](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90079-0).
- Olivares-Pérez, J., Avilés-Nova, F., Albarrán-Portillo, B., Rojas-Hernández, S. & Castellán-Ortega, O. A. (2011). Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 739-748.
- Orozco Gutiérrez, G., Muñoz Flores, H. J., Rueda Sánchez, A., Sígala Rodríguez, J. Á., Prieto Ruiz, J. Á., & García Magaña, J. J. (2010). Diagnóstico de la calidad de planta en los viveros de Colima. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 135-146. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i2.641>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody Plants* (3 rd ed.). Burlington, MA, USA: Academic Press.
- Palma García, J. M., & González-Rebeles Islas, C. (2018). *Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable*. En J. M. Palma García & C. González-Rebeles Islas (Eds.), Colima: Universidad de Colima. Recuperado de [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales\\_462.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales_462.pdf)

- Prieto Ruiz, J. Á., Rosales Mata, S., Sigala Rodríguez, J. Á., Madrid Aispuro, R. E., & Mejía Bojorques, J. M. (2012). Producción de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl ex Wild.) M. C. Johnst. con diferentes mezclas de sustrato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(20), 50-57. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i20.369>
- Riikonen, J., & Luoranen, J. (2018). Seedling Production and the Field Performance of Seedlings. *Forests*, 9, 740. <https://doi.org/10.3390/f9120740>.
- South, D. B. (2016). Top Pruning of Bareroot Hardwood Seedlings. *Tree Planters' Notes*, 59(2), 37-48.
- Tsakalimi, M., Ganatsas P., & Jacobs, D. F. (2013). Prediction of planted seedling survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology. *New Forests*, 44, 327-339. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9339-3>.
- Umeki, K., Kawasaki, M., Shigyo, N., & Hirao, T. (2018). Inter- and intraspecific patterns in resprouting of trees in undisturbed natural forests along an elevational gradient in Central Japan. *Forests*, 9(11), 672. <https://doi.org/10.3390/f9110672>.
- Vesk, P. A. (2006). Plant size and resprouting ability: Trading tolerance and avoidance of damage? *Journal of Ecology*, 94(5), 1027-1034. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01154.x>.
- Von Fircks, Y., & Sennerby-Forsse L. (1998). Seasonal fluctuations of starch in root and stem tissues of coppiced *Salix viminalis* plants grown under two nitrogen regimes. *Tree Physiology*, 18(4), 243-249. <https://doi.org/10.1093/treephys/18.4.243>.
- Wade, G., & Westerfield, R. (2009). *Basic principles of pruning woody plants*. Bulletin 949. GA, USA: University of Georgia Extension. Recuperado de <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=B949&title=Basic%20Principles%20of%20Pruning%20Woody%20Plants>
- Wilson, B. F. (2000). Apical control of branch growth and angle in woody plants. *American Journal of Botany*, 87(5), 601-607. <https://doi.org/10.2307/2656846>.
- Zida, D., Tigabu, M., Sawadogo, L., & Odén, P. C. (2008). Initial seedling morphological characteristics and field performance of two Sudanian savanna species in relation to nursery production period and watering regimes. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2151-2162. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.029>.

### CAPÍTULO III

- Alves, P. L. da C. A., Magalhães, A. C. N., & Barja, P. R. (2002). The phenomenon of photoinhibition of photosynthesis and its importance in reforestation. *The Botanical Review*, 68(2), 193-208. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2002\)068\[0193:TPOPOP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2002)068[0193:TPOPOP]2.0.CO;2)
- Basave-Villalobos, E., Rosales-Mata, S., Sigala-Rodríguez, J. Á., Calixto-Valencia, C. G., & Sarmiento-López, H. (2017). Cambios morfo-fisiológicos de plántulas de *Prosopis*

- laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. ante diferentes ambientes de luz en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 112-131. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.107>
- Bonfil, C., & Trejo, I. (2010). Plant propagation and the ecological restoration of Mexican tropical deciduous forests. *Ecological Restoration*, 28 (3), 369-376. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.369>.
- Ceballos, G., Martínez, L., García, A., Espinoza, E., Bezaury-Creel, J., & Dirzo, R. (2010). *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las selvas secas del pacífico de México* (1ª ed.). México, D.F.: Fondo de Cultura Económica-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Cheng, A. X., Yu, M., Wang, G. G., Wu, T., & Zhang, C. (2013). Growth, morphology and biomass allocation in response to light gradient in five subtropical evergreen broadleaved tree seedlings. *Journal of Tropical Forest Science*, 25(4), 537-546. <http://www.jstor.org/stable/23616995>
- Close, D. C., Beadle, C. L., & Brown, P. H. (2005). The physiological basis of containerised tree seedling 'transplant shock': A review. *Australian Forestry*, 68(2), 112-120. <https://doi.org/10.1080/00049158.2005.10674954>
- Comisión Nacional Forestal [CONAFOR]. (2019). *Estado que guarda el Sector Forestal en México*. Jalisco, México: CONAFOR. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/1/7743Estado%20que%20Guarda%20el%20Sector%20Forestal%20en%20Mexico%202019.pdf>
- Fernández N., R., Rodríguez J., C., Arreguín S., M. L. & Rodríguez J., A. (1998). Listado florístico de la cuenca del Río Balsas, México. *Polibotánica*, 9, 1-151. Recuperado de <http://www.polibotanica.mx/pdf/pb9/ListadoBalsas.pdf>
- Filho, P. R. A., Gondim, F. A., & Costa, M. C. G. (2018). Seedling growth of tree species under doses of hydrogel and two levels of luminosity. *Revista Árvore*, 42(1). <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000100012>
- García, E., (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D.F: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, A. N. M., Méndez, E. K. M., Reyes, R. R., & Marín, C. R. H. (2015). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2013*. México: Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/324-NO.15-IMPACTOSOCIOECONMICODELOSPRINCIPALESDESASTRESOCURRIDOSENMXICOENELAO2013.PDF>
- Gong, H. D., Wang, H., Jiao, D. Y., Cai, Z. Q. (2016). Phenotypic plasticity of seedlings of five tropical tree species in response to different light and nutrient availability. *Tropical Ecology*, 57(4), 727-737.



- Grossnickle, S., MacDonald, J. (2018). Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes. *Forests*, 9(5), 283. <https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Guzmán, Q. J. A., Cordero, S. R. A., Core, A. E. (2016). Biomass allocation and gas exchange are affected by light conditions in endangered *Cedrela salvadorensis* (Meliaceae) seedlings. *Revista de Biología Tropical*, 64(3), 1143-1154. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i3.19606>
- Hunt, R. (1990). *Basic growth analysis: plant growth analysis for beginners*. London, United Kingdom: Unwin Hyman.
- InfoStat. (2008). InfoStat versión 2008. Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Kaplan, E. L., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*. 53(282), 457-481. <https://doi.org/10.2307/2281868>.
- Kelly, J., Jose, S., Nichols, J. D., & Bristow M. (2009). Growth and physiological response of six Australian rainforest tree species to a light gradient. *Forest Ecology and Management*, 257(1), 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.008>
- Kenzo, T., Yoneda, R., Matsumoto, Y., Azani, A. M., & Majid, M. N. (2011). Growth and photosynthetic response of four Malaysian indigenous tree species under different light conditions. *Journal of Tropical Forest Science*, 23 (3), 271–281.
- Khurana, E., & Singh, J. S. (2001). Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest : a review. *Environmental Conservation*, 28(01), 39-52. <https://doi.org/10.1017/S0376892901000042>
- Lamb, D., Erskine, P. D., & Parrotta, J. A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, 310(5754), 1628-1632. <http://doi.org/10.1126/science.1111773>
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. New York, USA: Springer-Verlag.
- Masarovičová, E., Májeková, M., & Vykouková, I. (2016). Functional traits and plasticity of plants. En M. Pessaraki (Ed.), *Handbook of photosynthesis* (3rd ed. pp. 487-501). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Naves, V. L., Rambal, S., Barbosa, J. P. R. A. D., de Castro, E. M., & Pasqual, M. (2018). Recruitment niches of *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong: functional acclimations to light. *Forests*, 9(5), 1-21. <https://doi.org/10.3390/f9050266>
- Olivares-Pérez, J., Avilés-Nova, F., Albarrán-Portillo, B., Rojas-Hernández, S. & Castelán-Ortega, O. A. (2011). Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 739-748.
- Olson, D. M., & Dinerstein, E. (2002). The global 200: priority ecoregions for global conservation.

*Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89, 199-224.  
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677498>

- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody Plants* (3 rd ed.). Burlington, MA, USA: Academic Press.
- Palma García, J. M., & González-Rebeles Islas, C. (2018). *Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable*. En J. M. Palma García & C. González-Rebeles Islas (Eds.), Colima: Universidad de Colima. Recuperado de [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales\\_462.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales_462.pdf)
- Pimentel, B. L. (2009). *Producción de árboles y arbustos de uso múltiple*. México: Mundi Prensa México.
- Reis, S. M., Marimon-Júnior, B. H., Morandi, P. S., Oliveira-Santos, C., Oliveira, B. de, & Marimon, B. S. (2016). Desenvolvimento inicial e qualidade de mudas de *Copaifera langsdorffii* Desf. sob diferentes níveis de sombreamiento. *Ciência Florestal*, 26 (1), 11-20. <https://doi.org/10.5902/1980509821061>
- Riikonen, J., & Luoranen, J. (2018). Seedling production and the field performance of seedlings. *Forests*, 9(12), 740. <https://doi.org/10.3390/f9120740>
- Rodríguez-García, E., & Bravo, F. (2013). Plasticity in *Pinus pinaster* populations of diverse origins: comparative seedling responses to light and nitrogen availability. *Forest Ecology and Management*, 307, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.046>
- Statistical Analysis System [SAS]. 2009. SAS Version 9.2. Cary NC, USA: SAS Institute Inc.
- Tang, H., Hu, Y. Y., Yu, W. W., Song, L. L., & Wu, J. S. (2015). Growth, photosynthetic and physiological responses of *Torreya grandis* seedlings to varied light environments. *Trees - Structure and Function*, 29(4), 1011-1022. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1180-9>
- Vallejo, V. R., Smanis, A., Chirino, E., Fuentes, D., Valdecantos, A., & Vilagrosa, A. (2012). Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forests*, 43, 561-579. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9325-9>
- Yang, W., Liu, F., Zhou, L., Zhang, S., & An, S., (2013). Growth and photosynthetic responses of *Canarium pimela* and *Nephelium lappaceum* seedlings to a light gradient. *Agroforestry Systems*, 87(3), 507-516. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9570-0>

#### CAPÍTULO IV

- Aerts, R., & Honnay O. (2011). Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning. *BMC Ecology*, 11, 29.
- Alves, P. L. da C. A., Magalhães, A. C. N., & Barja, P. R. (2002). The phenomenon of photoinhibition of photosynthesis and its importance in reforestation. *The Botanical*

- Baligar, V. C., Elson, M. K., He, Z., Li, Y., Paiva, A. Q., Almeida, A. A. F., & Ahnert, D. (2020). Light Intensity effects on the growth, physiological and nutritional parameters of tropical perennial legume cover crops. *Agronomy*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101515>
- Barros, F. de V., Goulart, M. F., Telles, S. B. Sá, Lovato, M. B., Valladares, F., Lemos-Filho, J. P. (2012). Phenotypic plasticity to light of two congeneric trees from contrasting habitats: Brazilian Atlantic Forest versus cerrado (savanna). *Plant Biology*, 14, 208-215. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00474.x>
- Basave-Villalobos, E., Rosales-Mata, S., Sigala-Rodríguez, J. Á., Calixto-Valencia, C. G., & Sarmiento-López, H. (2017). Cambios morfo-fisiológicos de plántulas de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M. C. Johnst. ante diferentes ambientes de luz en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(44), 112-131. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i44.107>
- Berendse, F., de Kroon, H., & Braakhekke, W. G. (2007). Acquisition, use, and loss of nutrients. En F. I. Pugnaire & F. Valladares (Eds.), *Functional Plant Ecology* (2 nd ed., pp. 259-283). Boca Raton FL: CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420007626.ch8>
- Bonfil, C., & Trejo, I. (2010). Plant propagation and the ecological restoration of Mexican tropical deciduous forests. *Ecological Restoration*, 28(3), 369-376. <https://doi.org/10.3368/er.28.3.369>
- Calzavara, A. K., Rocha, J. S., Lourenço, G., Sanada, K., Medri, C., Bianchini, E., Pimenta, J. A., Stolf-Moreira, R., & Oliveira, H. C. (2017). Acclimation responses to high light by *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae) leaves at different stages of development. *Plant Biology*, 19, 720-727. <https://doi.org/10.1111/plb.12592>
- Cerqueira, A. F., Dalmolin, Â. C., dos Anjos, L., da Silva Ledo, C. A., da Costa Silva, D., & Mielke, M. S. (2018). Photosynthetic plasticity of young plants of *Carpotroche brasiliensis* (Raddi) A. Gray, Achariaceae. *Trees - Structure and Function*, 32, 191-202. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1623-6>
- Cetina-Alcalá, V. M., Ortega-Delgado, M. L., González-Hernández, V. A., Vargas-Hernández J. J., Colinas-León M. T., & Villegas-Monter, A. (2001). Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm. en respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. *Agrociencia*, 35(6), 599-607.
- Chapin, F. S. (1980). The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11, 233-260. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.11.110180.001313>
- Chapin, F. S., Schulze, E. D., & Mooney, H. A. (1990). The ecology and economics of storage in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21, 423-447. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.21.110190.002231>

- Di Rienzo, J. A., Casanoves F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C. W. (2012). InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar> (16/10/ 2019).
- DosAnjos, L., Oliva, M. A., Kuki, K., Mielke, M. S., Ventrella, M. C., Galvão, M. F., Pinto, L. M. R. (2015). Key leaf traits indicative of photosynthetic plasticity in tropical tree species. *Trees*, 29, 247-258. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1110-2>
- Endres, L., Câmara, C. A., Ferreira, V. M., Silva, J. V. (2010). Morphological and photosynthetic alterations in the Yellow-ipe, *Tabebuia chrysotricha* (Mart. Ex DC.) Standl., under nursery shading and gas exchange after being transferred to full sunlight. *Agroforestry Systems*, 78, 287-298. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9235-9>
- Gong, H. D., Wang, H., Jiao, D. Y., Cai, Z. Q. (2016). Phenotypic plasticity of seedlings of five tropical tree species in response to different light and nutrient availability. *Tropical Ecology*, 57(4), 727-737.
- Guzmán, Q. J. A., Cordero, S. R. A., Core, a A. E. (2016). Biomass allocation and gas exchange are affected by light conditions in endangered *Cedrela salvadorensis* (Meliaceae) seedlings. *Revista de Biología Tropical*, 64(3), 1143-1154. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i3.19606>
- Hall, A. E. (2018). Crop physiological responses to light, photosynthesis, and respiration. En A. E. Hall (Ed.), *Crop responses to environment-Adapting to Global Climate Change* (pp.37-62). Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315147130>
- Hiremath, A. J. (2000). Photosynthetic nutrient-use efficiency in three fast-growing tropical trees with differing leaf longevities. *Tree Physiology*, 20, 937-944. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.14.937>
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., & Askew, A. P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*, 90, 485-488. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf214>
- Kelly, J., Jose, S., Nichols, J. D., & Bristow M. (2009). Growth and physiological response of six Australian rainforest tree species to a light gradient. *Forest Ecology and Management*, 257(1), 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.008>
- Kenzo, T., Yoneda, R., Matsumoto, Y., Azani, A. M., & Majid, M. N. (2011). Growth and photosynthetic response of four Malaysian indigenous tree species under different light conditions. *Journal of Tropical Forest Science*, 23 (3), 271-281.
- Khurana, E., & Singh, J. S. (2001). Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest : a review. *Environmental Conservation*, 28(01), 39-52. <https://doi.org/10.1017/S0376892901000042>
- Laborde, J., & Corrales-Ferrayola, I. (2012). Direct seeding of *Brosimum alicastrum* SW. (Moraceae) and *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (Mimosaceae) in different habitats in the dry tropics of central Veracruz. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 107-134.

- Lamb, D., Erskine, P. D., & Parrotta, J. A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, *310*(5754), 1628-1632. <http://doi.org/10.1126/science.1111773>
- Lambers, H., Chapin, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. New York, USA: Springer-Verlag
- Lebrija-Trejos, E., Pérez-García, E. A., Meave, J. A., Poorter, L., & Bongers, F. (2011). Environmental changes during secondary succession in a tropical dry forest in Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, *27*, 477-489. <https://doi.org/10.1017/S0266467411000253>
- Masarovičová, E., Májeková, M., & Vykouková, I. (2016). Functional traits and plasticity of plants. En M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of photosynthesis* (3rd ed. pp. 487-501). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Mathur, S, Jain, L, & Jajoo, A. (2018). Photosynthetic efficiency in sun and shade plants. *Photosynthetica*, *56*, 354-365. <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0767-y>
- Müller, C., Hodecker, B. E. R., Merchant, A., de Barros, N. F. (2017). Nutritional efficiency of Eucalyptus clones under water stress. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *41*, e0160528. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160528>
- Naves, V. L., Rambal, S., Barbosa, J. P. R. A. D., de Castro, E. M., & Pasqual, M. (2018). Recruitment niches of *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong: functional acclimations to light. *Forests*, *9*(5), 1-21. <https://doi.org/10.3390/f9050266>
- Newton, A. C. (2008). Restoration of dryland forests in Latin America: The ReForLan project. *Ecological Restoration*, *26*, 10-13. <https://doi.org/10.3368/er.26.1.10>
- Palma García, J. M., & González-Rebeles Islas, C. (2018). *Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable*. En J. M. Palma García & C. González-Rebeles Islas (Eds.), Colima: Universidad de Colima. Recuperado de [http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales\\_462.pdf](http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales_462.pdf)
- Piña, M., & Arboleda, M. E. (2010). Efecto de dos ambientes lumínicos en el crecimiento inicial y calidad de plantas de *Crescentia cujete*. *Bioagro*, *22*, 61-66.
- Poorter, L., Kwant, R., Hernández, R., Medina, E., & Werger, M. J. A. (2000). Leaf optical properties in Venezuelan cloud forest trees. *Tree Physiology*, *20*, 519-526. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.8.519>
- Robakowski, P. (2016). Photosynthetic competition between forest trees. En M. Pessarakli M (Ed.), *Handbook of Photosynthesis* (pp. 475-486). Boca Raton FL: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372136>
- Rozendaal, D. M. A, Hurtado, V. H., & Poorter, L. (2006). Plasticity in leaf traits of 38 tropical tree species in response to light; relationships with light demand and adult stature. *Functional Ecology*, *20*, 207-216. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2006.01105.x>
- Sanches, M. C., Marzinek, J., Bragiola, N. G., Terra Nascimento, A. R. (2017). Morpho-

- physiological responses in *Cedrela fissilis* Vell. submitted to changes in natural light conditions: implications for biomass accumulation. *Trees - Structure and Function*, 31, 215-227. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1474-6>
- Santos, U. M. dos, Carvalho Gonçalves, J. F. de, & Feldpausch, T R. (2006). Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 226, 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.042>
- Torres, A. P, Lopez, R. G. (2016). *Medición de luz diaria integrada en invernaderos*, HO-238-SW. Purdue University. Recuperado de <https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/ho-238-sw.pdf>
- Uscola, M., Salifu, K. F., Oliet, J. A, Jacobs, D. F. (2015). An exponential fertilization dose-response model to promote restoration of the Mediterranean oak *Quercus ilex*. *New Forests*, 46, 795-812. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9493-5>
- Valladares, F., Aranda, I., & Sánchez-Gómez, D. (2004). La luz como factor ecologico y evolutivo para las plantas y su interaccion con el agua. En F. Valladares (Ed), *Ecología de bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (pp. 335-369). Madrid: Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Valladares, F., & Niinemets, Ü. (2008). Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39, 237-257. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506>