



UNSE

Universidad Nacional
de Santiago del Estero

La solarización del sustrato aumenta el crecimiento y el vigor de los plantines de *Eucalyptus camaldulensis*



María Verónica Parra

TESIS DOCTORAL

Facultad de Ciencias Forestales

Santiago del Estero, Argentina
2023



Parra, María Verónica

La solarización del sustrato aumenta el crecimiento y el vigor de los plantines de *Eucalyptus camaldulensis*: tesis doctoral: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero / María Verónica Parra. - 1a ed. - Santiago del Estero: Universidad Nacional de Santiago del Estero - UNSE. Facultad de Ciencias Forestales, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-8922-30-0

1. Eucaliptos. 2. Nutrición. 3. Especies Vegetales. I. Título.
CDD 634.973766



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO
Facultad de Ciencias Forestales



**La solarización del sustrato aumenta el
crecimiento y el vigor de los plantines de
*Eucalyptus camaldulensis***

TESIS
PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS FORESTALES

POR

María Verónica Parra

Ing. Agrónoma - Universidad Nacional de Santiago del Estero - 2001

Director de tesis: **Dr. Diego Ariel Meloni**

Santiago del Estero, Argentina.
Año 2023



**TÉRMINO DE APROBACIÓN
TESIS DOCTORAL**

En la ciudad de Santiago de Estero, a los 15 días del mes de agosto de 2023, siendo las 10:00 horas, se reúne en forma híbrida, mediante el uso de medios tecnológicos sincrónicos, el Tribunal de Tesis, constituido por los profesores: Dra. Katia Christina Zuffellato-Ribas (Departamento de Botánica-Universidad Federal de Paraná, Brasil – UFPR-Br.), Dra. Cecilia Inés Mónaco (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - Universidad Nacional de la Plata – FCAYF-UNLP), Dra. Amelia Nancy Giannuzzo (Facultad de Ciencias Forestales - Universidad Nacional de Santiago del Estero – FCF-UNSE), para evaluar la Tesis doctoral de la **Mg. Ing. Agr. María Verónica Parra**, DNI 22.747.195, en la Defensa convocada mediante Resolución FCF Nº 393/2023.

La Tesis para obtener el título de Doctora en Ciencias Forestales se denomina “La solarización del sustrato aumenta el crecimiento y el vigor de los plantines de *Eucalyptus camaldulensis*”, y fue dirigida por el Dr. Diego Ariel Meloni (Universidad Nacional de Santiago del Estero).

Después de evaluar la Tesis e interrogar a la doctoranda, el Jurado deliberó por la Aprobación, con la calificación: 10 (diez).

JURADO DE TESIS

Dra. Katia Christina Zuffellato-Ribas
UFPR-Br

Dra. Cecilia Inés Mónaco
UNLP

Dra. Amelia Nancy Giannuzzo
UNSE

Dra. María G. Sepiliani
SECRETARÍA DE POSGRADO
FCF - UNSE



DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A mis padres, Maribé y Pipí, quienes dedicaron mucho tiempo y esfuerzo para que pueda crecer sana, feliz, y me inculcaron los valores del trabajo, la responsabilidad y, sobre todo, me enseñaron a ser una mujer independiente.

A mi hijo Nico, quien desde hace 28 años se ha esmerado en hacerme desarrollar habilidades que nunca imaginé tener y es, sin duda alguna, mi mayor tesoro en esta aventura que es vivir.

AGRADECIMIENTOS

Una tesis es una construcción colectiva, el resultado del trabajo y del esfuerzo de muchas personas e instituciones. La culminación de esta tesis doctoral no hubiera sido posible sin su valiosa contribución en diversos aspectos, por lo que quiero expresarles mi sincero agradecimiento:

A la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) por brindarme la posibilidad de realizar el doctorado y concederme permiso para asistir a los cursos.

Al Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques de la FCF por proveerme de las semillas de *Eucalyptus* para los ensayos y del espacio físico para llevarlos a cabo.

Al Dr. Iván Crespo, quien facilitó mi estadía en la Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil.

Al Ing. Ftal. Claudio Jiménez, quien colaboró en la preparación de los sustratos y en la instalación del ensayo para la solarización.

A la Facultad de Agronomía y Agroindustrias (FAyA) y la Ing. Agr. Analía Anríquez, que me permitieron realizar los análisis de algunas propiedades biológicas en el Laboratorio de Microbiología de la FAyA.

Al Ing. Agr. Fernando Galizzi por sus desinteresados aportes en la interpretación de datos edafológicos.

Al Dr. Diego Meloni, Director de tesis, por su orientación y acompañamiento.

A mi profesor de Gramática Española, por su infinita paciencia y meticulosa ayuda en la revisión del texto.

A todas aquellas personas que me brindaron su aliento y apoyo permanentes.

Y creo que a nadie más...

ÍNDICE GENERAL

Capítulo	Tema	Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	La solarización	4
2.2	La solarización y el control de malezas	7
2.3	La solarización y el control de patógenos del suelo	8
2.4	Efectos de la solarización sobre el suelo y el crecimiento de las plantas	12
2.5	Bibliografía	15
3	EFFECTO DE LA SOLARIZACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS SUSTRATOS	23
3.1	Introducción	23
3.1.1	Propiedades físicas, químicas y biológicas	24
3.2	Materiales y métodos.....	30
3.2.1	Propiedades físicas	31
3.2.2	Propiedades químicas	31
3.2.3	Propiedades biológicas	32
3.2.4	Análisis estadístico	33
3.3	Resultados y discusión	34
3.3.1	Propiedades físicas	34
3.3.1.1	Temperatura	34
3.3.1.2	Densidad aparente	35
3.3.1.3	Porosidad total	36
3.3.2	Propiedades químicas	38

3.3.2.1	pH	38
3.3.2.2	Conductividad eléctrica	39
3.3.2.3	Materia orgánica	40
3.3.2.4	Nitrógeno total	42
3.3.2.5	Relación Carbono : Nitrógeno	42
3.3.2.6	Potasio intercambiable	43
3.3.2.7	Calcio intercambiable	44
3.3.2.8	Magnesio y sodio intercambiables	45
3.3.2.9	Fósforo	47
3.3.2.10	Nitratos	48
3.3.3	Propiedades biológicas	49
3.3.3.1	Respiración, carbono potencialmente mineralizable, carbono de la biomasa microbiana y tasa de mineralización	49
3.3.3.2	Fitotoxicidad	52
3.3.4	Efectos de la solarización sobre las propiedades de los sustratos	55
3.4	Conclusiones	59
3.5	Bibliografía	60
4	EFECTO DE LA SOLARIZACIÓN EN EL CRECIMIENTO DE PLANTINES DE <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	68
4.1	Introducción	68
4.1.1	La especie objeto de estudio	68
4.1.2	La producción de plantines de eucalipto	70
4.1.3	Características morfológicas y fisiológicas de los plantines	71
4.1.4	Efecto de la solarización sobre el crecimiento	75
4.2	Materiales y métodos	78
4.2.1	Producción de plantines	78
4.2.2	Parámetros de crecimiento	79
4.2.3	Nutrición foliar y radical	80

4.2.4	Presencia de malezas	80
4.2.5	Presencia de <i>damping off</i>	80
4.2.6	Diseño experimental	80
4.3	Resultados y discusión	81
4.3.1	Parámetros de crecimiento	81
4.3.1.1	Altura	81
4.3.1.2	Longitud de raíz	83
4.3.1.3	Biomasa total	84
4.3.1.4	Biomasa aérea	85
4.3.1.5	Biomasa radical	86
4.3.1.6	Relación entre biomasa radical y aérea	88
4.3.2	Concentración de macronutrientes	89
4.3.2.1	Nitrógeno	89
4.3.2.2	Fósforo	91
4.3.2.3	Potasio	94
4.3.2.4	Magnesio y calcio	95
4.3.3	Concentración de micronutrientes	99
4.3.3.1	Manganeso	99
4.3.3.2	Cinc	101
4.3.3.3	Molibdeno	102
4.3.4	Presencia de malezas	102
4.3.5	Presencia de <i>damping off</i>	105
4.3.6	Efecto de la solarización de sustratos sobre parámetros morfológicos y fisiológicos de los plantines	106
4.4	Conclusiones	108
4.5	Bibliografía	109
5	EFECTO DE LA SOLARIZACIÓN SOBRE ALGUNAS VARIABLES FISIOLÓGICAS EN <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	121

5.1	Introducción	121
5.2	Materiales y métodos	123
5.3	Resultados y discusión	125
5.3.1	Fotosíntesis e intercambio de gases	125
5.3.2	Concentración de pigmentos fotosintéticos	131
5.3.3	Concentración de azúcares	132
5.3.4	Estado hídrico de las plantas	135
5.4	Conclusiones	136
5.5	Bibliografía	137
6	CONSIDERACIONES FINALES	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
3.1	Influencia del tamaño de la partícula en las propiedades físicas del material	25
3.2	Escala de propiedades físicas y químicas de sustratos para la producción de plantines forestales	29
3.3	Temperaturas alcanzadas en los sustratos testigos (T) y solarizados (S)	34
3.4	Número total de horas de exposición de sustratos solarizados (S) y testigos (T), a temperaturas por encima de 37, 40, 45, 50 y 55°C	35
4.1	Propiedades de los sustratos solarizados y testigos utilizados en la producción de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para las determinaciones de crecimiento y nutrición	79
5.1	Propiedades del sustrato testigo y solarizado utilizado para la producción de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para la medición de la actividad fisiológica.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
3.1	Solarización de sustratos	31
3.2	Densidad aparente (Dap) de sustratos solarizados y testigos	36
3.3	Porosidad total de sustratos solarizados y testigos	37
3.4	pH de sustratos solarizados y testigos	38
3.5	Conductividad eléctrica de sustratos solarizados y testigos	39
3.6	Contenido de materia orgánica de sustratos solarizados y testigos..	40
3.7	Contenido de carbono orgánico total (COT) de sustratos solarizados y testigos	41
3.8	Contenido de nitrógeno total de sustratos solarizados y testigos	42
3.9	Relación Carbono : Nitrógeno (C:N) de sustratos solarizados y testigos	43
3.10	Concentración de potasio intercambiable de sustratos solarizados y testigos	44
3.11	Concentración de calcio intercambiable de sustratos solarizados y testigos	45
3.12	Concentración de magnesio intercambiable de sustratos solarizados y testigos	46
3.13	Concentración de sodio intercambiable de sustratos solarizados y testigos	46
3.14	Concentración de fósforo en sustratos solarizados y testigos	47
3.15	Concentración de nitratos en sustratos solarizados y testigos	48
3.16	Respiración de sustratos solarizados y testigos	49
3.17	Carbono potencialmente mineralizable (Co) de sustratos solarizados y testigos	50
3.18	Carbono de la biomasa microbiana de los sustratos solarizados y testigos	51

3.19	Tasa de mineralización (Kc) de los sustratos solarizados y testigos.	51
3.20	Porcentaje de germinación relativo de <i>Raphanus sativus</i> en extractos preparados a partir de sustratos solarizados y testigos....	52
3.21	Crecimiento relativo de raíces (CRR) de <i>Raphanus sativus</i> en extractos preparados a partir de sustratos solarizados y testigos...	53
3.22	Índice de germinación (IG) de <i>Raphanus sativus</i> en extractos preparados a partir de sustratos solarizados y testigos	53
4.1	Longitud de tallo de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos	81
4.2	Longitud de la raíz principal de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos	83
4.3	Biomasa total de plantines de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos	84
4.4	Biomasa aérea de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos	86
4.5	Biomasa de raíces de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos	87
4.6	Relación entre biomasa de raíces y biomasa aérea de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos	88
4.7	Concentración de nitrógeno en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en los sustratos 1 y 2, solarizados y testigos	89
4.8	Concentración de fósforo en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos.....	92
4.9	Concentración de potasio en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos	94
4.10	Concentración de magnesio en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos	96
4.11	Concentración de calcio en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos	96

4.12	Concentración de manganeso en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos	100
4.13	Concentración de cinc en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos	101
4.14	Concentración de molibdeno en hojas (H) y raíces (R) de plantines de <i>E. camaldulensis</i> de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados y testigos	102
4.15	Malezas presentes en los sustratos solarizados y testigos	103
4.16	Biomasa aérea de malezas en plantines producidos en sustratos solarizados y testigos	104
5.1	Fotosíntesis neta de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	126
5.2	Conductancia estomática de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	127
5.3	Transpiración de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	127
5.4	Variación en la concentración interna de CO ₂ en distintos momentos del día en plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	129
5.5	Variación del índice de desempeño total en distintos momentos del día en plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	130
5.6	Concentración de clorofila A, clorofila B y carotenoides en plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	131
5.7	Concentración de sacarosa en raíces y hojas de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar.....	132
5.8	Concentración de fructosa en raíces y hojas de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	133
5.9	Concentración de glucosa en raíces y hojas de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	133
5.10	Azúcares solubles totales en raíces y hojas en plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T)...	134
5.11	Contenido relativo de agua (CRA) en hojas de plantines de <i>E. camaldulensis</i> producidos en sustrato solarizado y sin solarizar	135

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi leal saber y entender, original y producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifiquen explícitamente las contribuciones de otros), y que no ha sido presentado, en forma total o parcial, como una tesis en esta u otra institución.

María Verónica Parra

**La solarización del sustrato aumenta el crecimiento y el vigor de los plantines de
*Eucalyptus camaldulensis***

RESUMEN

Eucalyptus camaldulensis es la especie de eucalipto más utilizada para forestar zonas áridas y semiáridas. En el vivero, es susceptible a una amplia gama de hongos que provocan *damping off* y a la competencia de malezas, que afectan la supervivencia y el crecimiento de los plantines. Por ello es necesario desinfectar el sustrato para obtener plantines vigorosos. La solarización del sustrato, además de ejercer un efectivo control de patógenos y malezas, provoca cambios físicos, químicos y biológicos que hacen que las plantas producidas en sustratos solarizados tengan un mayor crecimiento. El objetivo de esta tesis fue determinar el efecto de la solarización de dos sustratos elaborados con proporciones de mantillo y suelo 1:1 V/V y 1:2 V/V sobre el crecimiento y algunas variables fisiológicas en plantines de *E. camaldulensis*. Se determinaron las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sustratos testigos y solarizados. Se midieron parámetros de crecimiento y variables fisiológicas de plantines de *E. camaldulensis*. En ambos sustratos, la solarización produjo cambios en las propiedades evaluadas, que se relacionaron con la temperatura alcanzada durante el proceso y con el porcentaje de materia orgánica de cada uno de ellos. Se logró un control efectivo de malezas y no se manifestó el *damping off*. Los plantines producidos en los sustratos solarizados presentaron mayor altura y biomasa aérea y radical. Se incrementaron las concentraciones de N, P, Ca, Mn, Zn, y Mo tanto en hojas como en raíces. También aumentaron la fotosíntesis neta, el índice de desempeño total, la concentración de azúcares en hojas y raíces, y el contenido relativo de agua. Se concluyó que la solarización del sustrato ejerció un efecto positivo en el crecimiento y vigor de los plantines de *E. camaldulensis*.

Palabras clave: sanidad vegetal, nutrición vegetal, fotosíntesis, azúcares totales, vigor vegetativo.

**Substrate solarization increases growth and vigor of
Eucalyptus camaldulensis seedlings**

ABSTRACT

Eucalyptus camaldulensis is the most widely used tree species for afforestation of arid and semiarid zones. In the nursery, it is susceptible to an ample range of damping off causing fungi and to weed competition, which affect the survival and growth of the seedlings. Hence the importance of disinfecting the substrate to obtain vigorous seedlings. In addition to effectively controlling pathogens and weeds, solarization brings about physical, chemical, and biological changes which result in greater growth of those plants produced in solarized substrates. The objective of this thesis was to determine the effects of solarization of two substrates prepared with forest litter/soil ratios of 1:1 and 1:2 (V/V) on the growth and some physiological variables of *Eucalyptus camaldulensis* seedlings. Physical, chemical, and biological properties of both solarized and control substrates were determined. Also, growth parameters and physiological variables of *Eucalyptus camaldulensis* seedlings were measured. In both substrates, the treatment led to changes in the assessed properties which were related to the temperature reached during the process and to the percentage of organic matter in each one of them. An effective control of weeds was achieved, and no damping off occurred. The seedlings produced in the solarized substrates exhibited greater height as well as aerial and root biomass. Similarly, concentrations of N, P, Ca, Mn, Zn, and Mo in both leaves and roots were higher. Furthermore, increases in net photosynthesis, total performance index, sugars concentration in leaves and roots, and relative water content became evident. It was concluded that solarization exerted a positive effect on the growth and vigor of *Eucalyptus camaldulensis* seedlings.

Key words: plant health, plant nutrition, photosynthesis, total sugars, plant vigor.

1. INTRODUCCIÓN

Eucalyptus camaldulensis es el eucalipto más utilizado para forestar zonas áridas y semiáridas. Por su alta densidad y dureza, su madera es muy apreciado para fines energéticos (leña, carbón y siderurgia) y para tableros de fibras de alta densidad. En países como Australia, Uruguay y Argentina, también se destina a la elaboración de productos de mayor valor, como madera sólida, especialmente para pisos y muebles, o bien para carpintería rural, debido a su resistencia y durabilidad (Marcó y Harrand, 2005).

En vivero, *E. camaldulensis* es susceptible a una amplia variedad de hongos que provocan *damping off* y enfermedades de la hoja. El control de malezas también es importante en esta etapa ya que afectan la supervivencia y el crecimiento de las plantas. La desinfección del sustrato es una práctica de manejo necesaria para obtener un plantín vigoroso (Espinoza Mesa *et al.*, 2015).

Entre los métodos que se aplican para el control de las plagas del suelo, la solarización se presenta como una alternativa segura y barata, que no implica toxicidad ni presencia de residuos tóxicos. Además, esta técnica no requiere de maquinaria sofisticada. Varios autores concuerdan en que la solarización es un método simple que no conlleva riesgos (Abu Irmalieh, 1991 y Elmore *et al.*, 1997, entre otros).

Los efectos de la solarización sobre el crecimiento han sido estudiados en muchas especies hortícolas; no así en especies forestales. Se ha demostrado que las plantas que se producen en sustratos solarizados tienen un mayor crecimiento, pero son muy pocas las investigaciones que relacionan este incremento con variables fisiológicas.

La hipótesis de esta tesis fue que la solarización del sustrato favorece el crecimiento y mejora el vigor de plantines de *E. camaldulensis*. Para demostrarla, se desarrollaron numerosos ensayos con los sustratos y con los plantines producidos en ellos. Los resultados obtenidos se presentan en tres capítulos, en los que se plantean objetivos generales y específicos, organizados de la siguiente manera:

- Capítulo 3: Efecto de la solarización sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los sustratos.
- Capítulo 4: Efecto de la solarización sobre el crecimiento de plantines de *Eucalyptus camaldulensis*.
- Capítulo 5: Efecto de la solarización sobre algunas variables fisiológicas de *Eucalyptus camaldulensis*.

Bibliografía

- Abu-Irmaileh, B.E. 1991. Weed control in vegetables by soil solarization. *In: De Vay J.E., J. Stapleton, and C. Elmore (Ed.). Soil solarization. FAO, Roma. FAO Plant Production and Protection Paper N° 109. 395 p.*
- Elmore, C.L. 1995. Soil solarization, a nonpesticidal method for controlling diseases, nematodes, and weeds. Memoria, Taller de Solarización del Suelo. FAO. p. 22-33.
- Espinoza Meza, S., R. Santelices Moya, A. Cabrera Ariza, C. Magni Díaz, F. Muñoz Sáez, J. Cancino Cancino, J. Contreras González, C. Bustamante Valdés. 2015. Cap. 2: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., p. 34-43, *In: Santelices Moya R., S. Espinoza Meza y A. Cabrera Ariza (Eds.). 2015. Especies del género Eucalyptus con potencial energético para ser establecidas en el secano Mediterráneo de la Región del Maule. Consultado en abril de 2020. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/283934553>.*
- Marcó, M.A. y L. Harrant. 2005. Valor potencial de los eucaliptos colorados en combinaciones híbridas. *In: Primera jornada sobre potencialidad foresto-industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. 10p.*

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La desinfección de suelos y sustratos se considera una intervención en los sistemas de cultivo cuyo principal objetivo es mejorar la calidad de los productos obtenidos. Esta práctica puede lograrse mediante la aplicación de diversas técnicas cuya elección dependerá de las condiciones de cada sistema de cultivo (Zanón Alonso, 2009).

Las técnicas de desinfección del suelo se pueden clasificar como químicas o no químicas, existiendo la posibilidad de combinarlas con la finalidad de aprovechar al máximo los efectos beneficiosos que éstas ofrecen (Zanón Alonso, 2009). Entre las técnicas empleadas, la desinfección con fumigantes químicos y el uso de calor, tanto seco como húmedo, incluyendo el aprovechamiento de la radiación solar, son las prácticas de control más difundidas (Ripanti *et al.*, 2009; de Lima Silva Júnior, 2022).

La contaminación de los alimentos por plaguicidas ha inducido al desarrollo de una intensa investigación de métodos alternativos para controlar plagas y enfermedades (Luvisi *et al.*, 2015; de Lima Silva Júnior, 2022).En la búsqueda actual de soluciones para cualquier plaga, enfermedad o maleza se tiende a que estas soluciones estén fundamentadas en el concepto del manejo integrado de plagas (MIP), siendo su principal objetivo la minimización del empleo de biocidas de amplio espectro para evitar o reducir los problemas como la contaminación medioambiental, la eliminación de enemigos naturales y la inducción de resistencias (Miller, 2001; Nava Camberos *et al.*, 2003; Zanón Alonso, 2009).

El incremento de la presión social y legislativa para restringir el uso de fumigantes químicos impulsó la búsqueda de otras medidas que pudieran reemplazar su uso en la agricultura y ha permitido en la actualidad poner en evidencia la existencia de nuevas alternativas para el control de las plagas del suelo (Braga *et al.*, 2002, de Lima Silva Júnior, 2022). Entre ellas, la solarización se presenta como una alternativa segura, barata, que no implica ni toxicidad ni presencia de residuos de pesticidas y que, además, no requiere de maquinaria sofisticada. Es un método simple que no conlleva riesgos y no implica materiales tóxicos (Abu Irmalieh, 1991; Elmore *et al.*, 1997; de Lima Silva Júnior, 2022).

Desde el descubrimiento de la técnica de la solarización, en 1976, muchos investigadores han enfocado sus estudios en los cambios que provoca la solarización en el suelo y en la correlación de estos con el crecimiento de las plantas, y han puesto énfasis en las ventajas de esta técnica en relación con la disminución en el uso de agroquímicos. En este capítulo se presenta, en orden cronológico, una revisión exhaustiva de las investigaciones realizadas sobre la aplicación del método de solarización en diferentes lugares y en diversos cultivos.

2.1. La solarización

Cuando se inició la denominada Revolución Verde, gran parte del mundo pensó que, con las nuevas variedades de cultivo, más productivas que las tradicionales, y con el uso de agroquímicos (plaguicidas y fertilizantes minerales), se resolvería el problema de la producción de alimentos. La historia ha demostrado que todo esto es cierto en alguna medida, pero también indica que existe un costo social de todas las prácticas que se realizan en la agricultura, que aún no se ha medido, y compromete los medios básicos de producción agrícola (Labrada, 1995).

En los cultivos de agricultura intensiva, como hortalizas, viveros forestales, de frutales y la mayoría de los ornamentales, se recurre regularmente a la desinfección química del suelo o del sustrato con el fin de evitar pérdidas causadas directamente por patógenos del suelo o indirectamente por la competencia con malezas. La desinfección química presenta una serie de ventajas, pero también conlleva desventajas dentro de las que se pueden destacar tres aspectos importantes, a saber: los residuos tóxicos en el suelo por el uso continuado de productos químicos, la rápida reinfeción del suelo con patógenos y plagas, y el costo asociado a esta práctica. Los residuos de plaguicidas en sí representan un riesgo potencial en dos aspectos: que se transloquen a los frutos comestibles, o que

pasen a contaminar las aguas subterráneas y posteriormente los ríos (Pullman y DeVay, 1984, citados por Navarro y Umaña, 1997).

El término “solarización” se refiere a la desinfestación del suelo por medio del calor generado a partir de la energía solar capturada. Es un proceso hidrotérmico que tiene lugar en el suelo húmedo, que es cubierto por una película plástica y expuesto a la luz solar durante los meses más cálidos (Chen y Katan, 1980; Melero Vara *et al.*, 1989; Kumar *et al.*, 1993; de Souza, 1994; Labrada, 1995; Ghini, 1997; Stapleton, 2000; Ghini *et al.*, 2002; Arboleya *et al.*, 2006; Bettioli, 2006; Díaz y Jiménez, 2007; Reid y Cohen, 2013; Murase *et al.*, 2015; Arboleya *et al.*, 2018, Hernández Lara 2023), abarcando un complejo de cambios físicos, químicos y biológicos en el suelo asociados con el calentamiento solar, y constituye una alternativa al uso de ciertos productos químicos para la agricultura (Melero Vara, *et al.*, 1989; Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez, 1991; Labrada, 1995; Elmore *et al.*, 1997; Stapleton, 2000; Abu Irmaileh, 2004; Montealegre, 2005).

Mediante la solarización, se reduce la presión de plagas y malezas, se mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, y se incrementan los rendimientos de algunos cultivos luego de aplicarla (Arboleya *et al.*, 2018; de Lima Silva Júnior, 2022). Esta técnica tuvo sus orígenes en las épocas tempranas de la agricultura, cuando se la aplicó para cubrir el suelo y las plantas con materiales orgánicos e inorgánicos con el fin de formar una barrera protectora contra las heladas (Cassanello, 2003). El suelo así calentado se usó para aumentar el crecimiento de las plantas, y la cobertura también fue utilizada para limitar la evaporación de agua del suelo, controlar malezas, mejorar la estructura del suelo y combatir la erosión (Abu Irmaileh, 2004; Sánchez Lucas, 2013).

Cuando se comenzaron a usar las coberturas de plástico, el polietileno fue considerado ideal para el calentamiento solar ya que es transparente a la radiación solar (280-2500 nm), extendiéndose hasta el extremo infrarrojo, pero menos transparente a la radiación terrestre (5000-35000 nm), reduciendo el escape de calor del suelo (Abu Irmaileh, 2004).

La energía que llega al suelo a través de la radiación solar penetra en él en función de sus propiedades térmicas, de su capacidad calorífica, de la conductividad térmica, de la difusividad térmica, etc., propiedades que a la vez dependen de las características físicas del suelo, especialmente de su contenido de humedad. Además, la energía sufre una serie de pérdidas por radiación, conducción, convección y evaporación. Por la noche se produce un proceso de enfriamiento en el suelo, de modo que la temperatura a lo largo del tiempo

describe una curva cíclica parecida a una senoide (Cebolla *et al.*, 1991; González Rabelino *et al.*, 2003). Si el suelo se encuentra húmedo y acolchado con una lámina de polietileno, el balance de energía se modifica debido a que la humedad aumenta la conductividad (Kuva *et al.*, 1995) y, sobre todo, la difusividad térmica, haciendo posible un calentamiento más rápido hacia el interior. Por otra parte, la modificación del balance energético es consecuencia de una reducción de la radiación solar incidente debido a la transmitancia y reflexión de la lámina plástica, a una disminución notable de pérdidas caloríficas por conducción y convección y, principalmente, a una eliminación de pérdidas de calor latente de evaporación a causa de la barrera impuesta por el acolchado. Asimismo, las pérdidas nocturnas por radiación calórica hacia la atmósfera disminuyen debido a la condensación del agua en la superficie interna del plástico. El resultado es que un suelo en estas condiciones consigue elevar progresivamente la temperatura, con diferencias que superan al suelo no solarizado en unos 10°C (Chen y Katan, 1980; Ghini, 1997; Cebolla *et al.*, 1991; González Rabelino *et al.*, 2003; Gómez Salces *et al.*, 2016). La técnica de la solarización es similar, en principio, a la del calentamiento artificial mediante vapor u otros métodos que alcanzan temperaturas entre 60 y 100°C. Sin embargo, las temperaturas logradas mediante la solarización son relativamente más bajas; por tanto, el efecto sobre los microorganismos es menos drástico (Elmore *et al.*, 1997; Sánchez Lucas, 2013). La máxima temperatura alcanzada en un suelo solarizado está en el rango de 42 a 45°C a 5 cm de profundidad, y de 32 a 37°C a 45 cm (Elmore *et al.*, 1997). Esto se traduce en una menor recolonización después de la desinfestación, debido a que no se produce un vacío biológico tan exhaustivo (Melero Vara, *et al.*, 1989; Cebolla *et al.*, 1991; Ramírez Villapudua *et al.*, 1991; Ghini, 1997; Stapleton, 2000; Abu Irmaileh, 2004; Sánchez Lucas, 2013). La eficiencia de la solarización para controlar las plagas del suelo es función de las relaciones entre el tiempo de exposición a las temperaturas altas y la temperatura máxima alcanzada, y se basa en el hecho de que muchos patógenos de las plantas, las malezas y otras plagas, son mesófilos (Labrada, 1995; Ghini, 1997; González Rabelino *et al.*, 2003; Reid y Cohen, 2013). En el caso de estos organismos, es crítico un umbral de temperatura de 37°C (Arboleña *et al.*, 2018; Öz, 2018). La acumulación de los efectos del calor a esta temperatura, o más altas, durante un cierto tiempo, es letal.

La solarización del suelo ha demostrado ser efectiva, ambientalmente segura, y aplicable a varias situaciones agrícolas para el control de diferentes plagas del suelo, incluyendo fitopatógenos y malezas (Labrada, 1995; Elmore *et al.*, 1997; Abu Irmaileh, 2004; Reid y Cohen, 2013; Murase *et al.*, 2015; Öz, 2018).

2.2. La solarización y el control de malezas

El control de malezas a través de métodos alternativos al uso de productos químicos es un componente esencial de los modernos sistemas de producción, para reducir la dependencia del control químico de plagas (Arboleya *et al.*, 2018). Uno de los resultados visibles de la solarización del suelo es el control de un amplio espectro de malezas (Reid y Cohen 2013). Por lo tanto, se sugiere este método para obtener un control efectivo de éstas. El principal mecanismo físico involucrado en la muerte de malezas en la solarización es el efecto térmico, aunque existen mecanismos biológicos y químicos que también juegan un rol importante en el proceso letal de esta técnica (Golzardi *et al.*, 2015; Arboleya *et al.*, 2018).

Las malezas son más susceptibles que los patógenos a la solarización. En general, la mayoría de las especies de malezas anuales y perennes pueden controlarse por medio de la solarización del suelo, pero difieren respecto a su susceptibilidad al calor (Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez, 1991; Elmore, 1995; Arboleya, 2006). La eficiencia de la solarización del suelo en el control de semillas de malezas anuales depende de la relación entre el tiempo de tratamiento y las temperaturas alcanzadas, que, a su vez, interactúan con la humedad del suelo que promueve el ciclo del agua durante el tratamiento (Rodríguez y Salvo, 2018).

La efectividad de la solarización sobre el propágulo de malezas varía con su localización en el perfil del suelo, la duración de la exposición a temperaturas altas, la temperatura alcanzada, la conductividad térmica del suelo y las características propias de cada especie (Herrera y Ramírez, 1996).

Según Elmore (1991), las malezas anuales de invierno son muy sensibles a pequeños incrementos de temperatura. Sin embargo, las de verano son más resistentes, por lo cual la aplicación del método de solarización para controlarlas se restringe en zonas con temperaturas bajas. Entre las especies que sobreviven al tratamiento están *Melilotus sp.* (L.) All., *Medicago sp.* L. y, en menor medida, *Portulaca sp.* L.

Elmore (1995) y Stapleton (1996) afirman que, entre las especies efectivamente controladas mediante la solarización, se encuentran: *Amaranthus albus* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Avena fatua* L., *Capsella bursa-pastoris* (L) Medik., *Chenopodium album* L., *Convolvulus arvensis* L. (semilla), *Conyza canadensis* (L.) Cronquist., *Cynodon dactylon* (L) Pers. (semilla), *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop., *Echinochloa crusgalli* (L.) P. Beauv.,

Eleusine indica (L) Gaert., *Lamium amplexicaule* L., *Poa annua* L., *Portulaca oleracea* L., *Senecio vulgaris* L., *Sida spinosa* L., *Solanum nigrum* L., *Sonchus oleracea* L., *Sorghum halepense* L. (semilla), y *Trianthema portulacastrum* L. Stapleton (1996) también menciona como malezas susceptibles a la solarización a: *Anagalis arvensis* L., *Abutilon theophrasti* Medik., *Brassica niger* (L) W.D.J. Koch, *Capsella rubella* Reut., *Centaurea iberica* Trevir., *Chenopodium murale* L., *Chenopodium pumila* R. Brown, *Commelina communis* L., *Datura stramonium* L., *Heliotropium suaveolens* M. Bieb., *Hordeum leporinum* Link., *Ipomoea lacunosa* L., *Lactuca scariola* L., *Malva parviflora* L., *Malva sylvestris* L., *Medicago polymorpha* L., *Orobancha aegyptica* Pers., *Orobancha crenata* Forssk., *Orobancha ramosa* L., *Papaver dubium* L., *Phalaris paradoxa* L., *Polygonum equisetiforme* Sibth. & Sn., *Polygonum persicaria* L., *Polygonum polyspermum* L., *Raphanus raphanistrum* L., *Senecio vernalis* Walds & Kit., *Setaria glauca* (L.) P. Beauv., *Sisymbrium* spp. L., *Tribulus terrestris* L., *Urtica urens* L., *Xanthium pensylvanicum* Wallr., y *Xanthium spinosum* L. Entre las especies perennes, Elmore (1991) clasifica a *Cyperus esculentus* L. y *Cyperus rotundus* L. como resistentes, a *Convolvulus arvensis* L., como moderadamente resistente a resistente, y a *Cynodon dactylon* (L.) Pers. y *Sorghum halepense* L., como moderadamente sensibles a la solarización.

Según Reid y Cohen (2013), la solarización durante 4 a 6 semanas redujo el crecimiento de malezas dicotiledóneas y gramíneas en un 56%. Golzardi *et al.* (2015) lograron reducir en forma significativa la germinación y emergencia de malezas. Informaron, asimismo, que la solarización, además de disminuir el banco de semillas y la biomasa de malezas, tuvo efecto sobre el contenido de la materia orgánica del suelo.

2.3. La solarización y el control de patógenos del suelo

El aumento de la temperatura mediante la solarización trae consigo un efecto letal que consiste en la muerte directa de muchos microorganismos fitopatógenos, con una reducción de sus densidades poblacionales (Garijo Alba y Frapolli Daffari, 1989; Balakrishna *et al.*, 2015; Tomazeli *et al.*, 2019; Bhardwaj *et al.*, 2023). La inactivación térmica de diversos patógenos es generalmente un modelo exponencial. Cuanto menor es la temperatura, se necesita un mayor tiempo de exposición para provocar la inactivación de las estructuras del patógeno. Parte de la población muere por un efecto directo, especialmente las estructuras localizadas en la superficie, donde se registran las mayores

temperaturas. A medida que aumenta la profundidad, la temperatura es menor, por lo que los propágulos son sometidos a temperaturas subletales. Esto debilita a los patógenos y favorece la acción de organismos antagonistas (Ghini, 1997). Según Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez (1991), la velocidad de mortandad de una población de organismos depende de los siguientes factores: nivel de temperatura, humedad, tiempo de exposición, condición fisiológica del organismo, tipo de propágulo, edad, y propiedades físicas y químicas del suelo. Comúnmente, las poblaciones de patógenos se reducen de manera significativa a temperaturas de 40-50°C, con tiempos de exposición que fluctúan de minutos a horas para las temperaturas más altas, y hasta días para las temperaturas más bajas.

En general, se ha comprobado que la solarización es efectiva contra varios hongos patógenos del suelo bajo diversas condiciones (Jiménez Díaz y Salazar Sosa, 2003; de Lima Silva Júnior, 2022). Desde los primeros trabajos, se conoce la eficacia contra *Verticillium spp.* (en tomate, berenjena y papa), *Rhizoctonia solani* (en papa y cebolla), *Sclerotium rolfii* (en maní), *Pyrenochaeta terrestris* (en cebolla), *Fusarium spp.* (en algodón, melón, tomate y cebolla) (Cebolla *et al.*, 1991). Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez (1991), De Souza (1994), Stapleton (1996), Elmore *et al.* (1997), Ghini (1997), y Jiménez Díaz y Salazar Sosa (2003) confirman que la solarización también ejerce efecto sobre las poblaciones de *Didymella lycopersici*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *conglutinans*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *fragariae*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*, *Plosmodiophora brassicae*, *Phoma terrestris*, *Phytophthora cinnamomi*, *Pyrenochaeta lycopersici*, *Pythium ultimum*, *Pythium spp.*, *Pythium myrothecium*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia minor*, *Sclerotium cepivorum*, *Sclerotium rolfii*, *Thielaviopsis basicota*, *Verticillium dahliae*, *Agrobacterium tumefaciens*, *Clavibacter michiganensis* y *Streptomyces scabies*, entre otros.

Esta técnica también es efectiva para controlar algunos virus del suelo. Al respecto, investigaciones realizadas por Luvisi *et al.* (2015) demostraron que la solarización durante 20 días logró inactivar al Virus Y de la Papa (PYV); no así, al Virus del Mosaico del Tabaco (TMV).

Todas las especies cultivadas, en mayor o menor grado, son afectadas en su fase germinativa por el *damping off*. Se conoce con este nombre a la enfermedad causada por un complejo de hongos presentes en el suelo. Entre ellos, los principales son *Pythium*, *Phytophthora* y *Fusarium*, que ejercen su acción patógena tanto en las semillas como en las plántulas. El efecto más común es la incapacidad de las plántulas para emerger, debido a la destrucción del embrión en la semilla o en el momento de germinar. Si la germinación

tuvo lugar, lo más probable es que se produzca un vuelco de las plántulas por necrosis y estrangulamiento en la base del tallo al nivel de la superficie del terreno (Fernández Valiela, 1978). Al respecto, Hildebrand (1985) afirma que el nivel de la población de hongos patógenos causantes del *damping off* se redujo significativamente en almácigos solarizados de especies forestales.

En Costa Rica, Navarro *et al.* (1991) reportaron reducciones de 50 y 71% en la incidencia de *Rhizoctonia solani* en suelos solarizados durante 4 y 6 semanas, respectivamente, durante el período de precipitaciones. Por su parte, Ghini *et al.* (1993) concluyeron que la solarización del suelo durante 30 a 50 días redujo la incidencia de *Verticillium dahliae* en tomate. Poco tiempo después, Vidales Fernández y Alcantar Rocillo (1999) comprobaron que el efecto de la temperatura que se alcanza durante el proceso de la solarización con plástico cristalino durante 60 días se traduce en una reducción de las poblaciones de *Phytophthora cinnamomi* en el suelo, en plantaciones de palto con “tristeza”, y observaron una rápida recuperación de los árboles dañados.

Según Basallote *et al.* (1994), la solarización redujo la densidad de inóculo de *Verticillium dahliae* (verticilosis del algodón) hasta niveles no detectables o muy bajos, independientemente del nivel de población del patógeno; también se observó un retraso de dos semanas en el inicio del desarrollo epidémico. Resultados similares obtuvieron Melero Vara *et al.* (1989), quienes lograron erradicar del perfil a *Verticillium dahliae* solarizando el suelo durante 50 días, y redujeron la densidad poblacional de *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* (fusariosis vascular de la sandía) en un 64% cuando solarizaron durante 45 días. También reportaron la inactivación de esclerocios de *Sclerotium cepivorum* (podredumbre blanca del ajo) con 75 días de solarización; esto también fue corroborado por Basallote *et al.*, (1994), quienes concluyeron que la solarización del suelo en Andalucía es efectiva como método de lucha contra la podredumbre blanca del ajo causada por *Sclerotium cepivorum*. Sin embargo, Tomazeli *et al.* (2019) afirmaron que, a pesar de lograr bajar la incidencia y severidad, no fue posible el control de la pudrición del cuello de la raíz, causada por *Sclerotium rolfsii* en el cultivo de poroto, solarizando el suelo durante 61 días el primer año de ensayo (46,8°C de temperatura media) y 93 días en el segundo año (43,15°C de temperatura media).

López Herrera y Verdú Valiente (1994) midieron la pérdida de viabilidad del inóculo primario de *Botrytis cinerea* (micelio y esclerocios) a diferentes profundidades. Las temperaturas alcanzadas fueron 47, 40 y 36°C a 5, 15 y 25 cm de profundidad,

respectivamente. A estas temperaturas se obtuvo la pérdida total de la viabilidad del inóculo, por lo que estos investigadores afirman que el inóculo primario de *Botrytis cinerea* puede ser erradicado mediante la solarización del suelo.

En Chile, Montealegre *et al.* (1996) estudiaron el efecto de la solarización en el control de *Pyrenochaeta lycopersici* y determinaron que con una cobertura del suelo de 40 días se lograba un buen control de este patógeno en los primeros centímetros del perfil, y concluyeron que este período resultó insuficiente para lograr un control efectivo del hongo a partir de los 20 cm de profundidad. En la India, Dwivedi (1998) estudió el efecto de la solarización en la sobrevivencia de *Colletotrichum falcatum* y *Fusarium moniliforme*, causantes de la podredumbre roja y del marchitamiento en la caña de azúcar, respectivamente. El tratamiento destruyó los patógenos totalmente hasta los 16 cm de profundidad (con una temperatura máxima de 53,5°C), y sólo se encontró una pequeña fracción de éstos entre los 17 y 24 cm.

Coelho y Mitchell (1999) evaluaron el efecto de la solarización sobre la sobrevivencia de *Phytophthora spp.* en varios suelos del Norte de Florida. A los 10 cm de profundidad, con una temperatura máxima de 47°C, el control de *Phytophthora* en los suelos solarizados fue tan efectivo como el obtenido con la aplicación de bromuro de metilo; pero a los 25 cm, con una temperatura de 41°C, no se obtuvo una reducción de la población.

López-Escudero y Blanco López (2001) lograron disminuir la población de *Verticillium dahliae* a niveles muy bajos y, en algunos casos, indetectables, solarizando plantaciones establecidas de olivo durante 5 a 8 semanas.

Montealegre (2005) comparó el grado de control de *Fusarium oxysporum* con la cantidad de horas acumuladas de temperaturas mayores de 37°C (crítica para el hongo), determinando que el control obtenido es proporcional a la cantidad de horas acumuladas y afirmando que es factible realizar un control eficiente de *F. oxysporum* f. sp. *fragariae*, *Rhizoctonia solani* y *Verticillium dahliae* en suelos destinados al cultivo de frutillas. Este mismo autor, en ensayos realizados en suelos destinados a la producción de tomate, confirmó que este método también controla eficazmente a *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y *F. solani*.

También Funahashi y Parke (2016), en California, estudiaron el efecto de la solarización en el control de *Phytophthora ramorum*, agente causal de la muerte súbita del roble (*Lithocarpus densiflorus* Rehder. (Hook & Arn.)). Estos autores concluyeron que la

solarización de 2 a 4 semanas controló efectivamente a *P. ramorum* hasta 15 cm de profundidad.

En Lisboa Silva *et al.*, (2021) lograron disminuir la densidad de *Fusarium circinatum*, agente causal del cancro resinoso del pino, solarizando durante siete semanas un sustrato inoculado artificialmente. En este período se acumularon 53 horas con una temperatura mayor de 45 °C.

Ruiz Díaz *et al.* (2022), bajo condiciones de vivero, lograron controlar totalmente a *Rhizoctonia* spp. y *Cylindrocladium* spp., patógenos cuasantes del *damping off* en eucalipto, mediante la combinación de la solarización del suelo, con la incorporación de dazomet (200 g·m⁻³), siendo efectivo el tratamiento hasta 55 días posteriores al tratamiento.

En la India, en ensayos realizados en el cultivo de tomate, Bhardwaj y colaboradores (2023) obtuvieron un control efectivo de *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani*, *Penicillium ultimum* y *Sclerotium rolfsii* solarizando el suelo durante 40 días, con un incremento de la temperatura media en 3,4 °C, a 5 cm de profundidad. Estos investigadores afirmaron además que el método de solarización se puede integrar bien con otras técnicas como el *mulching* y las enmiendas del suelo, mejorando el control de enfermedades y aumentando el rendimiento del cultivo.

2.4. Efectos de la solarización sobre el suelo y el crecimiento de las plantas

Otros componentes importantes de la solarización se relacionan con el incremento de nutrientes de las plantas y el aumento relativo de las poblaciones bacterianas en la rizosfera, tales como *Bacillus* spp., que contribuyen al marcado aumento en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas en suelos solarizados (Labrada, 1995; Abu Irmaileh, 2004; de Lima Silva Júnior, 2022). La mayor disponibilidad de nutrientes minerales, tales como NH₄⁺, NO₃⁻, P, Ca y Mg, después de la solarización del suelo, está principalmente relacionada con la fracción orgánica como resultado de la muerte de la microbiota (Hildebrand, 1985; Abu Irmaileh, 2004; Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez, 1991; De Souza, 1994; Stapleton, 2000). Los elementos P, K, Ca, Mg y otros nutrientes minerales solubles se encontraron en mayores cantidades después de la solarización del suelo (Hildebrand, 1985; Ramírez Villapudua *et al.*, 1991; Elmore, 1995; Stapleton, 2000; Cassanello, 2003; Abu Irmaileh, 2004). La liberación de compuestos del N₂ (vapor o líquido) es un componente del modo de acción del proceso, ya que una mayor concentración de N

reducido se nitrificará después de la solarización del suelo dando como resultado NO_3^- para un mayor crecimiento de las plantas (Stapleton *et al.*, 1990, citado por Abu Irmaileh, 2004). El incremento de NO_3^- en suelos cubiertos con plásticos se debería a que la humedad favorece el ascenso por capilaridad de nutrientes móviles como los nitratos, y a la mineralización del N orgánico (Sánchez Lucas, 2013). Según Ihara *et al.* (2014), la nitrificación a 45°C se produce debido a que la solarización influye en la composición de la población de microorganismos oxidantes de los nitritos. Estos autores afirman que los efectos sobre la dinámica del N y el crecimiento de las plantas son potencialmente grandes, al menos el primer año después de la solarización, debido al cambio en la actividad de nitrificación.

El incremento en el rendimiento podría explicarse por la integración de varios efectos tales como: mejor condición nutricional del suelo, estímulo de microorganismos benéficos, destrucción de patógenos secundarios, anulación de toxinas del suelo, alteración de la microbiota a favor de los antagonistas, liberación de nutrientes solubles al suelo, inactivación térmica de malezas, cambios en la composición gaseosa del suelo y aumento de la actividad de la microflora benéfica del suelo (Lefevre y de Souza, 1993; Jiménez Díaz y Salazar Sosa, 2003; Seman-Varner *et al.*, 2007).

Linke *et al.* (1991) estudiaron el efecto de la solarización en el rendimiento de legumbres comestibles (habas, lentejas y arvejas), afirmando que el incremento en el crecimiento de las plantas en suelos solarizados es un fenómeno que se observa con frecuencia, y es atribuido principalmente al control de plagas del suelo y de malezas; y en segundo lugar, a la liberación de nutrientes, a la modificación de la microbiota del suelo en favor a los antagonistas de los patógenos de las plantas, y al mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Según Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez (1991) y Kumar y Yaduraju (1992), la solarización no afecta consistentemente las concentraciones de los iones K, Fe, Mn, Zn, Cu y Cl^- disponibles, al pH del suelo, o a la materia orgánica total.

Basallote *et al.* (1994) afirman que en cultivos de rosal (*Rosa indica*) la solarización del suelo durante 8 semanas incrementó el porcentaje de estacas enraizadas, el vigor, la producción total y la calidad.

En Costa Rica, Herrera y Ramírez (1996) determinaron que la solarización estimuló el crecimiento del cilantro (*Coriandrum sativum*). Este incremento se atribuyó a la baja presencia de malezas y de nemátodos, así como a una mayor disponibilidad de NH_4^+ y

NO₃⁻.

Montealegre *et al.* (1996) obtuvieron mayor cantidad y tamaño de frutos en parcelas solarizadas de tomate. Este incremento se atribuyó a la mejora de las características físicas y biológicas del suelo, así como también al saneamiento residual de hongos y nemátodos.

En rúcula (*Eruca sativa L.*), se obtuvieron mayor rendimiento y mejor calidad en suelos solarizados durante 30 y 45 días que en suelos sin solarizar. Este resultado se debió a la menor incidencia de *Sclerotinia sclerotiorum* y a la reducción de las malezas (Moccia *et al.*, 2000).

Seman-Varner *et al.* (2007) concluyeron que, en el cultivo de okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench.) en un suelo solarizado, los cambios en los nutrientes del suelo se reflejaron en la concentración de nutrientes del tejido foliar, con aumento de la biomasa y mejora de la salud del cultivo.

Más recientemente, Balakrishna *et al.* (2015) reportaron aumentos en la producción de semillas de girasol en suelos solarizados durante 20, 40 y 60 días, atribuyendo estos resultados al incremento de la biomasa microbiana, la que interactuó con la colonización de las micorrizas arbúsculo-vesiculares.

Estudios realizados en Brasil demostraron que la solarización de sustratos destinados a la producción de pimiento favoreció el incremento de la masa seca, sugiriendo que puede ser una alternativa para la agricultura familiar (de Lima Silva Júnior *et al.*, 2022). Recientemente, Hernández Lara *et al.* (2023) afirmaron que la solarización de suelo con el agregado de compost estimuló la actividad y la diversidad microbiana, mejorando la fertilidad de suelos utilizados para el cultivo intensivo de espinaca en el SE de España.

El uso de la energía solar como medio de control no contaminante es la única herramienta disponible para la recuperación de suelos degradados que prescinde de contaminantes químicos o reduce los niveles de residuos cuando se la usa combinada con tratamientos químicos. La sociedad en la que vivimos camina hacia mayores niveles de bienestar que incluyen cada vez más exigencias sanitarias y mayores restricciones en el contenido de residuos. La solarización puede aportar la técnica adecuada para aproximarnos a un nivel de agricultura biológica si no se cometen errores en el proceso de transferencia de esta tecnología. Lo que se busca no es ya un control absoluto de las enfermedades sino más bien una reducción económica del nivel de enfermedad, mediante la utilización de los recursos biológicos y físicos naturales. La solarización es, pues, una

opción más para integrar en los planes de control mediante lucha integrada (Cebolla *et al.*, 1991). Según Jiménez Díaz y Salazar Sosa (2003), la técnica de solarización del suelo se adapta a los diferentes requerimientos de la agricultura orgánica y representa una alternativa prometedora para su integración en los sistemas de producción, siendo sus ventajas principales la no contaminación del medio ambiente y su efectividad cuando se la incluye en los programas de manejo integrado de los cultivos.

Si bien son numerosas las investigaciones sobre los efectos de la solarización en el control de malezas y de patógenos, así como también en el rendimiento de diversos cultivos, son escasos los estudios relacionados con los efectos de la solarización sobre las propiedades del suelo y la respuesta fisiológica de especies forestales producidas en suelos o sustratos solarizados. El objetivo de esta tesis fue evaluar el efecto de la solarización sobre el crecimiento y el vigor de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., analizando algunas de las modificaciones en el sustrato y la respuesta de la planta, teniendo en cuenta parámetros fisiológicos indicadores de vigor.

2.5. Bibliografía

- Abu-Irmaileh, B.E. 1991. Weed control in vegetables by soil solarization. *In*: DeVay, J.E., J. Stapleton, and C. Elmore (Eds.). 1991. Soil solarization. FAO Plant Production and Protection Paper N° 109. FAO, Roma. 395 p.
- Abu Irmaileh, B.E. 2004. Estudios FAO. Manejo de malezas para países en desarrollo (Addendum I). Labrada R. (Ed). 2004. Capítulo: Solarización del suelo. 318 p.
- Arboleya, J., E. Campelo y J. Rodríguez. 2006. Solarización en canteros para almácigos de cebolla. *Revista INIA* 8:21-24.
- Arboleya J., E. Campelo, J. Rodríguez. 2018. Antecedentes nacionales sobre el uso de la solarización. *In*: Arboleya, J. (Ed.). 2018. Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura. INIA Serie Técnica N.º 245, p. 3-10.
- Balakrishna, A.N., R. Lakshmiathy, D.J. Bagyaraj, and R. Ashwin. 2015. Effect of soil solarization on native AM fungi and microbial biomass. Research Gate. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/276026731>.
- Basallote, M.J., J. Bejarano, M.A. Blanco, R.M. Jiménez-Díaz y J.M. Melero. 1994. La solarización del suelo: una estrategia para controlar enfermedades causadas por

- organismos del suelo y reducir las alternativas de cultivo. *Investigación Agraria: Fuera de Serie* 2:208-219.
- Bettiol, W. 2006. Productos alternativos para el manejo de enfermedades en cultivos comerciales. *Fitosanidad* 10(2): 85-98.
- Bhardwaj, S., M. Gupta, S.K. Gupta y D.K. Metha. 2023. Soil solarization: an eco-friendly management technique of damping-off of tomato. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 14(4):506-511.
- Braga, R., R. Labrada, L. Fornasari y N. Fratini. 2002. Manual para la capacitación de trabajadores de extensión y agricultores. Alternativas al bromuro de metilo para la fumigación de los suelos. Unidad de Energía y Ozonización, Programa Ambiental de las Naciones Unidas, FAO, Roma. 70 p.
- Cassanello, M.E. 2003. Solarización. Bases conceptuales para el manejo ecológico de plagas y enfermedades. Capítulo 5.12, p. 245-249.
Disponible en www.pv.fagro.edu.uy/fitopato/publica/solarizacion.pdf.
- Cebolla, V., P.F. Martínez, A. Del Busto y D.J. De Baredo. 1991. La desinfección del suelo por energía solar (solarización): una técnica no contaminante para la agricultura del futuro. In: Gallo, L. y F. Nuez (Eds.). 1991. *Horticultura Española en la CEE*. Edición de Horticultura S. L. p. 446-465.
- Coelho, L. y D.J. Mitchell. 1999. Efficacy of solarization and cabbage amendment for the control of *Phytophthora spp.* in North Florida. *Plant Disease* 83(3):293-299.
- Chen, Y. y J. Katan. 1980. Effect of solar heating of soil by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soils Science* 130(5):271-277.
- de Lima Silva Júnior, C.J., K. Ferreira da Silva, I. Oliveira Silva, K. Ferreira Alves, E.P. da Rocha Amorim e J. Pauva Carnaúba. 2022. Efeito da solarização de substratos na produção de mudas de pimentão. *Research, Society and Development* 11(13):1-9.
- De Souza, N.L. 1994. Solarização do solo. Revisão. *Summa Phytopathologica* 20(1):3-15.
- Díaz, F. y J. Jiménez. 2007. Efecto de la solarización para el control de enfermedades del suelo en semilleros artesanales en el Valle de Comayagua. Hoja Técnica N.º 10, Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, Programa de Hortalizas. Honduras.

-
- Dwivedi, R. 1998. Soil solarization and the survival of two fungal pathogens of sugarcane and the composition of the soil fungal community. Short communication. *Soil Biology and Biochemistry* 30(13):1849-1852.
- Elmore, C.L. 1991. Effect of soil solarization on weeds. *In*: DeVay, J., J. Stapleton and C.L. Elmore (Eds.). 1991. Soil Solarization. FAO Plant Production and Protection Paper N° 109. p. 109-128.
Disponible en <http://www.fao.org/docrep/t0455e/T0455E0c.htm#5>.
- Elmore, C.L. 1995. Soil Solarization, a non-pesticidal method for controlling diseases, nematodes, and weeds. Memoria, Taller de Solarización del Suelo. FAO, Honduras, p. 22-33.
- Elmore, C.L., J.J Stapleton, C. Bell y J. DeVay. 1997. Soil Solarization: A non-pesticidal method for controlling diseases, nematodes, and weeds. Vegetable Research and Information Center, Publication 21377, University of California, Davis, California, USA.
- Fernández Valiela, M.V. 1978. *Introducción a la Fitopatología*, (3ª) Edición, Volumen III: Hongos. INTA-Colección Científica, Tomo VII. Buenos Aires, Argentina. 779 p.
- Funahashi, F. and J.L. Parke. 2016. Effects of soil solarization and *Trichoderma asperellum* on soilborne inoculum of *Phytophthora ramorum* and *Phytophthora pini* in container nurseries. *Plant Disease* 100(2):438-443.
Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/281571186>.
- Garijo Alba, C. y E. Frapolli Daffari. 1989. Medidas culturales, mecánicas y medios físicos. *In*: Sanidad Vegetal en la Horticultura Protegida. 1989. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca (Ed.). p. 47-56.
- Hernández Lara, A., M. Ros, J. Cuartero, J.M. Vivo, P. Lozano Pastor y J.A. Pascual. 2023. Effects of solarisation combined with compost on soil pathogens and the microbial community in a spinach cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 346: 1-12.
- Hildebrand, D.M. 1985. Soil solar heating for control of damping-off fungi and weeds at the Colorado State Forest Service Nursery. *Tree Planters Notes* 26(1):28-34.
- Ghini, R., W. Bettiol, C. Spadotto, G. Morales, L. Paraiba e J. Mineiro. 1993. Soil solarization for the control of tomato and eggplant *Verticillium* wilt and its effects on weed and micro-arthropod communities. *Summa Phytopathologica* 19(3,4):183-189.

-
- Ghini, R. 1997. Desinfestação do solo com o uso de energia solar: Solarização e collector solar. Jaguariuna: Embrapa-CNPMA, Circular 1. Jaguariúna, SP, Brasil. 29 p.
- Ghini, R., I.A. Swart Schoenmaker e W. Bettiol. 2002. Solarização do solo e incorporação de fontes de materia organica no controle de *Pythium spp.* *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37(9):1253-1261.
- Golzardi, F., Y. Vaziritabar, K.S. Asilan, M.H. Jafari Sayadi, and S. Sarvaramini. 2015. Effect of Solarization and Polyethylene Thickness Cover Type on Weeds Seed Bank and Soil Properties. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* 5(6):88-95.
- Gómez-Salces, S., J.A. Barreda-Argüeso, R. Valiente, and F. Rodríguez. 2016. Solarization-induced redox reactions in doubly Ce3p/Mn2p-doped highly transmission glasses studied by optical absorption and photo-luminescence. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 157(2016):42-47.
Disponible en: www.elsevier.com/locate/solmat.
- González Rabelino, P., L. Herrera Isla, C. Pérez Navarro, O. Saucedo Castillo y M. Díaz Castellanos. 2003. La solarización como medida fitosanitaria, VI. Efecto sobre las temperaturas del suelo. Comunicaciones Breves. *Centro Agrícola* 30(1):94-96.
- Herrera, F. y C. Ramírez. 1996. Períodos de solarización y adición de gallinaza sobre la sobrevivencia de propágulos de *Cyperus rotundus*, *Rottboellia cochinchinensis* y *Bidens pilosa*. *Agronomía Mesoamericana* 7(1):1-8.
- Ihara, H., N. Kato, S. Takahashi, and K. Nagaoka. 2014. Effect of soil solarization on subsequent nitrification activity at elevated temperatures. *Soil Science and Plant Nutrition* 60 (2014):824-831. Disp. en: <https://www.tandfonline.com/loi/tssp20>.
- Jiménez Díaz, F. y E. Salazar Sosa. 2003. Utilización de plásticos para la eliminación de microorganismos del suelo. In: Salazar Sosa, E., M. Fortis Hernández, A. Vázquez Alarcón, y C. Vázquez Vázquez (Eds.). 2003. Agricultura Orgánica. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. y Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, p. 76-88.
- Kumar, B. y N.T. Yaduraju. 1992. Effects of Solarization on the temperature and physico-chemical properties of soils. *Plasticulture* 94:13-20.
- Kumar, B., N. Yaduraju, K. Ahuja, and D. Prasad. 1993. Effect of soil solarization on weeds and nematodes under tropical Indian conditions. *Weed Research* 33:423-429.

-
- Kuva, M.A., P.L.C.A. Alves e E.L.A. Erasmo.1995. Efeitos da solarização do solo a través de plástico transparente sobre o desenvolvimento da Tiririca (*Cyperus rotundus*). *Planta Daninha* 13(1):26-31.
- Labrada, R. 1995. Aspectos técnicos de la solarización. El desarrollo actual de la solarización. Memoria, Taller de Solarización del Suelo. FAO, Honduras, p. 17-20.
- Lefèvre, A. y N. de Souza. 1993. Efeitos da solarização sobre algumas variáveis do solo. *Summa Phytopathologica* 19 (2):113-118.
- Linke, K.H., M.C Saxena, J.D. Sauerborn y H. Masri. 1991. Effect of soil solarization on the yield of food legumes and on pest control. *In*: J. DeVay, J. Stapleton and C. Elmore (Eds.).1991. Soil Solarization, FAO Plant Production and Protection Paper N° 109. p.139-147.
- López-Escudero, F.J. and M.A. Blanco López. 2001. Effect of a single or double soil solarization to control *Verticillium* wilt in established olive orchards in Spain. *Plant Disease* 85(5):489-496.
- López-Herrera, C.J. and B. Verdú-Valiente. 1994. Eradication of primary inoculum of *Botrytis cinerea* by soil solarization. *Plant Disease* 78:594-597.
- Luvisi, A., A. Panattoni, and A. Materazzi. 2015. Heat treatments for sustainable control of soil viruses. *Agronomy for Sustainable Development* 35:657–666.
Disponibile en: www.researchgate.net/publication/267764654.
- Melero Vara, J.M., R. González, J. Gómez, J. Bejarano, and M.J. Basallote. 1989. Solarization of soils in Andalucía using plastics film. *Plasticulture* 82(2):73 -82.
- Miller, M. 2001. Sourcebook of Technology for Protecting the Ozone Layer. Alternatives to Methyl Bromide. United Nations Environment Programme, 316 p.
- Moccia, S., J. Núñez, M. Moya y D. Frezza. 2000. Efecto de la longitud del período de solarización sobre rendimiento y calidad del cultivo de rúcula (*Eruca sativa* L.), en invernáculo. XXIII Congreso Argentino de Horticultura, Mendoza, Argentina.
- Montealegre, J.R., P. Fuentes, y J.L. Henríquez. 1996. Efecto de la solarización y fumigación en el control de *Pyrenochaeta lycopersici* y su relación con el rendimiento y calidad de un cultivo de tomates. *Fitopatología* 31(3):217-229.
- Montealegre, J.R. 2005. Uso de la solarización y de bioantagonistas para el control de patógenos radicales y malezas en el cultivo del tomate y de la frutilla en Chile. *In*:

- Control biológico e integrado de enfermedades y nemátodos en frutales y hortalizas. Serie Digital Ciencias Agronómicas N°1 (956-19-0493-4. ISBN Libro 956-19-0483-7), Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, p. 85-99.
- Murase, J., Y. Shinohara, K. Yokoe, R. Matsuda, S. Asakawa, and T. Hashimoto. 2015. Impact of soil solarization on the ciliate community structure of a greenhouse soil. *Soil Science and Plant Nutrition* (2015)61:927-933.
Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/286441595>.
- Nava Camberos, U., M. Ramírez Delgado y K.F. Byerly Murphy. 2003. Manejo integrado de plagas en sistemas agrícolas sustentables. Cap. VIII *In*: Salazar Sosa, E., M. Fortis Hernández, A. Vázquez Alarcón y C. Vázquez Vázquez (Eds.). 2003. *Agricultura Orgánica*. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, COCyTED, México. 271 p.
- Navarro, J. R., D. Mora, J. Díaz, H. Vilches y E. Corrales 1991. Efecto de la solarización del suelo sobre la población de malezas y del hongo *Rhizoctonia solani* durante la estación lluviosa en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 15(1/2):93-98.
- Navarro, J.R. y G. Umaña. 1997. Combate de fitopatógenos en almácigos de cebolla (*Allium cepa*). Nota Técnica. *Agronomía Mesoamericana* 8(2):107-111.
- Öz, H. 2018. A new approach to soil solarization: Addition of biochar to the effect of soil temperature and quality and yield parameters of lettuce (*Lactuca sativa* L. Duna). *Scientia Horticulturae* 228:153–161.
Disponible en: www.elsevier.com/locate/scihorti.
- Ramírez Villapudua, J. y R. Sáinz Rodríguez. 1991. La solarización como herramienta para el control de malezas, patógenos y plagas del suelo.
Disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos43/solarizacion-malezas/solarizacion-malezas2.shtml#ixzz2l95gf3wZ>
- Reid, N.T.P. and J. Cohen. 2013. Alternative weed management strategies for vegetables: Solarization and mulching in onions. Proceedings of the Caribbean Food Crops Society, 49:391-397. Disponible en:
<http://cfcs.eea.uprm.edu/sites/default/files/proc/CFCS%202013%20Vol.%2049%20rs.pdf>.

-
- Ripanti, S., L. Calderón, Y. Arrieta, G. Ramírez, J. León, Y. Ovalles, R. Perrin y J. Petit. 2009. Efectividad de la solarización en el control del *damping off* en el vivero Santa María de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. *Agricultura Andina* 16:3-27.
- Rodríguez, J. y G. Salvo. 2018. Efecto de la radiación solar en el control de malezas mediante la solarización. *In: Arboleya, J. (Ed.). 2018. Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura. Serie Técnica N° 245, INIA, Montevideo, Uruguay. p. 21-25.*
- Ruiz Díaz M., R.O. Campo Arana, y J. de J. Royet Barroso. 2022. Efecto de la solarización en patógenos fúngicos que afectan al Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) en condiciones de vivero. *Temas Agrarios* 27(1):211-219.
- Sánchez Lucas, C. del M. 2013. Variación de los nitratos en un suelo enarenado con aplicación de dos materias orgánicas en solarización y biofumigación. Monografía. Departamento de Producción Vegetal, Universidad de Almería, España. 95 p.
- Seman-Varner, R., R. Mc Sorley, and R.N. Gallaher. 2007. Soil nutrient and plant responses to solarization in an agroecosystem utilizing an organic nutrient source. *Renewable Agriculture and Food Systems*: 23(2):149-154.
- Silva A.C., E. Diogo y H. Bragança. 2021. Effect of substrate solarization for the control of fungi: The case study of *Fusarium circinatum*, the quarantine agent of pine pitch canker. Instituto Nacional de Investigação Agrícola e Veterinária, 29(2):161-175.
- Stapleton, J.J. 1996. Fumigation and solarization practice in plasticulture systems. *Horticultural Science and Technology* 6(3):189-192.
- Stapleton, J.J. 2000. Soil solarization in various agricultural production systems. *Crop Protection* 19:837-841.
- Tomazeli, V.N., V. dos Santos, R.G. Ferreira Morales and A.S. Torre Figueiredo. 2019. Soil solarization in the control of bean diseases caused by *Sclerotium rolfsii*. *Brazilian Journal of Agriculture* 94(1):1-9.
- Vidales-Fernández, J.A. y J.J. Alcantar-Rocillo. 1999. Acción de la solarización y de la materia orgánica en el control de la tristeza *Phytophthora cinnamomi* Rands del aguacate (*Persea americana* L.). *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 5:255-259.

Zanón Alonso, M. 2009. Efecto de la biofumigación y la biosolarización en el control de agentes fitopatógenos. Tesis para optar por el título de Doctor. Universidad Politécnica de Valencia, España. 40 p.

3. EFECTO DE LA SOLARIZACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS SUSTRATOS

3.1. Introducción

El término sustrato se aplica a todo material sólido distinto del suelo *in situ*, natural o de síntesis, mineral u orgánico que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical y desempeña la función de soporte para la planta (Valenzuela, 2008; Cruz-Crespo *et al.*, 2013; Monsalve Camacho, 2016). Un sustrato está compuesto por tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Valenzuela *et al.*, 2014).

Según Hidalgo Loggiodice *et al.* (2009), se entiende por sustrato a “todo material o combinación de diferentes componentes que, no siendo tóxico, provea sostén, adecuada capacidad de intercambio catiónico, así como una adecuada retención de humedad para la planta que en él crecerá, con una porosidad que garantice una correcta aireación para un óptimo desarrollo radical”.

Se entiende que un “componente de sustrato” es cualquier material individual mezclado en proporciones volumétricas con otros componentes, para alcanzar un nivel adecuado de aireación, retención de agua y nutrientes para el crecimiento de las plantas. La elección de uno u otro componente del sustrato depende de su disponibilidad, facilidad de mezcla y costo en la región donde se encuentre el vivero, además de la experiencia del viverista en su uso (Monsalve Camacho, 2016).

Cabrera (1999), Barbaro (2011), Cruz-Crespo *et al.* (2013) y Gayosso Rodríguez *et al.* (2018) enfatizan que un buen sustrato deberá tener adecuadas propiedades físicas tales como aireación y drenaje, retención de agua y baja densidad aparente, y propiedades

químicas adecuadas como pH, sales solubles y nutrientes. Además, son importantes las características biológicas como el contenido de materia orgánica, así como su estado y velocidad de descomposición (Pastor Sáes, 1999; Monsalve Camacho, 2016).

Un buen sustrato es esencial para la producción de plantas de alta calidad (Gayosso Rodríguez *et al.*, 2018; Barbaro y Karlanián, 2020). Dado que el volumen de los contenedores es limitado, pues suelen ser de poca altura y tamaño pequeño, el sustrato y sus componentes deben tener el suficiente contenido de agua, aire y nutrientes que necesitan las plantas, puesto que las raíces no pueden extenderse fuera del contenedor para conseguir lo que no encuentren en él. Además, un contenedor de poca altura ejerce una presión muy baja para eliminar el agua de drenaje. Con estas restricciones, el mejor sustrato será aquel que proporcione la máxima cantidad de agua, el mayor volumen de aire, los elementos nutritivos necesarios, el anclaje adecuado para las raíces y que, además, no contenga ningún componente que inhiba el crecimiento de las plantas (Burés, 2002; Monsalve Camacho, 2016; Barbaro y Karlanián, 2020).

Según Cabrera (1999), una planta que crece en una maceta se expone generalmente a un ambiente más estresante y de cambios constantes que aquella que crece en el campo como consecuencia directa del volumen restringido del sustrato en la maceta, el cual tiene que suplir las necesidades de una planta que es relativamente grande para ese volumen.

Para Valenzuela *et al.*(2005) y Cruz-Crespo *et al.* (2013), el sustrato ideal sería aquel que proporcione a la planta las mejores condiciones para su crecimiento, que posea un bajo impacto ambiental, que la relación costo/beneficio sea adecuada para el sistema productivo en cuestión y que esté disponible en la zona.

3.1.1. Propiedades físicas, químicas y biológicas

Dentro de una serie de aspectos esenciales que caracterizan a las tres fases que componen un sustrato se destacan: la densidad del sustrato (DS), el tamaño y la forma de las partículas, el espacio que ocupan los poros en el volumen total del sustrato, la capacidad de los poros de retener agua y la de liberar y conducir agua desde la trama porosa hacia la raíz, y el intercambio gaseoso, los que actúan sobre el crecimiento de las plantas (Raviv, 2002, citado por Valenzuela *et al.*, 2014). Un medio de cultivo adecuado se caracteriza por poseer buenas propiedades físicas, como: aireación y drenaje, retención

de agua y baja densidad aparente (Barbaro, 2011; Cruz-Crespo, *et al.*, 2013; Gayosso Rodríguez *et al.*, 2018; Barbaro y Karlanián, 2020).

Cabrera (1999) indica que el sustrato deberá tener una porosidad total de por lo menos 70% con base en volumen (V/V), aunque lo ideal es que sea superior al 85%, según Cruz-Crespo *et al.* (2013). El espacio ocupado por el aire debe ajustarse de acuerdo con la tolerancia de las plantas a niveles bajos de aireación. Hasta el momento no existe consenso entre los autores sobre cuál es el valor óptimo. Algunos aceptan que éste debe estar comprendido entre 10 y 35% para sustratos en maceta, mientras que otros señalan que debe situarse entre 20 y 30 % (Cruz-Crespo *et al.*, 2013). Con respecto a la capacidad de retención de agua por el sustrato, un mínimo de 55% es deseable para una maceta o recipiente de 10 a 15 cm de profundidad. Asimismo, se desea que el volumen de agua total disponible para la planta sea por lo menos el 30 % del volumen total del sustrato (Cabrera, 1999). La granulometría de un material orgánico e inorgánico determina el tamaño y la distribución de los poros (Tabla 3.1) y la proporción agua-aire y, en consecuencia, el régimen de riego y el desarrollo de las plantas (Prasad y Chualáin, 2004, citado por Morales-Maldonado y Casanova-Lugo, 2015).

Tabla 3.1. Influencia del tamaño de la partícula en las propiedades físicas del material.
Fuente: Morales- Maldonado y Casanova-Lugo (2015).

Tamaño	Retención humedad	Capacidad Aireación	Densidad		Espacioporoso total	Porosidad ocluida
			Aparente	Real		
> 0,5 mm	disminuye	70-84%	disminuye	disminuye	aumenta	Aumenta
< 0,5 mm	aumenta	8-27%	aumenta	aumenta	disminuye	Disminuye

El tamaño de partícula equivalente a 0,50 mm es importante en la relación humedad-aire, ya que presenta una óptima capacidad de retención de humedad (CRH), lo que significa que el agua se encuentra fácilmente disponible para las raíces de las plantas, y una capacidad de aireación (CA) entre 70-84%, que permite el crecimiento de éstas sin daño mecánico debido a problemas de compactación (Morales-Maldonado y Casanova-Lugo, 2015).

La densidad aparente también debe ser considerada cuidadosamente, ya que puede ocasionar aumentos significativos en el peso de las macetas, dificultando su carga y transporte. Se suelen preferir los sustratos ligeros, aunque no son recomendables en viveros expuestos frecuentemente a fuertes vientos, ya que el reacomodo de las macetas

volcadas en el vivero puede ser una labor intensiva y costosa (Davidson *et al.*, 1994, citado por Cabrera, 1999; Barbaro y Karlanián 2020). Según Alvarado y Solano (2002), se consideran valores óptimos de densidad aparente de 100 a 800 g·L⁻¹, con valores mínimos entre 300 y 400 g·L⁻¹ para la mayoría de las plantas en maceta, excepto para plantas grandes, que pueden requerir una densidad de 500 a 750 g·L⁻¹.

Es importante que un sustrato provea no sólo un ambiente físico favorable, sino también propiedades químicas adecuadas (Cabrera, 1999; Barbaro, 2011). En este sentido, los sustratos orgánicos son los que contribuyen en mayor grado a estas propiedades. La capacidad de intercambio catiónico (CIC), la disponibilidad de nutrientes, la salinidad y la relación C:N son las más importantes (Cruz-Crespo *et al.*, 2013; Gayosso Rodríguez *et al.*, 2018). Estas propiedades, junto con el contenido de materia orgánica, la liberación de CO₂ y la fitotoxicidad, entre otras, se utilizan para evaluar la estabilidad y madurez de los constituyentes orgánicos de los sustratos (López Clemente *et al.*, 2015).

La CIC depende fundamentalmente del pH, del contenido y la composición de la materia orgánica, y de la arcilla de la fase sólida. Según Cruz-Crespo *et al.* (2013), los materiales orgánicos con elevada CIC poseen mayor capacidad de amortiguamiento ante cambios de pH, y así es menos probable que los nutrientes se pierdan por lixiviación.

Monsalve Camacho (2016) afirma que las propiedades químicas del sustrato ideal propuestas por Abad *et al.* (2001) corresponden a los siguientes valores: pH: 5,2-6,3; conductividad eléctrica: 0,75-3,49 Ds·m⁻¹; materia orgánica: > 80%; NO₃⁻: 100-199 mg·L⁻¹; K⁺: 150-249 mg·L⁻¹; Na⁺: ≤ 115 mg·L⁻¹; Cl⁻: ≤ 180 mg·L⁻¹ y SO₄⁼: ≤ 960 mg·L⁻¹.

El pH controla las reacciones químicas que determinan si los nutrientes estarán disponibles o no (Burés, 2002). Cuando el pH del sustrato se encuentra en el rango óptimo (5,5-6,8), la mayoría de los nutrientes mantiene su máximo nivel de solubilidad. Por debajo de este rango, pueden presentarse deficiencias de N, K, Ca y Mg; mientras que, por encima, puede disminuir la solubilidad del Fe, P, Mn, Zn y Cu. Los óxidos metálicos de Fe, Mn, Cu y Zn se vuelven más solubles al bajar el pH (< 5), pudiendo resultar fitotóxicos (Barbaro *et al.*, 2018).

En cuanto a la concentración de sales solubles en la solución del sustrato, que se mide mediante la conductividad eléctrica (CE), Burés (2002) y Barbaro *et al.* (2018) recomiendan que la CE de un sustrato sea baja, en lo posible menor que 1dS·m⁻¹ pues así se facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo. Según Cabrera (1999), el nivel de sales solubles es adecuado cuando la CE se encuentra

en el intervalo 1-2 dS·m⁻¹, y alto con valores superiores a 3 dS·m⁻¹. Al respecto, Cruz Crespo *et al.* (2013) afirman que la CE suele ser elevada en sustratos orgánicos; por ello, en el cultivo en sustrato es mayor la probabilidad de acumulación de sales en comparación con el suelo. La respuesta de la planta a la alta CE depende de la edad, las condiciones ambientales, el manejo del cultivo y las características de la especie.

Las características biológicas de los sustratos provienen en su mayoría de la presencia de materia orgánica, la que actúa como un reservorio dosificador de nutrientes. Además, ésta puede ejercer efectos supresivos, tener actividad hormonal y enzimática, y contener agentes bióticos que favorecen el crecimiento de las plantas. La biomasa microbiana es la principal responsable de la descomposición de la materia orgánica y es considerada un indicador ecológico sensible a los cambios ambientales (Acosta y Paolini, 2006; Paolini Gómez, 2017). La degradación de la materia orgánica del suelo (MOS) es un proceso inherente a todos los microorganismos heterotróficos. Su tasa o velocidad de descomposición generalmente indica el nivel de la actividad microbiana de un suelo (Paolini Gómez, 2017). La respiración microbiana está correlacionada con la actividad biológica del suelo y, por ende, con la biomasa microbiana que representa la parte viva de la materia orgánica y cuantifica la población total de los microorganismos presentes en el suelo (Matheus *et al.*, 2017).

Todos los materiales orgánicos son inestables y se pueden degradar con el tiempo (Burés, 2002; Alvarado y Solano, 2002). Por ello es importante determinar algunas características tales como la población microbiana, su relación con la presencia de sustancias reguladoras y la respiración como un indicador de la velocidad de descomposición (Villasmil, 2008, citado por Cruz-Crespo *et al.*, 2013). La relación entre el C total y el N total en un sustrato indica el grado de evolución de la materia orgánica y su grado de resistencia a la degradación por los microorganismos, que necesitan N disponible en una relación de al menos 1:30 de C. Cuando la relación C:N es mayor que 30, el N disponible es utilizado primero por los microorganismos que por las plantas, creándose deficiencias nutricionales por este elemento (Alvarado y Solano, 2002).

La adición de componentes orgánicos a un sustrato ayuda a mejorar principalmente sus propiedades físicas y químicas, tales como capacidad de retención de agua, porosidad de aire, disminución de la densidad aparente y mejora en la capacidad de intercambio catiónico. La descomposición del componente orgánico de un sustrato durante el período de crecimiento de un cultivo, además de causar problemas como reducciones en el

volumen total de sustrato disponible para las plantas, puede alterar significativamente las propiedades físicas obtenidas.

Un buen sustrato deberá tener elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible, buena aireación, baja densidad aparente, elevada porosidad, baja salinidad, elevada capacidad tampón, baja velocidad de descomposición, estabilidad estructural, reproductividad y disponibilidad, bajo costo, y fácil manejo (mezclado, desinfección, etc.). Así, Gonçalves e Poggiani (1996), citados por Kratz (2011), indican una escala de valores para la interpretación de las propiedades físicas y químicas de sustratos usados para la producción de plantines forestales (Tabla 3.2).

Según López Cosme y González Torres (1995), la solarización del suelo ha probado su efectividad en la disminución temporal de la salinidad en los primeros 15 cm del perfil. La disminución de la CE se atribuye a la prevención del ascenso capilar de la solución del suelo y su concentración por evaporación en la superficie cuando los suelos poseen una capa freática salina. Resultados contrarios obtuvieron Chen y Katan (1980) en Israel y Parra (2014) en Santiago del Estero, Argentina, donde la CE se incrementó en los sustratos solarizados en comparación con los sin solarizar. Según Golzardi *et al.* (2015), al aumentar la temperatura del suelo, la tasa de descomposición y mineralización de la materia orgánica del suelo aumenta, y esto provocaría el incremento de la CE del suelo. Durante la solarización, el contenido de carbono orgánico total (COT) disminuye debido a la descomposición de la materia orgánica. El contenido porcentual de materia orgánica en el sustrato es importante en este sentido: a mayor porcentaje de ésta, más alta es la temperatura que se alcanza durante el proceso (Simmons *et al.*, 2016).

En ensayos realizados por Chauhan *et al.* (1988), se determinó que la solarización de suelos destinados a la producción de poroto guandú (*Cajanus cajan* (L) Millsp.) y de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) no afectó significativamente los valores de pH, CE, P disponible ni NH_4^+ , y provocó un incremento en la concentración de NO_3^- ; sin embargo, Parra (2014) determinó que el pH en sustratos solarizados disminuyó en relación con los testigos. Lefèvre y de Souza (1993) afirman que, de un modo general, la solarización no afecta las propiedades químicas del suelo, aunque se han detectado variaciones en la concentración de K y de materia orgánica en algunos casos. Esto también lo corroboran Streck *et al.* (1995) y Parra (2014), quienes reportaron variaciones en el carbono orgánico total (COT) y el carbono potencialmente mineralizable (Co) en sustratos solarizados.

Tabla 3.2. Escala de propiedades físicas y químicas de sustratos para la producción de plantines forestales propuesta por Gonçalves e Poggiani (1996), citado por Kratz (2011).

Propiedades	Nivel			
	Bajo	Medio	Alto	Adecuado
Físicas				
Densidad aparente (g cm ⁻³)	<0.25	0.25-0.50	>0.50	0.45-0.55
Porosidad total (%)	<55	55-75	>75	75-85
Macroporosidad (%)	<20	20-40	>40	35-45
Microporosidad (%)	<25	25-50	>50	45-55
Capacidad máxima de retención de agua (mL·50cm ⁻³)	<15	15-25	>25	20-30
Químicas				
Relación C total : N total	8 a 12:1	12 a 18:1	>18:1	8 a 12:1
pH en CaCl ₂ 0,01M	<5	5-6	>6	5.5-6.5
P resina (mg·dm ⁻³)	<200	200-400	>400	400-800
K intercambiable (mmol _c ·dm ⁻³)	<15	15-30	>30	30-100
Ca intercambiable (mmol _c ·dm ⁻³)	<100	100-150	>150	100-200
Mg total (mmol _c ·dm ⁻³)	<50	50-100	>100	50-100
CIC efectiva (mmol _c ·dm ⁻³)	<100	100-200	>200	>200

Reybet *et al.* (2012) y Hasan *et al.* (2016) afirman que la solarización produce un incremento del N en sus formas NO₃⁻ y NH₄⁺. Esto ya fue comprobado por Kumar y Yaduraju (1992), quienes observaron un aumento significativo en la proporción de nitratos del suelo y una reducción en la CE en suelos solarizados. Sin embargo, la proporción de C orgánico y el pH no sufrieron modificaciones, resultados que coinciden con los obtenidos por Chen y Katan (1980).

También Ghini *et al.* (2003) reportan cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos solarizados en el estado de São Paulo, Brasil, tales como mejoras en la estructura, disminución de la resistencia a la penetración, aumento en la concentración de nutrientes, reducción de la actividad microbiana y aumento en la supresividad.

No se conoce un registro formal de los tipos de sustratos que se emplean en viveros forestales de Santiago del Estero, pero, como consecuencia de un recorrido realizado por los viveros de la zona, se pudo comprobar que el sustrato más empleado es una mezcla de suelo y de mantillo obtenido del monte (Parra, 2014). Según Valenzuela *et al.* (2005),

cuando los mismos productores realizan la formulación de los sustratos, el resultado es el desconocimiento de sus propiedades, así como una gran variabilidad, ya que para su producción se utiliza una amplia gama de materiales, que difieren en su origen y composición, incluyendo tanto materiales orgánicos (cortezas, turbas y estiércoles) como productos inorgánicos (suelo, perlita y vermiculita).

Tomando como base la extensa revisión bibliográfica hasta aquí presentada y las inquietudes surgidas como consecuencia de ella, se proponen a continuación los **objetivos** de este trabajo:

1. Realizar la caracterización de dos sustratos preparados a partir de una mezcla de mantillo de algarrobo (*Neltuma alba*) y suelo en proporciones 1:1 (V/V) y 1:2 (V/V).
2. Evaluar el efecto de la solarización sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de dichos sustratos.

3.2. Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo durante el período comprendido entre el 20 de febrero y el 20 de marzo del 2018 en las instalaciones del Instituto de Silvicultura y Manejo de la Facultad de Ciencias Forestales. Se ensayaron dos sustratos. Para preparar el Sustrato 1 se mezcló (V/V) una parte de mantillo de *Neltuma alba* con una parte de suelo, se homogeneizó y se tamizó. El término mantillo se refiere a la capa superficial de suelo forestal (horizonte H_0) que se encuentra debajo de los árboles de algarrobo, que no se encuentra en un estado avanzado de descomposición, compuesta mayormente por hojarasca, ramitas finas secas, corteza y frutos. Para preparar el Sustrato 2 se mezcló (V/V) una parte de mantillo con dos partes de suelo. Una parte de cada sustrato se embolsó y conservó en depósito, constituyendo los testigos (T1 y T2), mientras que la otra se solarizó. Para efectuar la solarización, cada sustrato (S1 y S2) se distribuyó en canteros de 1 m de ancho por 2 m de largo y 0,20 m metros de altura, se regó a capacidad de campo y luego se cubrió con polietileno transparente de 100 micrones. Transcurridas las cuatro semanas, se procedió a descubrir los canteros (Fig. 3.1). Se tomaron 3 muestras al azar de cada uno de ellos para realizar los análisis físicos, químicos y biológicos.



Figura 3.1. Solarización de los sustratos. A: Preparación de los sustratos, B: distribución de los sustratos y colocación del *data logger*, C: riego y cobertura de los sustratos, D: descubrimiento de los sustratos después de cuatro semanas de instalado el ensayo.

3.2.1. Propiedades Físicas

Se midieron las siguientes propiedades físicas:

- Temperatura, con un *data logger*, a intervalos de una hora, desde el 20 de febrero hasta el 20 de marzo de 2019. Los resultados se expresaron en °C.
- Densidad aparente, mediante el protocolo propuesto por la Red INTA de Laboratorios de Suelo, Agua y Material Vegetal (RILSAV), descrito por Ferrari (2011). Los resultados se expresaron en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
- Porosidad total, según la técnica descrita por Rucks *et al.* (2004). Los resultados se expresaron en porcentaje (%).

3.2.2. Propiedades Químicas

Para la determinación de estas propiedades se enviaron las muestras de los sustratos al Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua del INTA y al Laboratorio de

Microbiología de la Facultad de Agronomía y Agroindustrias (FAyA) de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Argentina. Se midieron:

- pH en extracto de pasta de saturación.
- CE en extracto de pasta de saturación. Los resultados se expresaron en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$.
- Carbono Orgánico Total (COT), por oxidación con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, digestión en caliente con H_2SO_4 y cuantificación por espectrofotometría a 590 nm. Los resultados se expresaron en $\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo y en % (Nelson y Sommers, 1982).
- Nitrógeno Total (NT), según el método Kjeldahl (Bremner and Mulvaney, 1982). Los resultados se expresaron en $\text{g N}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo y en %.
- Concentración de P intercambiable, mediante el método de P extractable descrito por Bray. Los resultados se expresaron en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Concentración de NO_3^- intercambiable, mediante ácido fenildisulfónico. Los resultados se expresaron en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Concentración de K^+ intercambiable, por medio de fotometría de llama. Los resultados se expresaron en $\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Concentración de Na^+ intercambiable, mediante fotometría de llama. Los resultados se expresaron en $\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Concentración de Ca^{+2} intercambiable, por complejometría EDTA. Los resultados se expresaron en $\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Concentración de Mg^{+2} intercambiable, por complejometría EDTA. Los resultados se expresaron en $\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$.

3.2.3. Propiedades Biológicas

En el Laboratorio de Microbiología de la FAyA se midieron:

- Respiración, según la técnica descrita por Anderson (1982). Los resultados se expresaron en $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g de suelo}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$.
- Carbono potencialmente mineralizable y tasa de mineralización, mediante el sistema OxiTop Control (Slevogt-Strasse, 2006).

- Carbono de la biomasa microbiana (C_{bm}), por el método de fumigación- extracción (Vance *et al.*, 1987) y determinado por espectrofotometría a 590 nm. Los resultados se expresaron en µg C·g⁻¹ de suelo.
- Presencia de sustancias fitotóxicas, según la técnica descrita por Zuconni *et al.* (1981).

Se trabajó con rabanito (*Raphanus sativus*) como especie indicadora, Para realizar este ensayo se prepararon extractos de cada una de las muestras, en una relación 1:2, se agitó durante 15 minutos y se filtró. Se colocó papel de filtro en cajas de Petri y se regó con 5 mL de extracto. Se sembraron 100 semillas de rabanito y se incubó durante 5 días en cámara de germinación a 30°C. Se midió longitud radicular y poder germinativo. Para el testigo, se colocaron 100 semillas de rabanito en cajas de Petri que se regaron con 5 ml de agua destilada e incubadas a 30°C por periodo de 5 días. Se midió porcentaje de germinación relativo (PGR), crecimiento de radícula relativo (CRR) e índice de germinación (IG) con las siguientes ecuaciones:

$$PGR = \frac{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el extracto}}{N^{\circ} \text{ de semillas germinadas en el testigo}} * 100$$

$$CRR = \frac{\text{Elongación de radículas en el extracto (cm)}}{\text{Elongación de radículas en el testigo (cm)}} * 100$$

$$IG = \frac{PGR * CRR}{100}$$

3.2.4. Análisis Estadístico

Los resultados de las variables evaluadas en los sustratos se sometieron a un Análisis de la Varianza y a un Test de LSD Fisher para comparación de medias ($p < 0,05$), mediante el uso del software estadístico InfoStat, versión 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Propiedades Físicas

3.3.1.1. Temperatura

Las temperaturas medias registradas oscilaron entre 29,8 y 28,3°C en los testigos y entre 38 y 34,2°C en los sustratos solarizados (Tabla 3.3), obteniéndose diferencias de 8,2 y 5,9°C entre los sustratos solarizados y los sin solarizar, respectivamente. Los valores de temperaturas medias registrados a 10 cm de profundidad en los sustratos solarizados se encuentran dentro del rango de 32 a 37°C, registrado por Elmore *et al.*, (1997) y Parra (2014).

Las temperaturas medias máximas alcanzadas mediante la solarización variaron entre 45,7 y 40,8°C (Tabla 3.3). Luvisi *et al.* (2016) reportaron valores similares, solarizando el suelo durante 20 días.

Tabla 3.3. Temperaturas alcanzadas en los sustratos testigos (T) y solarizados (S). S1: sustrato 1:1 V/V solarizado, T1: sustrato 1:1 V/V testigo, S2: sustrato 1:2 V/V solarizado y T2: sustrato 1:2 V/V testigo.

	Temperaturas (°C)			
	S1	T1	S2	T2
Media general	38,0	29,8	34,2	28,3
Media máxima	45,7	32,4	40,8	30,9
Media mínima	31,6	27,6	28,6	26,1
Máxima absoluta	52,0	36,0	47,5	33,5

Las diferencias de temperaturas máximas entre S1 y T1 fueron de 13,3°C y de 9,9°C entre S2 y T2. Oscilaciones semejantes obtuvieron Kumar y Yaduraju (1992) en la India, Baptista *et al.* (2007) en Brasil, y Parra (2014) en Santiago del Estero, Argentina. Las temperaturas mínimas registradas en los sustratos solarizados oscilaron entre 31,6 y 28,6°C (Tabla 3.3). Las diferencias de temperaturas mínimas entre S1 y T1 fueron de 4°C, y de 2,5°C entre S2 y T2.

La cantidad de horas en las que la temperatura de los sustratos superó los 37°C (crítica para malezas y patógenos) se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Número total de horas de exposición de sustratos solarizados (S) y testigos (T), a temperaturas por encima de 37, 40, 45, 50 y 55°C. S1: sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) solarizado, T1: sustrato 1:1 V/V testigo, S2: sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo) solarizado y T2: sustrato 1:2 V/V testigo.

Temperatura	Número de horas acumuladas			
	S1	T1	S2	T2
> 37°C	330	0	190	0
> 40°C	226	0	85	0
> 45°C	79	0	5	0
>50°C	5	0	0	0
>55°C	0	0	0	0

El sustrato 1 acumuló mayor cantidad de horas por encima de los 37°C que el sustrato 2. Según Simmons *et al.* (2016), cuanto mayor es el contenido de materia orgánica, mayor es la temperatura que se alcanza durante el proceso. Esto fue corroborado por Ghini *et al.* (2003), quienes reportaron aumentos de la temperatura máxima en suelos solarizados con la incorporación de materia orgánica. También fue demostrado por Ripanti *et al.* (2009), quienes ensayaron el efecto de la solarización para el control del *damping off*, con y sin agregado de materia orgánica, obteniendo incrementos de 4 a 5°C en sustratos con materia orgánica incorporada.

3.3.1.2. Densidad Aparente

Los resultados de la densidad aparente (Dap) se presentan en la Fig. 3.2. La Dap del sustrato con una proporción 1:1 de mantillo y suelo fue 0,61 g·cm⁻³ para el testigo (T1) y 0,63 g·cm⁻³ para el sustrato sometido a solarización (S1). Estos valores son similares a los obtenidos por García *et al.* (2001) en sustratos elaborados con corteza de pino compostada y arena, y por Salazar *et al.* (2018) en sustratos preparados en una proporción 75% de vermicompost y 25% de arena (V/V).

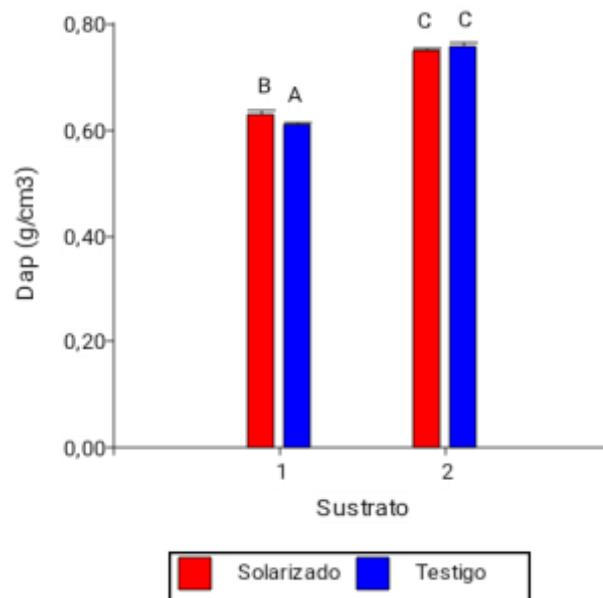


Figura 3.2. Densidad aparente (Dap) de sustratos solarizados y testigos. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

La Dap del sustrato con una proporción 1:2 (V/V) de mantillo y suelo fue de 0,76 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el testigo (T2) y 0,75 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para el sustrato solarizado (S2), debido a que estos sustratos poseen una mayor proporción de suelo en comparación con T1 y S1. Densidades similares obtuvieron Salazar *et al.* (2018), en sustratos preparados con una proporción (V/V) 45% de vermicompost y 55% de arena, y Parra (2014), en sustratos preparados con vermicompost y suelo en una proporción 1:3 (V/V). Según Alvarado y Solano (2002), estos valores podrían considerarse óptimos ya que se encuentran en el intervalo de 100 a 800 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Sin embargo, son altos según la escala propuesta por Gonçalves y Poggiani (1996), citados por Kratz (2011), quienes indican que, para la producción de especies forestales, la Dap adecuada se encuentra en un rango del 0,45 a 0,55 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

3.3.1.3. Porosidad Total

La porosidad total fue de 54,43% para T1 y 52,21% para S1, mientras que T2 y S2 presentaron valores de 57,77 y 52,21%, respectivamente (Fig. 3.3).

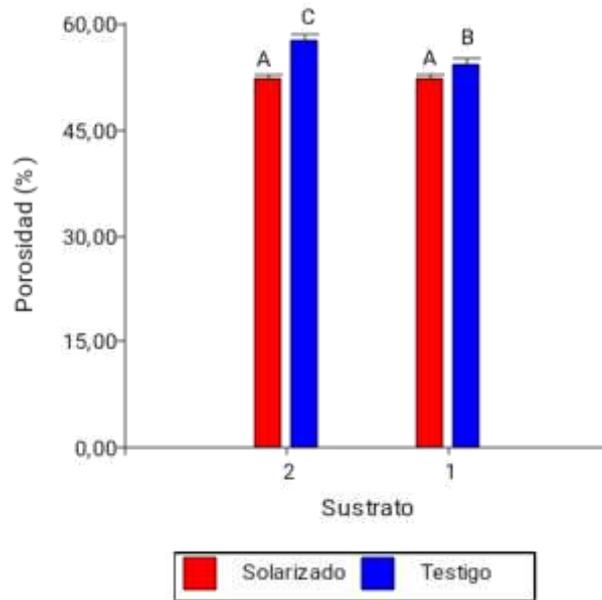


Figura 3.3. Porosidad de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Tomando como base la escala presentada en la Tabla 2, la porosidad de S1 y S2 es baja mientras que la de T1 y T2 es media. Según los parámetros de Cabrera (1999) y Cruz-Crespo *et al.* (2013), ni los sustratos testigos ni los solarizados poseen una porosidad adecuada. La disminución del espacio poroso de los sustratos solarizados pudo deberse a la compactación que se ejerció al aplicar el polietileno.

Los valores de porosidad obtenidos son similares a los publicados por García *et al.* (2001) en sustratos producidos con suelo y hojas de monte, y también en sustratos elaborados con cascarilla de arroz compostado y polvo de coco, ambos mezclados con arena en una proporción 70:30 % (V/V). Por otra parte, Gayosso- Rodríguez *et al.* (2018), trabajando con sustratos elaborados con fibra de coco, y Salazar *et al.* (2018), utilizando sustratos preparados con 75% de vermicompost y 25% de arena (V/V), también reportaron valores similares. Sin embargo, esos valores son menores que los determinados por López-Clemente *et al.* (2015), quienes obtuvieron una porosidad mayor de 85% en sustratos elaborados con cáscaras de naranja, paja de trigo y bagazo de caña.

3.3.2. Propiedades Químicas

3.3.2.1. pH

Los valores de pH de los sustratos testigos y solarizados (Fig. 3.4) se encuentran dentro de los rangos óptimos especificados por Cabrera (1999), Barbaro *et al.* (2018) y Monsalve Camacho (2016).

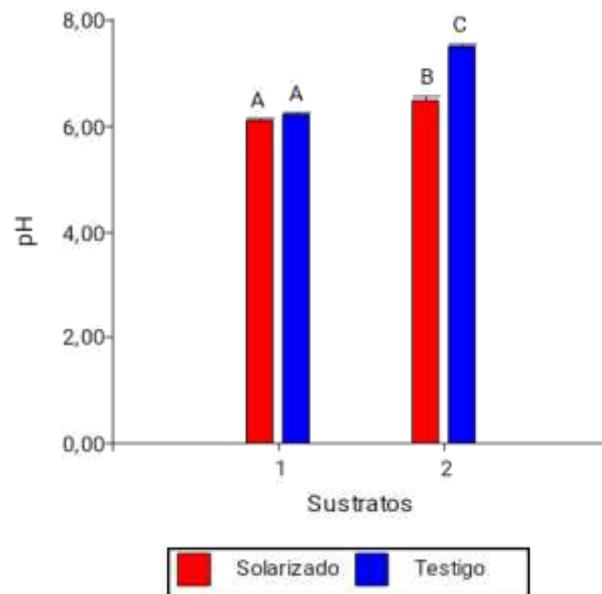


Figura 3.4. pH de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

En comparación con los sustratos ensayados por Monsalve Camacho (2016) en Colombia a partir de residuos agrícolas y agroindustriales, los valores de pH de T1 y S1 se aproximaron a los de los sustratos elaborados a base de coco picado fino y grueso. Estos sustratos también presentaron un pH similar a los reportados por Kratz (2015) en combinaciones de cáscara de pino con turba y en mezclas de fibra de coco con vermiculita. El valor de T2 fue similar a los obtenidos en sustratos elaborados con aserrín, con virutas, y con fibra de palma (Monsalve Camacho, 2016) así como también en los sustratos a base de cáscara de pino compostada, mezclada con turba en distintas proporciones (Kratz, 2015). A su vez, S2 presentó valores de pH próximos a los de sustratos preparados con astillas y con fibra de coco, a los preparados con cascarilla de arroz, carbonizada en distintas proporciones con fibra de coco (Kratz, 2015), y a los elaborados con turba, corteza

y gallinaza, mezcladas en una proporción 40:30:30, respectivamente (Castillo-Martínez, 2007). Todos los sustratos presentaron un pH menor al obtenido por Gayosso-Rodríguez *et al.* (2018) en sustratos preparados con aserrín de pino, con bagazo de *Agave foucroydes* y con hojas de *Gymnospodium floribundum*, al reportado por Galindo Pardo *et al.* (2014) en sustratos de estiércol solarizado y de vermicompost puros y combinados, y al informado por Salazar *et al.* (2018) en sustratos preparados con vermicompost y arena.

3.3.2.2. Conductividad Eléctrica

Con respecto a la concentración de sales solubles, los valores considerados óptimos varían según los autores. Así, la CE de los sustratos ensayados (Fig.3.5) se encuentra dentro del rango propuesto por Abad (2001), según Monsalve Camacho (2016), pero es elevada si se toman en cuenta los valores sugeridos por Burés (2002) y Barbaro *et al.* (2018), quienes indican que la CE debería ser menor de $1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

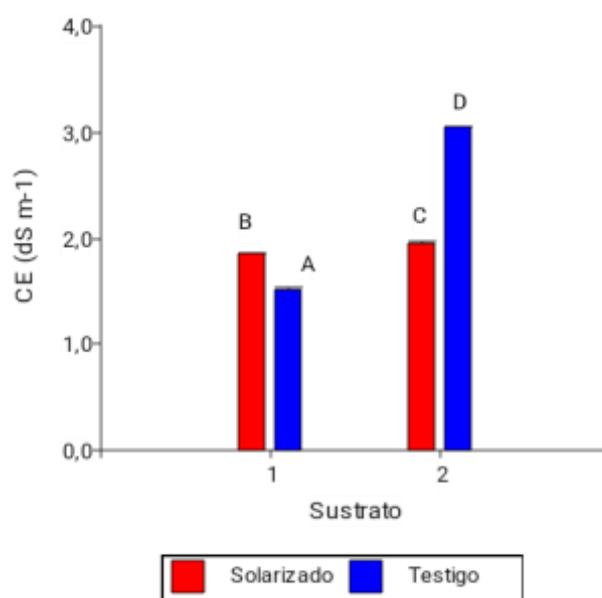


Figura 3.5. Conductividad eléctrica (CE) de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Para Gayosso-Rodríguez (2018), un valor de CE menor a $2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ sería adecuado. Según este criterio, solo la CE de T2 supera ese nivel (Fig. 5). La CE de T1, S1 y S2 fue menor a la determinada por Salazar *et al.* (2018) en sustratos con vermicompost y arena ($2,23\text{-}9,36 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). La CE de T1 fue similar a la obtenida por Monsalve Camacho (2016)

en sustratos de cascarilla de arroz quemada y en sustratos de cascarilla de palma. También Gayosso-Rodríguez (2018) reportó valores similares en aserrín de pino. La CE de S1 se aproximó a las obtenidas por el mismo autor en sustratos preparados con astillas de coco, con fibra de coco y en sustratos inorgánicos como arena y escoria fina de carbón. La CE de T2 fue similar a la obtenida por Galindo Pardo *et al.* (2014) en sustratos de estiércol solarizado y en sustratos elaborados con vermicompost puros y combinados. Sin embargo, fue menor a los valores reportados por López Clemente *et al.* (2014) en sustratos compostados de paja de trigo (6,65), bagazo de caña (4,20) y cáscara de naranja (3,96), y también menor a los publicados por Ybalo *et al.* (2017) en sustratos preparados con compost. La CE de S2 fue similar a la obtenida por Kratz (2015) en un sustrato combinado con 70% de cáscara de arroz carbonizada y 30% de biosólido obtenido de aguas residuales, y en otro, compuesto por un 90% de carbón vegetal, obtenido a partir de pino y eucalipto y 10% de biosólido.

3.3.2.3. Materia Orgánica

Debido a la fracción mineral de los sustratos ensayados, el contenido de materia orgánica fue mucho menor al sugerido para los sustratos de origen orgánico, siguiendo el orden T1>S1>S2>T2, como se ilustra en la Fig. 3.6.

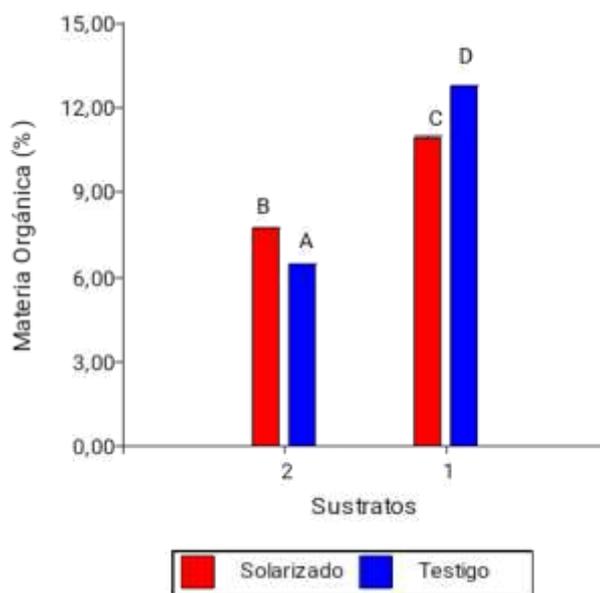


Figura 3.6. Contenido de materia orgánica de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

El contenido de materia orgánica de S1 y de T1 (10,98% y 12,81%, respectivamente) fue superior al reportado por Galindo Pardo *et al.* (2014) en sustratos

compuestos por estiércol bovino solarizado (8,8%), vermicompost (7,04%) y una combinación de ambos materiales (7,89%). En S2 la materia orgánica fue superior a la contenida en sustratos elaborados con un 50% de cáscara de arroz quemada y un 50% de vermiculita (Kratz *et al.*, 2013).

El contenido de C orgánico siguió el mismo orden que el de la materia orgánica, (Fig. 3.7). Los valores obtenidos son coincidentes con los reportados por Parra (2014) en sustratos elaborados con mantillo y con lombricompost, mezclados con suelo en proporción 1:3 (V/V). Los resultados obtenidos por Sánchez-Hernández *et al.* (2011) sobre el contenido de carbono en suelos con distintos usos agropecuarios permiten afirmar que los valores de carbono orgánico de S1 y T1 (Fig. 3.7) se encuentran dentro de los rangos obtenidos en los primeros 15 cm de suelo destinados al cultivo de cítricos y eucaliptos. Los valores de S2 se aproximan a los valores determinados para suelos destinados a la producción de pasto y los de T2, a los destinados a caña de azúcar y arroz.

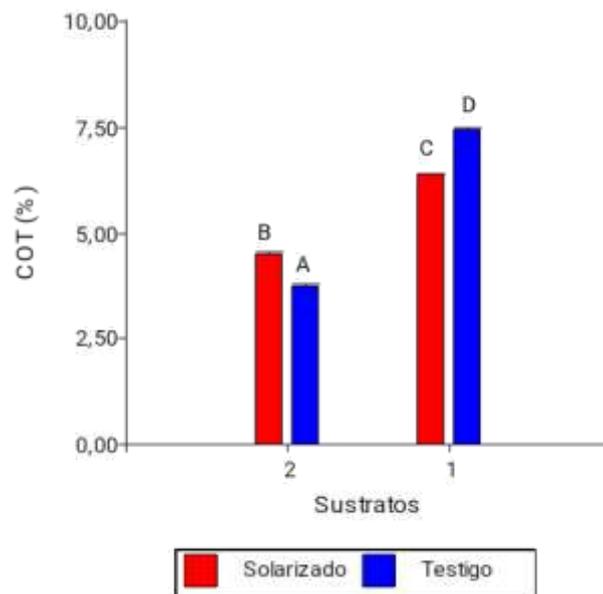


Figura 3.7. Contenido de carbono orgánico total (COT) de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

3.3.2.4. Nitrógeno Total

En T1, el nivel de N₂ total de los sustratos (Fig. 3.8) fue similar al obtenido por Monsalve Camacho (2016) en sustratos elaborados con mesocarpio de coco. Los valores determinados en S1 se asemejaron a los obtenidos en sustratos elaborados con cáscara de arroz, con aserrín y con viruta, y a los reportados por Kratz (2015) en sustratos con 50% de corteza de pino y 50% de vermiculita. El contenido de nitrógeno en T2 fue similar al obtenido por Kratz (2015) en sustratos a base de cáscara de pino, en sustratos elaborados con un 10% de carbón vegetal y un 90% de vermiculita, y en sustratos con un 30% de cáscara de pino semi compostada y un 70% de vermiculita.

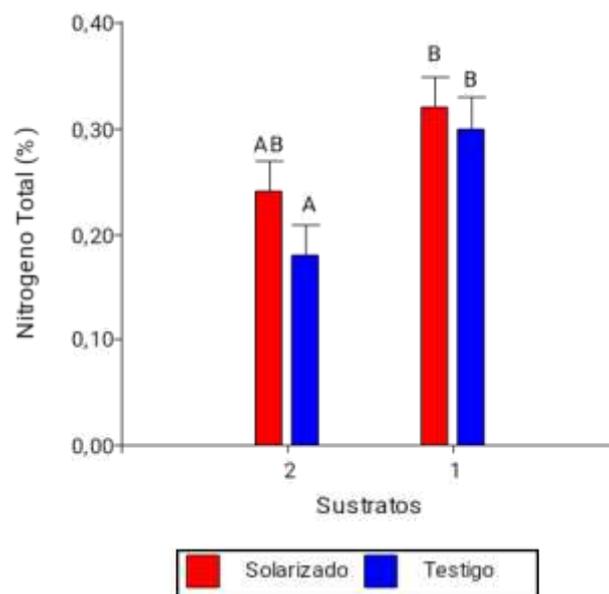


Figura 3.8. Contenido de Nitrógeno Total (NT) de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

3.3.2.5. Relación C:N

La relación Carbono:Nitrógeno (C:N) de los sustratos ensayados se presenta en la Fig. 3.9. Según Gayosso Rodríguez *et al.* (2018), la relación C:N es un indicador del origen, el grado de madurez y la estabilidad de la materia orgánica. Por su parte, López Clemente *et al.* (2015) afirman que la relación C:N tiende a disminuir durante el proceso de biodegradación debido a la pérdida de C en forma de CO₂ y a la pérdida de agua por evaporación durante la mineralización de la materia orgánica, mientras que el contenido de N por unidad de material es mayor que el inicial. En esta investigación, la relación C:N

osciló entre 24,83 en T1 y 18,75 en S2, como se puede apreciar en la Fig. 3.9. Estos valores son altos, según Gonçalves e Poggiani (1996), citado por Kratz (2011).

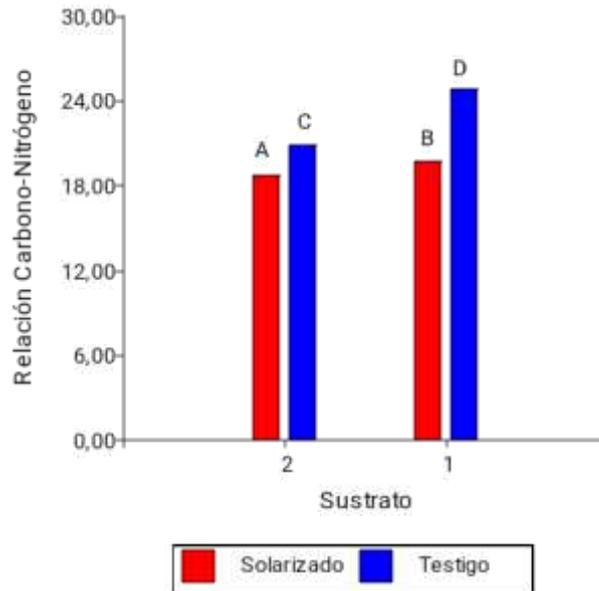


Figura 3.9. Relación Carbono:Nitrógeno (C:N) de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

3.3.2.6. *Potasio intercambiable*

El K intercambiable en los ensayos de esta investigación osciló entre 3 y 3,2 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$, como se muestra en la Fig. 3.10. Cabe destacar que la concentración de cualquier nutriente depende de la composición del sustrato. Así, los valores aquí obtenidos fueron menores que los reportados por Gayosso-Rodríguez *et al.* (2018) en sustratos de aserrín de pino y de fibra de coco. En contraste, la concentración de K fue mayor que la medida por Rodríguez *et al.* (2010) en sustratos elaborados con bagazo de agave tequilero y estiércol en proporción 4:1, compostado durante 130 días, y también mayor que la reportada por Kratz *et al.* (2013) en sustratos de cáscara de pino semi descompuesta, en sustratos elaborados con fibra de coco mezclada con cáscara de arroz carbonizada en distintas proporciones, y en sustratos preparados con biosólido, fibra de coco y cáscara de arroz carbonizada.

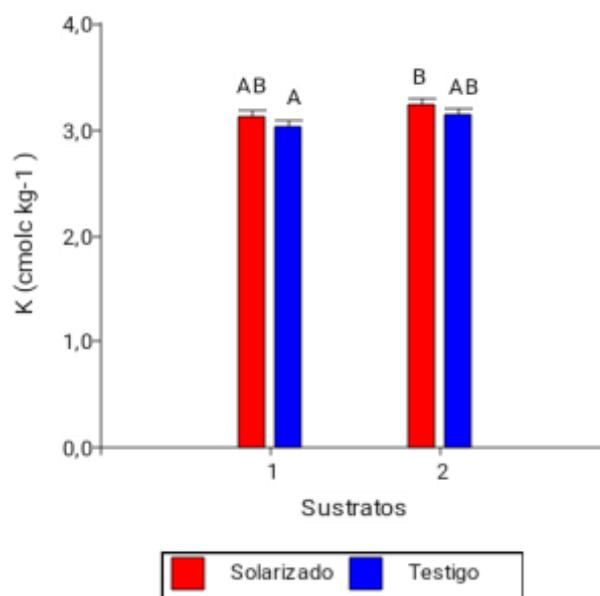


Figura 3.10. Potasio intercambiable de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

A su vez, Galindo Pardo *et al.* (2014) reportaron valores menores de potasio en sustratos preparados con arena y estiércol bovino solarizado en proporción 80:20 (V/V), y en sustratos preparados con arena, estiércol bovino y vermicompost en proporción 80:10:10 (V/V). Por su parte, Monsalve Camacho (2016) reportó valores menores de K en sustratos de cascarilla de arroz quemada. Tanto Kratz (2013), trabajando con sustratos elaborados con escoria de carbón y con piedra pómez, como Monsalve Camacho (2016), en sustratos elaborados con 25% de cascarilla de palma y 75% de escoria de carbón, y con 50% de coco y 50% de vermiculita, determinaron concentraciones de K similares a los de esta investigación.

3.3.2.7. Calcio intercambiable

El calcio intercambiable varió entre 12,3 y 18,9 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ (Fig.3.11) y fue mayor que el obtenido por Rodríguez *et al.* (2010) en sustratos elaborados con bagazo de agave tequilero y estiércol en proporción 4:1, compostado durante 130 días, y que el reportado por Monsalve Camacho (2016) en sustratos de cascarilla de arroz quemada, de escoria de carbón, de cascarilla de palma, de coco, y de piedra pómez, ya sea puros o combinados en distintas proporciones. También fue mucho mayor que el obtenido por Kratz *et al.* (2013) en mezclas de cascarilla de arroz carbonizada con vermiculita al 50%, en combinaciones

de fibra de coco con cascarilla de arroz carbonizada en distintas proporciones, y en mezclas de biosólidos con fibra de coco y cascarilla carbonizada, en diferentes proporciones. Gayosso-Rodríguez *et al.* (2018) reportó valores menores en sustratos de aserrín de pino. Sin embargo, el Ca intercambiable fue mayor en sustratos de fibra de coco que los obtenidos en este ensayo.

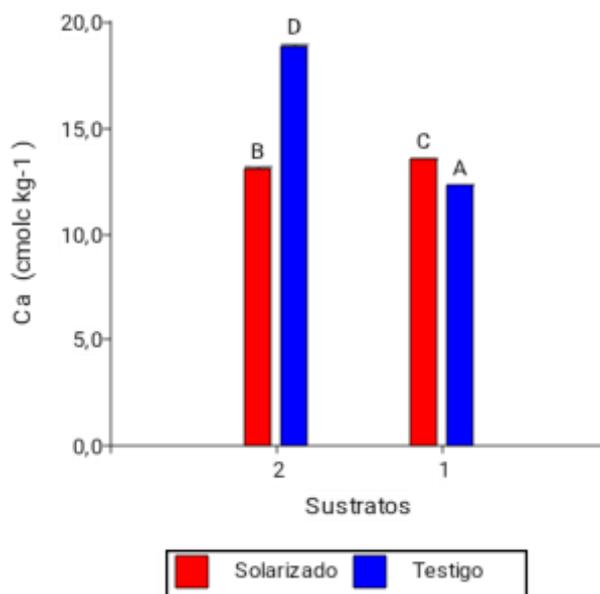


Figura 3.11. Calcio intercambiable de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

3.3.2.8. Magnesio y Sodio intercambiables

Las concentraciones de Mg y Na intercambiables resultantes de esta investigación se pueden observar en las Figuras 3.12 y 3.13. En los sustratos ensayados, la concentración de Mg y Na intercambiables fue mayor que la obtenida en sustratos de aserrín de pino y fibra de coco por Gayosso-Rodríguez *et al.* (2018), y menor que la obtenida por Monsalve Camacho (2016) en sustratos con un 75% de cascarilla de arroz quemada y un 25% de zeolita, y también en sustratos con un 50% de cascarilla de palma y un 50% de zeolita y en sustratos con coco y zeolita en distintas proporciones. En cambio, Kratz *et al.* (2013) obtuvieron valores de Mg muy superiores ($10-16 \text{ cmolc kg}^{-1}$) en sustratos elaborados con biosólidos combinados con cascarilla de arroz quemada y también con fibra de coco.

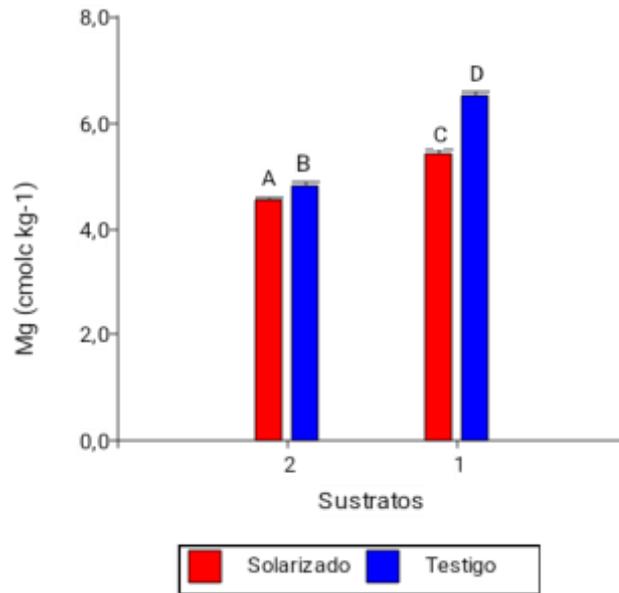


Figura 3.12. Magnesio intercambiable de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

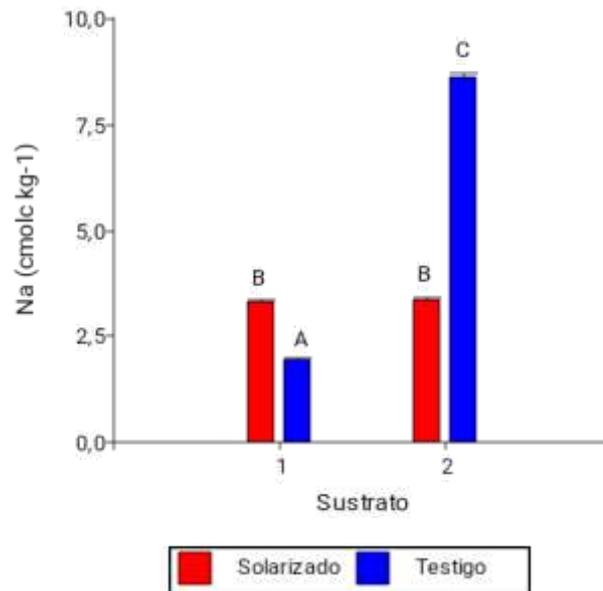


Figura 3.13. Sodio intercambiable de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

3.3.2.9. Fósforo

La cantidad de P en las muestras varió entre 77,1 y 87,1 mg·kg⁻¹, como se puede observar en la Fig. 3.14. Estos valores son altos en comparación con los obtenidos por Rodríguez *et al.* (2010) en sustratos elaborados con bagazo de agave tequilero y estiércol en proporción 4:1, compostado durante 130 días (54,78 mg·kg⁻¹) y con el reportado por Galindo Pardo *et al.* (2014) en sustratos preparados con arena y estiércol bovino solarizado en proporción 80:20 (V/V), y en sustratos preparados con arena, estiércol bovino y vermicompost en proporción 80:10:10 (V/V).

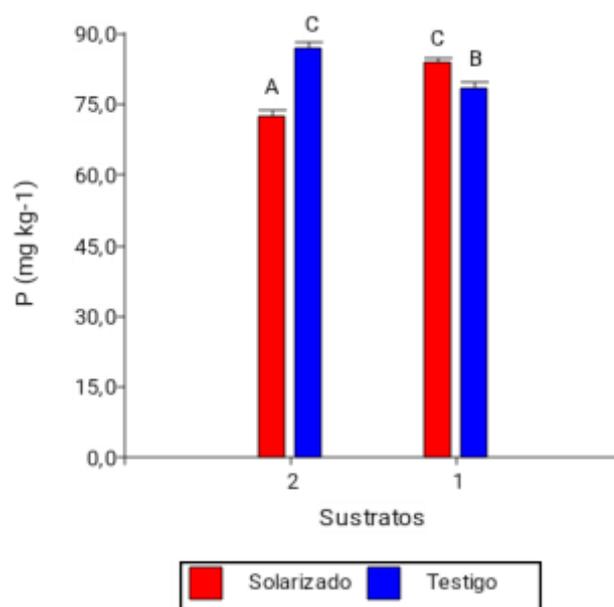


Figura 3.14. Fósforo intercambiable de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

También Salazar *et al.* (2018), trabajando con sustratos elaborados con vermicompost y arena en diversas proporciones, reportaron valores menores que el obtenido en este estudio. Estos oscilaron entre 2,15 y 6,2 mg·kg⁻¹, aumentando con el incremento en la proporción de vermicompost. Ybalo *et al.* (2017) determinaron valores similares (78,1 mg·kg⁻¹) en sustratos de compost elaborado a partir de residuos vegetales, en tanto que Kratz *et al.* (2013) y Gayosso-Rodríguez *et al.* (2018) obtuvieron valores de P superiores en sustratos de fibra de coco (833,86 mg·kg⁻¹).

3.3.2.10. Nitratos

La concentración de nitratos (NO_3^-) de los sustratos ensayados (Fig.3.15) se encuentra dentro del rango considerado como adecuado por Cabrera (1999), excepto para S2, en el que la cantidad de nitratos fue menor de $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

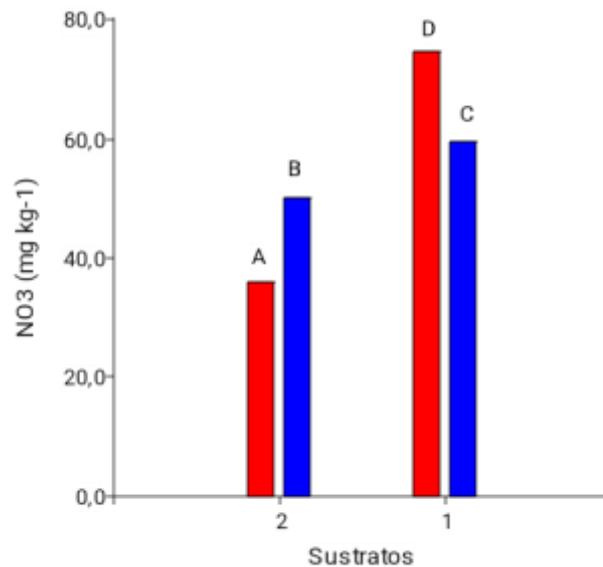


Figura 3.15. Nitrato intercambiable de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Los valores de NO_3^- obtenidos son superiores a la cantidad de N disponible reportada por Kratz (2013) en sustratos elaborados con cascarilla de arroz quemada en proporciones mayores a un 50%, combinada con fibra de coco y también con biosólidos. También Galindo Pardo *et al.* (2014) reportaron cantidades inferiores de NO_3^- en estiércol solarizado ($9,25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), en vermicompost ($13,72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en estiércol solarizado mezclado con vermicompost ($9,11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). El contenido de NO_3^- de T1, T2 y S1 fue mayor que los valores obtenidos en sustratos elaborados con 50% de biosólidos combinados con diferentes proporciones de cascarilla de arroz quemada y de fibra de coco, mientras que el de T2 fue similar a un sustrato en el que se combinaron biosólido, fibra de coco y cascarilla de arroz en una proporción de 30, 40 y 30%, respectivamente (Kratz, 2013).

3.3.3. Propiedades Biológicas

3.3.3.1. Respiración, carbono potencialmente mineralizable, carbono de la biomasa microbiana y tasa de mineralización.

La respiración y el C potencialmente mineralizable (Co) siguieron la secuencia T1>T2>S1>S2, como se ilustra en las Figuras 3.16 y 3.17.

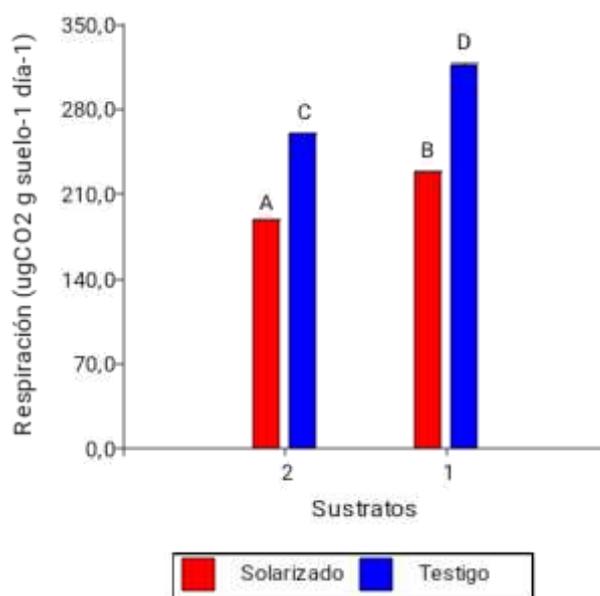


Figura 3.16. Respiración de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Según González Castillo (2009), la respiración del suelo depende de muchos factores tales como: la dinámica de la raíz, los ciclos de los nutrientes, la temperatura, la humedad del suelo, la cantidad y calidad del sustrato, la concentración de O₂, la biodisponibilidad de C, así como también de los usos de la tierra, la cobertura vegetal, la composición mineral y las prácticas de manejo. Según Guerrero Ortiz *et al.* (2012), durante las etapas iniciales de la descomposición de los materiales orgánicos recientemente incorporados, hay un rápido aumento en el número de organismos heterótrofos, acompañado por la emisión de grandes cantidades de CO₂.

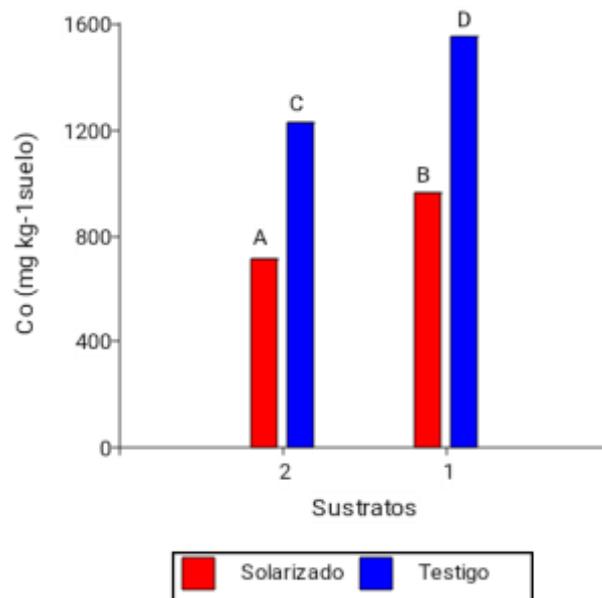


Figura 3.17. Carbono potencialmente mineralizable (Co) de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Los valores de respiración obtenidos en este estudio son similares a los obtenidos por Parra (2014) en sustratos compuestos de mantillo sin tamizar compostado y mantillo mezclado con suelo en una proporción 1:3, pero menores que los obtenidos por Castillo *et al.* (2010) en sustratos de corteza de pino compostada ($755 \mu\text{gCO}_2 \cdot \text{g suelo}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) y en compost a base de estiércol de caballo y oveja ($758 \mu\text{gCO}_2 \cdot \text{g suelo}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$). Además, los valores de Co medidos fueron superiores a los obtenidos por Parra (2014) en los sustratos elaborados a base de mantillo y en sustratos elaborados con vermicompost y suelo en una proporción 1:3 (V/V). Según Guadarrama Nonato *et al.* (2018), el Co es un valor indicativo de la actividad microbiana y estima el C orgánico que puede ser mineralizado en el suelo en determinado tiempo. En esta investigación, el Co presentó la misma tendencia que la respiración y que el C de la biomasa microbiana (CBM) (Fig. 3.18).

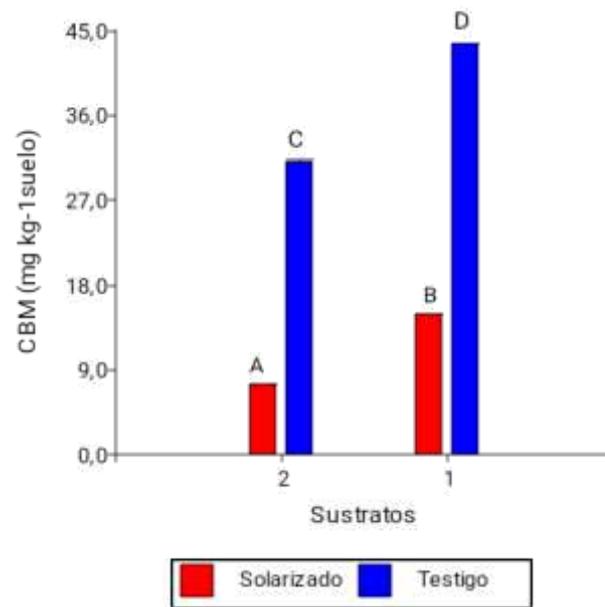


Figura 3.18. Carbono de la biomasa microbiana de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

La tasa de mineralización (K_c), representada en la Fig. 3.19, fue menor que la reportada por Parra (2014) en sustratos elaborados con mantillo compostado y en sustratos elaborados con vermicompost y suelo en una proporción 1:3 (V/V), y con mantillo y suelo en una proporción 1:3 (V/V).

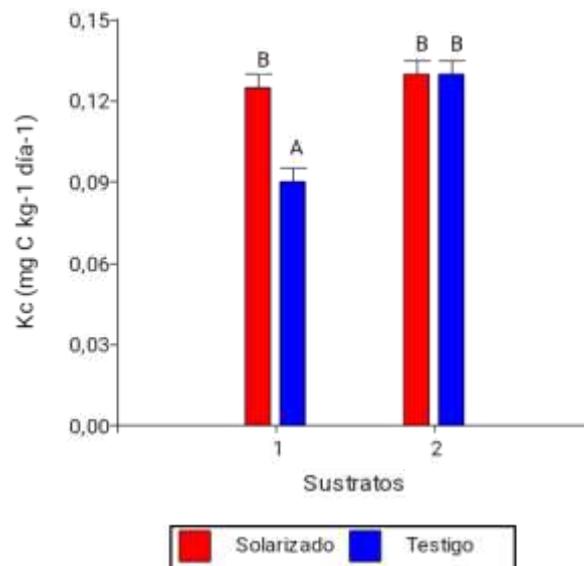


Figura 3.19. Tasa de mineralización (K_c) de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

3.3.3.2. Fitotoxicidad

En los sustratos ensayados no se detectó la presencia de sustancias fitotóxicas. El porcentaje de germinación relativo (PGR) siguió el orden S1>T1>S2>T2, como se puede apreciar en la Fig. 3.20.

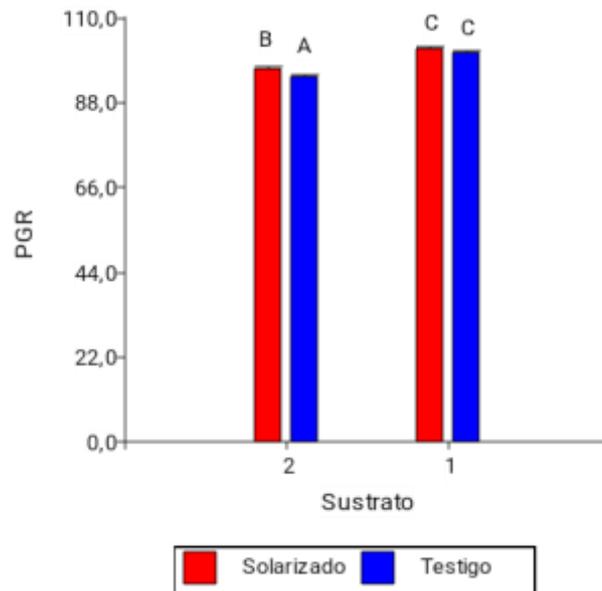


Figura 3.20. Porcentaje de germinación relativo de *Raphanus sativus* en extractos preparados a partir de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Según Varnero *et al.* (2007), la inhibición en el crecimiento de raíces es un parámetro más sensible como indicador de toxicidad que la germinación de semillas. Esto se debe a que el crecimiento de la radícula está relacionado con la presencia de metabolitos moderadamente fitotóxicos incapaces de limitar la germinación de semillas, pero sí de limitar el desarrollo radicular. En esta investigación, el crecimiento relativo de radícula (CRR) siguió la tendencia S2>S1>T1>T2, como se muestra en la Fig. 3.21.

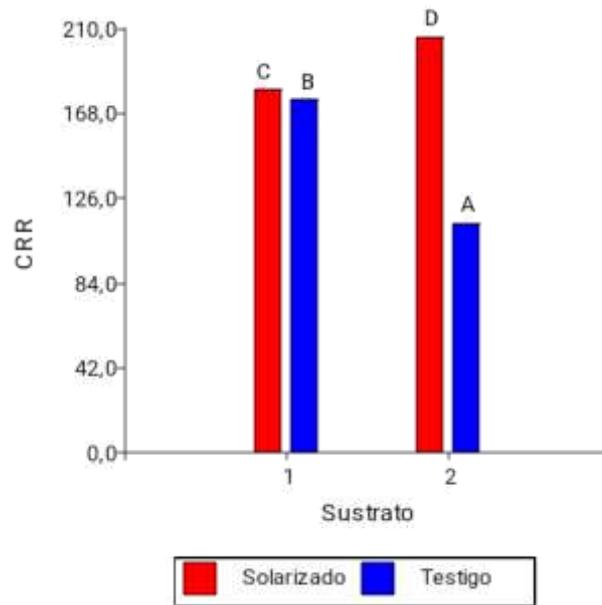


Figura 3.21. Crecimiento relativo de raíces (CRR) de *Raphanus sativus* en extractos preparados a partir de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

El índice de germinación (IG), representado en la Fig. 3.22, surge de los índices PGR y CRR, y siguió el orden $S2 > S1 > T1 > T2$.

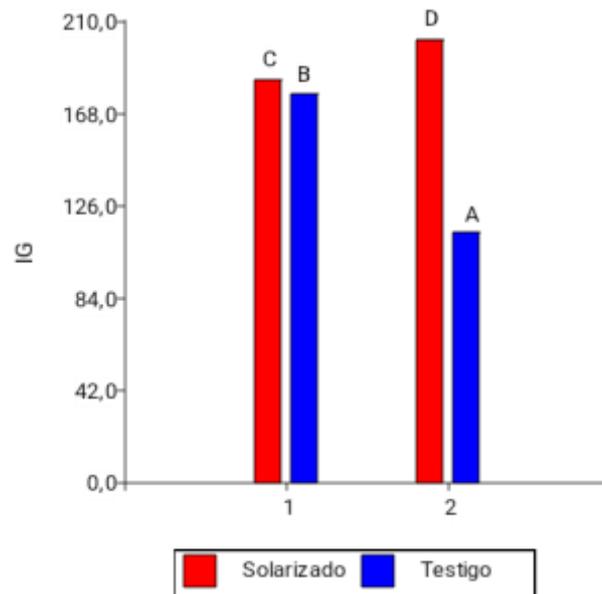


Figura 3.22. Índice de germinación de *Raphanus sativus* en extractos preparados a partir de sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Para su interpretación, Zucconi *et al.* (1981) estableció el siguiente criterio: valores de IG > 80% indicarían que no hay sustancias fitotóxicas o que están en muy baja concentración, IG < 50% indicaría que hay una fuerte presencia de sustancias fitotóxicas, y valores entre 50 y 80% serían indicadores de la presencia moderada de estas sustancias. Según este criterio, en los sustratos ensayados no hay sustancias fitotóxicas.

Los índices obtenidos en este ensayo son superiores a los obtenidos por Parra (2014), quien reportó valores de IG=88 en sustratos compuestos de mantillo compostado, y 85 en sustratos con vermicompost y suelo en una proporción 1:3 (V/V). Por lo general, se asocia la fitotoxicidad del sustrato con la presencia de materia orgánica en proceso de descomposición que no alcanzó a estabilizarse. Los efectos fitotóxicos de un material orgánico inmaduro se deben a diversos factores, entre los cuales se destacan los contenidos de NH_4^+ , de ácidos volátiles orgánicos, de metales pesados y de sales (Valnero *et al.*, 2007). Los valores de IG obtenidos en T1, S1 y S2 son superiores a los obtenidos por López Clemente *et al.* (2015) en extractos de bagazo de caña, cáscara de naranja y paja de trigo compostados durante 180 días.

Sobre la base de las determinaciones realizadas y de la bibliografía consultada, el sustrato 1 (1:1 mantillo-suelo V/V) posee un nivel adecuado de pH, K, Ca, y Mg; porosidad media, alta densidad aparente y alta relación C/N (Kratz, 2011). La CE está dentro del intervalo considerado como adecuado por Cabrera (1999) (1-2 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$). El nivel de Na no supera los $115 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y las concentraciones de nitratos y fosfatos son bajas, tomando en cuenta los intervalos propuestos por Monsalve y Camacho (2016). Considerando las propiedades analizadas, este sustrato es apto para la producción de plantines forestales.

El sustrato 2 (1:2 mantillo-suelo V/V) tiene niveles altos de densidad aparente, pH, relación C/N, Ca y K, según Kratz (2011). La CE ($3,05 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) supera el valor máximo propuesto por Cabrera (1999), mientras que las concentraciones de nitratos y fosfatos son bajas, según Monsalve y Camacho (2016). El pH de este sustrato (7,5) disminuiría la solubilidad del Fe, P, Mn, Zn y Cu, mientras que una CE elevada dificultaría el manejo de la fertilización, pudiendo ocasionar problemas por fitotoxicidad en los plantines. Teniendo en cuenta estas características, este sustrato no sería apto para la producción de plantines forestales.

Luego de ser sometido al proceso de solarización, el sustrato 1 (1:1 mantillo-suelo) mantuvo un nivel adecuado pH, K, Ca y Mg. Sin embargo, la porosidad bajó y la densidad

aparente aumentó. Las concentraciones de nitratos y fosfatos se incrementaron en un 20% y 6%, respectivamente, aunque siguieron por debajo de los valores descriptos por Monsalve y Camacho (2016). La relación C:N disminuyó de 24,8 a 19,7, acercándose más al intervalo 8:1-12:1, considerado como adecuado por Kratz (2011). A pesar de que la concentración de Na subió, se mantuvo por debajo de los 115 mg·L⁻¹. Teniendo en cuenta estos parámetros, el sustrato 1 solarizado sigue siendo apto para la producción de plantines forestales.

Luego de solarizar el sustrato 2 (1:2 mantillo-suelo V/V), la porosidad y la densidad aparente se mantuvieron altas, mientras que el pH bajó de 7,5 a 6,5. Esta variación estuvo relacionada con la disminución de la CE (1,96 dS·m⁻¹) y con los niveles más bajos de Na (75,9 mg·L⁻¹) y de Ca (13,1 cmol·kg⁻¹). Las concentraciones de nitratos y fosfatos siguieron por debajo del intervalo considerado óptimo por Kratz (2011). La relación C:N disminuyó hasta 18,7, acercándose más al intervalo 8:1-12:1, considerado como adecuado por Kratz (2011). La disminución en el pH, la CE y la concentración de Na que se produjeron en este sustrato luego de haber sido sometido a la solarización, lo convierten en un sustrato apto para la producción de plantines forestales.

Los sustratos preparados a base de mantillo-suelo en distinta proporción, como los de esta investigación, son utilizados con frecuencia por viveristas de la provincia de Santiago del Estero (Parra, 2014). Si bien algunas características físicas como la densidad aparente y la porosidad no se encuentran dentro de los parámetros considerados óptimos, en el caso del sustrato elaborado con una proporción 1:1, las propiedades químicas sí se adecuan a los intervalos propuestos por Kratz (2011), Monsalve y Camacho (2016) y Cabrera (1999). Según Valenzuela *et al.* (2005) y Cruz-Crespo *et al.* (2013), el sustrato ideal, además de proporcionar a la planta las mejores condiciones para su crecimiento, debe tener una relación costo/beneficio adecuada para el sistema productivo en cuestión y estar disponible en la zona. Estos dos últimos aspectos son lo suficientemente importantes como para justificar el estudio y la evaluación de estos sustratos.

3.3.4. Efectos de la solarización sobre las propiedades de los sustratos

Los efectos de la solarización sobre las propiedades de los sustratos están en función de las temperaturas alcanzadas durante el proceso. En los sustratos ensayados, las diferencias de temperaturas podrían atribuirse a que el sustrato S1 se elaboró con mayor porcentaje de materia orgánica y de porosidad total que el sustrato S2 al inicio del

proceso, permitiendo que retenga mayor cantidad de agua. Estas características mejoraron la absorción solar y la transmisión del calor. Según Stapleton (2000), las plagas y los patógenos del suelo sufren daños térmicos a partir de los 39-40°C. El sustrato S2 alcanzó estas temperaturas y el S1 las superó, lo que se puede comprobar consultando las Tablas 3.3 y 3.4.

La solarización provocó un incremento en la Dap (Fig. 3.1), que fue significativo sólo para el sustrato S1. Estos resultados se contraponen a los obtenidos por Parra (2014) en sustratos elaborados con mantillo de monte sin tamizar y descompuesto, en mantillo de desmonte mezclado con suelo en proporción 1:3 (V/V), y en lombricompost mezclado con suelo en proporción 1:3 (V/V), en los que la solarización no ejerció efecto sobre la Dap. El aumento en la Dap fue acompañado por una disminución en la porosidad total (Fig. 3.2), siendo ésta significativa para ambos sustratos, probablemente debido a la compactación que se ejerció al aplicar el polietileno.

Según Chen y Katan (1980), Kumar y Yaduraju (1992), Ulla (2002) y Golzardi *et al.* (2015), la solarización no afecta al pH del suelo, mientras que Lefèvre y De Souza (1993) afirman que la solarización tiene un efecto mínimo sobre el pH, con variaciones menores que 0,1 unidades entre los tratamientos. Esto fue corroborado en el sustrato S1 (Fig. 3.4). Sin embargo, en el sustrato S2, el pH bajó en una unidad luego de ser solarizado. Esta disminución posiblemente se pueda atribuir al lavado de sales debido al riego efectuado al comienzo del tratamiento.

La CE tuvo un comportamiento diferencial. En el sustrato S1 aumentó con la solarización, siendo este incremento estadísticamente significativo (Fig. 3.5). Según Chen y Catan (1880), Kumar y Yaduraju (1992), Elmore *et al.* (1997), Stapleton (2000), Frápoli Daffari *et al.* (2000) y Hasing (2002), esto se debería a que en los suelos solarizados hay un incremento de las sales solubles totales provocado por la descomposición de la materia orgánica. El presente estudio ratifica lo expuesto por estos últimos autores, ya que la tasa de mineralización (Kc) aumentó (Fig. 3.19), el contenido de materia orgánica disminuyó (Fig. 3.6) y aumentaron algunos cationes intercambiables como K^+ , Ca^{+2} y Na^+ en S1 (Figuras 3.10, 3.11 y 3.13). Resultados similares a este estudio obtuvieron Mitidieri *et al.* (2009) y Parra (2014), quienes afirmaron que parcelas solarizadas con aporte de materia orgánica presentan mayores valores de CE, pero no de pH. El valor de pH=6,1 obtenido en S1 se encuentra dentro del intervalo con una clasificación de ligeramente ácido, en el que habría una máxima disponibilidad de nutrientes y una mayor mineralización de la

materia orgánica. En el sustrato S2, la CE disminuyó (Fig. 3.5) y también bajó la concentración de Ca^{+2} y Na^{+} (Figuras 3.11 y 3.13). Esto podría explicar el descenso del pH como resultado de la solarización (Fig. 3.4). A su vez, la materia orgánica aumentó (Fig. 3.6) y la Kc permaneció constante (Fig. 3.19) en este sustrato, luego de aplicar el tratamiento. A esto podría deberse la diferencia de comportamiento entre los dos sustratos luego de ser solarizados.

El COT y la MOS en S1 disminuyeron en forma significativa en comparación con T1 (Figuras 3.7 y 3.6). Este resultado es similar a los obtenidos por Basavaraju y Nanjapa (2000), Baptista *et al.* (2007) y Parra (2014), quienes reportaron disminuciones significativas del COT en suelos solarizados. Cuando los residuos vegetales son incorporados al suelo, varios compuestos orgánicos se descomponen. Los residuos de los cultivos contienen principalmente compuestos complejos de carbono que se originan en las paredes celulares. La descomposición sucesiva del material muerto y la materia orgánica modificada van afectando las propiedades del suelo, incrementando la agregación de las partículas del suelo y la estabilidad de los agregados. Estos procesos también aumentan la capacidad de intercambio catiónico y aportan N (Fig. 3.8), P (Fig. 3.14) y otros nutrientes durante su lenta descomposición (Guerrero Ortiz *et al.*, 2012). En S2, la materia orgánica aumentó (Fig. 3.6) y la Kc permaneció constante (Fig. 3.19), mientras que el COT y la materia orgánica aumentaron en comparación con T2. Probablemente, esto se debió a que el aumento de la temperatura y de la humedad inicial favorecieron la germinación de malezas, y a que la Kc se mantuvo constante.

Según González Castillo (2009), la respiración del suelo depende de muchos factores, entre ellos, los ciclos de nutrientes, la temperatura, la humedad del suelo, la cantidad y calidad del sustrato, la concentración de O_2 y la biodisponibilidad de C. Para Scopa y Dumontet (2007), los efectos del calentamiento del suelo sobre la dinámica de los nutrientes y de la población microbiana dependen de la temperatura alcanzada, del tiempo de exposición y de la profundidad de penetración del calor. Estos autores concluyeron que la solarización provoca una disminución en la respiración del suelo. Esto se comprobó en los dos sustratos ensayados, en los cuales la variación en la respiración fue estadísticamente significativa (Fig. 3.17).

Marañés *et al.* (1998), citados por Sánchez Lucas (2013), afirman que la relación C:N, a través de su influencia selectiva sobre los microorganismos del suelo, ejerce un control poderoso sobre la nitrificación y la presencia de NO_3^- en el suelo. La

razón C:N resulta óptima cuando alcanza un valor próximo a 15, pero cuando es muy alta (> 50), o muy baja (< 10), la materia orgánica se descompone con lentitud. En este sentido, la solarización de los sustratos produjo una disminución de la relación C:N (Fig. 3.9), haciendo que se acerquen al valor considerado ideal por los autores mencionados.

La concentración de nitratos aumentó en S1 en comparación con T1 (Fig. 3.15). Según Sánchez Lucas (2013) y Monsalve *et al.* (2017), la mineralización del N es en gran parte microbiana y está influenciada por las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, la composición y el origen de la enmienda orgánica y las condiciones ambientales donde se desarrolla el proceso. Así, Monsalve *et al.* (2017) afirman que la mineralización de N tiende a incrementarse cuando la humedad del suelo se aproxima a capacidad de campo y con los incrementos de la temperatura. Otros factores que se incluyen son el pH (Neale *et al.*, 1997), la salinidad y alcalinidad del suelo (Pathack y Rao, 1998) y De Neve *et al.* (2003), citados por Sánchez Lucas (2013). Estos investigadores encontraron que los cambios en la conductividad eléctrica de un suelo estuvieron fuertemente correlacionados con los cambios en la concentración de nitratos y, por tanto, con la mineralización del N. Los resultados obtenidos en S1 ratifican las afirmaciones de estos autores. Además, estos resultados coinciden con los obtenidos por Hasan *et al.* (2016), quienes reportaron que, luego de 40 días de solarización, aumentó la concentración de NO_3^- en el suelo. Sin embargo, en el sustrato S2 la concentración disminuyó en comparación con el T2, probablemente porque el NO_3^- fue consumido por las malezas que germinaron en él. Esta disminución también pudo haber influido en el descenso del pH y de la CE registrados en este sustrato.

Los valores de PGR, CRR e IG, obtenidos mediante el test de Zuconni (1981), que se muestran en las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22, indican que en los sustratos no hay sustancias fitotóxicas que inhiban la germinación y el crecimiento radicular, si bien las diferencias no son significativas en S1 en comparación con T1. El IG fue levemente mayor como resultado del incremento en la longitud de las raíces, probablemente debido a la mayor cantidad de NO_3^- . En S2, sin embargo, se observó un aumento significativo del CRR y del IG en comparación con T2. Esto probablemente se deba a la disminución de la CE y del pH que la solarización provocó.

3.4. Conclusiones

1. Según los parámetros de calidad expuestos en este trabajo, el sustrato 1 (1:1 mantillo-suelo V/V) es adecuado para la producción de plantines de especies forestales, mientras que el sustrato 2 (1:2 mantillo-suelo V/V) posee características químicas que limitarían el crecimiento.
2. La solarización afectó las propiedades físicas ensayadas ya que incrementó la Dap y disminuyó la porosidad de los sustratos estudiados.
3. Las modificaciones en las propiedades químicas se comportaron de manera diferente según el sustrato.
4. En el sustrato 1 (1:1 mantillo-suelo V/V), la solarización no modificó el pH, aumentó la CE y la mineralización de la materia orgánica, y disminuyó la relación C:N. También aumentaron las concentraciones de K^+ , Ca^{+2} , Na^+ , P y NO_3^- intercambiables.
5. En el sustrato 2 (1:2 mantillo-suelo V/V), el pH y la CE disminuyeron; aumentó el porcentaje de materia orgánica y disminuyó la relación C:N. También bajaron las concentraciones de K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , P y NO_3^- intercambiables.
6. En ambos sustratos, la solarización modificó las propiedades biológicas estudiadas pues se registraron disminuciones en la respiración, en el carbono de la biomasa microbiana y en el carbono potencialmente mineralizable. La solarización también mejoró el índice de germinación y el crecimiento radicular de la especie indicadora *Raphanus sativa*.
7. Mediante la solarización se lograron mejorar algunas de las propiedades químicas poco deseables del sustrato 2 pues se logró bajar el pH y la CE. Esto se reflejó en el aumento del índice de germinación y del crecimiento radicular de *Raphanus sativa*.
8. Los resultados obtenidos permiten afirmar que la solarización provoca cambios físicos, químicos y biológicos, y que sus efectos son variables, dependiendo, entre otros factores, del tipo de sustrato, de la temperatura alcanzada y de la concentración de materia orgánica.

3.5. Bibliografía

- Acosta Y. y J. Paolini. 2006. Dinámica de la biomasa microbiana (C y N) em um solo de la península de Paraguaná tratado com resíduos orgânicos. *Multiciencias* 6(002):180-187. Universidad del Zulia, Punto Fijo, Venezuela.
- Alvarado, M.A. y J.A. Solano. 2002. Producción de Sustratos para Viveros. Proyecto VIFENEX-OIRSA (Eds.), Costa Rica. 46 p.
- Anderson J.E. 1982. Soil respiration. *In*: Page, A.L. (ed.). 1982. *Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd Ed., Agron. Monog.* 9:831-871. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Baptista, M.J., F.B. Dos Reis, G. Ribeiro Xavier, C. De Alcântara, A. Regis de Oliveira, R. Bartolomeu Souza, R. y C.A. Lopes. 2007. Eficiência da solarização e biofumigação do solo no controle da murcha-bacteriana do tomateiro no campo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42(7):933-938.
- Barbaro L.A. 2011. Desarrollo de sustratos sin suelo para el cultivo en macetas de plantas florales. Tesis para acceder al título de Master en Cultivos Intensivos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina. 108 p.
- Barbaro L.A., M. Karlanián y D.A. Mata. 2018. Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas, 1^a Ed. Ediciones INTA, Buenos Aires. 12 p. Disponible en:
https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_importancia_del_ph_y_la_conductividad_electrica_ce_en_los_sustratos_para plantas.pdf
- Barbaro L.A. y M. Karlanián. 2020. Efecto de las propiedades físicas del sustrato sobre el desarrollo de plantines florales en maceta. *Ciencia del Suelo* 38(1):1-11.
- Basavaraju, H.K. y H.V. Nanjapa. 2000. Nutrient release due to soil solarization in alfisols. *Indian Journal of Agricultural Research* 34(4):217-222.
- Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-Total. *In*: Page, A.L. (ed). 1982. *Methods of soil analysis, Part 2, 2nd Ed. Agron. Monog.* 9:595-624. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

- Burés, S. 2002. Curso de gestión de viveros forestales. Manejo de Sustratos. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/80373I>. Consultado: marzo 2019.
- Cabrera, R.I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 5(1):5-11.
- Castillo Martínez, I.C. 2007. Efecto de diferentes sustratos y del endurecimiento por riego en la calidad de plantas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en contenedores. Pinar del Río, Cuba. Tesis doctoral, Universidad de Alicante. 197 p.
- Castillo X., C. García Delgado y E. Eymar. 2010. Determinación del flujo de liberación de CO₂ de materiales orgánicos compostados en relación al contenido de humedad. En línea. Disponible en: [http://www.sech.info/ACTAS/Acta Nº 59 /JornadasdelGrupodeSustratos/Comunicaciones/Determinación del flujo de liberación de CO₂ de materiales orgánicos compostados en relación al contenido de humedad](http://www.sech.info/ACTAS/Acta_Nº_59_/JornadasdelGrupodeSustratos/Comunicaciones/Determinación%20del%20flujo%20de%20liberación%20de%20CO2%20de%20materiales%20orgánicos%20compostados%20en%20relación%20al%20contenido%20de%20humedad). PDF. Consultado el 7/10/2019.
- Chauhan, Y.S., Y.L. Nene, C. Johansen, M.P. Haware, N.P. Saxena, Sardar Singh, S.B. Sharma, K.L. Sahrawat, J.R. Burford, O.P. Rupela, J.V.D.K. Kumar Rao, and S. Sithanatham. 1988. Effects of Soil Solarization on Pigeonpea and Chickpea. *Research Bulletin* Nº 11. Patancheru. A.P. 502 324, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics.
- Chen, Y. y J. Katan. 1980. Effect of solar heating of soil by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soil Science* 130(5):271-277.
- Cruz-Crespo, E., A. Can-Chulim, M. Sandoval-Villa, R. Bugarín-Montoya, A. Robles-Bermúdez y P. Juárez-López. 2013. Sustratos en la horticultura. *Revista Bio Ciencias* 2(2):17-26.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada y C.W. Robledo. InfoStat versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Elmore, C.L., J.J. Stapleton, C. Bell, and J. DeVay. 1997. Soil Solarization: A Nonpesticidal Method for Controlling Diseases, Nematodes, and Weeds. *Vegetable Research and Information Center Publication* 21377. University of California, Davis, California, USA.

- Ferrari, J. 2011. Determinación de humedad y densidad aparente en abonos orgánicos. Red INTA de laboratorios de suelo, agua y material vegetal (RILSAV). 4p.
- Frápoli Daffari, E., C. Garijo Alba y E. García García. 2000. La desinfección del suelo por energía solar (solarización). Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca, 2ª Edición. Comunicaciones I+D N° 29/00. 24 p.
- Galindo Pardo, F.V., M. Fortis Hernández, P. Preciado Rangel, R. Trejo Valencia, M. A. Segura Castruita, y J.A. Orozco Vidal. 2014. Caracterización físico-química de sustratos orgánicos para producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo sistema protegido. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7:1219-1232.
- García C.O., G.G. Alcántar, R.I. Cabrera, F.R. Gavi y H.V. Volke. 2001. Evaluación de sustratos para la producción de *Epipremnum aureum* y *Spathiphyllum wallisii* cultivadas en maceta. *Terra Latinoamericana* 19(3):249-258. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.
- Gayosso-Rodríguez S., L. Borges-Gómez, E. Villanueva-Couoh, M.A. Estrada-Botello, y R. Garruña. 2018. Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia* 52:639-652.
- Ghini, R., F.R.A. Patricio, M.D. Souza, C. Sinigaglia e B.C. Barros. 2003. Efeito da solarização sobre propriedades físicas, químicas e biológicas de solos. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 27:71-79.
- Golzardi, F., Y. Vaziritabar, Y. Vaziritabar, K.S. Asilan, M.H. JafariSayadi, y S. Sarvaramini. 2015. Effect of Solarization and Polyethylene Thickness Cover Type on Weeds Seed Bank and Soil Properties. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* 5(6):88-95.
- Gonçalves, I.M. e F. Poggiani. 1996. Substratos para produção de mudas florestais. *In: Congresso Latino Americano De Ciência Do Solo*, 13. Águas de Lindóia, Resumos. Sociedade Latino Americana de Ciência do Solo, Piracicaba, Brasil.
- González Castillo, N.L. 2009. Respiración del suelo por sustrato inducido en un bosque siempreverde montano bajo y en una cronosecuencia de pastizales en la provincia de Zamora Chinchipe. Tesis para optar por el título de Ingeniera en Gestión Ambiental. UTPL. Loja, Ecuador. 50 p.
- Guadarrama-Nonato, A., J. Mejía-Carranza y M.G. Ramírez-Gerardo. 2018. Mineralización de la materia orgánica en suelos con manejo diferencial en cultivo de rosa. Acta

- Universitaria, vol. 28, núm. 2. Universidad de Guanajuato, México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41655593004>. Consultado el 15/10/19.
- Guerrero-Ortiz, P.L., R. Quintero-Lizaola, V. Espinoza-Hernández, G.S. Benedicto-Valdés y M. de J. Sánchez-Colín. 2012. Respiración de CO₂ como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de lupinos. *Terra Latinoamericana* 30(4):355-362. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325814007>
- Hasan, O., A. Coskan, and A. Atılgan. 2016. Determination of Effects of Various Plastic Covers and Biofumigation on Soil Temperature and Soil Nitrogen Form in Greenhouse Solarization: New Solarization Cover Material. *J Polym Environ*. Springer Science & Business Media, New York. 8 p.
- Hasing, J.E. 2002. Agroeconomic effect of soil solarization on fall-planted lettuce. Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Horticulture, Baton Rouge, Louisiana, USA. 69 p.
- Hidalgo Loggiodice, P.R., M. Sindoni Vielma y J.R. Méndez Natera. 2009. Importancia de la selección y manejo adecuado de sustratos en la producción de plantas frutales en vivero. *Revista Científica UDO Agrícola* 9(2):282-288. Disponible en <http://www.bioline.org.br/request?cg09036>. Consultado el 08/05/2013.
- Kratz, D. 2011. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage e *Mimosa scabrella* Benth. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal. Curitiba, Brasil. 121 p.
- Kratz, D., I. Wendling, A.C. Nogueira y P.V. de Souza. 2013. Propriedades físicas e químicas de substratos renováveis. *Revista Árvore* 37(6):1103-1113. Viçosa-MG, Brasil.
- Kratz, D. 2015. Substratos para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*: formulação e estimativa de propriedades físico-químicas por meio da espectroscopia no infravermelho próximo (nir). Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do

- Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Doutora em Engenharia Florestal. Curitiba, Brasil. 112 p.
- Kumar, B. y N.T. Yaduraju. 1992. Effects of solarization on the temperature and physico-chemical Properties of soils. *Plasticulture* 94:13-20.
- Lefèvre, A. e de Souza, N. 1993. Efeitos da solarização sobre algumas variáveis do solo. *Summa Phytopathologica* 19(2):113-118.
- López-Clemente, X.A., C. Robles-Pérez, V.A. Velasco-Velasco, J. Ruiz-Luna, J. R. Enríquez-del Valle y G. Rodríguez-Ortiz. 2015. Propiedades físicas, químicas y biológicas de tres residuos agrícolas compostados. *Revista CIENCIA ergo-sum* 22(2):145-152. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- López-Cosme, E. y R. González Torres. 1995. Efectos de la solarización del suelo sobre la viabilidad de *Cyperus rotundus* L. y sobre la salinidad del suelo sometido a una capa freática salina. Congreso de la Sociedad Española de Malherbología. p. 261-265.
- Luvisi, A., A.Panattoni, and A. Materazzi. 2016. RFID temperature sensors for monitoring soil solarization with biodegradable films. *Computers and Electronics in Agriculture* 123(2016):135-141.
- Matheus, J., J. Santos-Osechas, G. Briceño, D. Simancas y L. Montilla. 2017. Efecto de la incorporación del biofertilizante azotofos en el potencial biológico de dos sustratos empleados para la producción de cítricos en Trujillo, Venezuela. *Revista Academia* 17(40):55-69.
- Mitidieri, M., V.Brambilla, V. Saliva, E. Piris, R. Celié, C. Pereyra, K. Del Prado, E. Chaves y J. Gonzáles. 2009. Efecto de distintas secuencias de tratamientos de biofumigación sobre parámetros fisicoquímicos y biológicos del suelo, el rendimiento y la salinidad de cultivos de tomate y lechuga bajo cubierta. *Horticultura Argentina* 28(67):5-17.
- Monsalve Camacho, O.I.2016. Caracterización química de mezclas de materiales orgánicos y minerales con potencial de uso en cultivos sin suelo. Tesis presentada para optar al título de Magister en Ciencias Agrarias. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Colombia, Bogotá.167p.
- Monsalve Camacho, O.I., J.S. Gutiérrez y W.A. Cardona. 2017. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas

- orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 11(1):200-209. Disponible en:<http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>.
- Morales-Maldonado, E.R. y F. Casanova-Lugo. 2015. Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Revista Agronomía Mesoamericana* 26(2):365-372.
- Nelson, D. and L.E. Sommers. 1982. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In: Page, A.L. (ed). 1982. Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd Ed. *Agron. Monog.* 9:539-579. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Paolini Gómez, J.E. 2017. Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana* 36: 13-22. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>. Consultado el 10/09/2019.
- Parra, M.V. 2014. Obtención de plantines de algarrobo (*Prosopis alba* Griseb.) en sustratos orgánicos solarizados en Santiago del Estero. Una alternativa para pequeños productores. Tesis para optar al título de Magister en Desarrollo de Zonas Áridas y Semiáridas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. 84 p.
- Reybet, G.E., A.P. Bustamante, C.M. Reybet, S. Bramardi y A.R. Escande. 2012. Efecto sinérgico de la solarización del suelo y la aplicación de *Pseudomonas fluorescens* P190 sobre el rendimiento del tomate en invernadero. *Horticultura Argentina* 31(74):5-11.
- Ripanti S., L. Calderón, Y. Arrieta, G. Ramírez, J. León, Y. Ovalles, R. Perrin, y J. Petit. 2009. Efectividad de la solarización en el control del *damping off* en el vivero Santa María de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. *Agricultura Andina* 16:3-27.
- Rodríguez, M.R., E.G. Alcántar González, G. Iñiguez Covarrubias, F. Zamora Natera, P.M. García López, M.A. Ruiz López y E. Salcedo Pérez. 2010. Caracterización física y química de sustratos agrícolas a partir de bagazo de agave tequilero. *Interciencia* 35(7):515-520.
- Rucks, L., F. García, A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill. 2004. Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Montevideo, Uruguay. 68 p.

-
- Salazar Ramírez M.T., M. Fortis Hernández, P. Preciado Rangel, M.A. Segura Castruita y J. Sáenz Mata. 2018. Caracterización de sustratos orgánicos en la producción de *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Avances en Investigación Agropecuaria* 22(3):45-55.
- Sánchez-Hernández, R., R. Ramos-Reyes, V. Geissen, J. de D. Mendoza-Palacios, E. de la Cruz-Lázaro, E. Salcedo-Pérez, y D.J. Palma-López. 2011. Contenido de carbono en suelos con diferentes usos agropecuarios en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana* 29(2):211-219.
- Sánchez Lucas, C. del M. 2013. Variación de los nitratos en un suelo enarenado con aplicación de dos materias orgánicas en solarización y biofumigación. Monografía, Universidad de Almería. 95 p.
- Scopa, A. and S. Dumontet. 2007. Soil Solarization: Effects on Soil Microbiological Parameters. *Journal of Plant Nutrition* 30(4):537-547.
- Simmons, C.W., B. Higgins, S. Staley, L.D. Joh, B.A. Simmons, S.W. Singer, J.J. Stapleton, and J.S. Vanderghinst. 2016. The role of organic matter amendment level on soil heating, organic acid accumulation and development of bacterial communities in solarized soil. *Applied Soil Ecology* 106:37-46. Disponible en www.elsevier.com/locate/apsoil. Consultado el 30/07/19.
- Slevogt-Strasse, K. 2006. OxiTop Control System, OxiTop O.C. 110 Controller. Alemania.
- Stapleton, J.J. 2000. Soil solarization in various agricultural production systems. *Crop Protection* 19:837-841.
- Streck, N.A., F.M. Schneider, and G.A. Buriol. 1995. Effect of soil solarization on tomato inside a plastic greenhouse. *Ciencia Rural* 25(1): 5-9.
- Ulla, E. 2002. La solarización sobre las poblaciones microbianas benéficas del suelo. Tesis para optar al título de Magister en Agronomía. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. 104 p.
- Valenzuela, O.R., M. Alorda, M. García, C. Gallardo y D. Díaz. 2005. Características de los sustratos utilizados por los viveros forestales. IDIA XXI, Año V, N° 8, Forestales: 57-59.
- Valenzuela, O. 2008. Bases tecnológicas del uso de sustratos para el cultivo de plantas en contenedor. Conferencia. XXXI Congreso Argentino de Horticultura ASAHO – Mar del Plata, Argentina.

- Valenzuela, O.R., C.S. Gallardo, M.S. Carponi, M. Aranguren, H. Tabares y M.C. Barrera. 2014. Manejo de las propiedades físicas en sustratos regionales para el cultivo de plantas en contenedores. Suplemento Ciencia, Docencia y Tecnología, vol 4, N°4, Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. p.1-19.
- Vance, E.D., P.C. Brookes, and D.S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass carbon. *Soil Biol. Biochem.* 19:703-707.
- Varnero, M.M.T., A.C. Rojas y R.R. Orellana. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 7(1):28-37.
- Ybaló, B., V. Torres, M. Ruiz, A. Cabezas, C. González y M.C.F. Sánchez. 2017. Características de compost y lombricompost provenientes de residuos vegetales usados como sustratos. V Jornadas de Ciencia del Suelo del NOA para estudiantes y jóvenes profesionales. San Salvador de Jujuy, Argentina. 7 p.
- Zucconi, F., A. Peram, M. Forte y M. De Bertoldi. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Bio Cycle* 22:54-56.

4. EFECTO DE LA SOLARIZACIÓN SOBRE EL CRECIMIENTO DE PLANTINES DE *EUCALYPTUS CAMALDULENSIS*

4.1. Introducción

4.1.1. La especie objeto de estudio

Las especies del género *Eucalyptus* pertenecen a la familia de las Mirtáceas y son originarias principalmente de Australia, aunque también se las encuentra en Nueva Guinea y en algunas islas de Indonesia. Son un grupo de árboles y algunos arbustos de rápido crecimiento, que cuenta con alrededor de 700 especies. La importancia de este género se debe a varias razones. En primer lugar, se trata de una gran fuente de recursos para la humanidad, ya que muchas especies se adaptan prácticamente a todos los climas; son capaces de producir grandes cantidades de madera en períodos de tiempo relativamente cortos (Marcó y Harrand, 2005; Ruiz y López, 2010; Chahin, 2012; Beale y Clodovero Ortiz, 2013; Silva dos Santos, 2017); tienen la capacidad de recuperarse de la acción negativa del fuego, las sequías, las plagas, y el ramoneo, entre otros factores adversos, gracias a diversos mecanismos defensivos propios de las especies (Beale y Clodovero Ortiz, 2013); y se adaptan a suelos pobres y deteriorados. Además, su madera se puede utilizar para diversos fines (Salerno *et al.*, 1993; Marcó y Harrand, 2005; Beale y Clodovero Ortiz, 2013).

Según la Dirección de Desarrollo Foresto-Industrial del Ministerio de Agroindustria de la Nación (2017), la República Argentina cuenta actualmente con aproximadamente 1.323.000 ha de bosques cultivados, de las cuales unas 320.000 son de eucaliptos, distribuidas en las provincias de Misiones, Corrientes, Entre Ríos, Buenos Aires y el NOA,

siendo *Eucalyptus grandis* y *E. saligna* los más plantados; luego, en menor cantidad, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. viminalis* y *E. globulus* (Beale y Ortiz, 2013).

Eucalyptus camaldulensis Dehnh. es un árbol de follaje perenne, de gran porte, que alcanza los 30 m de altura (entre 9 y 50 m en Australia), con tronco grueso de base recta, generalmente bifurcado o torcido, y un diámetro de 60 cm hasta 2 m. Posee copa abierta e irregular, corteza lisa, blanca con manchas grises a rojizas. Las hojas adultas son lanceoladas, pecioladas de borde liso. Las flores son blanquizcas, alcanzan hasta 1 cm de diámetro y se encuentran reunidas en número de 4 a 14, en pequeños racimos axilares. La formación de yemas florales ocurre en verano y primavera, haciendo que el período de floración se extienda gran parte del año (Di Stefano, 2001). Los frutos son cápsulas leñosas de 5 a 8 mm que contienen numerosas semillas. La dispersión de semillas ocurre durante todo el año. Generalmente presenta cosechas abundantes cada 2 a 3 años (INFORINDAP-FIA, 2000; Hobbs *et al.*, 2009, citados por Espinoza Mesa *et al.*, 2015; CONABIO, 2016; Baptiste *et al.*, 2017). En la Argentina se conoce a esta especie con el nombre vulgar de eucalipto colorado.

La madera de *E. camaldulensis* se utiliza para producir pasta para papel, madera aserrada para construcción, y como combustible (CONABIO, 2016; Baptiste *et al.*, 2017). Posee un poder calórico de 19,2 MJ·kg⁻¹. Su dureza y densidad la hacen especialmente adecuada para la fabricación de pisos de alto tránsito. Otros productos que se elaboran a partir de su madera son: tableros de fibras, tableros de partículas, pisos de parquet, chapas y muebles (Hobbs *et al.*, 2009).

E. camaldulensis es el eucalipto más ampliamente distribuido en todo el mundo y el más utilizado para la siembra en tierras áridas y semiáridas (CONABIO, 2016). Es capaz de prosperar y producir cosechas aceptables en suelos relativamente pobres, con una estación seca prolongada. Tiene tolerancia a las heladas ocasionales y a las inundaciones periódicas. La temperatura óptima de crecimiento no varía mucho, permaneciendo el promedio anual en torno a los 27°C, y los niveles de temperatura mínima de hasta 6-7°C. Tolera máximas medias de verano de 27 a 40°C y mínimas medias invernales de 3 a 15°C, mientras que el rango de precipitaciones que soporta la especie se encuentra entre 200 y 1250 mm·año⁻¹ (INFORINDAP-FIA, 2000, citado por Espinoza Meza *et al.*, 2015).

En cuanto a los requerimientos de suelo, es una especie muy adaptable y resistente a suelos pobres o degradados, con fertilidad media a baja. Tiene tolerancia a suelos salinos. Crece en suelos moderadamente profundos a delgados, con drenaje regular, e

incluso periódicamente inundados. Para un buen crecimiento, requiere un pH de ácido a neutro (INFOR-INDAP-FIA, 2009; citado por Espinoza Meza *et al.*, 2015; CONABIO, 2016).

En vivero, *E. camaldulensis* es susceptible a una amplia gama de hongos que provocan *damping off* y enfermedades de la hoja. Los principales géneros que lo atacan en vivero son: *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia* y *Fusarium* (INTA, 1995; Espinoza Meza *et al.*, 2015; Ruiz Díaz *et al.*, 2022). Por ello es importante la desinfección del sustrato (INTA, 1995). Otros patógenos de importancia que afectan al eucalipto colorado son: *Botrytis cinerea*, *Corticium salmonicolor* y *Puccinia psidii*. El control de malezas también es importante en esta etapa pues su presencia afecta la supervivencia y el crecimiento en altura y diámetro de las plantas (Espinoza Meza *et al.*, 2015).

4.1.2. La producción de plantines de eucalipto

La producción de plantines en viveros se realiza por semilla, pudiéndose efectuar en almácigos directamente sobre el suelo, o bien en cajones, dependiendo de la cantidad de plantas a producir. Los plantines necesitan un buen sustrato que satisfaga sus exigencias nutricionales, favoreciendo su desarrollo. Al seleccionar el sustrato, se debe tener en cuenta que posea adecuadas características físicas y químicas relacionadas con la especie a plantar, y considerar también los aspectos económicos. El sustrato debe permitir buen crecimiento y nutrición de las raíces, “promover una buena formación del sistema radical y garantizar un buen crecimiento inicial” (Salerno *et al.*, 1993). La preparación del sustrato de siembra debe ser cuidadosa y se debe utilizar tierra de buena calidad, de textura arenosa y rico en humus que favorezcan el drenaje, con pH neutro a ligeramente ácido. La óptima relación N:P:K es de 1:0,6:1,6 (Cahin, 2012). Según Aparicio *et al.* (2005), el eucalipto responde en forma positiva a la fertilización con N y P, con lo cual se obtienen plantas con mayor DAP y altura que aquéllas que no fueron fertilizadas con estos dos nutrientes en forma simultánea.

La época de siembra en viveros es muy variable según la zona. En Santiago del Estero la siembra se realiza en marzo y abril. Durante el período de vivero, se debe realizar un manejo sanitario adecuado en relación con las enfermedades, plagas y malezas (Beale y Clodovero Ortiz, 2013).

El *damping off* es uno de los problemas más comunes en los viveros de eucalipto (Silva *et al.*, 2022). Esta enfermedad es causada por varias especies de hongos

fitopatógenos, entre ellos: *Botrytis cinerea*, *Fusarium sp.*, *Rhizoctonia solana*, *Pythium sp.*, *Phytophthora sp.* (Krügner y Carvalho, 1971; INTA, 1995; Sánchez Hernández y Trapero Casas, 2001; FAO, 2006; García y Ramos, 2015). Puede presentarse en preemergencia como consecuencia del ataque a la radícula o al hipocótilo en desarrollo antes de que la plántula emerja del suelo, o en post-emergencia, cuando el ataque tiene lugar inmediatamente después que la plántula emerge del suelo, provocando su caída (Sánchez Hernández y Trapero Casas, 2001; García y Ramos, 2015).

La eliminación de la competencia de malezas, tanto gramíneas como latifoliadas, en el cultivo de *Eucalyptus* es fundamental en las etapas iniciales de crecimiento, hasta que se cierran las copas (INTA, 1995; Villalba *et al.*, 2010; García *et al.*, 2015; García, 2017). Según Aparicio *et al.* (2005), en estudios realizados sobre el establecimiento de *E. grandis*, el efecto negativo de las malezas en el crecimiento se debe a que las raíces de la nueva plantación y de las malezas se concentran en el suelo superficial, donde es más alta la disponibilidad de nutrientes (en particular N y P). El sistema de raíces de las malezas, de mayor densidad y más finas, ocupa primero el suelo, limitando el crecimiento de las raíces de *E. grandis* y, en consecuencia, la absorción de nutrientes y agua. Estos autores afirman que es muy importante combinar la fertilización con un control de malezas estricto para un mejor aprovechamiento de los nutrientes. Asimismo, Garau *et al.* (1989) y Garau *et al.* (2009) detectaron diferencias significativas en el crecimiento en diámetro y en altura de plantines de *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* durante los primeros meses de implantación en suelos enmalezados, y también demostraron que la presencia de malezas influye sobre el área foliar y el volumen individual de los eucaliptos.

4.1.3. Características morfológicas y fisiológicas de los plantines

La formación exitosa de forestaciones de alta producción depende en gran medida de la calidad de los plantines implantados, que, además de tener que resistir las condiciones adversas que se encuentran en el campo, se espera que sobrevivan y que, finalmente, se transformen en árboles con un crecimiento volumétrico económicamente deseable (Gomes *et al.*, 2002). El contenido de nutrientes de las plantas puede contribuir, en parte, a la capacidad de supervivencia tras el trasplante, debido a sus efectos sobre el crecimiento, la capacidad de regeneración de raíces, la distribución de la biomasa, la superficie y estructura foliar, la tasa fotosintética y/o la movilización de nutrientes desde los tejidos más viejos hacia los que están creciendo (Fernández Martínez *et al.*, 2008). Así, un

plantín de buena calidad debe ser vigoroso, con hojas de tamaño y coloración típica de la especie y tener un buen estado fitosanitario y nutricional (Munguambe, 2012).

En la determinación de calidad de los plantines se usan parámetros denominados morfológicos (aspectos fenotípicos) y fisiológicos (internos). Tanto la calidad morfológica como la fisiológica de los plantines depende de la carga genética de las semillas, las condiciones ambientales y las técnicas de producción (Gomes *et al.*, 2002; Munguambe, 2012; Eloy *et al.*, 2013; Silva dos Santos, 2017).

Dentro de los parámetros morfológicos que se usan para evaluar la calidad de un plantín se encuentran: la altura, el diámetro del cuello, peso de la masa seca total (biomasa), peso de la masa seca aérea, peso de la masa seca de raíces, y las relaciones entre ellas (Castillo Martínez, 2007; Munguambe, 2012; Silva dos Santos, 2017).

Castillo Martínez (2007) afirma que los atributos morfológicos tales como la altura de la planta, la masa de la parte aérea, la masa del sistema radical, la proporción entre la masa aérea y la masa radical, entre otros, tienen una buena capacidad predictiva del desarrollo de las plantas en las plantaciones. En general, se ha comprobado que la morfología, el tamaño y la cantidad de nutrientes de la planta cultivada en vivero tienen una influencia directa en la supervivencia y el crecimiento de la planta en el campo.

También Gomes *et al.* (2002) y Kratz (2011) aseguran que la altura de la parte aérea y la biomasa son indicadores que reflejan el comportamiento de las plantas en las condiciones en que éstas se encuentran, por lo que estas variables biométricas serían útiles para la evaluación de los plantines. La biomasa seca indica la rusticidad de un plantín; mayores valores representan plantas más lignificadas y rústicas (Ramos Vieira y dos Santos, 2016). Esto se relaciona con la resistencia del plantín a las condiciones adversas en el campo, por lo que una planta con mayor biomasa tendrá mayor posibilidad de sobrevivir una vez llevada a la plantación.

Cuantificar la biomasa radical es importante desde el punto de vista fisiológico ya que está ligada a la supervivencia y al crecimiento inicial en el campo, debido a su función de absorción de agua y nutrientes (Kratz, 2011; Munguambe, 2012). Kratz (2011) afirma que la supervivencia en plantación es mayor cuanto mayor es la biomasa radical, independientemente de la altura de la parte aérea. Al respecto, Munguambe (2012) sostiene que un plantín de *Eucalyptus sp.* con una altura de 15 a 35 cm y una relación entre la masa seca aérea y la masa seca de la raíz igual a 2, sería un plantín de buena calidad; esta relación sería importante para los procesos fisiológicos y para el desarrollo de

la planta. Según Rodríguez (2008), citado por Luna y Fontana (2020), una buena relación entre el peso seco aéreo y el peso seco radical debe fluctuar entre 1,5 y 2,5, ya que esta proporción favorece un proceso fotosintético eficiente y predice la resistencia a los períodos relativamente secos. Ferreira da Silva *et al.* (2014), quienes trabajaron con *E. grandis*, confirman lo expresado por Munguambe (2012), afirmando que la relación entre masa seca de raíz y masa seca de la parte aérea indicada como ideal es de 1:2.

Entre los parámetros fisiológicos que se usan para evaluar la calidad de un plantín, también debe mencionarse la concentración de macro- y micronutrientes en la planta. En este sentido, las hojas son el órgano que mejor representa el estado nutricional, pues es allí donde ocurren los principales procesos metabólicos (Munguambe, 2012).

Cada nutriente mineral cumple varias funciones, y algunas de ellas están débilmente correlacionadas ya sea con la cantidad requerida o con sus propiedades fisicoquímicas. Un nutriente mineral puede funcionar como constituyente de una estructura orgánica, como un activador de reacciones enzimáticas, o como un osmoregulador (Toro-Vergara y Quiroz-Marchant, 2007).

El nitrógeno es un constituyente de aminoácidos, ácidos nucleicos y clorofila, y su presencia es necesaria para las principales reacciones bioquímicas en las plantas (Toro-Vergara y Quiroz-Marchant, 2007; Acosta Bop, 2008; Munguambe, 2012).

El fósforo (en forma de PO_4^{3-}) en las células vegetales está en los fosfato-azúcares, como intermediario en el proceso de respiración y fotosíntesis, y en los fosfolípidos, como constituyente de las membranas vegetales. También actúa en la activación de aproximadamente 50 enzimas, por lo que es importante que los plantines lleguen al campo con una buena reserva de este nutriente, hasta que las raíces nuevas puedan absorber el P disponible del suelo (Munguambe, 2012). Además, participa activamente en la reproducción y el crecimiento vegetal, así como en el desarrollo de las raíces y en la buena formación de los frutos (Pozo Peñaloza, 2005).

Niveles bajos de P producen una disminución de la mayoría de los procesos metabólicos, como, por ejemplo, un desequilibrio en el balance de las fitohormonas (Toro-Vergara y Quiroz-Marchant, 2007). Al respecto, Graciano (2005) afirma que limitaciones en la disponibilidad de P restringen la regeneración de la ribulosa 1,5 bifosfato, el aceptor primario de CO_2 , y que la fotosíntesis es menor en plantas deficientes en P.

El potasio participa en el control osmótico de las células, interviniendo en la turgencia y expansión celular, en la apertura y el cierre de estomas, en las nastias y el tactismo; también aumenta la tolerancia a las sequías, las heladas y la salinidad (Acosta Bop, 2008; Bonilla, 2013; Munguambe, 2012; Silva y Bassaco, 2018). El K está involucrado, además, en los mecanismos de defensa de las plantas a las plagas y enfermedades, debido a que las altas concentraciones de K en los tejidos favorecen la síntesis y la acumulación de compuestos fenólicos, que actúan como inhibidores de insectos y hongos (Arruda Silveira y Malavolta, 2001).

El calcio participa en la síntesis de la pared celular, en particular de la lámina media que separa a las células en división, reforzando la estructura de las plantas. Es un elemento esencial para la lignificación, por lo que su aporte debe ser mayor en la fase de rustificación del plantín (Ferrando Urrutia, 2010; Munguambe, 2012).

El magnesio forma parte de la estructura de las clorofilas y en la activación de varias enzimas (Pozo Peñaloza, 2005). Está presente en procesos claves como la unión y estabilización de las subunidades del ribosoma y, por tanto, en la biosíntesis de proteínas, e incluso en la transcripción del mensaje genético por la activación de la RNA polimerasa (Bonilla, 2013). También el manganeso está relacionado con la activación de las enzimas, además de ser esencial para la síntesis de clorofilas y participar en la elongación celular y el crecimiento de las raíces (Pozo Peñaloza, 2005; Munguambe, 2012).

El cinc interviene en la actividad de varias enzimas (entre ellas la ribulosa 1-5-difosfato carboxilasa), en la síntesis del ácido indol acético (AIA) y en el metabolismo de los carbohidratos. Es un regulador de la expresión génica, debido a que interviene en la estabilidad del ribosoma, y está presente en la RNA polimerasa (Bonilla, 2013; Munguambe, 2012).

El molibdeno participa en reacciones de tipo redox como constituyente de sistemas enzimáticos esenciales y forma parte de la nitrato reductasa. También parece estar implicado en la formación del ácido abscísico (ABA) por ser parte estructural de la enzima que lo genera (Bonilla, 2013).

Leite (2003), citado por Munguambe (2012), asigna como rango óptimo de concentración de nutrientes para plantines de *Eucalyptus sp.* los valores siguientes: N entre 20 y 25 g·kg⁻¹; P entre 2,5 y 3 g·kg⁻¹; K entre 20 y 25 g·kg⁻¹; Ca 9 g·kg⁻¹; Mg 3,5 g·kg⁻¹; Mn 600 mg·kg⁻¹; y Zn 35 mg·kg⁻¹. Por otra parte, Landis *et al.* (2000), citado por García (2017), proponen los siguientes niveles foliares óptimos para especies forestales

producidas en tubetes: N entre 1,4 y 2,2%; P entre 0,2 y 0,4%; K entre 0,4 y 1,5%; Ca entre 0,2 y 0,5% y Mg entre 0,1 y 0,3%. A su vez, Dell *et al.* (1995), citados por Betancourt (2014), asignan como rangos óptimos para micronutrientes los siguientes valores: B entre 15 y 27 mg·kg⁻¹; Cu entre 2 y 11 mg·kg⁻¹; Fe entre 25 y 130 mg·kg⁻¹; Mn entre 60 y 2300 mg·kg⁻¹; y Zn entre 15 y 50 mg·kg⁻¹. La concentración de Mo en las plantas es muy variable, pudiendo fluctuar desde 0,1 hasta más de 200 mg·kg⁻¹; sin embargo, el contenido más frecuente se encuentra entre 0,1 y 2 mg·kg⁻¹ (Betancourt, 2014).

4.1.4. Efecto de la solarización sobre el crecimiento

Los efectos directos de la solarización se relacionan con el control de plagas del suelo, entre estas, varias especies de nemátodos, de patógenos y de malezas (Labrada, 1995; Mauro *et al.*, 2015). En situaciones sin problemas patológicos, se ha observado una estimulación del crecimiento de las plantas e incluso un aumento en los rendimientos. Para explicar esta estimulación se han considerado varias hipótesis, tales como el aumento de macro- y micronutrientes en la solución del suelo, la liberación de fitorreguladores, la destrucción de sustancias fitotóxicas acumuladas en el suelo, la eliminación de parásitos no identificados, y la estimulación de micorrizas y de otros microorganismos beneficiosos (Grünzweig *et al.*, 1999; Cebolla, 2009; Mauro *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2017).

Las malezas son más susceptibles que los patógenos a la solarización. En general, la mayoría de las especies de malezas anuales y perennes pueden controlarse por medio de la solarización del suelo, pero difieren con respecto a su susceptibilidad al calor (Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez, 1991; Elmore, 1995; Arboleya, 2006; Golzardi *et al.*, 2015; Arboleya y Falero, 2018). Según Elmore (1991) y Marengo y Castro Lustosa (2000), las malezas anuales de invierno son muy sensibles a pequeños incrementos de temperatura, en cambio, las malezas anuales de verano son más resistentes (Rodríguez Lagreca, 2012). En el caso de los fitopatógenos, parte de la población muere por un efecto directo, especialmente las estructuras localizadas en la superficie, donde se registran las mayores temperaturas. A medida que aumenta la profundidad, el incremento de temperatura del suelo va disminuyendo; como consecuencia de ello, los propágulos son sometidos a temperaturas subletales (Arboleya y Maeso, 2018).

Múltiples investigaciones relacionan la solarización con el incremento de nutrientes de las plantas, que contribuye al marcado aumento en el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de las plantas en suelos solarizados (Labrada 1995; Grünzweig *et al.* 1999;

Abu Irmaileh, 2004).

La mayor disponibilidad de nutrientes minerales tales como NH_4^+ , NO_3^- , P, Ca^{+2} y Mg^{+2} , después de la solarización del suelo, está principalmente relacionada con la fracción orgánica, como resultado de la muerte de la microbiota (Chen y Katan, 1980, citados por Hildebrand, 1985 y por Abu Irmaileh, 2004; Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez, 1991; De Souza, 1994; Stapleton, 2000; Golzardi *et al.*, 2015). Los elementos P, K, Ca, Mg y otros nutrientes minerales solubles se encontraron en mayores cantidades después de la solarización del suelo (Hildebrand, 1985; Abu Irmaileh, 2004; Ramírez Villapudua *et al.*, 1991; Elmore, 1995; Stapleton, 2000; Cassanello, 2003). Por su parte, Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez (1991) y Kumar y Yaduraju (1992), aseguran que la solarización no afecta consistentemente a las concentraciones de K, Fe, Mn, Zn, Cu y Cl⁻ disponibles, al pH del suelo, o a la materia orgánica total.

La liberación de compuestos del N (vapor o líquido) es una parte del modo de acción del proceso, ya que una mayor concentración de N reducido se nitrificará después de la solarización del suelo, proporcionando NO_3^- para un mayor crecimiento de las plantas (Abu Irmaileh, 2004). El aumento de NO_3^- en suelos cubiertos por plásticos se debería a que la humedad favorece el ascenso por capilaridad de nutrientes móviles como los nitratos y a la mineralización del N orgánico. El incremento de NO_3^- y también de NH_4^+ dura hasta nueve meses después del tratamiento de solarización (Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez, 1991; Kumar y Yaduraju, 1992).

Después de estudiar el efecto de la solarización en el rendimiento de legumbres comestibles (habas, lentejas y arvejas), Linke *et al.* (1991) afirmaron que el aumento en el crecimiento de las plantas en suelos solarizados es un fenómeno que se observa con frecuencia, y es atribuido principalmente al control de plagas del suelo y de malezas, y, en segundo lugar, a la liberación de nutrientes, a la modificación de la microbiota del suelo en favor a los antagonistas de los patógenos de las plantas, y al mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Basallote *et al.* (1994) afirmaron que, en cultivos de rosal (*Rosa indica* L.), la solarización del suelo durante 8 semanas incrementó el porcentaje de estacas enraizadas, el vigor, la producción total y la calidad.

Herrera y Ramírez (1996) en Costa Rica, determinaron que la solarización estimuló el crecimiento del cilantro (*Coriandrum sativum* L.). Este aumento se atribuyó a la baja presencia de malezas y de nemátodos, así como a una mayor disponibilidad de NH_4^+ y

NO_3^- . Por otra parte, Montealegre *et al.* (1996) obtuvieron mayor cantidad y tamaño de frutos en parcelas solarizadas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Los autores atribuyeron este incremento a la mejora de las características físicas y biológicas del suelo, así como también al saneamiento residual de hongos y nemátodos. A su vez, Grünzweig *et al.* (1999) registraron aumentos significativos en la concentración de nitrógeno foliar en plantas de tomate producidas en sustratos solarizados, lo que mostró una alta correlación positiva con el crecimiento de los brotes. En cultivos de rúcula (*Eruca sativa* L.), se obtuvo mayor rendimiento y mejor calidad en suelos solarizados durante 30 a 45 días que en suelos sin solarizar. Este resultado se debió a la menor incidencia de *Sclerotinia sclerotiorum* y a la reducción de las malezas (Moccia *et al.*, 2000).

Salerno *et al.* (2000) estudiaron el efecto de la solarización en plántulas de *Eucalyptus viminalis*, concluyendo que el mayor crecimiento obtenido se debió al incremento de nitratos y a la disminución del potencial de inóculo de patógenos en los suelos tratados.

Investigaciones realizadas por Seman-Varner *et al.* (2007) demostraron que la solarización del suelo por un período de 4 a 6 semanas incrementó la concentración de nutrientes esenciales, incluyendo N, K y Mn. Este aumento de nutrientes se reflejó en el análisis de tejido foliar y en el aumento de biomasa de plantas de okra, indicando que las plantas utilizaron el aumento de nutrientes disponibles en el suelo (Seman-Varner *et al.*, 2007).

Plantines de cebolla (*Allium cepa* L.) producidos en almácigos solarizados exhibieron mayor altura de la planta, mayor peso seco total y aumento del N foliar. Estas diferencias se atribuyeron al aumento de nitratos en el sustrato y al control de malezas resultantes del tratamiento (Arboleya, 2009; Arboleya *et al.*, 2018).

Morales Romero (2009) reportó mayor longitud de tallo, mayor peso seco de hojas, tallo y raíces, y mayor concentración de N y P foliares en plantas de dinde (*Maclura tinctoria* (L.) D. Don. ex Steud.), producidas en sustratos solarizados, atribuyendo estos resultados a una mayor disponibilidad y posterior utilización de los nutrientes.

En sandía (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Mastum y Nakai), López Elías *et al.* (2014) afirmaron que en suelos solarizados obtuvieron mayor proporción de N, P, Ca y K, mientras que el análisis foliar mostró un incremento de N, K, Mg, Ca, Zn, Fe, Mn y Cu, siendo significativa la diferencia para las concentraciones de N, Mn y Zn. Estos autores concluyeron que el aumento del rendimiento observado se debió a la interacción entre el

control de patógenos, nemátodos y malezas, además del incremento de los nutrientes mencionados.

En algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.), Parra (2014) obtuvo mayor altura en plantines producidos en sustratos solarizados, elaborados con lombricompost y suelo en una proporción 1:3 (V/V), y mayor peso de materia seca total en plantines producidos en mantillo compostado y en otro sustrato elaborado con mantillo y suelo en proporción 1:3 (V/V). El incremento se atribuyó al efectivo control de malezas logrado con el tratamiento.

González Salvatierra (2017) reportó que en plantas de *Pinus maximinoi* H.E. Moore y *Pinus pseudostrabus* Lindley, producidas en sustratos solarizados, obtuvo mayor germinación, altura y sobrevivencia.

En comino (*Cuminum cyminum* L.), Meena *et al.* (2018) obtuvieron mayor crecimiento y rendimiento. Según estos autores, este incremento se debió al control de malezas ejercido por el tratamiento, que provocó una mayor disponibilidad de humedad y nutrientes para las plantas.

Kumar *et al.* (2020) obtuvieron mayor rendimiento en el cultivo de frutilla (*Fragaria x ananassa* Duch.) en suelos solarizados con la incorporación de organismos benéficos. Estos autores determinaron que las plantas producidas en suelos solarizados tenían mayor concentración de macro- y micronutrientes que las producidas en suelos sin solarizar.

El objetivo de este capítulo fue analizar los efectos de la solarización de los sustratos sobre algunos parámetros morfológicos y fisiológicos de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Para este fin, se procedió a evaluar de qué manera influye la solarización de los sustratos en el crecimiento y en la nutrición mineral de dichos plantines.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Producción de plantines

El ensayo se llevó a cabo durante la primavera de 2018. Los sustratos utilizados para la producción de plantines fueron el Sustrato 1 (S1), elaborado con 1 parte de mantillo y 1 parte de suelo (V/V), y el Sustrato 2 (S2), elaborado con una parte de mantillo y 2 partes de suelo, solarizados durante cuatro semanas, y sus respectivos testigos (sin solarizar), cuyas propiedades se presentan en la Tabla 4.1.

Los plantines se obtuvieron a partir de semillas de *Eucalyptus camaldulensis* procedencia Gibb River, Kimberley, Australia, cosechadas del ensayo genético del Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. Se colocaron varias semillas en recipientes de 100 cm³, ordenados en bandejas, y se las cubrió con una capa de 0,5 cm de arena. Hasta la emergencia, el riego fue por capilaridad, manteniendo una lámina de agua de 1cm. Una vez que las plántulas desarrollaron la primera hoja verdadera, fueron trasplantadas a macetas de 200 cm³. Setenta y cinco días después de la siembra, fueron descalzadas para efectuar las determinaciones.

La temperatura media durante el período ensayado fue de 23°C, con una temperatura máxima media de 29,5°C y una mínima media de 18°C. La precipitación acumulada fue de 175 mm y la evapotranspiración potencial acumulada fue de 356 mm; la velocidad del viento fue de 4,5 km·h⁻¹ y la humedad relativa promedio, de 60%.

Tabla 4.1. Propiedades de los sustratos 1 (1:1 mantillo-suelo V/V) y 2 (1:2 mantillo-suelo V/V). S1: sustrato 1:1 V/V solarizado, T1: sustrato 1:1 V/V testigo, S2: sustrato 1:2 V/V solarizado y T2: sustrato 1:2 V/V testigo.

Propiedades	T1	S1	T2	S2
Densidad aparente (g·cm ⁻³)	0,61	0,63	0.76	0.75
Porosidad (%)	54,4	52,2	57.7	52.2
Ph	6.2	6.1	7.5	6.5
Conductividad eléctrica	1,52	1,86	3.05	1.96
Materia orgánica (%)	12,81	10,98	6.45	7.74
Carbono orgánico total (%)	7,45	6,39	3.75	4.50
Nitrógeno orgánico total (%)	0,30	0,32	0.18	0.24
Relación Carbono:Nitrógeno	24,83	19,75	20.83	18.75
Nitratos (mg·kg ⁻¹)	59,4	74,5	50	35.9
Fósforo (mg·kg ⁻¹)	78,5	83,9	87.10	72.43
Potasio (cmol _c ·kg ⁻¹)	3,0	3,1	3.2	3.2
Calcio (cmol _c ·kg ⁻¹)	12,3	13,5	18.87	13.10
Magnesio (cmol _c ·kg ⁻¹)	6,5	5,4	4.8	4.5

4.2.2. Parámetros de crecimiento

Para evaluar el crecimiento, se determinaron los siguientes parámetros:

- La longitud de la parte aérea y de la raíz según la técnica propuesta por Castillo Martínez (2007). La altura se midió desde el cuello de la raíz hasta el extremo de la

yema terminal, utilizando una regla graduada de 30 cm. La longitud de la raíz principal se midió desde el cuello hasta el ápice con la misma regla.

- El peso seco total, peso seco de la parte aérea y peso seco de la raíz. Para ello las muestras se secaron en estufa a 65°C durante 48 h hasta peso constante. Se pesó con balanza analítica con un error de 0,1 mg.

4.2.3. Nutrición foliar y radical

Para evaluar la nutrición de los plantines se determinaron las concentraciones de:

- Macronutrientes: N, P, Mg, Ca y K, según la técnica de Malavolta *et al.* (1989).
- Micronutrientes: Zn, Mn y Mo, según la técnica de Malavolta *et al.* (1989).

4.2.4. Presencia de malezas

Para investigar el efecto de los tratamientos sobre las malezas, se siguieron los siguientes pasos:

- (a) Identificación de las especies.
- (b) Determinación del número total de malezas por plantín.
- (c) Determinación de la biomasa aérea por plantín.

Antes de descalzar los plantines, se extrajeron las malezas que habían germinado y se procedió a su recuento e identificación. Posteriormente se las colocó en estufa a 65°C durante 48 h hasta peso constante. Se las pesó en una balanza analítica con un error de 0,1 mg.

4.2.5. Presencia de damping off

Se estimó la incidencia de esta enfermedad, observando la aparición de síntomas y aplicando la fórmula:

$$I = \frac{N^{\circ} \text{plantas enfermas}}{N^{\circ} \text{plantas observadas}} * 100$$

4.2.6. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue totalmente al azar, con 4 tratamientos y 5 repeticiones, cada una de ellas con 20 plantas, de las que se tomaron al azar 2 plantas por

repetición. El análisis estadístico se realizó con el paquete estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2020). En los casos en que se cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad, se aplicó ANOVA, y en caso contrario, el test de Kruskal-Walis.

4.3. Resultados Y discusión

4.3.1. Parámetros de crecimiento

4.3.1.1. Altura

La evaluación del crecimiento en altura de los plantines muestra diferencias significativas entre los sustratos solarizados y los testigos, siguiendo el orden Sustrato 1 solarizado (1:1 mantillo-suelo) >Sustrato 2 solarizado (1:2 mantillo-suelo) >Testigo del sustrato 1 > Testigo del sustrato 2 (Fig. 4.1).

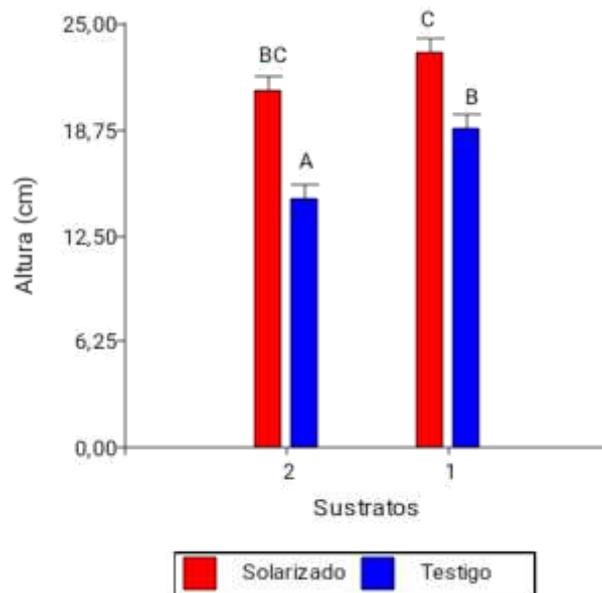


Figura 4.1. Longitud de tallo de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos solarizados y testigos. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

La altura de los plantines producidos en el sustrato 1 solarizado (S1) se incrementó en un 11% en comparación con los producidos en el sustrato testigo (T1), mientras que en

los plantines producidos en el sustrato 2 solarizado (S2), el incremento fue de un 43% en relación con los testigos (T2).

Los plantines producidos en S1, S2 y T1 alcanzaron una altura dentro del rango considerado como óptimo para ser llevados a campo, según Munguambe (2012). Esto no ocurrió con los plantines producidos en el sustrato T2.

Los rangos de altura obtenidos en este ensayo concuerdan con el intervalo de alturas determinadas por Assis Cardoso (2017) en plantines de *E. urophylla* (12,37-22,75 cm) en sustratos orgánicos elaborados con residuos agroindustriales enriquecidos con distintos porcentajes de P mineral.

Los plantines producidos en todos los tratamientos alcanzaron una altura mayor a la reportada por Guerra *et al.* (2000) en plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en tubetes, en sustratos elaborado con bagazo de caña de azúcar, cachaza y N, que fue de 8,80 cm.

Las alturas de los plantines en S1, T1 y S2 fueron mayores que las obtenidas por Guerra *et al.* (2000) en *E. camaldulensis*, trabajando con un sustrato elaborado con corteza de eucalipto, vermiculita y fertilizante (15,82 cm), y que las medidas por Gomes *et al.* (2002) para plantines de *E. grandis* de 90 días en un sustrato elaborado con 80% de guano y 20% de carbón (16,85 cm).

Kratz (2011) obtuvo alturas similares a las obtenidas en S1 en plantas de 90 días de *Eucalyptus benthamii*, producidas en sustratos elaborados con cáscara de arroz carbonizada y fibra de coco en distintas proporciones, y en sustratos producidos con biosólido y fibra de coco, y con estos dos componentes más cascara de arroz carbonizada, también en distintas proporciones. Además, obtuvo resultados similares en plantas de *E. benthamii* de 120 días de edad, producidas en un sustrato elaborado con corteza de pino semicompostada y en otro elaborado con cáscara de arroz carbonizada. Estos resultados también coinciden con los obtenidos por Munguambe (2012) y Silva dos Santos (2017) en algunos clones de *E. urophylla* de 120 y 90 días, respectivamente.

Las alturas de los plantines producidos en T1 y S2 fueron similares a las de *E. benthamii* producidas en sustratos de corteza de pino con vermiculita, en sustrato de cáscara de arroz carbonizada pura, y en sustratos elaborados con carbón de diversas granulometrías (Kratz, 2011; Kratz, 2015).

Efectuando dos fertilizaciones semanales con macronutrientes durante un período de 10 semanas, Monsalve *et al.* (2009) produjeron plantines de *E. globulus* con una altura

promedio superior a las obtenidas en los ensayos de la presente investigación (30 cm). Sin embargo, el crecimiento de dichos plantines fue superior al de los de *E. grandis* reportados por García (2017), que alcanzaron alturas menores de 10 cm 120 días después de la siembra.

En S1, las alturas fueron superiores a las reportadas por Ramos Vieira y dos Santos (2017) en plantines de *E. camaldulensis* producidos en un sustrato elaborado con cáscara de pino, vermiculita y humus, enriquecido con K (23,5 cm), y en este mismo sustrato enriquecido con material calcáreo (20 cm), 150 días después de la siembra.

4.3.1.2. Longitud de raíz

La longitud de la raíz principal de los plantines producidos en los sustratos solarizados fue 27,5 % mayor que la de sus respectivos testigos (Fig. 4.2).

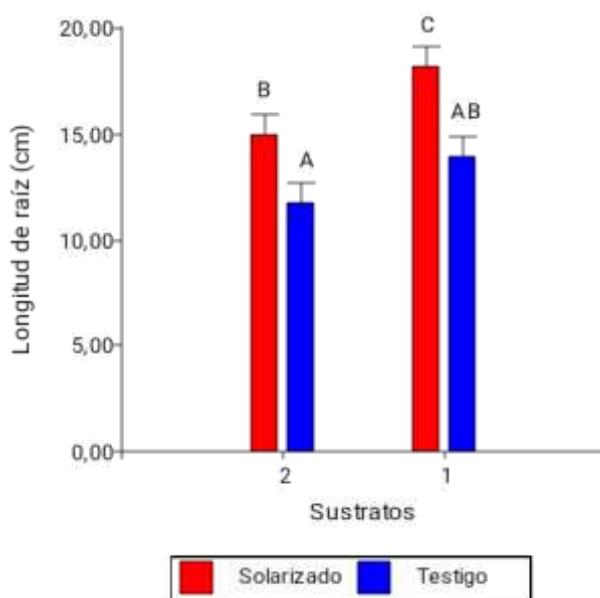


Figura 4.2. Longitud de la raíz principal de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

González (1995), citado por Luna y Fontana (2020), afirma que una mayor longitud de raíces garantizaría un mejor desempeño a campo, ya que cuanto mayor sea el sistema

radical también lo serán la cantidad de puntos activos de crecimiento y la exploración del suelo para absorber nutrientes.

4.3.1.3. Biomasa Total

En cuanto a la biomasa seca, se observa que fue superior en las plantas producidas en los sustratos solarizados, siguiendo el mismo orden que para la longitud del tallo, como se ilustra en la Fig. 4.3.

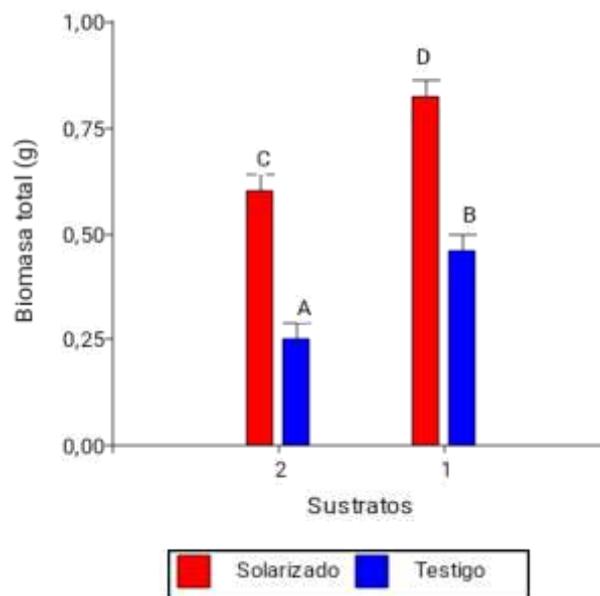


Figura 4.3. Biomasa total de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Los plantines producidos en S1 tuvieron un 48% más de biomasa que los producidos en T1, mientras que en S2 los plantines produjeron un 84% más de biomasa que en T2. Según Cardoso (2017), este parámetro indica la rusticidad de un plantín: cuanto mayor sea este valor, más rustificado estará el plantín.

El incremento en la biomasa total y en el crecimiento de los plantines producidos en S1 podría deberse a que, en este sustrato, hubo mayor cantidad de nitratos. Esto coincide con las afirmaciones de Monsalve *et al.* (2009), quien indica que una mayor disponibilidad de N aumenta significativamente la biomasa aérea y radical, así como la altura de las plantas.

Gomes *et al.* (2002) reportaron, en *E. grandis* de 60 días, alturas promedio entre 13,8 y 23,24 cm, valores de masa seca aérea con medias que oscilaron entre 0,15 y 0,71 g por planta, y masa seca radical entre 0,20 y 0,26 g por planta, dependiendo del tamaño del tubete y de la fertilización recibida, en tanto que Eloy *et al.* (2013) obtuvieron, para esta misma especie, a los 80 días, alturas entre 18,28 y 22,94 cm, valores de masa seca aérea entre 1,07 y 1,94 g por planta, y masa seca radical entre 0,73 y 1,21 g por planta. Estos autores afirman que, en tubetes de tamaño medio (90 cm³), las plantas tuvieron un mayor crecimiento, mientras que Ferreira da Silva *et al.* (2014) obtuvieron, a los 90 días de la emergencia, plantines cuya altura media varió entre 15,16 y 20,61 cm, con una masa seca aérea entre 0,31 y 0,52 g por planta y una masa seca radical entre 0,12 y 0,17 g por planta en sustratos orgánicos elaborados con residuos urbanos y agroindustriales.

Teniendo en cuenta la altura y la biomasa, el sustrato T2 no es técnicamente viable para producir *E. camaldulensis*. Kratz (2011 y 2015) afirma que un pH inadecuado puede influir en el crecimiento; así, en sustratos con pH menor que 5 pueden ocurrir deficiencias de N, Ca, Mg, K y B, mientras que con un pH superior a 6,5 se esperan deficiencias de P, Fe, Mn, Zn y Cu. Según este autor, el crecimiento de *E. benthamii* presenta una correlación negativa con el pH. Para la producción de especies forestales, la conductividad eléctrica debe estar entre 1,5 y 3 dS·m⁻¹. Valores altos de CE pueden dañar las raíces y los pelos radiculares, impidiendo la absorción de agua y nutrientes (Kratz, 2011), y valores de CE mayores que 3,5 mS·cm⁻¹ se consideran excesivos para la mayoría de las especies (Kratz, 2013). Varios autores afirman que *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* y *E. robusta* son resistentes a la salinidad, no presentando disminución de crecimiento con una CE de 8,33 dS·m⁻¹ (Kratz, 2015). Sin embargo, esto no coincide con los resultados obtenidos en esta investigación. Este último autor también afirma que el pH presenta una correlación negativa con el crecimiento.

4.3.1.4. Biomasa aérea

La biomasa aérea también fue mayor en los plantines producidos en los sustratos solarizados (Fig. 4.4). En el S1, el incremento fue de un 100% en comparación con T1, mientras que en S2 fue 153% mayor que T2.

Los resultados que se obtuvieron en esta investigación son comparables con los obtenidos por Kratz (2011) en *Eucalyptus benthamii*. En S1 (0,63 g) la biomasa aérea fue superior a la obtenida en plantines en diversos sustratos; la de S2 fue similar a la obtenida por este autor en sustratos elaborados con distintas proporciones de fibra de coco y

cáscara de arroz carbonizada; en sustratos de biosólido, fibra de coco y arroz en diversas combinaciones; y en un sustrato elaborado con cáscara de arroz carbonizada y vermiculita en proporción 50/50. Los valores obtenidos en T1 se asemejan a los obtenidos en sustratos producidos con corteza de pino y vermiculita y en sustratos de cáscara de arroz carbonizada.

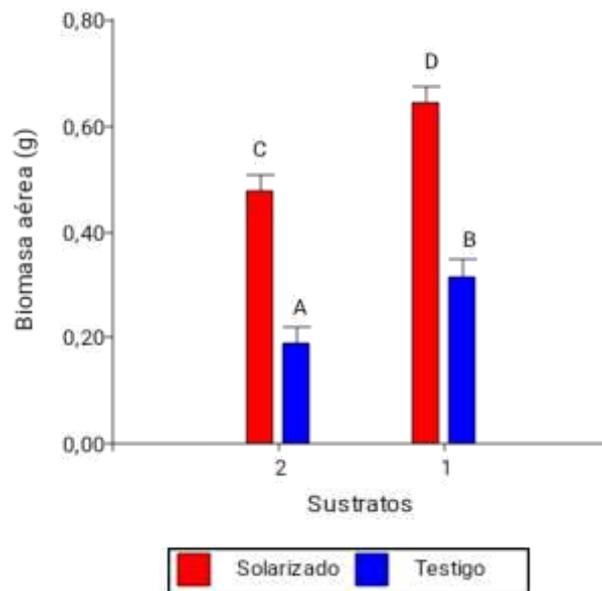


Figura 4.4. Biomasa aérea de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

La biomasa aérea de los plantines producidos en S1 y S2 fue mayor a la obtenida por Guerra *et al.* (2000) en plantines de *E. camaldulensis* producidos en corteza de eucalipto, vermiculita y fertilizante (3,90 g). La menor producción de biomasa aérea se obtuvo en el sustrato 2 sin solarizar; aun así, fue superior a la reportada por este mismo autor en plantines de *E. camaldulensis* producidos en bagazo de caña, cachaza y nitrógeno (0,08 g).

4.3.1.5. Biomasa radical

La biomasa radical aumentó 28,5 % en los plantines producidos en S1 y 117% en los producidos en S2 en comparación con sus respectivos testigos, como se puede observar en la Fig. 4.5.

La biomasa radical obtenida en S1 fue superior a la obtenida por Kratz (2011) en raíces de *E. benthamii* en la mayoría de los sustratos ensayados, excepto en el sustrato elaborado con 80% de fibra de coco y 20% de cáscara de arroz carbonizada, en el que el peso seco fue levemente mayor (0,2 g). Las biomases de T1 y S2 fueron similares a las obtenidas en plantines de *E. benthamii* producidos en sustratos a base de corteza de pino y vermiculita; en sustratos producidos con biosólido, fibra de coco y cáscara de arroz carbonizada en distintas proporciones; en sustratos de cáscara de arroz carbonizada; y en aquéllos producidos con 50% de cáscara de arroz y 50% de vermiculita.

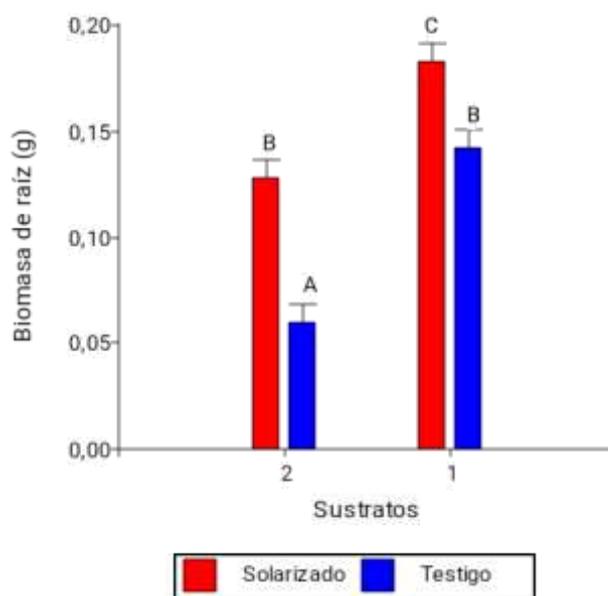


Figura 4.5. Biomasa de raíces de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Los plantines producidos en S1, T1 y S2 tuvieron una biomasa radical mayor que la de *E. camaldulensis* producidos en corteza de eucalipto, vermiculita y fertilizante (0,10 g), mientras que la de T2 fue mayor que la calculada por Guerra *et al.* (2000) en plantines de *E. camaldulensis* producidos en bagazo de caña de azúcar, cachaza y nitrógeno (0,03 g). La biomasa de estos plantines en estos tres tratamientos también fue similar a la reportada por Ferreira da Silva *et al.* (2014) en plantines de *E. grandis* de 90 días, producidos en diferentes combinaciones de sustratos elaborados con residuos orgánicos urbanos y agroindustriales.

4.3.1.6. Relación entre biomasa radical y aérea

La relación entre la biomasa radical y la aérea disminuyó en los plantines producidos en los sustratos solarizados pues los incrementos en la biomasa aérea fueron mayores que los incrementos de la biomasa radical (Fig. 4.6). Según Graciano (2005), esto se debería a que las plantas con buen nivel nutricional destinarían una mayor proporción de materia seca a tallos y hojas, en detrimento de las raíces.

En plantines de *E. grandis* producidos en sustratos orgánicos, Ferreira da Silva *et al.* (2014) reportaron una relación similar a la obtenida en los plantines producidos en S1, S2 y T2, (0,27-0,34), mientras que, en un sustrato constituido sólo por suelo, obtuvieron una relación similar a la de T1 (0,49).

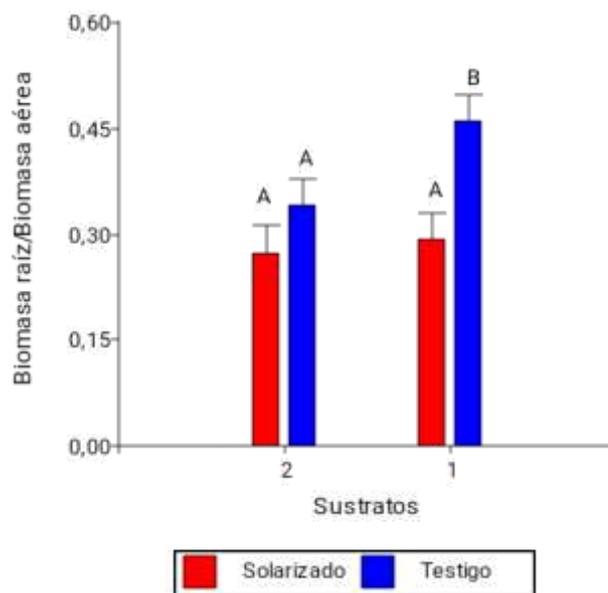


Figura 4.6. Relación entre biomasa de raíces y biomasa aérea de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Teniendo en cuenta la relación propuesta por Munguambe (2012) y Ferreira da Silva *et al.* (2014), sólo los plantines producidos en T1 estuvieron dentro del rango considerado como óptimo, mientras que los producidos en los demás tratamientos no cumplieron con esta condición. La importancia de lograr esta proporción (1:2) se relaciona con la posibilidad de la planta para desarrollarse en sitios secos.

La mayor concentración de nutrientes en S1 y S2 pudo haber influido en estos resultados, pues las plantas minimizan el gasto energético de emisión de raíces cuando los nutrientes están fácilmente disponibles (Ferreira da Silva *et al.*, 2014).

4.3.2 Concentración de macronutrientes

4.3.2.1. Nitrógeno

La concentración de N en hojas y raíces se presenta en la Fig. 4.7. Los plantines producidos en el sustrato 1 solarizado presentaron mayores concentraciones de N tanto en las hojas como en la raíz. El incremento fue de 65% y de 66%, respectivamente. En los plantines producidos en el sustrato 2 solarizado, la concentración de N foliar subió 57% en relación con los testigos, mientras que en las raíces el aumento sólo fue de 43%, y no fue estadísticamente significativo.

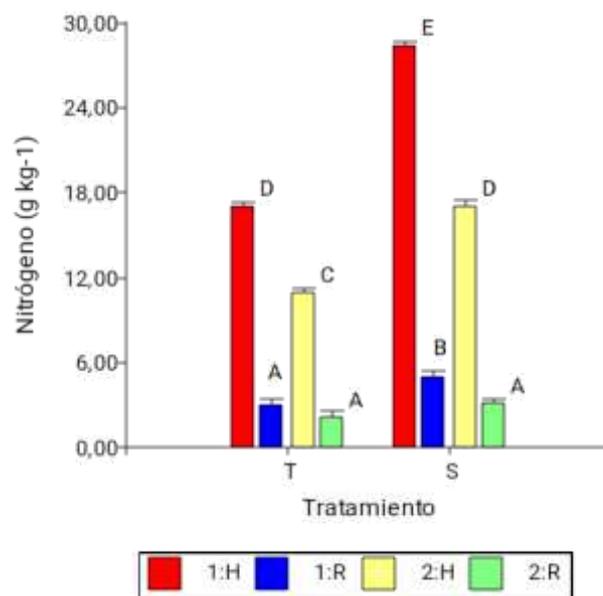


Figura 4.7. Concentración de nitrógeno en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en los sustratos 1 y 2, solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Según los niveles óptimos de N foliar propuestos por Leite (2003), citado por Munguambe (2012), sólo los plantines producidos en el sustrato 1 solarizado (S1) presentaron un nivel adecuado de N; sin embargo, teniendo en cuenta los niveles indicados

por Landis *et al.* (2000), citado por García (2017), solamente los plantines que se produjeron en el sustrato 2 sin solarizar (T2) no alcanzaron un nivel óptimo.

Los niveles altos de N promueven una rápida división y elongación celular. A medida que sube la concentración de N, también aumentan el crecimiento en altura, el área foliar y el crecimiento radical (Monsalve *et al.*, 2009), aunque Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007) advierten que altas concentraciones de N producirían plantas suculentas que serán dañadas fácilmente en períodos de bajas temperaturas, e indican que valores foliares superiores a 2,5 % de N representan una concentración excesiva que produciría un excesivo crecimiento de la parte aérea a expensas del crecimiento de la raíz. Según Fernández Martínez *et al.* (2008), en ensayos de fertilización con distintas dosis de N, P y K en *E. globulus*, sólo el N influyó significativamente en la calidad de las plantas producidas.

Con respecto al crecimiento radical, Monsalve (2009) y Fernández Martínez *et al.* (2008) afirman que el aumento de N en el sustrato aumenta la biomasa de las raíces. Esta afirmación se corroboró para los plantines producidos en S1 y S2.

La concentración de N en los sustratos es un aspecto importante para tener en cuenta, sobre todo si no se tiene previsto aplicar fertilizantes. Así, el tenor de N obtenido por Fernández Martínez *et al.* (2008) en *E. globulus* de siete meses producidos en un sustrato elaborado con turba y corteza de pino 1:1 (V/V) fue de 1,31%. Estos autores señalaron que concentraciones foliares en el rango de 1,3-1,6% eran suficientes como para no suponer un impedimento en cuanto a la calidad de las plantas producidas y su respuesta en el campo, mientras que concentraciones por debajo de 1,0 % sí limitaban la capacidad de crecimiento y endurecimiento de las plantas. Teniendo en cuenta este aspecto, únicamente los plantines producidos en T2 tuvieron una concentración de N en el límite para ser considerados de calidad (1,09%).

Guerra *et al.* (2000), trabajando con plantines de *E. camaldulensis* de la misma edad que los de esta investigación, producidos en tubetes de 50 cm³, determinaron que la concentración de N foliar osciló entre 10,66 y 11,67 g·kg⁻¹, según los sustratos utilizados. Estos valores se aproximan a los obtenidos en los plantines producidos en T2 y son muy inferiores a la cantidad de N medida en los demás tratamientos.

Ramos Vieira y dos Santos (2017) obtuvieron concentraciones de N foliar en plantines de *E. camaldulensis* menores que los de T2, en un sustrato comercial elaborado con corteza de pino, vermiculita y humus, al que se le agregó material calcáreo (8,9 g·kg⁻¹) y Ca + K (8,62 g·kg⁻¹). Ellos midieron concentraciones menores que T1 cuando

se usó el sustrato comercial puro ($10,25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), cuando se le adicionó N + P + K + calcáreo ($13,28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), y cuando se le incorporó sólo N ($11,82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Las concentraciones de los plantines producidos en S1 y S2 fueron mayores que las obtenidas en plantines producidos en el sustrato comercial + calcáreo + N ($17,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y también mayores que todas las combinaciones que se hicieron con este sustrato nombradas anteriormente.

Silva *et al.* (2018) en plantines de *E. urograndis* de 110 días producidos en sustratos elaborados con distintas proporciones de biosólido y residuos de la industria del palmito, obtuvo un rango promedio entre 9,4 y 11,3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ indicando que, estos sustratos sin fertilización no proveían las cantidades necesarias de este nutriente para alcanzar el nivel recomendado, ratificando lo manifestado por Fernández Martínez *et al.* (2008).

Los estudios sobre la concentración de nutrientes en raíces de eucaliptos son escasos en comparación a los de nutrición foliar, esto se debe según Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007), a que se prefiere analizar la concentración del follaje porque es una medida verdadera de la efectividad de la fertilización aplicada. A pesar de ello, estos autores afirman que es conveniente analizar el estado nutricional de cada uno de los elementos de la planta en forma separada.

Las concentraciones de N presentes en las raíces de los plantines en todos los tratamientos ensayados fueron menores a las reportadas por Graciano (2005) en *E. grandis* ($9,7\text{-}18,3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y por Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007), en *E. globulus* ($10,8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

4.3.2.2. Fósforo

Las concentraciones de P en hojas y raíces se presentan en la Fig.4.8. En los dos sustratos ensayados, la concentración de P aumentó en los plantines producidos en los sustratos solarizados. Las diferencias fueron significativas tanto en hojas como en raíces.

En las hojas de los plantines producidos en el sustrato 1 el incremento de P fue de un 47%, mientras que en las raíces el P aumentó un 38%. Las hojas de los plantines producidos en el sustrato presentaron un 58% más de P que sus testigos mientras que en sus raíces el incremento de este nutriente fue de un 44%.

En ensayos realizados con *E. grandis*, Graciano (2005) obtuvo mayor respuesta al crecimiento con incrementos de N y/o P. También observó que con la adición de N aumentó la tasa de crecimiento de la biomasa aérea.

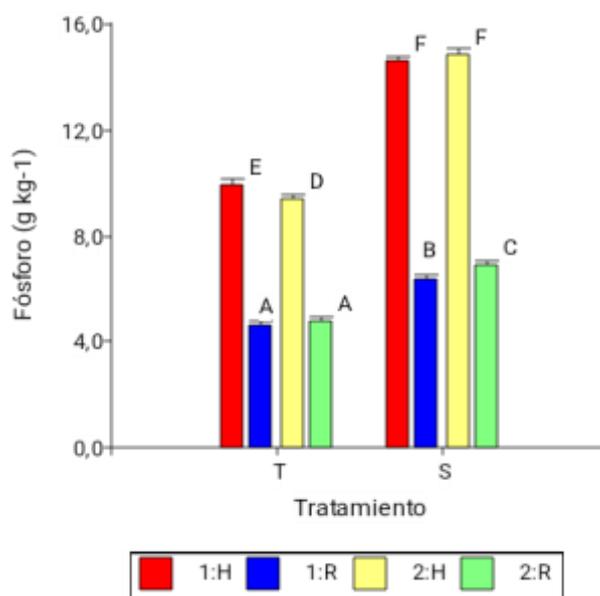


Figura 4.8. Concentración de fósforo en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Las diferencias en las concentraciones de N y P en S1 y T1 se reflejaron en los contenidos foliares de los plantines producidos en ellos; sin embargo, esto no sucedió en los plantines producidos en T2 y S2 pues, a pesar de que en T2 las concentraciones de P y N fueron mayores en los plantines producidos en él, los contenidos de estos nutrientes y el crecimiento fueron menores que en los plantines producidos en S2. Esto probablemente se debió a la mayor cantidad de malezas en T2, que compitieron con los plantines por agua, luz y nutrientes. Por otra parte, el pH en T2 (7,5) pudo haber provocado una menor disponibilidad de P para los plantines, mientras que la CE elevada ($3,05 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) pudo haber influido en forma negativa en el crecimiento.

Cardoso (2017) afirmó que el eucalipto posee una alta exigencia de P en la fase inicial del crecimiento. Cuando los niveles de P son bajos, hay una disminución de la mayoría de los procesos metabólicos (Toro Vergara y Quiroz Marchant, 2007). Para *E. camaldulensis*, el rango adecuado de P en las hojas está entre 1 y $1,4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, mientras que una concentración menor de $0,8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ se considera deficiente (Boardman *et al.*, 1997, citado por Arruda Silveira y Gava, 2004). Tomando como base estos parámetros, la concentración de P en los plantines producidos en todos los tratamientos sería excesiva.

Para plantines de la misma especie y edad, Guerra *et al.* (2000) determinaron una concentración de P entre $2,01$ y $2,44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pero Ramos Vieira y dos Santos (2016),

trabajando con plantines un poco mayores (110 días), obtuvieron concentraciones de P entre 6,33 y 15,09 g·kg⁻¹, valores más próximos a los determinados en los ensayos de la presente investigación. La diferencia pudo deberse a que, a pesar de ser de la misma edad, los plantines producidos por Guerra *et al.* (2000) tenían un tamaño y una biomasa menor que los ensayados. Ello explicaría la menor concentración de este elemento, así como la de N.

En ensayos más recientes, Ramos Vieira y dos Santos (2017), trabajando con plantines de la misma especie, obtuvieron niveles de P foliar similares a los de esta investigación, e incluso mayores (entre 9,92 y 18,64 g·kg⁻¹), indicando que, a pesar de ser elevados, no provocaron limitaciones en el crecimiento. Este resultado coincide con lo observado en los plantines estudiados.

Según Bonilla (2013), el exceso de P origina un gran desarrollo de las raíces en relación con la parte aérea, determinando una baja proporción en la relación parte aérea: raíz. Teniendo en cuenta este criterio, los plantines no presentaron exceso de este nutriente pues, si bien la biomasa radical aumentó en los plantines producidos en los sustratos solarizados, también lo hizo la biomasa aérea, dando como resultado una proporción entre la biomasa aérea y radical mayor en los plantines de sustratos solarizados en comparación con sus testigos (Fig.4.6).

Estudios realizados por Oliva *et al.* (1995) demostraron que la concentración de P en las raíces de *E. camaldulensis* aumenta cuando se incorpora P al suelo, lo que coincide con los resultados obtenidos en los plantines producidos en el sustrato S1 solarizado, cuya concentración de P fue mayor que la de su testigo (Fig. 3.14), pero opuesta a los resultados obtenidos en el sustrato S2 solarizado, en el que la concentración de P fue menor. A su vez, las raíces de los plantines producidos en S2 exhibieron un aumento de este nutriente del 48%. Estos autores, con diferentes niveles de fertilización fosfatada, reportaron concentraciones de P de entre 0.8 y 1,5 g·kg⁻¹ en raíces de plantines de *E. camaldulensis* de 90 días, valores menores que los obtenidos en esta investigación. También fueron mayores que los medidos por Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007) en raíces de *E. globulus* (1,7 g·kg⁻¹ de P).

4.3.2.3. Potasio

La concentración de K (Fig. 4.9) en las hojas de los plantines producidos en los dos sustratos solarizados tuvo un incremento muy pequeño, siendo las diferencias no significativas. Sin embargo, este nutriente aumentó 45 % en las raíces de los plantines producidos en S2 y 38% en las de los producidos en S1.

El K cumple un papel indispensable en un gran número de procesos bioquímicos y biofísicos en las plantas. Está relacionado con la síntesis de glúcidos y prótidos y con la resistencia a heladas y enfermedades (Pozo Peñaloza, 2005).

Guerra *et al.* (2000) reportaron concentraciones de K de entre 12,6 y 11,26 g·kg⁻¹, y 18,75 y 19,18 g·kg⁻¹ en plantines producidos en tubetes de 50 cm³ y en envases de 250 cm³, respectivamente. Aun cuando estos valores son más altos que los propuestos como óptimos para *E. camaldulensis* por Boardman *et al.* (1997), citado por Ferrando Urrutia (2010), son muy inferiores a los determinados en esta investigación. También Ramos Vieira y dos Santos (2017) obtuvieron concentraciones menores, (10,11 a 16,9 g·kg⁻¹) en plantines de la misma especie producidos en un sustrato comercial al que se le agregaron diferentes combinaciones de N, P, K y material calcáreo.

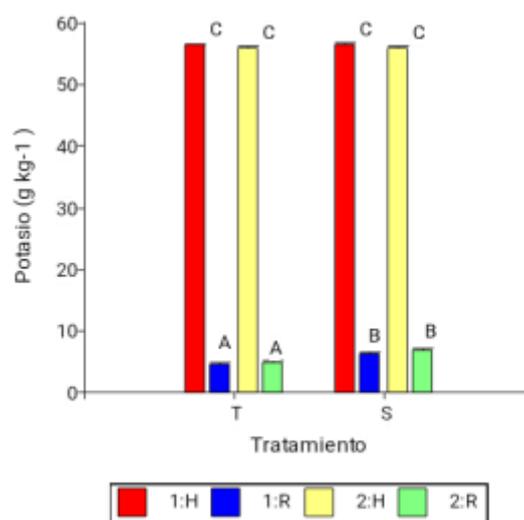


Figura 4.9. Concentración de potasio en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007) afirmaron que los elementos K y P son necesarios en mayor concentración en la primera etapa para potenciar el crecimiento de las raíces y apoyar los procesos fisiológicos. El P es esencial para la fotosíntesis pues la

regeneración de la ribulosa 1,5 bifosfato, el aceptor primario de CO₂, se vería limitada si hubiese restricciones en la disponibilidad de este elemento (Graciano, 2005).

La concentración adecuada de K para hojas juveniles de *Eucalyptus camaldulensis* es de 6-10 g·kg⁻¹ y de 6-8 g·kg⁻¹ para hojas adultas (Boardman *et al.*, 1997, citado por Ferrando Urrutia, 2010). La concentración de este elemento medida en los plantines fue cinco veces más que el máximo recomendado; aun así, no hubo síntomas de toxicidad en los plantines, lo que sugiere que se habría producido un consumo de lujo de este elemento.

Oliva *et al.* (1995) reportaron una concentración de K de 7,66 g·kg⁻¹ en raíces de *E. camaldulensis*. Las raíces de los plantines producidas en S1 y S2 se aproximaron a este valor, pero en los plantines testigo la concentración de este nutriente fue menor que la reportada por estos autores. Fernández Martínez *et al.* (2008), en ensayos realizados con *E. globulus*, demostraron que el incremento de K en las raíces favoreció la regeneración y el aumento de la biomasa de raíces.

4.3.2.4. Magnesio y Calcio

La concentración de Mg en las hojas disminuyó levemente en los plantines producidos en S1, siendo esta variación no significativa en comparación con los testigos (Fig. 4.10). Sin embargo, en las raíces de estos plantines se detectó un incremento de Mg del 10%. En los plantines producidos en el sustrato 2 solarizado, la concentración de Mg subió en las hojas y disminuyó en las raíces. Estas variaciones fueron tan pequeñas (0,11 y 0,15, respectivamente) que no resultaron significativas en ninguno de los dos casos.

La concentración de Ca aumentó con la solarización de los sustratos, tanto en las hojas como en las raíces (Fig. 4.11). En los plantines producidos en S1, el incremento fue de 16 y 34% en hojas y en raíces, respectivamente, mientras que en los plantines producidos en S2, el aumento del Ca foliar fue de 28% y en las raíces, de 16%, siendo este último no significativo.

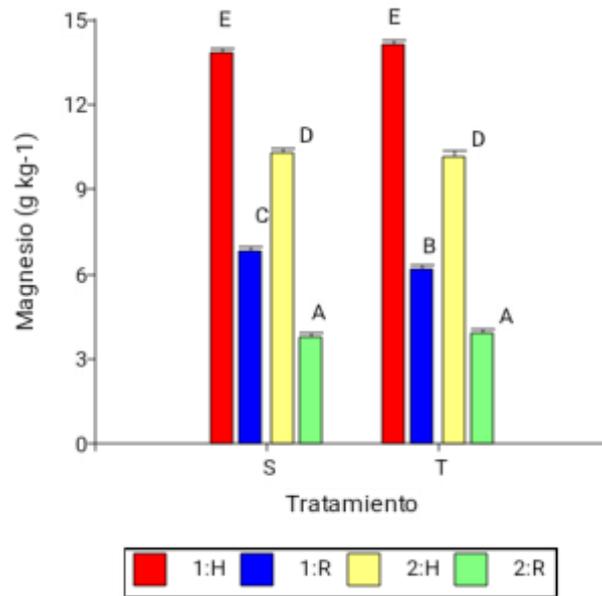


Figura 4.10. Concentración de magnesio en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

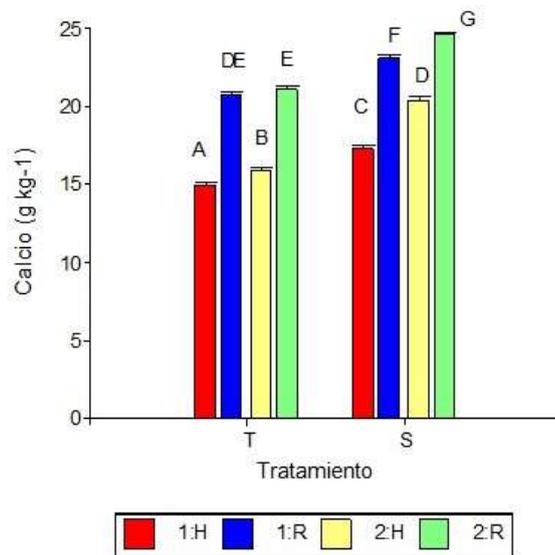


Figura 4.11. Concentración de calcio en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Según Arruba Silveira y Malavolta (2001), citados por Pozo Peñaloza (2005), la concentración de K guarda una estrecha relación con las de Ca y Mg. Estos autores afirman que las interacciones entre K, Ca y Mg ocurren en forma de inhibición competitiva, en la membrana celular. Cuando hay exceso de K, su consumo aumenta, lo que puede interferir en la absorción y en la disponibilidad fisiológica del Ca y el Mg (Bonilla, 2013). Esta relación no se presentó en los plantines de este ensayo, cuyos niveles de K, Ca y Mg fueron altos, según los óptimos propuestos por Leite (2003), citado por Munguambe (2012) y Landis *et al.* (2000). En los plantines producidos en los cuatro tratamientos se obtuvieron concentraciones de K mayores que los reportados por Graciano (2005) en plantines de *E. grandis* fertilizados con 4 g de urea ($10,44 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en plantines fertilizados con 24 g de superfosfato triple de calcio ($10,49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

El contenido de Ca foliar en los plantines de los cuatro tratamientos fue superior a los valores reportados por Guerra *et al.* (2000) en *E. camaldulensis* ($6,54$ y $5,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) en sustrato de bagazo de caña y cachaza, y en sustrato de corteza de eucalipto, vermiculita y nitrógeno, respectivamente, y a los publicados por Ramos Vieira y dos Santos (2016) para la misma especie (entre $0,83$ y $1,41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), y por estos últimos autores un año más tarde (entre $0,70$ y $1,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Los valores obtenidos también fueron superiores a los resultados de Graciano (2005) en *E. grandis* fertilizados con 2 g de urea ($16,84 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en plantines fertilizados con 6 g de superfosfato triple de calcio ($16,13 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Según Ferrando Urrutia (2010), la deficiencia de Ca produciría alteración en el crecimiento, mientras que altas cantidades de este elemento restringen la disponibilidad de B, lo que protegería a los plantines del exceso de este nutriente; además, debido a su función estructural en la pared celular, favorecería la rustificación del plantín. El Ca facilita la absorción de otros nutrientes como el P y el Mo, neutraliza el Al y Mn, y activa la vida microbiana al modificar el pH (Pozo Peñaloza, 2005).

La concentración de Mg foliar no tuvo variaciones significativas tras el proceso de solarización. Estos resultados no coinciden con lo manifestado por López Elías *et al.* (2014). No obstante, los valores obtenidos son superiores a los publicados por Guerra *et al.* (2000) en *E. camaldulensis* ($2,53$ y $2,58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), por Ramos Vieira y dos Santos (2016) en la misma especie (entre $0,69$ y $1,54 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y, más tarde, por estos últimos (entre $0,30$ y $1,07 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). También fueron mayores que los obtenidos por Graciano (2005) en plantines de *E. grandis* fertilizados con 2 g de urea ($2,08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en plantines fertilizados con 12 g de superfosfato triple de calcio ($2,06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Según Bonilla (2013), una carga excesiva de

Na en el sustrato dificulta la absorción de nutrientes, principalmente la de K, Ca y P. Esto se corroboró en los plantines producidos en T2.

En ningún momento se observaron síntomas de toxicidad por exceso de P, Ca, Mg o K, probablemente debido a lo expuesto por Graciano (2005), quien sostuvo que los eucaliptos tienen la capacidad de absorber y conservar nutrientes y poseen gran plasticidad para ajustarse a cambios en su disponibilidad. Además, las concentraciones de P, K, Ca y Mg en los plantines producidos en todos los tratamientos ensayados superaron los óptimos propuestos por Munguambe (2012) y García (2017).

Los incrementos en las concentraciones de N, P y Ca en las hojas de los eucaliptos producidos en los ensayos de esta investigación coincidieron con los obtenidos por Morales Romero (2009) en plantas de dinde, por Arboleya (2009) y Arboleya *et al.* (2018) en plantas de cebolla, y por López-Elías *et al.* (2014) en plantas de sandía. Por otra parte, no se observaron modificaciones en las concentraciones de K y Mg.

Investigaciones realizadas por Graciano (2005) demostraron que, en *E. grandis*, los incrementos de N y P provocaron un aumento significativo en la concentración de Mg foliar y en sus relaciones con el K y el Ca. En comparación con sus respectivos testigos (T1 y T2), en los plantines producidos en sustratos solarizados (S1 y S2), con el aumento de N, sí se observó un incremento de la biomasa aérea y del Ca foliar; no así del K y el Mg, que se mantuvieron en concentraciones similares tanto en los plantines producidos en los sustratos solarizados como en los testigos.

Oliva *et al.* (1995) demostraron que la concentración de Ca en las raíces de plantines de *E. camaldulensis* aumenta con el incremento de este nutriente en el suelo. Esto fue ratificado en el sustrato 1 (S1), pues, luego de ser solarizado, aumentaron la cantidad de Ca intercambiable (como quedó ilustrado en la Fig.3.11) y la concentración de Ca en las raíces (Fig.4.11). Sin embargo, en el sustrato 2 solarizado, a pesar de que la concentración de Ca disminuyó, esta disminución no se vio reflejada en la concentración de Ca de las raíces. Estos autores lograron incrementar la concentración de Ca en las raíces de 1,90 a 7,93 g·kg⁻¹ agregando al suelo 315 mg·kg⁻¹ de Ca.

Las concentraciones de Mg en las raíces de los plantines en todos los tratamientos fueron mayores que las reportadas por Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007) en *E. globulus* (2,6 g·kg⁻¹) y por Graciano (2005) en raíces de *E. grandis* sin fertilizar y fertilizados con 1, 2 y 4 g de urea y con 6, 12 y 24 g de superfosfato triple de calcio (1,34-2,00 g·kg⁻¹).

En comparación con los resultados obtenidos por otros investigadores, las concentraciones de los macronutrientes foliares evaluados en este ensayo fueron mayores que las obtenidas por Ramos Vieira y dos Santos (2016) en plantines de *E. camaldulensis* de 120 días, producidos en diversos sustratos, quienes reportaron los siguientes rangos: N entre 8,51 y 11,59; P entre 6,33 y 15,09; Ca entre 0,83 y 1,41 y Mg entre 0,69 y 1,54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. También fueron superiores a las reportadas por Cardoso (2017) en hojas de *E. urophylla* producidos en sustratos orgánicos enriquecidos con 3 niveles de fósforo, y por Rocha *et al.* (2014) en plantines de *E. urograndis* de 90 días con una altura promedio de 26,82 cm (N:22; P:4; K:6; Ca:10 y Mg:4,5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), excepto para la concentración de N en los plantines de T1, T2 y S2. Además, dichas concentraciones resultaron mayores que las publicadas por Monsalve *et al.* (2009) en plantines de *E. globulus* producidos en compost de corteza de pino, fertilizado con distintas concentraciones de nitrógeno, quienes midieron los siguientes valores porcentuales promedios: N entre 1,17 y 1,64; P entre 0,15 y 0,18; K entre 1,13 y 1,28; Ca entre 0,70 y 1,1 y Mg entre 0,34 y 0,38. Sólo la concentración de N en los plantines producidos en T2 resultó ser levemente menor: 1,09%.

Según Graciano (2005), las concentraciones de nutrientes en los tejidos no reflejan necesariamente la disponibilidad de esos nutrientes en el suelo. Esto se ratificó en el caso del sustrato 2 sin solarizar (T2), que tuvo mayor cantidad de P y N que el sustrato 2 solarizado (S2). Aun así, los plantines producidos en T2, mostraron menor concentración de estos nutrientes en sus tejidos y menor altura y biomasa, en comparación con los plantines producidos en S2.

4.3.3. Concentración de micronutrientes

4.3.3.1. Manganeso

Las concentraciones de Mn en las hojas y raíces de los plantines producidos en los sustratos solarizados (S1 y S2) fueron mayores que en sus respectivos testigos (Fig. 4.12). En S1 los incrementos fueron de 52% en hojas y de 13% en raíces, mientras que en S2 fueron de 37% en hojas y de 10% en raíces.

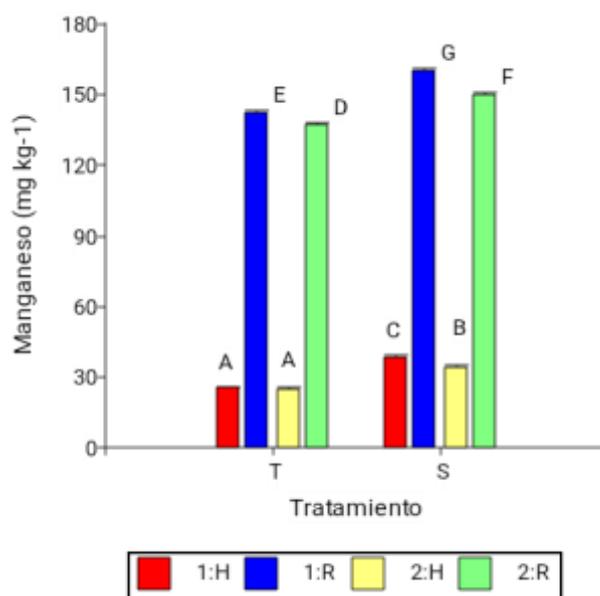


Figura 4.12. Concentración de manganeso en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

El Mn está implicado en los procesos de respiración y actúa como catalizador en la síntesis de clorofila, no presentando problemas de asimilación en suelos con valores de pH entre 5 y 6 (Pozo Peñaloza, 2005). Su deficiencia se torna evidente en hojas jóvenes, manifestándose en ellas una clorosis internerval y permaneciendo las nervaduras y tejidos adyacentes con una coloración verde oscura (Bonilla, 2013; García, 2017). A pesar de que la solarización provocó un aumento de este elemento en las hojas, las concentraciones de Mn medidas en este ensayo fueron inferiores a las propuestas por Leite (2003) como óptima para *Eucalyptus sp.* ($600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y por Dell *et al.* (1995) ($60\text{-}2300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Aun así, no se manifestaron síntomas de deficiencia en los plantines. La deficiencia de Mn puede suplirse con Mg^{+2} (Bonilla, 2013). Esto podría explicar por qué no se manifestaron los síntomas de deficiencia en los plantines. Según Brañas *et al.* (2000), diversos autores destacan la elevada eficiencia con que el eucalipto aprovecha los nutrientes limitantes. Por este motivo, es difícil establecer niveles de referencia apropiados que indiquen deficiencias nutricionales.

La concentración de Mn foliar en todos los tratamientos fue inferior a la obtenida por Guerra *et al.* (2000) en *Eucalyptus camaldulensis* ($51,77$ y $63,02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y por Rocha *et al.* (2014) en plantines de *E. grandis* ($225 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y *E. urograndis* ($200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Las concentraciones de Mn en S1 y S2 se aproximan a las obtenidas por Cardoso (2017) en

plantines de *E. urophylla* producidos en sustrato orgánico compostado con P agregado ($39,43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y en sustrato comercial ($32,52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). En las raíces, la concentración de Mn fue mayor que en las hojas, duplicando los valores reportados por Toro Vergara y Quiroz Marchant (2007) en *E. globulus*.

4.3.3.2. Cinc

La concentración de Zn se representa en la Fig. 4.13. Los plantines producidos en los sustratos solarizados (S1 y S2) presentaron mayor cantidad de Zn que sus testigos, tanto en las hojas como en las raíces.

Las concentraciones de Zn en las hojas fueron mayores que las reportadas por Guerra *et al.* (2000) en plantines de *E. camaldulensis* ($18,76$ y $14,48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), que las publicadas por Rocha *et al.* (2014) para *E. grandis* y *E. urograndis* ($24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), y que las obtenidas por Cardoso (2017) para *E. Urophylla* en sustratos orgánicos con distintas proporciones de P (entre $24,09$ y $34,59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). En los cuatro tratamientos, las concentraciones de Zn de los plantines fueron entre 4 y 5 veces mayores que los valores considerados como óptimos (Dell *et al.*, 1995).

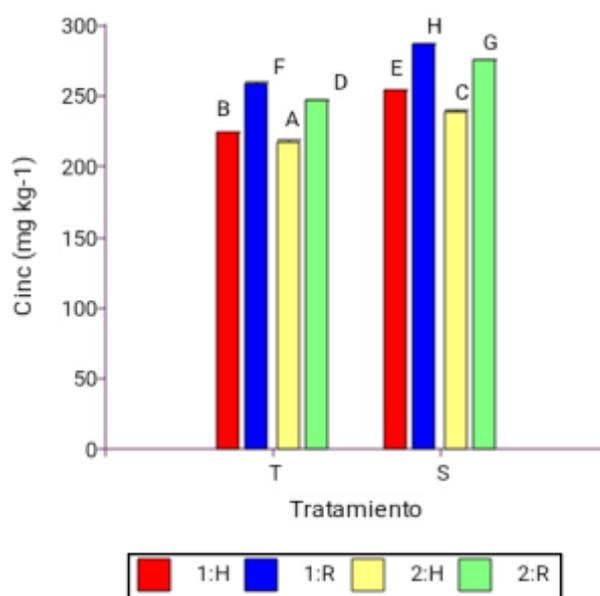


Figura 4.13. Concentración de cinc en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

4.3.3.3. *Molibdeno*

La concentración de Mo aumentó 58% en las hojas y 62% en las raíces de los plantines producidos en S1. En cambio, en los plantines producidos en S2, el incremento sólo fue significativo en las raíces (52%), lo que se ilustra en la Fig. 4.14.

En lo que respecta a la concentración de Mo, no se encontró bibliografía que haga referencia a este nutriente en el género *Eucalyptus*. No obstante, teniendo en cuenta los rangos propuestos por Betancourt (2014), la concentración de Mo en los plantines producidos en los cuatro tratamientos está dentro del rango considerado como normal.

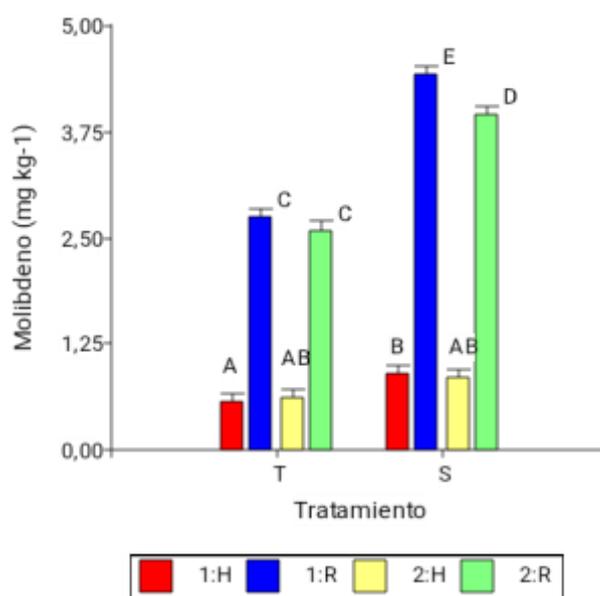


Figura 4.14. Concentración de molibdeno en hojas (H) y raíces (R) de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustratos 1 y 2 solarizados (S) y testigos (T). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

4.3.4. *Presencia de Malezas*

La cantidad de malezas que crecieron en los envases de los plantines evaluados se presenta en la Fig. 4.15. En los sustratos testigos se presentaron especies tanto mono- como dicotiledóneas, entre las que predominaron las siguientes: *Portulaca oleracea* L.; *Chenopodium album* L., *Coronopus didymus* (L.) Sm., *Amaranthus quitensis* Kunth, *Malvastrum coromandelianum* (L) Garcke, *Cynodon dactylon* (L.) Pers., y *Cyperus rotundus* L. En menor proporción, estuvieron presentes: *Sonchus oleraceus* L., *Wedelia glauca*

(Ortega) O. Hoffm, *Trianthema portulacastrum* L., *Polygonum aviculare* L., *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist y *Sorghum halepense* (L.) Pers.

Luego de la solarización, el número de malezas que emergieron se redujo en forma significativa en los dos sustratos, lo que indica que hubo un “efecto de debilitamiento”, según lo descrito por Cohen y Rubin (2007). Esto se debe a que las malezas germinan durante el período de solarización. Las temperaturas elevadas pueden provocar cambios en la cubierta de las semillas y/o en los procesos metabólicos, que inducen la germinación y aumentan la sensibilidad de las semillas a compuestos fitotóxicos volátiles y al ataque de microorganismos.

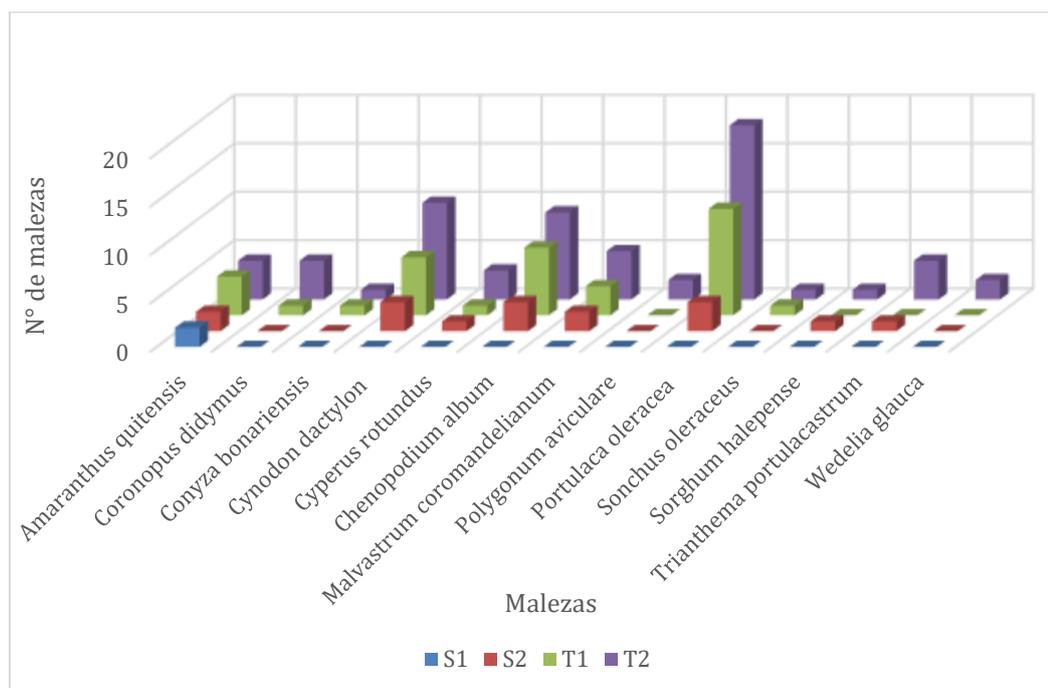


Figura 4.15. Malezas presentes en los sustratos solarizados y testigos. S1: sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) solarizado, T1: sustrato 1:1 V/V testigo, S2: sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo) solarizado y T2: sustrato 1:2 V/V testigo.

En el sustrato S1, el control de malezas luego de la solarización fue prácticamente total, siendo este resultado similar al obtenido por Rodríguez Lagreca (2012) en un suelo arcilloso solarizado durante 30 días. De las malezas presentes, la única que sobrevivió al tratamiento fue *Amaranthus quitensis*, como puede apreciarse en la Fig. 4.15. Esto podría deberse a que, si bien las temperaturas fueron lo suficientemente altas como para controlar

la germinación y la emergencia de las semillas superficiales, no ejercieron un control tan efectivo a mayor profundidad.

El sustrato T2 presentó mayor número de malezas que el T1, probablemente por tener una proporción mayor de suelo en su composición. La sobrevivencia de malezas en el sustrato 2 solarizado (S2) fue mayor que en S1. Esto se debió a que la temperatura alcanzada en aquél fue menor que la alcanzada en éste.

En comparación con sus correspondientes testigos, la biomasa de malezas del sustrato 1 se redujo 99,5 % luego de ser solarizado, mientras que en el sustrato 2 la disminución fue del 78% (Fig. 4.16).

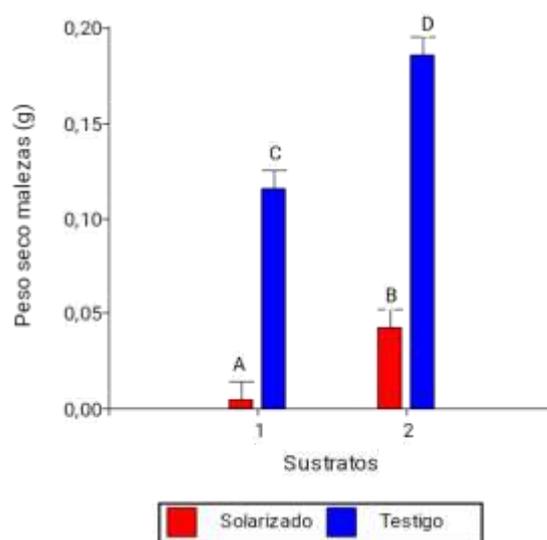


Figura 4.16. Biomasa aérea de malezas (peso seco en g) en cada plantín producido en los sustratos solarizados (S) y en los testigos (T). El 1 denota el sustrato 1:1 V/V (mantillo-suelo) y el 2, el sustrato 1:2 V/V (mantillo-suelo).

Los resultados obtenidos coinciden con los estudios realizados por diversos autores (Ashley, 1990; Tello, 1998; Parra, 2014), quienes afirmaron que la solarización del suelo reduce considerablemente la presencia de malezas. Esto también fue confirmado por Abu-Irmaileh (1991), quien, al solarizar por un período de seis semanas en el Valle del río Jordán, obtuvo una reducción en el desarrollo y el crecimiento de las malezas. Navarro *et al.* (1991) midieron el efecto de la solarización sobre las malezas, cubriendo el suelo durante 3, 4, 5 y 6 semanas. Determinaron que el número de malezas se reduce a medida que aumentan los días de solarización, logrando el máximo control de malezas de hoja ancha con tratamientos de 6 semanas y de gramíneas con tratamientos de 5 semanas.

Moya y Furukawa (2000) compararon el efecto de la solarización en distintos períodos de tiempo sobre el control de malezas en suelos con fines ornamentales, y determinaron que la solarización durante 30 días reduce el crecimiento y la emergencia de las malezas anuales hasta 79%. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en S2.

4.3.5. Presencia de damping off

No se detectó la presencia de *damping off* en ninguno de los tratamientos. A pesar de no haberse manifestado la enfermedad en esta investigación, los agentes causales podrían haber sido controlados en forma efectiva mediante la solarización, en caso de haber estado presentes en los sustratos ensayados.

Ripantiy sus colaboradores (2009) estudiaron el efecto de la solarización a dos profundidades (0-10 y 10-20 cm) en 3 períodos (15, 30 y 45 días), con simple y doble cubierta y con el agregado de materia orgánica, sobre patógenos presentes en sustratos forestales. Estos autores señalaron que, a medida que el ensayo avanzó, la presencia o la ausencia de cada uno de los patógenos estuvo sujeta a las condiciones de temperatura que se obtuvieron en cada una de las evaluaciones, y reportaron aumentos en la sobrevivencia de plántulas de *Pinus tecunumanii* en sustratos solarizados, debido al control ejercido sobre *Fusarium sp.*, con temperaturas medias de 36,5 y 34°C, en doble y simple cubierta respectivamente, a 10 cm de profundidad.

Coelho y Mitchell (1999) evaluaron el efecto de la solarización sobre la sobrevivencia de *Phytophthora spp.* en varios suelos del Norte de Florida. A 10 cm de profundidad, con una temperatura máxima de 47°C, el control de *Phytophthora* en los suelos solarizados fue tan efectivo como el obtenido con la aplicación de bromuro de metilo. En este estudio, las temperaturas medias alcanzadas fueron de 38°C en S1 y 34,2°C en S2, y la máxima, de 52 y 47,5°C, respectivamente. Bajo estas condiciones, se podría lograr un control eficiente de *Fusarium spp.* y *Phytophthora spp.* en los sustratos ensayados.

López-Herrera y Verdú-Valiente (1994) midieron la pérdida de viabilidad de *Botrytis cinerea* (micelio y esclerocios) a diferentes profundidades. Las temperaturas alcanzadas fueron 47, 40 y 36°C a 5, 15 y 25 cm, respectivamente. A estas temperaturas, se obtuvo la pérdida total de la viabilidad de inóculo, por lo que los autores afirmaron que el inóculo primario de *B. cinerea* puede ser erradicado mediante la solarización. En consecuencia, teniendo en cuenta las temperaturas máximas alcanzadas en S1 y S2, también se podría haber ejercido un buen control de *Botrytis* en ambos sustratos.

Ghini *et al.* (2002) lograron un control eficiente sobre *Pythium* con una acumulación de 88 horas, una temperatura mayor de 40°C y una temperatura máxima absoluta de 48,3°C. En S1, la temperatura máxima absoluta fue 52°C, con 226 horas acumuladas y una temperatura media mayor de 40°C, mientras que en S2, la temperatura máxima absoluta fue de 47,5°C, con 85 horas acumuladas y una temperatura media mayor de 40°C.

4.3.6. Efecto de la solarización de sustratos sobre parámetros morfológicos y fisiológicos de los plantines

Una vez que se lo lleva al terreno, el buen desempeño de un plantín depende de las características morfológicas, fisiológicas y sanitarias que posea. Estas características, además de estar influenciadas por la dotación genética, están relacionadas con todas las prácticas culturales que se realizan en el vivero, siendo la solarización una de ellas.

Luego de ser solarizados los sustratos, los plantines producidos en ellos presentaron mayor crecimiento, lo que se evidenció con los incrementos de altura y longitud radical y de biomasa aérea y radical. Esto coincide con los resultados obtenidos por numerosos investigadores, como, por ejemplo: Salerno *et al.* (2000) en plántulas de *Eucalyptus viminalis*, Morales Romero (2009) en plantas de dinde, Parra (2014) en plantines de algarrobo blanco (*Neltuma alba*), González Salvatierra (2017) en plantas de *Pinus maximino* y *Pinus pseudostrobus*, y muchos otros que fueron citados en la introducción de este capítulo.

En los plantines producidos en S1, el incremento que se produjo en la concentración de NO_3^- , P y Ca^{+2} en los tejidos se debió a que estos nutrientes estuvieron presentes en mayor concentración en el sustrato. Esto coincide con los resultados reportados por Arboleya (2009) y Arboleya *et al.* (2018) en el cultivo de cebolla, por Morales Romero (2009) en dinde, y por Kumar *et al.* (2020) en frutilla, entre otros.

Luego de la solarización, la concentración de Mg^{+2} disminuyó en S1. A pesar de ello, esta variación no produjo una disminución en la concentración de este elemento en los plantines, probablemente porque se encontraba en cantidades suficientes como para no limitar su absorción ni el crecimiento.

En S1, la concentración de K^+ intercambiable exhibió un leve incremento, que, aunque no fue estadísticamente significativo, se reflejó en un aumento de este nutriente en las raíces. Según Fernández Martínez *et al.* (2008), esto favorece la regeneración y el

aumento de la biomasa, característica muy deseable luego del trasplante.

La concentración de los micronutrientes estudiados también aumentó en los tejidos de los plantines producidos en S1. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Semana Varner *et al.* (2007) en plantas de okra, quienes demostraron que la solarización del suelo por un período de 4 a 6 semanas aumentó la concentración de nutrientes esenciales, incluyendo N, K y Mn. Kumar *et al.* (2020) también reportaron mayores concentraciones de macro- y micronutrientes en plantas de frutillas producidas en suelos solarizados.

Además de la mayor disponibilidad de nutrientes, en S1, la solarización ejerció un control de malezas prácticamente total, lo que también influyó en el incremento de la biomasa debido a la reducción de la competencia. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Moccia *et al.* (2000) en rúcula, por López-Elías *et al.* (2014) en sandía, por Parra (2014) en algarrobo blanco, y por Meena *et al.* (2018) en comino, entre otros.

La disminución en la porosidad total (Fig. 3.3) y el aumento en la densidad aparente (Fig. 3.2) de S1, en comparación con T1, no influyó negativamente en el crecimiento, ya que la longitud y la biomasa radical de los plantines producidos en S1 fue superior a las de los producidos en T1.

Si bien los plantines producidos en el sustrato S2 también obtuvieron un mayor crecimiento, que se manifestó en el incremento de la altura, la longitud radical y la biomasa, algunas de las causas que lo provocaron fueron diferentes a las que causaron el crecimiento de los plantines producidos en S1.

A pesar de que las concentraciones de NO_3^- , P, Mg^{+2} y Ca^{+2} solubles disminuyeron en S2, en comparación con su testigo, los plantines producidos en este sustrato presentaron mayores concentraciones de NO_3^- en las hojas, de P y Ca^{+2} en hojas y raíces, y de K^+ en raíces. Esto se debió a que la solarización provocó la disminución del pH en este sustrato, haciendo que los nutrientes estén más disponibles para las plantas y facilitando su absorción (Fig. 3.4).

Estos resultados se contraponen a lo expresado por varios autores, como Ramírez Villapudua y Sainz Rodríguez (1991) y Kumar y Yaduraju (1992), quienes afirman que la solarización no afecta considerablemente al pH del suelo. En S2, la CE también disminuyó significativamente (Fig. 3.5), por lo que éste resultó ser el sustrato más apto para el crecimiento de los plantines, en comparación a su testigo. Este resultado se contrapone a

los resultados obtenidos por Parra (2014), quien determinó incrementos significativos en la CE en un sustrato elaborado con vermicompost y suelo, en proporción 1:3 (V/V).

Los plantines producidos en S2, así como los producidos en S1, presentaron mayor concentración de K⁺ en las raíces y de micronutrientes tanto en hojas como en raíces.

Debido a que en el sustrato S2 la cantidad de malezas presentes fue mayor, y a que las temperaturas alcanzadas durante la solarización fueron menores que las de S1, el control de malezas no fue tan efectivo como en S1. Sin embargo, el aumento en el crecimiento de los plantines producidos en S2 también se puede atribuir al control de malezas logrado.

La relación entre la biomasa radical y la aérea disminuyó en los plantines solarizados, siendo significativa sólo en S1. Esto podría considerarse una característica negativa a la hora del trasplante, sobre todo en zonas áridas como la provincia de Santiago del Estero. Hay que tener en cuenta que las mediciones se realizaron en plantines de 75 días, en activo crecimiento, que no fueron rustificados. Para obtener resultados más concluyentes en este sentido, deberían realizarse otros ensayos en los que se incorpore la técnica de rustificación.

4.4. Conclusiones

Con relación al uso de sustratos preparados con mantillo y suelo en las proporciones 1:1 y 1:2 solarizados y sin solarizar, para la producción de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días, se puede concluir que:

1. Los plantines de *E. camaldulensis* producidos en los sustratos solarizados presentaron mayor altura, longitud de raíz, y biomasa que los producidos en los sustratos testigos.
2. La nutrición foliar y radical en los plantines producidos en los sustratos solarizados fue superior a la nutrición obtenida en los plantines producidos en sustratos testigos.
3. La solarización ejerció un control efectivo sobre las malezas presentes en los sustratos estudiados.
4. De los sustratos solarizados, el sustrato 1 (1:1 mantillo-suelo) fue el que exhibió la mejor aptitud para la producción de *Eucalyptus camaldulensis*.
5. El sustrato sin solarizar que confirió mejores características a los plantines fue el T1, elaborado con 1 parte de mantillo y 1 parte de suelo (V/V).

6. En contraste, el sustrato 2 (1 parte de mantillo y 2 partes de suelo), sin haber sido solarizado, no resultó ser un buen sustrato para producir la especie estudiada.

4.5. Bibliografía

- Abu-Irmaileh, B.E. 1991. Weed control in vegetables by soil solarization. *In*: DeVay, J., J. Stapleton, C. Elmore (Eds.). Soil solarization. Roma. FAO Plant Production and Protection Paper 109. 395 p.
- Abu Irmaileh, B. 2004. Solarización del suelo. *In*: Labrada, R. (Ed). Manejo de Malezas para Países en Desarrollo, Estudios FAO, Producción y Protección Vegetal 120, Add. 1. 318 p.
- Acosta Bopp, C.G. 2008. Evaluación de una fertilización en *Eucalyptus globulus* Labill. aplicada en la etapa de máxima acumulación nutritiva, Valdivia, Chile. Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar al Título de Ing. Forestal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 42 p.
- Aparicio, J.L., F. Larocca y F. Dalla Tea. 2005. Silvicultura del establecimiento de *Eucalyptus grandis*. IDIA XXI, *Revista de Información sobre Investigación y Desarrollo Agropecuario*. 5(8):66-69.
- Arbolea, J.E. 2009. Solarización de canteros en almácigos de cebolla para el control de malezas y enfermedades en Uruguay. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 3(2):223-236.
- Arbolea, J., E. Campelo y J. Rodríguez. 2006. Solarización en Canteros para Almácigos de Cebolla. *Revista INIA8*: 21-24.
- Arbolea, J., E. Campelo y J. Rodríguez. 2018. Antecedentes nacionales sobre el uso de la solarización. *In*: Arbolea, J. (Ed.). Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura. Serie Técnica N° 245, INIA, Uruguay. p. 3-10.
- Arbolea, J. y M. Falero. 2018. Momento de solarización de canteros para el control de malezas en almácigos de cebolla. *In*: Arbolea, J. (Ed.) Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura. Serie Técnica N° 245. INIA, Uruguay. p. 11-20.
- Arbolea, J. y D. Maeso. 2018. Solarización para el control de enfermedades del suelo. *In*: Arbolea, J. (Ed.) Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura. Serie Técnica N° 245, INIA, Uruguay. p. 37-38.

-
- Arruda Silveira, R.L. y E. Malavolta. 2001. Nutrição e adubação potássica em *Eucalyptus*. Informações Agronômicas, POTAFOS. Encarte Técnico 91:1-10.
- Arruda Silveira, R.L. y J.L. Gava. 2004. Nutrição e Adubação Fosfatada em *Eucalyptus*, p. 495-536 In: Yamada, T. e S.R.S. Abdalla (Eds.). 2004. Fósforo na Agricultura Brasileira. 726 p.
- Ashley, R.A. 1990. Solarization as weed control alternative for Connecticut. Proc. Northeastern Weed Science Society. 23 p.
- Assis Cardoso, A. 2017. Fertilizantes organominerais granulados na produção de mudas de espécies florestais em dois tipos de tubetes. Tese apresentada ao Programa de Pósgraduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia, área de concentração: Solo e Água. Goiânia, GO – Brasil.
- Baptiste, M.P., J. Cárdenas y L.M. García. 2017. Fichas de especies exóticas de alto riesgo de invasión. Familia Myrtaceae: *Eucalyptus camaldulensis*. In: Cárdenas-López, D., M.P Baptiste y N. Castaño (Eds.). 2017. Plantas exóticas con alto potencial de invasión en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Columbia. p. 140-144.
- Basallote, M.J., J. Bejarano, M.A. Blanco, R.M. Jiménez-Díaz, y J.M. Melero. 1994. La solarización del suelo: una estrategia para controlar enfermedades causadas por organismos de suelo y reducir las alternativas de cultivo. Investigación Agraria: Fuera de Serie N°2, p. 208-219.
- Beale, I. y E. Clodovero Ortiz. 2013. El Sector Forestal Argentino: EUCALIPTOS. Revista de Divulgación Técnica Agrícola y Agroindustrial 53:1-10.
- Betancourt, V.M.F. 2014. Dosis y frecuencias de fertilización fosforada en el establecimiento de plantaciones de *Eucalyptus grandis* en un andisol colombiano. Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título profesional de Ingeniero Agroforestal. Universidad Nacional a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente, Programa de Ingeniería Agroforestal. Palmira, Valle del Cauca. 105 p.
- Boardman, R., R.N. Cromer, M.J. Lambert, and M.J. Webb. 1997. Forest plantations. In: Reuter, D.J. and J.B. Robinson (Eds.). 1997. Plant Analysis and Interpretation Manual. Collingwood: CSIRO. p. 505-566.

- Bonilla, I. 2013. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. Cap. 6, p. 103-121. In: Azcón-Bieto, J. y M. Talón M. (Eds.).2013. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2ª ed., Mc Graw-Hill Interamericana. 639 p.
- Brañas, J., F. González-Río, y A. Merino. 2000. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del noroeste de la Península Ibérica. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.* 9 (2):318-335.
- Cardoso, A.A. 2017. Fertilizantes organominerales granulados na produção de mudas de espécies florestais em dois tipos de tubetes. Tese apresentada ao Programa de Pósgraduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia, área de concentração: Solo e Água. 106 p.
- Cassanello, M.E. 2003. Solarización. Capítulo 5.12. In: Bases Conceptuales para el Manejo Ecológico de Plagas y Enfermedades. p. 244-250.
- Disponible en www.pv.fagro.edu.uy/fitopato/publica/Solarizacion.pdf
- Castillo Martínez, I. de la C. 2007. Efecto de diferentes sustratos y del endurecimiento por riego en la calidad de plantas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en contenedores en Pinar del Río, Cuba. Tesis doctoral de la Universidad de Alicante.184 p.
- Cebolla, V. 2009. Solarización. *Revista Horticultura Internacional* 28:12-23.
- Disponible en: <http://www.horticom.com/pd/article.php?sid=72668>.
- Chahin, M.G. 2012. Cultivo de forrajes ornamentales. Una alternativa para la floricultura del sur. Boletín Técnico 238. INIA. 142 p.
- Chen Y. y Katan J. 1980. Effect of solar heating of soil by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soils Science* 130(5):271-277.
- Coelho, L. y D.J Mitchell. 1999. Efficacy of solarization and cabbage amendment for the control of *Phytophthora spp.* in North Florida. *Plant Disease* 83(3):293-299.
- Cohen, O. y Rubin, B. 2007. Soil solarization and weed management. In: M.K. Upadhyaya and R.E. Blackshaw (Eds.).2007. Non-chemical weed management: Principles, concepts and technology. CAB International, London, UK. 239 p.
- CONABIO, 2016. Fichas Técnicas. Método de Evaluación Rápida de Invasividad (MERI) para especies exóticas en México, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Consultado en abril de 2020 en:

http://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/MenuPrincipal/FichastecnicasFichastecnicas/FichastecnicasCONABIO_especiesexoticas/Fichasplantasinvasoras/DE/Eucalyptuscamaldulensis.pdf

De Souza, N.L. 1994. Solarização do Solo. Revisão. *Summa Phytopathologica* 20(1):3-15.

Dell, B., N. Malajczuk, D. XU and T.S. Grove. 1995. Nutrient disorders in plantation *Eucalyptus*, Australian Centre for International Agricultural Research, Camberra, Australia. 194 p.

Disponible en: http://www.aciar.gov.au/.../node/.../mn074_nutrient_disorders_i

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-Industrial. 2017. Estadísticas del Sector Forestal 2016. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Agroindustria, Buenos Aires, Argentina.

Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada y C.W. Robledo. 2020. InfoStat, versión 2020. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Di Stefano, J. 2001. River red gum (*Eucalyptus camaldulensis*): A review of ecosystem processes, seedling regeneration and silvicultural practice. *Australian Forestry* 65(1):14-22.

Elmore, C.L. 1991. Effect of soil solarization on weeds. In: De Vay, J., J. Stapleton, and C.L. Elmore (Eds.). 1991. Soil Solarization. FAO Plant Production and Protection Paper N° 109. Consultado en <http://www.fao.org/docrep/t0455e/T0455E0c.htm#5>.

Elmore, C.L. 1995. Soil Solarization, a non-pesticidal method for controlling diseases, nematodes and weeds. Memoria Taller de Solarización del Suelo. FAO. p. 22-33.

Eloy, E., B.O. Caron, D. Schmidt, A. Behling, L. Schwers e E.F. Elli. 2013. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. *Revista Floresta* 43(3):373-384.

Espinoza Meza, S., R. Santelices Moya, A. Cabrera Ariza, C. Magni Díaz, F. Muñoz Sáez, J. Cancino Cancino, J. Contreras González y C. Bustamante Valdés. 2015. Cap. 2: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. P. 34-43. In: R. Santelices Moya, S. Espinoza Meza y A. Cabrera Ariza (Eds.). 2015. Especies del género *Eucalyptus* con potencial energético para ser establecidas en el secano Mediterráneo de la Región del Maule, Chile. Consultado en abril de 2020.

Disponible en: [t: https://www.researchgate.net/publication/283934553](https://www.researchgate.net/publication/283934553)

- FAO. 2006. Manual de Campo. Plagas y Enfermedades en Eucaliptos y Pinos en el Uruguay. 167 p.
- Fernández Martínez, M., R. Tapias Martín, P. Alesso Oviedo, F. Ruiz Fernández y G. López Scollo. 2008. Efecto de la fertilización N-P-K sobre la calidad de planta y la respuesta en campo de plantas de vivero de *Eucalyptus globulus* Labill. Actas de la IV Reunión sobre Repoblaciones Forestales. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 28: 219-224.
- Ferrando Urrutia, M.G. 2010. Fertilización de eucalipto con boro. Efecto sobre los contenidos foliares. Tesis presentada como requisito para obtener el título de Magister en Ciencias Agrarias, Opción Ciencias del Suelo. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay. 67 p.
- Ferreira da Silva, R., M.T. Eitelwein, M.R. Cherubin, C. Fabbris, S. Weirich e R. Rossi Pinheiro. 2014. Produção de mudas de *Eucalyptus grandis* em substratos orgânicos alternativos. *Ciência Florestal* 24(3):609-619.
- Garau, A.M., J.H. Lencoff y C.M. Ghera. 1989. Relaciones entre la tolerancia al estrés hídrico y a las malezas en *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* durante el período de implantación. Disponible en:
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005039/tema1/poster1/GarauAnaM.pdf>
- Garau. A.M., C.M. Ghera, J.H. Lencoff y J.J. Baraño. 2009. Weeds in *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Muell) establishment: Effects of competition on sapling growth and survivorship. *New Forest* 37:251-264.
- García, E., A. Sotomayor, S. Silva y G. Valdebenito. 2015. Establecimiento de Especies Forestales: *Eucalyptus*. 32 p. Disponible en:
<http://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2015/12/PREFO-Manual-del-Eucalipto.pdf>.
- García, M. de los A. y S. Ramos. 2015. Guía Fitosanitaria para Viveros Forestales. Prevención, identificación y control de enfermedades y plagas más comunes en viveros de eucaliptos. INTA Concordia. 22 p.
- García, M. de los A. 2017. Producción de eucaliptos en vivero. En: Cartilla del curso de principios técnicos para el cultivo de especies forestales de Entre Ríos. 18 p.

-
- Ghini, R., I.A. Swart Schoenmaker e W. Bettiol. 2002. Solarização do solo e incorporação de fontes de materia organica no controle de *Pythium spp.* *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37(9):1253-1261.
- Golzardi, F., Y. Vaziritabar, Y. Vaziritabar, K. Sadat Asilan, M.H. Jafari Sayadi, and S. Sarvaramini. 2015. Effect of Solarization and Polyethylene Thickness Cover Type on Weeds Seed Bank and Soil Properties. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* 5(6):88-95. Disponible en: www.textroad.com.
- Gomes, J.M., L. Couto, H. García Leite, A. Xavier e S.L. Ribeiro García. 2002. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore* 26(6):655-664.
- González Salvatierra, E.R. 2017. Uso del método de solarizado en producción de pino; Vivero Municipalidad de San José Pinula (2013-2015). Estudio de Caso. Trabajo presentado para acceder al Título de Ingeniero Agrónomo con Énfasis en Cultivos Tropicales en el Grado Académico de Licenciado en la Universidad Rafael Landívar, Zacapa, Guatemala. 33 p.
- Graciano, C. 2005. Productividad temprana de *Eucalyptus* con diferentes disponibilidades de nutrientes y agua. Tesis presentada para optar por el título de Doctor en Ciencias Naturales. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. 165 p.
- Grünzweig J.M, J. Katan, Y. Ben-Tal, H.D. Rabinowitch. 1999. The role of mineral nutrients in the increased growth response of tomato plants in solarized soil. *Plant and Soil* 206:21-27.
- Guerra Barroso, D., J.G. De Araujo Carneiro y P.S. Dos Santos Leilo. 2000. Qualidade de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. urophylla* produzidas em tubetes em blocos prensados, com diferentes substratos. *Revista Floresta e Ambiente* 7(1):238-250.
- Herrera, F. y C. Ramírez. 1996. Períodos de solarización y adición de gallinaza sobre la sobrevivencia de propágulos de *Cyperus rotundus*, *Rottboellia cochinchinensis* y *Bidens pilosa*. *Agronomía Mesoamericana* 7(1):1-8.
- Hildebrand, D.M. 1985. Soil Solar Heating for Control of Damping-off Fungi and Weeds at the Colorado State Forest Service Nursery. *Tree Planters Notes* 26(1):28-34.
- Hobbs, T, J., M. Bennell, J. Bartle. 2009. Developing species for woody biomass crops in lower rainfall Southern Australia. Flora Search. Report to the Joint Venture

- Agroforestry Program (JVAP) and Future Farm Industries CRC. 242 p. (Publication No. 09/043).
- INFOR-INDAP-FIA (Instituto Forestal, Instituto de Desarrollo Agropecuario, Fundación para la Innovación Agraria, Chile). 2000. *Eucalyptus camaldulensis* en Chile: Silvicultura, manejo, productividad y rentabilidad. 62 p.
- INTA. 1995. Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. EEA Concordia. 162 p.
- Kratz, D. 2011. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage e *Mimosa scabrella* Benth. Dissertação apresentada ao Curso de PósGraduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal. 120 p.
- Kratz, D. 2015. Substratos para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii*: formulação e estimativa de propriedades físico-químicas por meio da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Tese apresentada ao Curso de PósGraduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial a obtenção do título de Doutora em Engenharia Florestal. 111 p.
- Krügner, T.L. e P.C.L. Carvalho. 1971. Ensaio em condições de casa de vegetação para controle químico do "damping-off" em *Eucalyptus saligna* SM. *Revista IPEF* 2/3:97-113. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, Brasil.
- Kumar, B. y N.T. Yaduraju. 1992. Effects of Solarization on the temperature and physico-chemical properties of soils. *Plasticulture* 94:13-20.
- Kumar, A., C.S. Azad, R. Kumar, R. Kumar, and M. Imran. 2017. Soil Solarization: An eco-friendly and effective disease management approach for soil borne diseases. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* SP1:513-515.
- Kumar, P., N. Sharma, S. Sharma, and R. Gupta. 2020. Rhizosphere stoichiometry, fruit yield, quality attributes and growth response to PGPR transplant amendments in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) growing on solarized soils. *Scientia Horticulturae* 265 (2020) 109215:1-19.
- Labrada, R. 1995. Aspectos Técnicos de la Solarización. El Desarrollo Actual de la Solarización. Memoria, Taller de Solarización del Suelo. FAO, Honduras. p.17-20.

-
- Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. Mc Donald, J.P. Barnett, R. Nisley y D. Rodríguez Trejo. 2000. Fertilización y riego. Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor, Vol. 4. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. En: https://rngr.net/publications/ctnm/espanol/volumen-cuatro/PDF.2003-1002.1213/at_download/file.
- Leite, F.P. 2003. Manejo nutricional para produção de mudas. Belo Oriente: CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira S.A.). 124 p.
- Linke, K.H., M.C. Saxena, J.D. Sauerborn, and H. Masri. 1991. Effect of soil solarization on the yield of food legumes and on pest control. *In: DeVay, J, J. Stapleton, and C. Elmore (Eds.).1991. Soil Solarization, FAO Plant Production and Protection Paper 109. p. 139-147.*
- López-Elías, J., J.C. Guerrero-Ruiz, M.A. Huez-López, J. Jiménez-León y J.J. Ruiz-Mendoza. 2014. Biofumigación y solarización del suelo en la producción de sandía (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. y Nakai). *European Scientific Journal* 10(3):121-131.
- López-Herrera, C.J. y B. Verdú-Valiente. 1994. Eradication of primary inoculum of *Botrytis cinerea* by soil solarization. *Plant Disease* 78:594-597.
- Luna, C. V. y M.L. Fontana. 2020. Calidad de planta y comportamiento morfológico de *Cedrela fissilis* Vell. en respuesta a distintos sistemas de producción y sustratos en vivero. Nota Técnica, *Quebracho* 28(1,2):145-158.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, e S.A. Oliveira.1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFO), Piracicaba, Brasil. 201 p.
- Marcó, M.A. y L. Harrand. 2005. Valor potencial de los eucaliptos colorados en combinaciones híbridas. *In: Primera jornada sobre potencialidad foresto-industrial del eucalipto en Santiago del Estero.*
- Marengo, R.A. and D. Castro Lustosa. 2000. Soil solarization for weed control in carrot. *Pesq. Agropec. Bras.* 35(10):2025-2032.
- Mauro, R., A. Lo Monaco, R. Lombardo, A. Restuccia and G. Mauromicale. 2015. Eradication of *Orobanche/Phelipanche* spp. seedbank by soil solarization and organic supplementation. *Scientia Horticulturae* 193:62–68. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/280036366>.

-
- Meena, R.D, G. Lal, P. Mehta, Y.K. Sharma, S.S. Meena, R.S. Meena, N.K. Meena, B.K. Mishra, R.L. Meena, N.L. Meena, and G.K. Tripathi. 2018. Efficacy of soil solarization on growth and yield of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under arid conditions. *International J. Seed Spices* 8(1):74-79.
- Moccia, S., J. Núñez, M. Moya y D. Frezza. 2000. Efecto de la longitud del período de solarización sobre el rendimiento y la calidad del cultivo de rúcula (*Eruca sativa* L.), en invernáculo. XXIII Congreso Argentino de Horticultura. Mendoza, Argentina.
- Monsalve, J., R. Escobar, M. Acevedo, M. Sánchez y R. Coopman. 2009. Efecto de la concentración de nitrógeno sobre atributos morfológicos, potencial de crecimiento radical y estatus nutricional en plantas de *Eucalyptus globulus* producidas a raíz cubierta. *BOSQUE* 30(2):88-94.
- Montealegre, J.R., P. Fuentes y J.L. Henríquez. 1996. Efecto de la solarización y fumigación en el control de *Pyrenochaeta lycopersici* y su relación con el rendimiento y calidad de un cultivo de tomates. *Fitopatología* 31 (3):217-229.
- Morales Romero, W.E. 2009. Crecimiento y desarrollo durante la etapa vegetativa inicial de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don. ex Steud (dinde) con la aplicación de bioinoculantes en suelo solarizado de la zona cafetera. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Biólogo. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ciencias, carrera de Biología, Bogotá, D.C. 100 p.
- Moya, M. y G. Furukawa. 2000. Use of Solar Energy (Solarization) for Weed Control in Greenhouse Soil for Ornamental Crops. *New Zealand Plant Protection* 53:34-37.
- Munguambe, J.F. 2012. Qualidades morfológicas de mudas clonais de eucalipto na fase de expedição em viveiros comerciais. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de PósGraduação em Engenharia Florestal para obtenção do título de Mestre. 73 p.
- Navarro, J.R., D. Mora, J. Díaz, H. Vilches y E. Corrales. 1991. Efecto de la solarización del suelo sobre la población de malezas y del hongo *Rhizoctonia solani* durante la estación lluviosa en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 15(1/2):93-98.
- Oliva, M.A., N.F. de Barros, y M.M. de Mouza Gomes. 1995. Muerte apical en eucalipto y manejo nutritivo de plantaciones forestales: aspectos fisiológicos del problema. *BOSQUE* 16(1):77-86.

-
- Parra, M. V. 2014. Obtención de plantines de algarrobo (*Prosopis alba* Griseb.) en sustratos orgánicos solarizados en Santiago del Estero. Una alternativa para pequeños productores. Tesis para optar al título de Magister en Desarrollo de Zonas Áridas y Semiáridas. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. 84 p.
- Pozo Peñaloza, E.R. 2005. Efecto de la fertilización sobre plantaciones de *Eucalyptus globulus* (Labill.) y *Eucalyptus nitens* (Maiden) de siete años de edad en la comuna de Máfil, provincia de Valdivia. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile, Santiago. 103 p.
- Ramírez Villapudua, J. y R. Sáinz Rodríguez. 1991. La solarización como herramienta para el control de malezas, patógenos y plagas del suelo. Disponible en: http://www.monografias.com/trabajos43/solarizacionmalezas/solarizacion_malezas2.shtml#ixzz2l95qf3wZ.
- Ramos Vieira, C. e O.L. dos Santos Weber. 2016. Produção de mudas de eucalipto em diferentes composições de substratos. *Revista de Estudos Ambientais* 18(2):25-34.
- Ramos Vieira, C. y O.L. dos Santos Weber. 2017. Fertilização mineral e calagem no crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. *Ecologia e Nutrição Florestal* 5(2):45-52. Consultado en abril 2020.
- Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320788505>.
- Ripanti, S., L. Calderón, Y. Arrieta, G. Ramírez, J. León, Y. Ovalles, R. Perrin, y J. Petit. 2009. Efectividad de la solarización en el control del *damping off* en el vivero Santa María de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. *Agricultura Andina* 16:3-27.
- Rocha, S.A., G.O. García, M.S. Lougon, R.A. Cecílio e M.V. Caldeira. 2014. Crecimiento e nutrição foliar de mudas de *Eucalyptus sp.* irrigadas com diferentes qualidades de água. *Revista de Ciências Agrárias* 37(2):141-151.
- Rodríguez Lagreca, J. 2012. Efecto de la solarización del suelo sobre la emergencia de malezas. *Agrociencia Uruguay* 16(1):79-85.
- Ruiz, F. y G. López. 2010. History of *Eucalyptus*: Present Situation and Utilization. Cap. 1, p. 13-27. In: Gil, L, W. Tadesse, E. Tolosana, and R. López (Eds.). 2010. *Eucalyptus* Species Management, History, Status, and Trends in Ethiopia. Proceedings of the Congress held in Addis Ababa, Ethiopia.

- Ruiz Díaz M., R.O. Campo Arana, y J. de J. Royet Barroso. 2022. Efecto de la solarización en patógenos fungosos que afectan al eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) en condiciones de vivero. *Temas Agrarios* 27(1):211-219.
- Salerno, M., J.E. Giménez y P.A. Imbellcne. 1993. Sustratos alternativos para la producción de plantas de eucaliptos en vivero. Provincia de Buenos Aires, Argentina. Congreso Forestal Español, Lourizán. Ponencias y comunicaciones, Tomo II, p. 301-305.
- Salerno, M.I, G.A. Lori, D.O. Giménez, J.E. Giménez and J. Beltrano. 2000. Use of soil solarization to improve growth of *Eucalyptus* forest nursery seedlings in Argentina. *New Forests* 20:235-248.
- Sánchez Hernández, M.E. y A. Trapero Casas. 2001. Etiología y control de enfermedades de plántulas en viveros forestales andaluces.
- En:http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/80-373_I_CURSO_DE_GESTION_DE_VIVEROS_FORESTALES/80-373/5_ETIOLOGIA_Y_CONTROL_DE_ENFERMEDADES_DE_PLANTULAS.
- Seman-Varner, R., R. McSorley, R.N. Gallaher. 2007. Soil nutrient and plant responses to solarization in an agroecosystem utilizing an organic nutrient source. *Renewable Agriculture and Food Systems* 23(2):149-154.
- Silva, A.C.M. y M.V.M. Bassaco. 2018. Crescimento inicial do *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* sob diferentes doses de fertilizantes e períodos de aplicação no município de Arapoti, Pr. *Revista da União Latino-americana de Tecnologia, Jaguaríaiva* 6(1):77-96.
- Silva, F.A. de M., G.M. Nunes, J.A. Zanon, I.A. Guerrini, e R. Barboza da Silva. 2018. Resíduo agroindustrial e lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de *Eucalyptus urograndis*. *Ciência Florestal* 28(2):827-828.
- Silva dos Santos, S.M., D.V. Porto da Cunha, R. de Andrade Silva, E. Carvalho Teixeira e F. Damasceno Carvalho. 2017. Avaliação morfofisiológica em mudas de clones de eucalipto em viveiros comerciais na etapa de expedição. *Revista Cultivando o Saber* 10(2):238-250.
- Stapleton, J.J. 2000. Soil solarization in various agricultural production systems. *Crop Protection* 19:837-841.

- Tello, A. 1998. Biofumigation and solarization and organic amendment, Regional workshop on methyl bromide alternative for North Africa and Southern European countries. *United Nations Environment Program (UNEP)* 28(9):397-399.
- Toro-Vergara, J. e I. Quiroz-Marchant. 2007. Fertilización de *Eucalyptus globulus* producidos en contenedores. Proyecto INNOVA CHILE: Desarrollo de estándares de origen de la semilla y calidad de la planta para el aumento de la productividad en plantaciones y bosques naturales. 95 p.
- Villalba, J. C. Montouto, J. Cazaban, P. Caraballo y O. Bentancourt. 2010. Efecto del laboreo sobre la eficacia de herbicidas y el crecimiento de *Eucalyptus spp.* *Agrociencia Uruguay* 14(2):45-54.

5. EFECTO DE LA SOLARIZACIÓN SOBRE ALGUNAS VARIABLES FISIOLÓGICAS DE *Eucalyptus camaldulensis*

5.1. Introducción

La fotosíntesis es un proceso metabólico clave que determina la producción de biomasa en las plantas. Consta de dos etapas: fotoquímica y bioquímica. La primera tiene lugar en los discos tilacoides de los cloroplastos, y consiste en la transformación de la energía luminosa en energía química, bajo la forma de ATP y NADPH. La segunda etapa se produce en el estroma de los cloroplastos, y utiliza los productos de la etapa fotoquímica para fijar CO₂, originando como primer producto estable el ácido 3-fosfoglicérico, precursor de los hidratos de carbono (Azcón-Bieto y Talón, 2013).

En las últimas décadas se han desarrollado instrumentos que permiten estudiar el impacto de distintos factores ambientales sobre la fotosíntesis. De este modo los fluorímetros portátiles suministran algunas variables que indican el funcionamiento de los diferentes pasos que tienen lugar durante la etapa fotoquímica. Por otra parte, los analizadores de gases infrarrojo (IRGA) miden variables ecofisiológicas asociadas a la etapa bioquímica, tales como conductancia, fotosíntesis neta, conductancia estomática, transpiración, concentración intercelular de CO₂, etc. (Meloni *et al.*, 2018).

El análisis de la fluorescencia de la clorofila A constituye un método sensible y no destructivo para la detección y cuantificación de los cambios inducidos en la etapa fotoquímica de la fotosíntesis. Ha sido utilizado para evaluar el grado de daño del aparato

fotosintético, bajo diferentes condiciones de estreses ambientales, tales como temperaturas extremas, déficit hídrico, herbicidas, etc. (Faria-Silva, *et al.*, 2017; Meloni y Martínez, 2021). Numerosos estudios han sugerido que las características fotosintéticas son las más adecuadas para ser utilizadas como marcadores indirectos en programas de mejoramiento genético, ya que responden rápidamente a los estreses ambientales (Duarte *et al.*, 2013).

Las plantaciones del género *Eucalyptus* se han expandido mundialmente, logrando cubrir una superficie aproximada de 20 millones de hectáreas (Silva *et al.*, 2017). El eucalipto cuenta con un buen potencial para la producción de madera y es de gran importancia en el manejo de cuencas hidrográficas (Chica Ramírez *et al.*, 2014). Según estos últimos autores, el estudio de la fotosíntesis y sus relaciones con factores fisiológicos y físicos en especies forestales como el eucalipto, resulta de gran importancia para estimar la producción de biomasa en aprovechamiento económico.

Dentro de las especies de este género, *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. posee un gran sistema radical, estableciéndose con éxito en suelos que se secan rápidamente y demostrando buena adaptación a condiciones de déficit hídrico (Milla Moreno, 2010; Romero Lecourt, 2010). Sobrevive aún con precipitaciones anuales cercanas a 250 mm, alcanzando su mejor desarrollo entre 700 y 1250 mm. Además, es resistente a suelos pobres o degradados, con fertilidad media a baja, y tolera los suelos salinos (Romero Lecourt, 2010).

El desarrollo de plantaciones de *Eucalyptus camaldulensis* (“eucalipto colorado”) tiene un gran potencial en el noroeste argentino, ya que la especie puede producir madera con características físicas y mecánicas adecuadas para su uso industrial. Además, posee gran plasticidad y tolerancia al estrés hídrico (Moglia *et al.*, 2008).

En esta etapa de la investigación, el objetivo fue determinar el efecto de la solarización del sustrato sobre algunas propiedades fisiológicas de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., para lo cual se evaluaron los siguientes parámetros fisiológicos:

- Fotosíntesis neta.
- Conductancia estomática.
- Concentración interna de CO₂.
- Transpiración.

- Índice de desempeño total.
- Concentración de pigmentos.
- Concentración de azúcares.
- Contenido relativo de agua.

5.2. Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo durante la primavera de 2018. El sustrato utilizado para la producción de plantines fue el Sustrato 1, elaborado con 1 parte de mantillo y 1 parte de suelo (V/V), solarizado durante 28 días (S), y sin solarizar (testigo, T). Las características del sustrato solarizado y del testigo se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Propiedades de los sustratos solarizado y testigo elaborados con mantillo y suelo en una proporción 1:1 V/V.

Propiedades	Testigo	Solarizado
Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0,61	0,63
Porosidad (%)	54,4	52,2
pH	6,2	6,1
Conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	1,52	1,86
Materia orgánica (%)	12,81	10,98
Carbono orgánico total (%)	7,45	6,39
Nitrógeno orgánico total (%)	0,30	0,32
Relación Carbono:Nitrógeno	24,83	19,75
Nitratos ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	59,4	74,5
Fósforo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	78,5	83,9
Potasio ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)	3,0	3,1
Calcio ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)	12,3	13,5
Magnesio ($\text{cmol}_c\cdot\text{kg}^{-1}$)	6,5	5,4

Los plantines se obtuvieron a partir de semillas de *Eucalyptus camaldulensis*, procedencia Gibb River, Kimberley, Australia, cosechadas del ensayo genético del Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. Se colocaron varias semillas en recipientes de 100 cm^3 , ordenados en bandejas, y se las cubrió con una capa de 0,5 cm de arena. Hasta la emergencia, el riego fue por capilaridad, manteniendo una lámina de agua de 1 cm. Una vez que las plántulas desarrollaron la primera hoja verdadera, fueron trasplantadas a macetas de 200 cm^3 . Setenta y cinco días después de la siembra, fueron descalzadas para efectuar las determinaciones.

La temperatura media durante el período ensayado fue de 23°C , con una temperatura máxima media de $29,5^\circ\text{C}$ y una mínima media de 18°C . La precipitación

acumulada fue de 175 mm y la evapotranspiración potencial acumulada fue de 356 mm; la velocidad del viento fue de 4,5 km·h⁻¹ y la humedad relativa promedio, de 60%.

Las mediciones de intercambio gaseoso y asimilación neta de CO₂ se realizaron en las mismas hojas en las que se midieron las variables de fluorescencia. Para ello se utilizó un analizador de gases infrarrojo en un sistema abierto (IRGA-LCpro+ System ADC, BioScientific Ltd.), con cámara para hojas de *Arabidopsis*, en condiciones de luz artificial saturante (1000 μmol·m⁻²·s⁻¹) y concentración de CO₂ ambiental. Se midieron las siguientes variables: fotosíntesis neta (A), transpiración (E), conductancia estomática (g_s) y concentración intercelular de CO₂ (C_i).

La emisión de fluorescencia transiente de la clorofila A se midió con un fluorímetro Handy PEA (Plant Efficiency Analyzer, Hansatech Instruments Ltd., King's Lynn Norfolk, UK). Las mediciones se realizaron en hojas completamente desarrolladas, luego de su aclimatación en la oscuridad, durante 30 minutos. La emisión de fluorescencia en hojas fue inducida por luz roja (650 nm), con una intensidad de 3000 μmol fotones·m⁻²·s⁻¹ proveniente de una matriz conteniendo 3 diodos enfocados sobre un punto de 4 mm de diámetro, y registrada durante 1 segundo. Las variables biofísicas que caracterizan al flujo de energía en la etapa fotoquímica de la fotosíntesis se analizaron de acuerdo con el test JIP propuesto por Strasser *et al.* (2005), utilizando el programa Biolyser® 4HP v.3., y se obtuvo el *Índice de desempeño total*. Dicho índice refleja el potencial para la conservación de la energía desde el excitón, hasta los aceptores de electrones del fotosistema I.

Los pigmentos fotosintéticos se extrajeron con dimetilsulfóxido (DSMO) a 60 °C durante 4 horas. Se midieron absorbancias a 480, 645 y 663 nm, cuantificándose las concentraciones de clorofila A, clorofila B y carotenoides, mediante las ecuaciones propuestas por Lichtenthaler y Welburn (1983).

Para extraer los azúcares solubles totales, se tomaron diez plantines, de los cuales se escogió una hoja de cada uno para medir el contenido relativo de agua (CRA); los plantines fueron luego descalzados, se separaron las raíces de las hojas (totalmente desarrolladas), y se hirvieron en etanol 80% durante tres minutos para inactivar enzimas. Posteriormente, el material se homogeneizó y los azúcares solubles se extrajeron en baño de agua a 80°C durante 15 minutos. El extracto se centrifugó por 15 minutos a 4500 g y se recolectó el líquido sobrenadante; el procedimiento se repitió dos veces más. Se mezclaron y concentraron los tres sobrenadantes en un evaporador rotativo a 35 rpm y 40°C. Se determinaron las concentraciones de azúcares solubles totales, sacarosa, fructosa y

glucosa, mediante espectrofotometría, siguiendo la metodología descrita por Portela *et al.* (2018).

El contenido relativo de agua (CRA) se determinó utilizando la metodología descrita por Silva *et al.* (2010), a través de la siguiente ecuación:

$$CRA = \frac{PF - PS}{Psat - PS} * 100$$

donde:

PF: peso fresco

PS: peso del material secado a estufa a 65°C

Psat: peso del material saturado de agua destilada.

5.2.1. Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado; se realizaron las mediciones en 10 plantines, y cada uno de ellos fue una unidad experimental. Los resultados de las variables evaluadas en los sustratos se sometieron a un Análisis de la Varianza y a un Test de LSD Fisher para comparación de medias ($p < 0,05$), mediante el uso del software estadístico InfoStat, versión 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

5.3. Resultados y discusión

5.3.1. Fotosíntesis e intercambio de gases

La fotosíntesis neta (A) fue mayor en los plantines producidos en el sustrato solarizado, habiendo diferencias significativas en todos los horarios en que se realizaron las mediciones (Fig.5.1) Las diferencias detectadas variaron según el horario, siendo del 17% a las 7 h, 50% a las 10 h, 87% a las 13 h, 26% a las 16 h y 51% a las 19h.

La fotosíntesis neta en los plantines producidos tanto en el sustrato testigo como en el solarizado presentó dos picos máximos, uno a las 10 h y otro a las 16 h (Fig. 5.1). Esto es coincidente con el resultado obtenido por Chica *et al.* (2014) en *Eucalyptus pellita*, quienes afirman que este comportamiento bimodal es típico en zonas donde los valores de

temperatura, radiación solar y déficit de presión de vapor del aire aumentan al medio día a niveles en los cuales muchas plantas cesan su actividad por cierre estomático.

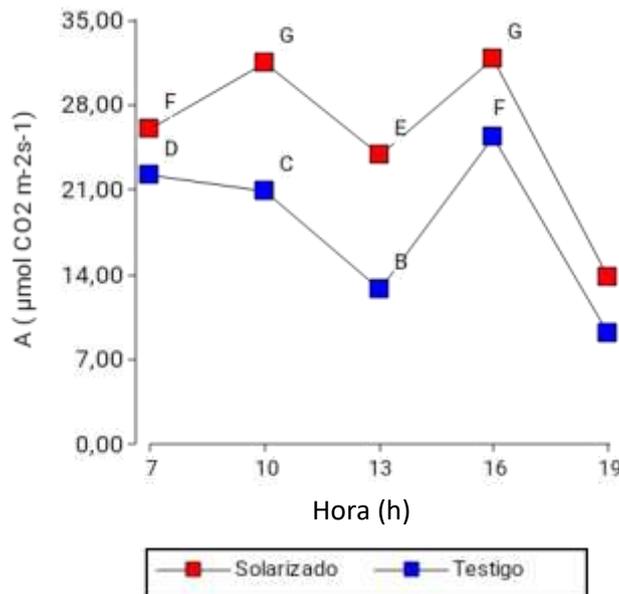


Figura 5.1. Fotosíntesis neta de plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Whitehead y Beadle (2004), citados por Chica *et al.* (2014), informaron que los valores máximos medios de asimilación se encuentran entre 15 y 25 $\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, en once especies de eucaliptos. Estos coinciden con los encontrados en los plantines producidos en el sustrato testigo, pero resultan inferiores a los plantines producidos en el sustrato solarizado.

En los dos tratamientos, durante el día, la transpiración (E) y la conductancia estomática (g_s) siguieron el mismo patrón de comportamiento que el de la asimilación, como se puede apreciar en la Fig. 5.2 y en la Fig. 5.3, respectivamente.

La transpiración en los plantines producidos en el sustrato solarizado fue mayor en un 19% a las 7 h, 100% a las 10 h, 148% a las 13 h, 24% a las 16 h y 125% a las 19 h, en comparación con los plantines testigo, mientras que las diferencias en la conductancia estomática fueron de un 5% a las 7 h, 32% a las 10 h, 84% a las 13 h, 28% a las 16 h y 59% a las 19 h.

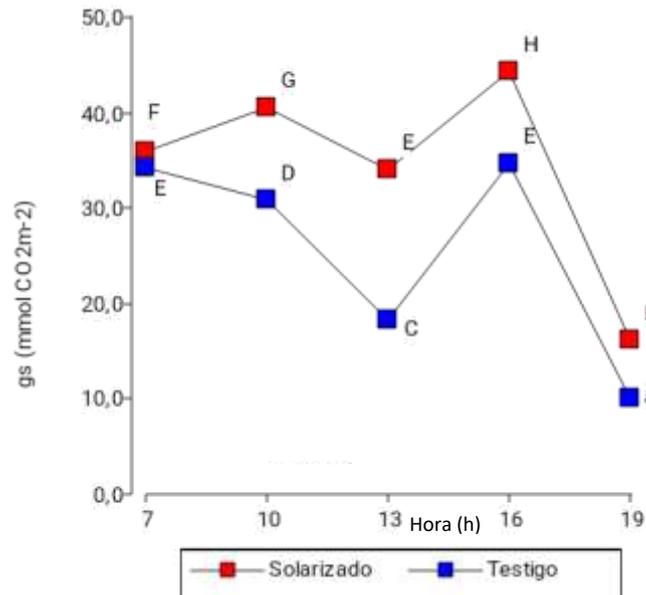


Figura 5.2. Conductancia estomática de plántulas de *E. camaldulensis* de 75 días producidas en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

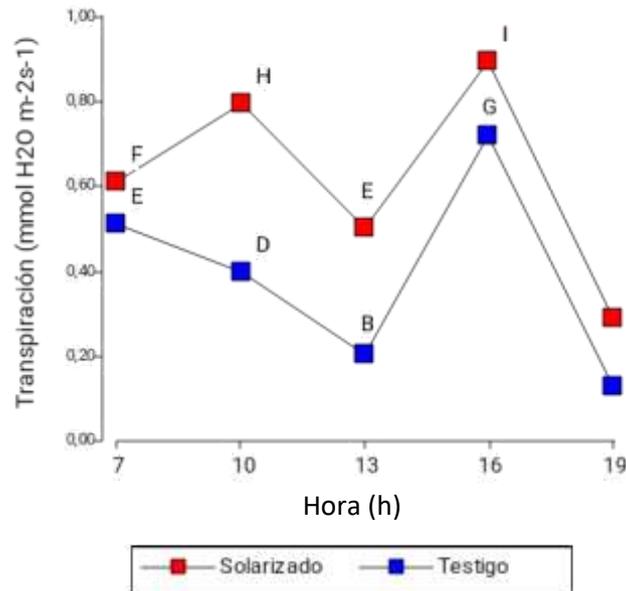


Figura 5.3. Transpiración de plántulas de *E. camaldulensis* producidas en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Según Chica *et al.* (2014), esto se explica porque el proceso de transpiración también es conducido y regulado por los estomas. Dentro de la hoja, el agua que se encuentra rodeando las células del mesófilo se evapora y difunde hacia los espacios

intercelulares que existen en el parénquima. Si los estomas están abiertos, la diferencia de presión de vapor provoca la pérdida de vapor de agua hacia la atmósfera.

Las moléculas de CO₂ siguen esta misma ruta, pero con una dirección contraria, marcando la condición de simultaneidad de los procesos de fotosíntesis y transpiración. Resultados similares obtuvieron Silva *et al.* (2017) en 35 genotipos de *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. badjensis*, *E. smithii* y en híbridos de *E. globulus* x *E. nitens* y *E. camaldulensis* x *E. globulus*, afirmando que existe una correlación positiva entre la conductancia estomática y la transpiración y también entre la fotosíntesis y la conductancia estomática.

La disminución de la conductancia estomática ha sido reportada como una de las principales limitantes de la fotosíntesis, lo que, consecuentemente, disminuiría las tasas de crecimiento, y podría generar que, en la primera etapa del establecimiento de plantaciones, aumente la competencia con malezas por luz, agua y nutrientes, incrementando el estrés hídrico y disminuyendo la disponibilidad de otros recursos (Silva *et al.*, 2017).

Medrano *et al.* (2007) afirmaron que el cierre estomático provoca dificultades de difusión del CO₂ hacia los cloroplastos y, con ello, drásticas reducciones de la fotosíntesis. Esto coincide con los resultados obtenidos en los plantines de eucaliptos producidos en el sustrato testigo, en los que la disminución en la fotosíntesis presenta la misma tendencia que el intercambio de gases.

Según Silva *et al.* (2017), los parámetros de intercambio gaseoso (fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración) se han identificado como herramientas potenciales para seleccionar genotipos con mejor comportamiento frente al estrés hídrico, aunque existe discusión acerca de cuáles son los más apropiados, dado que el crecimiento y el uso del agua dependen también de la especie, la edad y las interacciones con el medio ambiente.

La concentración interna del CO₂ no siguió la misma tendencia en los plantines testigos en comparación con los solarizados (Fig. 5.4). En los primeros, el CO₂ aumentó desde las 7 hasta las 16 h, aunque esos incrementos no fueron significativos. Este incremento pudo haber ocurrido en parte por la disminución de la fotosíntesis entre las 7 y las 13 h.

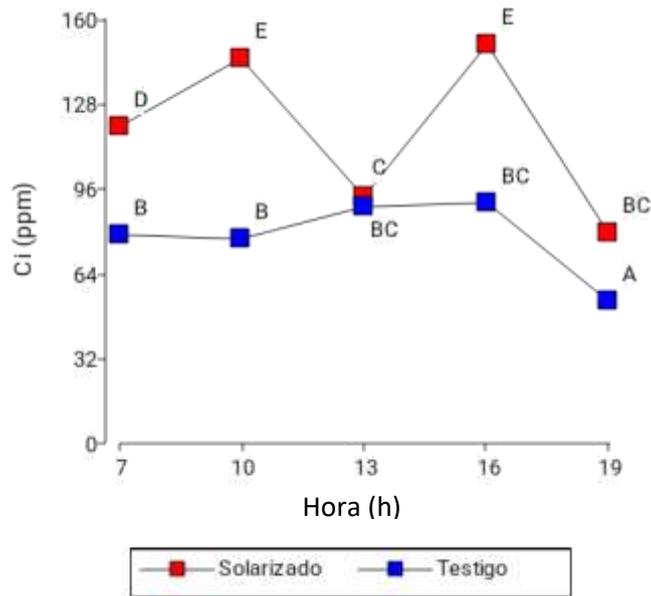


Figura 5.4. Variación en la concentración interna de CO₂ en distintos momentos del día en plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Por otro lado, a pesar de haber una mayor concentración de CO₂ a las 13 h que a las 10 h, la fotosíntesis disminuyó un 64%. Según Tofiño *et al.* (2007), la fotosíntesis es particularmente sensible al estrés por temperatura. El calor moderado puede ocasionar daños en el fotosistema II, en la degradación de los tilacoides, en la desactivación de Rubisco, y en la reducción de la tasa fotosintética, pues se estimula la producción de formas reactivas de oxígeno debido al incremento de la actividad oxigenasa de Rubisco.

La disponibilidad de nutrientes, especialmente N y P, puede afectar mucho la capacidad fotosintética de las plantas. El N forma parte de las enzimas y de la clorofila. Normalmente existe una fuerte correlación entre el contenido de N de las hojas y los contenidos de clorofila y, sobre todo, de Rubisco. En cuanto al P, éste forma parte de la molécula de ATP, que se produce en la fotosíntesis mediante el acoplamiento de la ATP sintasa con el transporte electrónico en la membrana tilacoidal. También forma parte de todos los productos intermediarios del ciclo de Calvin. Una deficiencia de P provoca una reducción de la fotosíntesis (Azcón-Bieto y Talón, 2013). Los resultados obtenidos ratifican lo expuesto por estos autores, pues las concentraciones de N y de P en las hojas de plantines producidos en el sustrato solarizado fueron mayores que las de los plantines testigos en 67% y 47 %, respectivamente.

En los plántulas producidas en el sustrato solarizado, la concentración interna de CO₂ siguió la misma tendencia que la tasa fotosintética, el cierre estomático y la transpiración, por lo cual, la disminución en la fotosíntesis pudo deberse a la disminución en la difusión del CO₂ como consecuencia del cierre estomático.

Coincidiendo con estos resultados, en los plántulas crecidas en el sustrato solarizado, el índice de desempeño total (Fig. 5.5) se mantuvo constante entre las 10 y las 13 h, mientras que en el no solarizado se registró una disminución significativa del 59 %. Este comportamiento indica que la disminución observada en la tasa fotosintética en dicho período no se debió a una limitación estomática, sino más bien a una limitación en la etapa fotoquímica de la fotosíntesis.

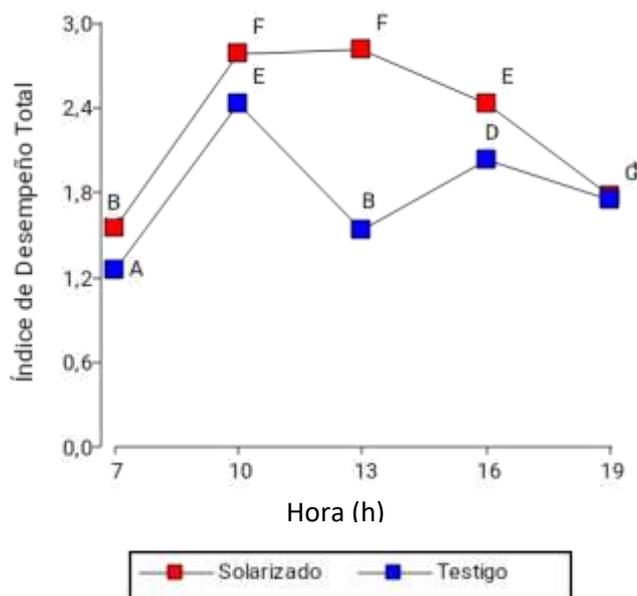


Figura 5.5. Variación en el índice de desempeño total en distintos momentos del día en plántulas de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidas en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La eficiencia del proceso fotosintético depende de factores ambientales como humedad, temperatura e intensidad lumínica. La planta ajusta su eficiencia fotosintética de acuerdo con la máxima intensidad de luz, la temperatura, el estado de desarrollo, factores genéticos y la apertura y el cierre de los estomas, todos dependientes de la dinámica del continuo suelo-planta-atmósfera. La tasa fotosintética se ve afectada en condiciones de estrés. La magnitud del efecto depende de la disponibilidad de agua y del estado nutricional de la planta, entre otras variables (Tofiño *et al.*, 2007).

5.3.2. Concentración de pigmentos fotosintéticos

La cantidad y el tipo de pigmentos presentes en las plantas se encuentran influenciados por factores ambientales tales como disponibilidad de luz, agua y nutrientes. El contenido de pigmentos fue mayor en los plantines producidos en el sustrato solarizado, aunque este incremento no fue estadísticamente significativo (Fig. 5.6).

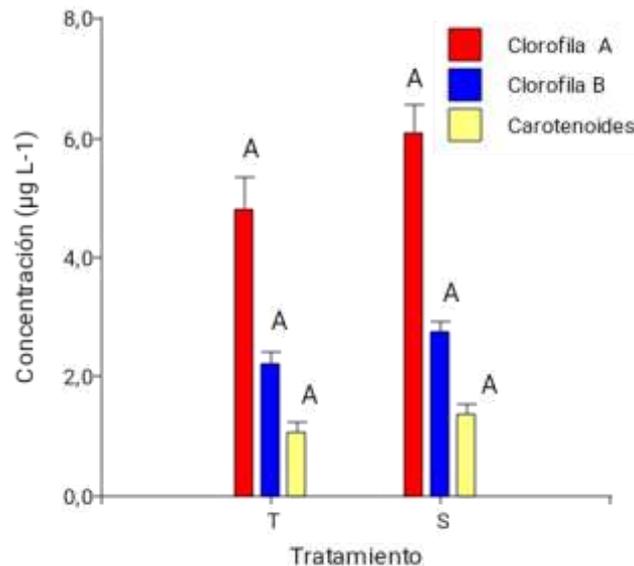


Figura 5.6. Concentración de clorofila A, clorofila B y carotenoides en plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Estudios realizados por Gómez-Romero *et al.* (2012) en plantines de varias especies de pinos demostraron que la mayor concentración de clorofila A y clorofila B está relacionada con un incremento en los contenidos de N y P, y obtuvieron mayor eficiencia fotosintética con el aumento de estos pigmentos. Debido a la estrecha relación que existe entre el contenido de clorofila y el de N en las hojas, se considera a dicha concentración como un buen parámetro para estimar el estado nutricional de la planta (Cambrón-Sandoval *et al.*, 2011).

Latsague *et al.* (2014) reportaron un incremento en el contenido de clorofila A, clorofila B y carotenoides en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook. f. fertilizadas con N, P y K, lo que contribuyó a un incremento en la tasa fotosintética de esta especie. También afirmaron que numerosos autores, ensayando con diversas especies, han reportado un aumento en el contenido de clorofila con la incorporación de N. La capacidad fotosintética

de las hojas se relaciona con el contenido de N principalmente porque las proteínas del ciclo de Calvin y de los tilacoides representan la mayor parte del N foliar.

5.3.3. Concentración de azúcares

El estado de las reservas de carbohidratos de la planta es un parámetro fisiológico que permite inferir acerca de su salud y su vigor, y que también puede tener implicaciones en el comportamiento en el campo (Grignola, 2014).

En estos ensayos, se midió la cantidad de sacarosa (Fig. 5.7), glucosa (Fig.5.8) y fructosa (Fig. 5.9) en hojas y raíces. Varios autores (Tofiño *et al.*, 2007; Aliaga y Nieto, 2009; Montenegro-Ruiz y Melgarejo-Muñoz, 2012, entre otros) coinciden en que la sacarosa es el azúcar libre que más se acumula en los tejidos, además de pequeñas concentraciones de glucosa y fructosa, tales como los obtenidos en esta investigación. En la partición de los azúcares solubles, la concentración de sacarosa en las hojas y raíces de los plantines solarizados fue mayor que en los plantines producidos en el sustrato testigo (Fig. 5.7).

En las hojas, el incremento de sacarosa fue de 32%, mientras que en las raíces fue de 46%. La concentración de sacarosa desempeña un papel central en la distribución del CO₂ asimilado a través de la regulación de la expresión de genes asociados con la síntesis de almidón. La sacarosa también inhibe la síntesis de α -amilasa (Tofiño *et al.*, 2007).

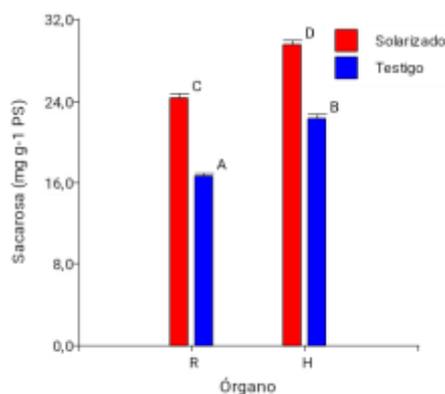


Figura 5.7. Concentración de sacarosa en raíces (R) y hojas (H) de plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Investigaciones realizadas por Duarte *et al.* (2016) en yerba mate demostraron que, en condiciones de sequía, tanto la concentración como el transporte de sacarosa hacia las raíces aumentaron, participando así en el ajuste osmótico y en el crecimiento radical.

La concentración de fructosa en las hojas de los plantines solarizados fue 130% mayor que en las hojas de los plantines testigo, y en las raíces el incremento fue de 76%.

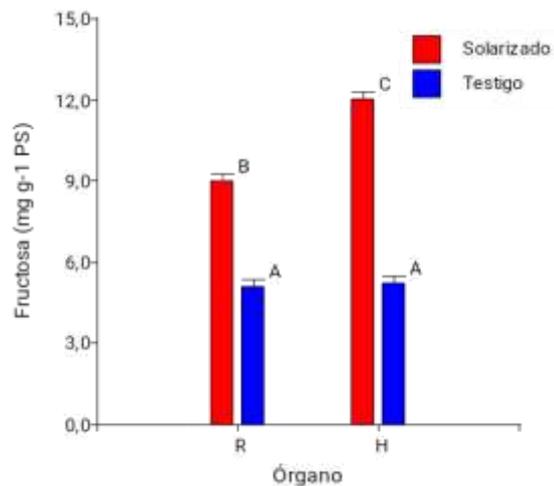


Figura 5.8. Concentración de fructosa en raíces (R) y hojas (H) de plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Aunque la concentración de glucosa en las hojas no presentó variaciones entre tratamientos, se detectó un incremento de 43% en las raíces de los plantines solarizados.

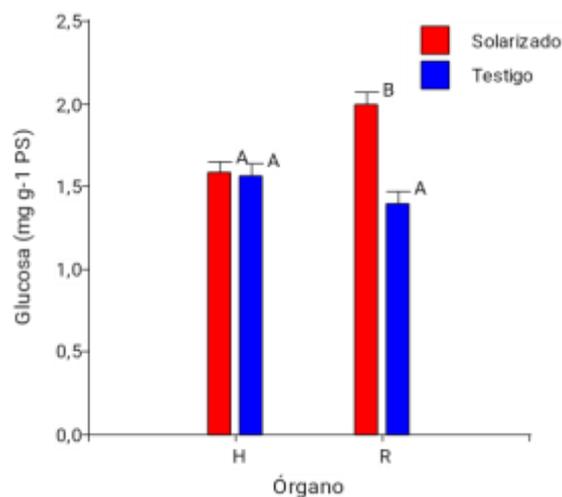


Figura 5.9. Concentración de glucosa en raíces (R) y hojas (H) de plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

La concentración de azúcares solubles totales se presenta en la Fig. 5.10. Setenta y cinco días después de la siembra, los eucaliptos producidos en el sustrato solarizado tuvieron mayor cantidad de azúcares solubles totales que los producidos en el sustrato

testigo. Esta tendencia se observó tanto en las hojas (80%) como en las raíces (51%). Este resultado podría atribuirse a la mayor tasa fotosintética de los plantines solarizados. Latsague *et al.* (2014) obtuvieron resultados similares en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook. f.

Los azúcares solubles constituyen las reservas de uso inmediato para las demandas de carbono y de energía de las plantas, cumpliendo múltiples funciones dentro de las plantas leñosas, tales como la respiración de mantenimiento y de crecimiento (Grignola, 2014; Camison *et al.*, 2017). Según Valenzuela-Núñez *et al.* (2019), los carbohidratos no estructurales son de vital importancia para las estrategias de sobrevivencia de los árboles y las plantas leñosas perennes.

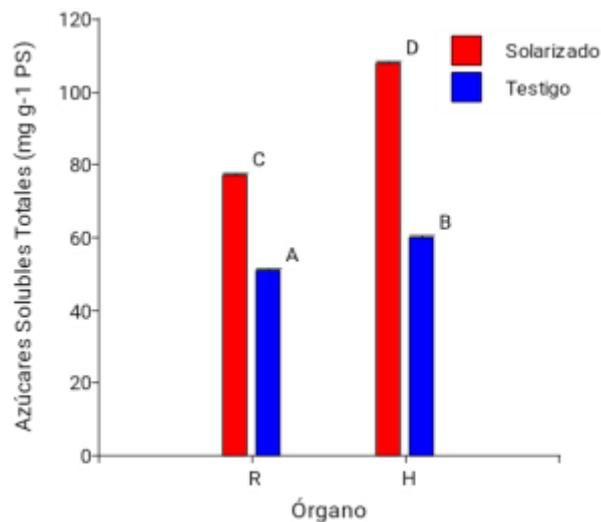


Figura 5.10. Azúcares solubles totales en raíces (R) y hojas (H) en plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Los azúcares solubles también actúan como osmoreguladores, disminuyendo el potencial osmótico en condiciones de estrés hídrico, y como osmoprotectores, ya que, bajo diferentes condiciones de estrés, también pueden actuar estabilizando proteínas y membranas celulares y captando radicales libres. Además, participan como moléculas de señalización en muchos procesos del ciclo biológico de las plantas (Montenegro y Melgarejo, 2012; Grignola, 2014; Camison *et al.*, 2017). Por otra parte, el contenido de carbohidratos en la raíz es importante para la interacción de la planta con las micorrizas y otras simbiosis microbianas que intervienen en la adquisición de minerales del suelo.

Una planta con mayor cantidad de azúcares solubles puede aclimatarse mejor al efecto causado por un estrés tanto biótico como abiótico (Tofiño *et al.*, 2007). Esto fue demostrado por Margarit *et al.* (2016), quienes investigaron la tolerancia a las temperaturas de congelación y la supervivencia de *Eucalyptus grandis*, *E. dunnii* y *E. benthamii*, detectando en los plantines diferencias en la capacidad para resistir las bajas temperaturas, lo que se relacionó con la variación en la concentración de azúcares en cada una de las especies ensayadas. Estos investigadores concluyeron que *E. benthamii* fue la especie con mayor potencial, habiendo exhibido elevados contenidos de azúcares totales y de antocianinas en las hojas, así como una menor tasa de daño frente a la exposición a temperaturas de congelación.

5.3.4. Estado hídrico de las plantas

Los resultados del contenido relativo de agua (CRA) mostraron que las hojas de los plantines producidos en el sustrato solarizado tuvieron mayores valores de CRA que las de los plantines producidos en el sustrato sin solarizar. (Fig. 5.11). Esto podría deberse a un mayor desarrollo del sistema radical (Dalmas y San Filippo, 2012; Mejía de Tafur *et al.*, 2017) y podría explicar la mayor conductividad estomática, transpiración y fotosíntesis que presentaron los plantines producidos en el sustrato solarizado.

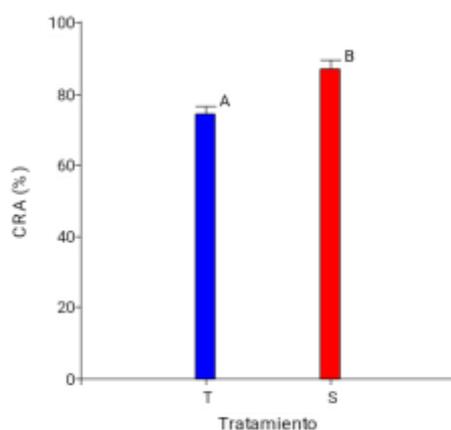


Figura 5.11. Contenido relativo de agua (CRA) en hojas de plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días producidos en sustrato solarizado (S) y testigo (T). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

El estado hídrico influye sobre el crecimiento y la producción de materia seca de las plantas (Dalmas y Sanfilippo, 2012). La producción de biomasa es proporcional al

abastecimiento y uso del agua. En consecuencia, la condición hídrica de la planta, junto con la condición hídrica del suelo, es importante para la producción de biomasa y para maximizar los rendimientos (Romero Lecourt, 2010).

Todos los azúcares solubles disminuyen el potencial osmótico y, en consecuencia, el potencial hídrico, permitiendo la absorción de agua. Este ajuste osmótico se evidencia en el contenido relativo del agua. Los plantines producidos en el sustrato solarizado presentaron un CRA mayor que los testigos, indicando la presencia de ajuste osmótico en sus hojas y logrando mantener un gradiente con el sustrato. En estos plantines, los azúcares totales fueron mayores tanto en las hojas como en las raíces; por lo tanto, estarían involucrados en este proceso de ajuste osmótico.

5.4. Conclusiones

Los resultados de la aplicación de la técnica de solarización para producir plantines de *Eucalyptus camaldulensis* de 75 días, en sustratos preparados con mantillo y suelo en proporciones 1:1 nos conduce a las siguientes conclusiones:

1. Los plantines de *E. camaldulensis* de 75 días producidos en el sustrato solarizado fotosintetizaron en mayor proporción que los plantines testigos. Esto se evidenció por el incremento de los azúcares tanto en las hojas como en las raíces.
2. Los plantines de *E. camaldulensis* producidos en el sustrato solarizado presentaron mayor vigor fisiológico y mejor desempeño total que los producidos en el sustrato testigo.
3. El incremento de azúcares no se relacionó con el aumento de los pigmentos.

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron aceptar la hipótesis planteada al principio. Se demostró que la solarización provocó cambios en los sustratos que hicieron posible producir plantines de *E. camaldulensis* más vigorosos y con mayor crecimiento.

5.5. Bibliografía

- Aliaga P. y C. Nieto. 2009. Contenido de azúcares en raíces reservantes de 106 clones de camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) de la colección de germoplasma. *Anales científicos* 70(2):1-10. Universidad Nacional de La Molina, Lima, Perú.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. 2013. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2ª Edición. McGraw Hill, Interamericana. 639 p.
- Camison, A., F.J. Dorado, G. Moreno, M.A. Martín y A. Solla. 2017. Carbohidratos no estructurales en *Castanea sativa* Mill. en respuesta a la sequía severa y al encharcamiento a corto plazo. 7º Congreso Forestal Español. Gestión del monte: servicios ambientales y bioeconomía. Plasencia, España. p. 1-9.
- Cambrón-Sandoval, V.H., M.L. España-Boquera, N.M. Sánchez-Vargas, C. Sáenz-Romero, J.J. Vargas-Hernández e Y. Herrerías-Diego. 2011. Producción de clorofila en *Pinus pseudostrobus* en etapas juveniles bajo diferentes ambientes de desarrollo. *Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2):253-260. Universidad Chapingo, México.
- Chica Ramírez, H.A., A.M. Castaño Marín, N.M. Riaño Herrera, D.O. Bonilla. 2014. Intercambio gaseoso en *Eucalyptus pellita* F.Mell y *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden en dos regiones de Colombia. *Revista Cenicafé* 65(2):55-72.
- Dalmas, N.J. y J.G. Sanfilippo. 2012. El contenido relativo de agua como indicador foliar en trigo para selección de genotipos y el manejo del cultivo. Tesina, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. 16p.
- Duarte, B., D. Santos, J.C. Marques, and I. Caçador. 2013. Ecophysiological adaptations of two halophytes to salt stress: Photosynthesis, PSII photochemistry and anti-oxidant feedback. Implications for resilience in climate change. *Plant Physiology and Biochemistry* 76:178-188.
- Duarte, M.J., E. Avico, R. Acevedo, P. Calzadilla, O. Ruiz y P. Sansberro. 2016. Partición de azúcares solubles en plantas de *Ilex paraguariensis* en respuesta al déficit hídrico. XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. Libro de Resúmenes. p. 122.
- Faria-Silva, L., C. Zanotti, E. Purgatto, D. Moura-Silva. 2017. Photochemical metabolism and fruit quality of Ubamango tree exposed to combined light and heat stress in the field. *Acta Physiologiae Plantarum* 39:238-249.

- Gómez-Romero, M., J.C. Soto-Correa, J.A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, J. Villegas, R. Lindig-Cisneros. 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Revista Agrociencia* 46:795-807.
- Grignola, J. 2014. Plasticidad y tolerancia de diferentes especies y procedencias del género *Cedrela* a las bajas temperaturas. Tesis para optar al Grado Académico de Magister en Ciencias Agropecuarias, Mención: Recursos Naturales. Facultad de Ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 116 p.
- Latsague, M., P. Sáez y M. Mora. 2014. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio sobre el contenido foliar de carbohidratos, proteínas y pigmentos fotosintéticos en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook. f. *Gayana Bot.* 71(1):37-42.
- Lichtenthaler, H.K. and A.R. Welburn. 1983. Determination of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 11:591-592.
- Margarit, E., J. Oberschelp, A. Guarnaschelli, N. Teson, L. Harrand y F. Podestá. 2016. Evaluación de la aclimatación al frío en tres especies de eucaliptos: una perspectiva metabólica. XXXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal, Libro de Resúmenes. p. 141.
- Medrano, H., J. Bota, J. Cifre, J. Flexas, M. Ribas-Carbó y J. Gulías. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43:63-84. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17604304>.
- Mejía de Tafur, M.S., C.M. Zapata, J.B. Urrego, D.M. Ibarra y J.J. Leal. 2017. Efecto del estrés hídrico sobre la acumulación y distribución de biomasa en *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Ecofisiología Vegetal y Producción de Cultivos. Acta Agronómica* 66(1):56-62.
- Meloni, D.A. y C.A. Martínez. 2021. Physiological responses of *Eucalyptus camaldulensis* (Dehnh.) to simulated glyphosate drift. *Biofix Scientific Journal* 6:46-53.
- Meloni, D.A., D. Moura Silva y G.I. Bolzón de Muñiz. 2018. Fisiología de especies forestales bajo estrés salino: conocimientos y desafíos. *In: Los bosques y el futuro. Consolidando un vínculo permanente en educación forestal.* p. 85-97. ISBN 978-987-1676-77-4.

- Milla Moreno, E. 2010. Efecto del déficit hídrico en algunas respuestas fisiológicas de *Eucalyptus globulus* Labill., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. y *Eucalyptus cladocalyx* x F. Muell. Tesis para optar por el título de Ing. Forestal. Universidad de Chile. 60p.
- Moglia, J.G.; S. Bravo y R. Gerez. 2008. Anatomía comparada del leño de *Eucalyptus camaldulensis* (Myrtaceae) de dos orígenes, ensayados en Santiago del Estero. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 43:239-246.
- Montenegro Ruiz, L.C. y L.M. Melgarejo Muñoz. 2012. Variación del contenido de azúcares totales y azúcares reductores en el musgo *Pleurozium schreberi* (Hylocomiaceae) bajo condiciones de déficit hídrico. *Acta Biológica Colombiana* 17(3):599-610.
- Portela, F.C, P.B.M, Becacici, L.V. Zanetti, V.N. Gama, D.M. Silva, C.R.D. Milanez, G.R.F. Cuzzuol. 2018. How does *Cariniana estrellensis* respond to different irradiance levels? *Journal of Forest Research* 30:31-44.
- Romero Lecourt, P. 2010. Evaluación de mecanismos de adaptación al déficit hídrico en tres especies de *Eucalyptus* sometidas a dos niveles de disponibilidad de agua. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Chile. 35p.
- Silva, E.N., S.L. Silva and R.A. Viégas. 2010. The role of organic and inorganic solutes in the osmotic adjustment of drought-stressed *Jatropha curcas* plants. *Environmental and Experimental Botany* 69:279-295.
- Silva, M., R. Rubilar, J. Espinoza, M. Yáñez, V. Emhart, J.J. Quiroga. 2017. Respuesta en parámetros de intercambio gaseoso y supervivencia en plantas jóvenes de genotipos comerciales de *Eucalyptus spp.* sometidas a déficit hídrico. *BOSQUE* 38(1):79-87.
- Strasser, R.J., M. Tsimilli-Michael, and A. Srivastava. 2005. Analysis of the fluorescence transient. In: Papageorgiou, G.C. (Ed.). 2005. Chlorophyll fluorescence: a signature of photosynthesis, p. 321-362. Springer, Germany.
- Tofiño, A.H., M. Romero y H. Ceballos. 2007. Efecto del estrés abiótico sobre la síntesis y degradación del almidón. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 25(2):245-254.
- Valenzuela-Núñez, L.M., E.A. Briceño-Contreras, J.R. Esparza-Rivera, C. García-De la Peña, G. Rodríguez-Bautista y J.A. Núñez-Colima. 2019. Cambios estacionales en la concentración de azúcares solubles en órganos perennes de nogal (*Carya*

illinoensis (Wangenh.) Koch). *Acta Universitaria, Multidisciplinary Scientific Journal* 29:1-13.

6. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos en esta tesis coinciden con los resultados presentados por investigadores que durante varios años han estudiado los efectos de la solarización en los sustratos y en las plantas producidas después del tratamiento.

Dado que el control de malezas y patógenos es el efecto más deseable, se debe tener en cuenta que los cambios físicos, químicos y biológicos que se producen al solarizar el suelo son complejos pues dependen de la interacción de varios factores, tales como la composición del sustrato, las condiciones ambientales y la cantidad de inóculo presente, por lo que no siempre es posible hacer generalizaciones al respecto.

Las condiciones ambientales de la provincia de Santiago del Estero no son una limitante para la solarización. Las temperaturas que se alcanzaron se encontraron dentro del rango de las temperaturas mencionadas en la bibliografía, por lo que esta técnica es una buena alternativa de desinfección del sustrato que permite lograr la producción de plantines en forma segura desde el punto de vista ambiental.

Haciendo un balance de los cambios producidos en los sustratos ensayados, se puede afirmar que mediante la solarización se obtuvieron resultados prometedores. Esto se evidenció a través de su efecto en los procesos fisiológicos y en el crecimiento de los plantines de *E. camaldulensis*.

Si bien esta investigación se enfocó en los efectos de la solarización sobre la producción de plantines forestales, esta técnica, debido a su bajo costo, podría aplicarse a la producción de plantines de especies hortícolas, frutales y ornamentales que se realicen a pequeña escala o en invernáculo. Además, existen diversas formas de aplicación según los recursos disponibles y los volúmenes de sustrato a solarizar, por lo que también se podría aplicar a gran escala.

Un aspecto negativo de la solarización a gran escala es que favorece la generación de residuos plásticos, contribuyendo a la contaminación ambiental. Actualmente existen películas biodegradables aptas para solarización, como por ejemplo el ácido poliláctico (PLA), polímero microbiano obtenido a partir de *Lactobacillus delbrueckii*, *L. amylophilus*, *L. bulgaricus* y *L. leichmannii* (Barrera Martínez *et al.*, 2022). Experiencias realizadas con un film biodegradable a base de almidón tratado con un estabilizador de origen natural, han demostrado el potencial de este material, que podría ser un sustituto adecuado para el film de polietileno tradicional para la solarización de suelos, con grandes beneficios ambientales (Di Mola *et al.*, 2021). Además, hay otros beneficios de esta técnica que no fueron analizados en esta tesis pero que deberían tenerse en cuenta. Por ejemplo, mediante la solarización se puede lograr la biorremediación del suelo, acelerando marcadamente la degradación de los herbicidas en el suelo (Gambín-Pozo, 2021).

Son escasas las investigaciones que relacionan la solarización con la producción de plantines forestales y su efecto sobre los procesos fisiológicos. Para poder determinar si las variaciones en la fotosíntesis, el crecimiento y la concentración de nutrientes favorecen efectivamente a los plantines para tolerar exitosamente el estrés del trasplante, deberán realizarse investigaciones sobre el comportamiento a campo de los plantines producidos en sustratos solarizados.

6.1. Bibliografía

Barrera-Martínez, C. L., N.P. Meléndez-Rentería, M.A. De León Zapata, T.A. Salinas-Jasso, C.N. Aguilar-González y E.I. Laredo-Alcalá. 2022. Polímeros de origen microbiano con aplicaciones agroindustriales. Revista Internacional de

Investigación e Innovación Tecnológica 9(54):19-40. Disponible en:
www.riiit.com.mx

Di Mola, I., V. Ventorino, E. Cozzolino, L. Ottaiano, I. Romano, L.G. Duri, O. Pepe, M. Mori. 2021. Biodegradable mulching vs. traditional polyethylene film for sustainable solarization: Chemical properties and microbial community response to soil management. *Applied Soil Ecology* 163:1-9. Disponible en:
www.elsevier.com/locate/apsoil

Gabín-Pozo, D.M. 2021. Aplicación de técnicas de remediación en aguas y suelos contaminados por residuos de herbicidas. Trabajo presentado para obtener el Grado de Doctor en la Facultad de Química, Universidad de Murcia, 208 p.