



Instituto Nacional de Innovación y
Transferencia en Tecnología Agropecuaria

ALCANCES TECNOLÓGICOS

REVISTA DEL INSTITUTO NACIONAL DE INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA EN TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

VOLUMEN 16

NÚMERO 1

AÑO 2023



EFICACIA BIOLÓGICA DE BIOINSUMOS SOBRE *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI* Y *CAMPYLOCARPON PSEUDOFASCICULARE*, EN CONDICIONES DE LABORATORIO

Kenneth Retana Sánchez¹

RESUMEN

Eficacia biológica de bioinsumos sobre *Phytophthora cinnamomi* y *Campylocarpon pseudofasciculare*, en condiciones de laboratorio. Durante el año 2021, se evaluó la eficacia biológica de diferentes bioinsumos sobre dos agentes causales asociados a la pudrición radical de plantas de aguacate. El estudio se realizó en dos etapas, en la primera se llevó a cabo el aislamiento, identificación morfológica y molecular de los organismos y verificación de los postulados de Koch. En la fase posterior, se realizaron pruebas de confrontación dual entre cada uno de los patógenos y los siguientes organismos: *Bacillus* spp. (INTA-B37), *Bacillus* spp. (BP-16), *Trichoderma harzianum* (aislado de suelo de Orotina (T.H.O)), *Trichoderma harzianum* (aislado de suelo de Nandayure (T.H.N)) y un producto comercial compuesto de *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* y *Azotobacter* spp. Se evaluó el porcentaje de inhibición en el crecimiento de los patógenos y, en el caso de las trichodermas, se valoró la competencia por el sustrato. Se identificó que los patógenos corresponden a *Campylocarpon pseudofasciculare* y a *Phytophthora cinnamomi*. En relación con la confrontación dual, se obtuvo que las trichodermas presentaron los mayores valores de inhibición sobre *C. pseudofasciculare*, con un 56,3 % (T.H.N) y 50 % (T.H.O) respectivamente. Asimismo, BP-16 y *T. harzianum* (T.H.O) alcanzaron un 55,2 % y 44,7 % de inhibición sobre *P. cinnamomi*, respectivamente. Con respecto a la competencia por sustrato, las dos trichodermas alcanzaron el grado uno en la escala de Bell frente a ambos patógenos.

Palabras clave: Patógeno, Aguacate, Organismos benéficos.

ABSTRACT

A survey about the biological efficacy of different bioinputs on two causal agents associated with root rot in avocado plants was evaluated during 2021. The study was carried out in two stages, in the first one the isolation, morphological and molecular identification of the organisms and verification of Koch's postulates were carried out. In the subsequent phase, dual confrontation tests were implemented between each of the founded pathogens and the following organisms: *Bacillus* spp. (INTA-B37), *Bacillus* spp. (BP-16), *Trichoderma harzianum* (isolate from Orotina (T.H.O) soil), *Trichoderma harzianum* (isolate from Nandayure (T.H.N) soil), and a commercial product composed of *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* and *Azotobacter* spp. The percentage of inhibition in the pathogen's growth was evaluated and, in the case of trichoderma species, the competition for the substrate was measured. Morphological and molecular techniques were used to identified the pathogens

1 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Teléfono: (506) 8944-4024. Correo: kretana@inta.go.cr ORCID: 0000-0003-1937-7249

as *Campylocarpon pseudofasciculare* and *Phytophthora cinnamomi*. Dual confrontation was performed and the results showed the highest inhibition on *C. pseudofasciculare* with the trichoderma species, with values of 56,3 % (T.H.N) and 50 % (T.H.O), respectively. Likewise, BP-16 and *T. harzianum* (T.H.O) reached 55,2 % and 44,7 % inhibition values on *P. cinnamomi*, respectively. Regarding the competition for substrate, the two trichoderma reached grade one in Bell's scale against both pathogens.

Keywords: Pathogen, Avocado, Beneficial organism.

INTRODUCCIÓN

En el cultivo de aguacate, uno de los patógenos más problemáticos es *P. cinnamomi*, así como otras especies del mismo género. Esta causa una de las enfermedades más devastadoras que afecta en cualquier etapa del cultivo. Cuando la infección se desarrolla en almácigo, las plantas presentan un reducido crecimiento, poco desarrollo foliar y amarillamiento generalizado de hojas (Tamayo 2007).

En plantaciones establecidas, los árboles afectados detienen su crecimiento y las hojas se tornan más pequeñas con apariencia pálida. Se observa un amarillamiento generalizado, con rebrotes pequeños y de poco vigor, así como floraciones excesivas y desfasadas. Posteriormente, las hojas se secan y las ramas laterales muestran una marchitez descendente; en estados avanzados ocurre la muerte árbol. El hongo también puede afectar la base del tronco por lo que se puede formar un chancro oscuro con exudaciones con apariencia blanquecina (Morales *et al.* 2005, Tamayo 2007).

Síntomas similares son provocados por varios hongos de la familia Nectriaceae. Debido a que estos patógenos atacan el sistema radical y pueden llegar a afectar los haces vasculares, según el estado de desarrollo de la enfermedad, el diagnóstico en campo se dificulta, ya que el daño observado puede ser provocado por uno o varios de estos organismos. La identificación morfológica puede ser compleja debido a la similitud morfológica de los conidios, aunque se reconocen algunos aspectos como el tamaño de estos, el número de septos y la presencia o no de microconidios para diferenciarlos (Ramírez y Morales 2013, Parkinson 2017, Palacios 2021).

En relación con el manejo de enfermedades radicales en el cultivo de aguacate, se han desarrollado diferentes estrategias de manejo integrado, sin embargo, prevalece el uso de plaguicidas, lo que conlleva a impactos negativos en el ambiente y la salud. Estos reducen la biota del suelo y simplifican el sistema al minimizar las interrelaciones entre las poblaciones de organismos, lo que puede degenerar en un mayor problema fitosanitario. Asimismo, el uso continuo de moléculas sintéticas ejerce una presión de selección sobre los patógenos, lo que ha provocado tolerancia o resistencia a las mismas (Dobrowolski 2008, Ramírez *et al.* 2013).

Como alternativa a los agroquímicos, se han evaluado distintos organismos para el control de *P. cinnamomi*. Se ha obtenido una reducción de la severidad de la enfermedad que provoca con el uso de *Trichoderma* spp., bacterias como *Pseudomonas fluorescens*, varias especies del género *Bacillus*, y actinomicetes (Ramírez *et al.* 2013).

Cabe destacar que el potencial de control se incrementa en presencia de materia orgánica debido al efecto supresivo de la diversidad biótica sobre la etapa saprofítica de este y otros patógenos, esto debido a que ocurre una mayor frecuencia de interacciones (competencia, parasitismo, antibiosis) entre las poblaciones presentes. La complejidad microbiana en el suelo promueve la estabilidad y, desde la arista ecológica, la autoorganización de los sistemas diversos contribuye al desarrollo de supresividad (Batista *et al.* 2008, Sarandón y Flores 2014).

El uso preventivo de consorcios (diversidad) de organismos benéficos reduce el desarrollo de las enfermedades de suelo, inclusive, puede disminuir la capacidad de infección del inóculo secundario. Por la tanto, la capacidad de los patógenos de permanecer en el sitio del cultivo depende de la densidad poblacional y de las interacciones que se desarrollen dentro de la comunidad biótica (Pérez 2008).

Con base en lo descrito, se planteó como objetivo de esta investigación determinar la eficacia biológica de diferentes bioinsumos sobre dos agentes causales de la pudrición de raíz en plantas de aguacate (*Persea americana* Mill, material Criollo), en condiciones de laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diagnóstico de los agentes causales

Aislamiento e identificación de los agentes causales

Se realizaron muestreos de plantas de aguacate con síntomas de marchitamiento, amarillamiento, pérdida de tejido foliar, pudrición del sistema radical y necrosis en los haces vasculares. Esto se realizó en varias fincas ubicadas en Orotina, Nandayure y Pérez Zeledón.

Cada una de las muestras se envolvió en papel periódico humedecido y se llevaron al Laboratorio de Fitoprotección del INTA. El aislamiento de los organismos se realizó mediante el protocolo para hongos y bacterias indicado por French y Hebert (1980). La identificación morfológica de los organismos asociados a los síntomas descritos se llevó a cabo mediante la observación al microscopio de luz, de las estructuras asexuales de los organismos obtenidos con mayor frecuencia en las cajas Petri. Estas se compararon con las guías para la identificación de organismos de Erwin y Ribeiro (1996), Gallegly y Hong (2008) y lo indicado por Agustí y Armengol (2013).

Verificación de los postulados de Koch

Una vez identificados los organismos aislados, se inocularon individualmente y en combinación (Cuadro 1), en plantas de aguacate (patrón criollo, copa Simmonds) de 40 cm de altura. A todas

las plantas se les mantuvo con saturación de humedad por 72 horas para favorecer la infección de los organismos. Se contó con tres repeticiones por tratamiento.

Cuadro 1. Organismos individuales o en mezcla inoculados para verificar los postulados de Koch. Laboratorio de Fitoprotección del INTA, San José, 2021.

Identificador	Organismo o mezcla
T0	Testigo absoluto
T1	<i>Phytophthora cinnamomi</i>
T2	<i>Campylocarpon pseudofasciculare</i>
T3	<i>P. cinnamomi</i> + <i>C. pseudofasciculare</i>

En caso de *Phytophthora*, la inoculación se realizó con 15 g/planta de semillas de sorgo colonizadas por el oomicete con una concentración de 1×10^5 esporangios/g. Los cuales se colocaron en tres orificios a cinco centímetros de la base de la planta, a una profundidad de 10 cm. Con respecto a *Campylocarpon*, se inoculó un mililitro de una solución de conidios (1×10^6) en la cantidad de puntos y profundidad antes indicada, en cada repetición.

Se verificó la ocurrencia de síntomas y avance de los mismos durante un período de 70 días. A partir de las plantas sintomáticas, se realizó el reaislamiento e identificación del o los organismos causales de la enfermedad generada.

Identificación molecular

Se realizó la identificación molecular de los patógenos reaislados, y de dos cepas de *Trichoderma* spp., una obtenida de un suelo de la finca El Porvenir cultivada con aguacate, en Nandayure (T.H.N) (Latitud: 9,93717° Norte y Longitud: -85,29633 Oeste) y otra de la finca Cavar la cual está ubicada en Orotina (T.H.O) (Latitud: 9,54505° Norte y Longitud: 84,30214° Oeste). Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de Técnicas Moleculares de CIPROC/UCR, bajo los protocolos de extracción de ADN establecidos por la entidad. Los productos de PCR se enviaron a secuenciar a Corea del Sur.

Se utilizó la herramienta Blast (instrumento bioinformático para inferir relaciones funcionales, estructurales o evolutivas entre dos secuencias de nucleótidos o proteínas) con la cual se

compararon las secuencias generadas con las que se encuentran en la base de datos del banco de genes (GenBank). El análisis filogenético se realizó con el software MEGA 6, mediante las pruebas del Vecino más cercano y Máxima Verosimilitud.

Pruebas de confrontación dual

Se evaluó la capacidad antagónica de organismos de control biológico contra los dos patógenos identificados morfológicamente como los causantes de las pudriciones de la raíz de aguacate. Los biocontroladores evaluados fueron: las dos trichodermas antes mencionadas, dos cepas de *Bacillus subtilis* identificadas como BP- 16 y INTA-B37. Asimismo, se valoró el efecto del producto comercial Fertibiol® (1×10⁹ UFC/mL) constituido de tres cepas de bacterias benéficas (*Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis* y *Azotobacter* spp.) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Microorganismos utilizados en la prueba de confrontación dual en caja Petri. Laboratorio de Fitoprotección del INTA, San José, 2021.

Tratamiento	Descripción
T1	<i>C. pseudofasciculare</i> vs <i>T. harzianum</i> Nandayure
T2	<i>C. pseudofasciculare</i> vs <i>T. harzianum</i> Orotina
T3	<i>C. pseudofasciculare</i> vs Fertibiol
T4	<i>C. pseudofasciculare</i> vs <i>Bacillus</i> BP-16
T5	<i>C. pseudofasciculare</i> vs <i>Bacillus</i> INTA-B37
T6	<i>Phytophthora cinnamomi</i> vs <i>T. harzianum</i> Nandayure
T7	<i>Phytophthora cinnamomi</i> vs <i>T. harzianum</i> Orotina
T8	<i>Phytophthora cinnamomi</i> vs Fertibiol
T9	<i>Phytophthora cinnamomi</i> vs <i>Bacillus</i> BP-16
T10	<i>Phytophthora cinnamomi</i> vs <i>Bacillus</i> INTA-B37
T11	Testigo <i>C. pseudofasciculare</i>
T12	Testigo <i>Phytophthora cinnamomi</i>

Diseño experimental

En el caso de los postulados de Koch, bajo condiciones de invernadero, se estableció un diseño irrestricto al azar. Se contó con tres repeticiones para cada tratamiento y el testigo.

Respecto a las pruebas de confrontación dual, se estableció un diseño irrestricto al azar con cuatro repeticiones por organismo de control evaluado, con cada hongo identificado como patógeno. Para cada hongo, se contó con un testigo que consistió únicamente en el crecimiento de cada organismo fitopatógeno en cajas Petri con medio de cultivo PDA acidificado, con la misma cantidad de repeticiones antes mencionada.

Control de calidad

Se realizó el control de calidad del producto comercial Fertibiol. Esto se realizó mediante la determinación de microorganismos presentes en UFC/mL, mediante diluciones decimales del producto y crecimiento en medios de cultivo para hongos y para bacterias. También se analizó la pureza microbiológica (porcentaje de colonias de otros organismos no declarados en el producto) y se llevó a cabo la identificación morfológica y bioquímica de las bacterias.

Pruebas de confrontación dual

El siguiente procedimiento se realizó, por separado, con cada organismo identificado como patógeno en las pruebas de verificación de los postulados de Koch:

Bacterias BP-16 y INTA-B37

En cajas Petri con medio de cultivo PDA sin acidificar, se colocó una línea de bacteria (~4cm) en cada extremo a una distancia aproximada de 2,5 cm del centro. Dos días después, se agregó un disco de 0,5 cm de diámetro de PDA colonizado por el patógeno en el centro del plato. Esto se realizó con cada una de las bacterias en estudio (Figura 1).

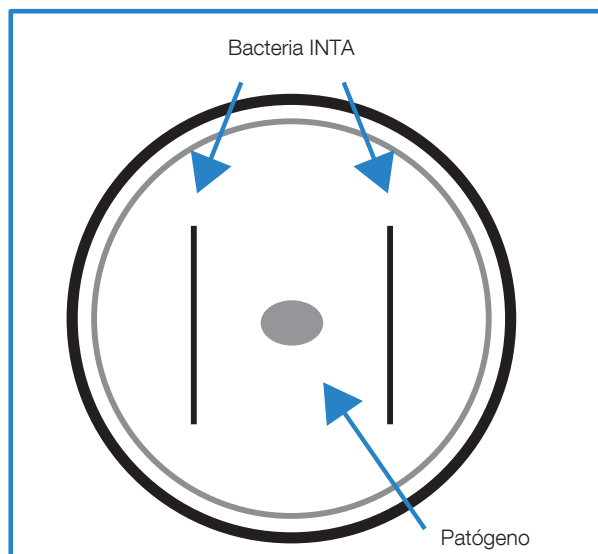


Figura 1. Ordenamiento de las bacterias INTA en las pruebas de confrontación dual.

Las cajas Petri con los organismos se incubaron por un periodo de siete días a temperatura ambiente. La inhibición del crecimiento del hongo (efecto antibiótico de cada bacteria) se evaluó diariamente mediante la determinación de la reducción en el porcentaje de expansión de micelio (mm), comparado con el testigo, mediante la siguiente fórmula:

$$(R1-R2)/R1 \times 100 \text{ (Royse y Ries 1977; Whipps 1987) (Figura 2).}$$

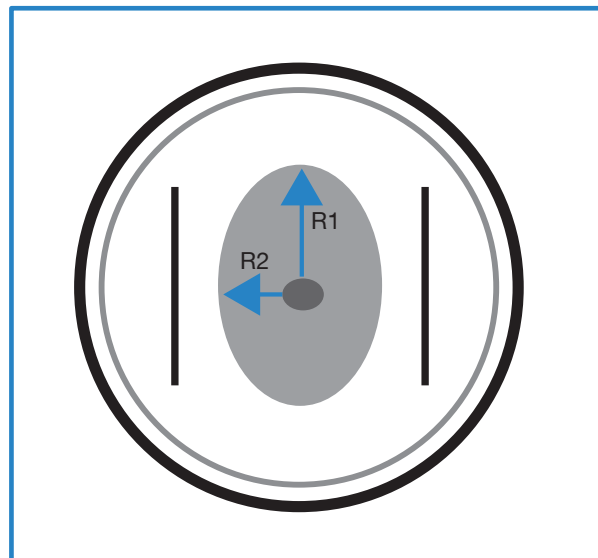


Figura 2. Radios para determinar el porcentaje de inhibición de crecimiento.

Fertibiol

Se tomaron dos alícuotas de 50 μ L del producto previamente agitado y se depositaron cada una en línea recta a 2,5 cm del centro (mismo diseño de la figura 1). Dos días después, se colocó un disco de 0,5 cm de diámetro de PDA colonizado con el hongo en el centro de una caja Petri con medio de cultivo PDA sin acidificar. La incubación y la evaluación del porcentaje de inhibición se realizó mediante el procedimiento descrito en el subapartado anterior (Figura 2).

Trichoderma harzianum

Se evaluó la capacidad de inhibición del crecimiento de las dos cepas de *T. harzianum* contra el patógeno (confrontación dual). Para esto, se colocó un disco de 0,5 cm de diámetro de PDA colonizado con el respectivo hongo (cinco días de crecimiento) en un extremo de una caja Petri con medio PDA acidificado y en el lado opuesto se agregó un disco de 0,5 cm de PDA colonizado con el organismo benéfico (cinco días de crecimiento). Esto se llevó a cabo con cada cepa de *T. harzianum* por separado (Figura 3).

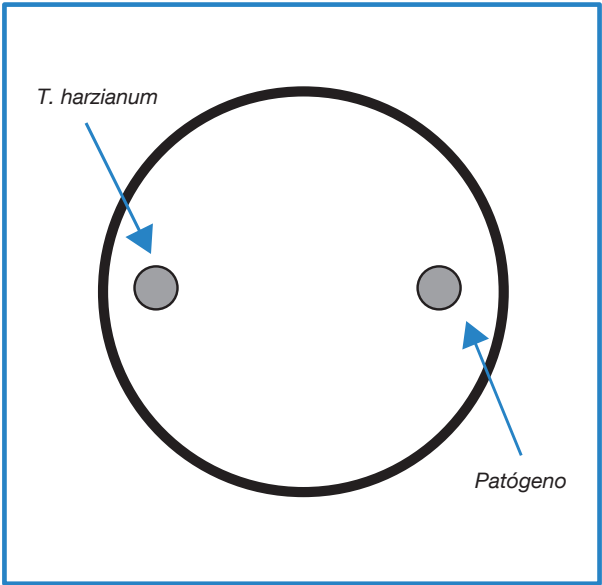


Figura 3. Ordenamiento de los organismos en la prueba de confrontación dual.

Se determinó el porcentaje de inhibición (efecto antibiótico) mediante la fórmula $(R1-R2)/R1 \times 100$. En donde R1 es el crecimiento radial del patógeno testigo (mm) y R2 es el crecimiento radial del patógeno (mm) en competencia con *T. harzianum*. Asimismo, se evaluó la competencia por sustrato del hongo benéfico con la escala de Bell (Bell *et al.* 1982) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Escala de evaluación de competencia por sustrato de organismos en confrontación dual.

Grado	Descripción
I	Antagonista cubre el medio + al patógeno
II	Antagonista está en $\frac{2}{3}$ partes del medio
III	Antagonista + patógeno cada uno en la mitad del medio
IV	Patógeno sobrepasa al antagonista
V	Patógeno sobrepasa todo el plato

Análisis estadístico

Con los datos obtenidos y con el uso del programa Infostat (versión estudiante 2020), se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) mediante modelos lineales generales y mixtos, así como la comparación de medias (DGC $p<0,05$). Se compararon tratamientos de interés dentro y entre grupos con análisis por contrastes ortogonales. Además, se realizó una comparación de medias (Tukey $p<0,01$) del crecimiento radial de las trichodermas en estudio frente a cada patógeno, por separado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico de los agentes causales

Se identificó morfológicamente (Figura 4) y molecularmente dos patógenos asociados a las pudriciones de las plantas de aguacate, como *Phytophthora cinnamomi* y *Campylocarpon pseudofasciculare*. El primer organismo es reconocido por el hábito de crecimiento del micelio, el cual es de color blanquecino poco algodonoso con bajo volumen que crece unido al medio de cultivo; este presenta hifas aseptadas (cenocíticas) y formación de esporangios multinucleados con forma elipsoide u ovoide, en donde se producen de 20-30 zoósporas heterocontas (morfología desigual) biflageladas. Además, tiene pelos tripartitos en el flagelo anterior llamados mastigonemas (Hardham 2005).

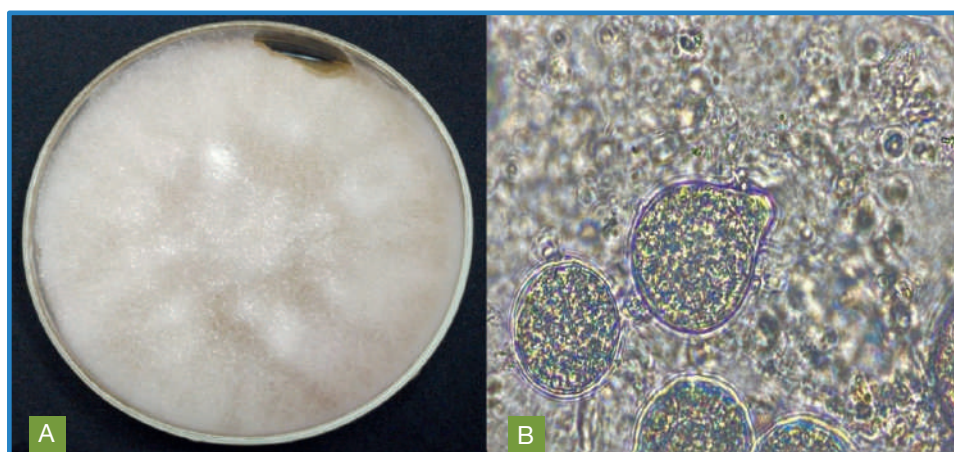


Figura 4. A. Micelio de *P. cinnamomi*. B. Esporangios de *P. cinnamomi*.

Este oomicete se encuentra comúnmente asociado a necrosis radical de árboles de aguacate tanto en vivero como en plantaciones establecidas, donde las condiciones de humedad en el suelo son altas por periodos prolongados y las temperaturas son cálidas. Esto favorece la incidencia del patógeno ya que este requiere de agua libre en el medio para que las zoosporas puedan movilizarse por quimiotaxia hacia la raíz del hospedero, además, facilita que en un plazo de dos a tres días después de la infección, se produzcan nuevos esporangios, lo que incrementa rápidamente el inóculo para nuevas infecciones (Gadek 1999, Hardham 2005).

Cabe destacar que, si la condición de humedad es constante, aún en suelos con buen drenaje,

el patógeno se puede desarrollar. Esto porque, además de favorecer la producción de esporangios, un ambiente húmedo puede provocar modificaciones químicas en el suelo y reducir la tolerancia del hospedero a este u otros patógenos (Pérez 2008). Este aspecto hídrico fue un factor continuo que se observó en los sitios donde se realizaron los muestreos, sobre todo en áreas arcillosas.

En el caso de *C. pseudofasciculare*, la colonia en PDA creció con el centro de color naranja-rojizo y con el borde liso de color blanquecino crema. Los conidios observados fueron hialinos, levemente curvados, cortos y septados (de cuatro a seis septos) (Figura 5). Esta descripción coincide con lo descrito por Agustí y Armengol (2014) y Lawrence *et al.* (2019).

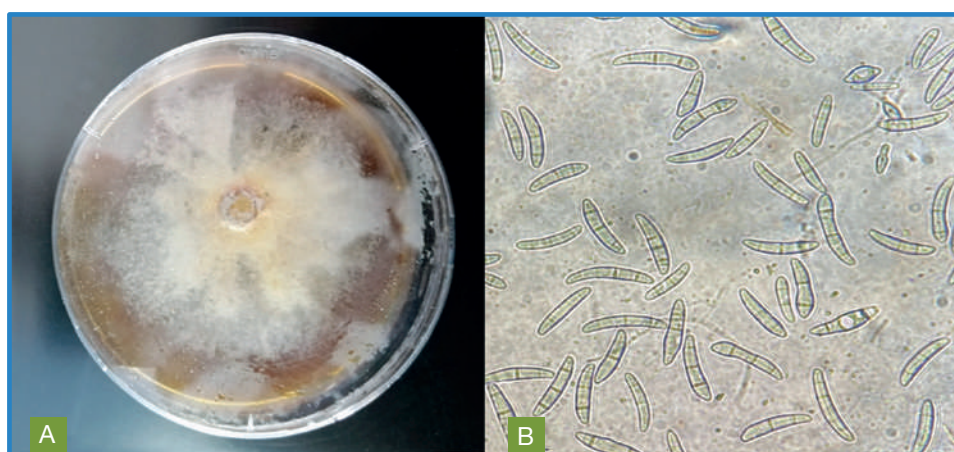


Figura 5. A. Micelio de *C. pseudofasciculare* en medio de cultivo V8. B. Macroconidios de *C. pseudofasciculare*.

Cabe destacar que este hongo sólo produce macroconidios, los cuales son generalmente más alargados que los de *Cylindrocarpon* e *Ilyonectria*, y por lo general, no forman clamidosporas. Este organismo se considera como patógeno de cultivos de aguacate y de otros frutales como el olivo y la vid, el cual provoca síntomas de pudrición radical (Agustí y Armengol 2014).

En relación con la identificación de las dos cepas de *Trichoderma* spp. encontradas en los sitios de estudio, ambas se identificaron molecularmente como *T. harzianum*. Esta especie es ampliamente reconocida en el control de diferentes organismos patógenos del suelo (Martínez *et al.* 2013).

Verificación de los postulados de Koch

De acuerdo con los resultados de los postulados de Koch los organismos encontrados, de forma individual, provocaron necrosis radical, lo que se traduce en el marchitamiento y necrosis del follaje (Figura 6). Esto último es producto de la pudrición tanto de las raíces finas absorbentes como de las fibrosas, y al bloqueo de haces vasculares (por lo que se reduce la absorción y translocación de agua y nutrientes), lo que lleva a la muerte regresiva de la planta (Gadek 1999, Hardham 2005).

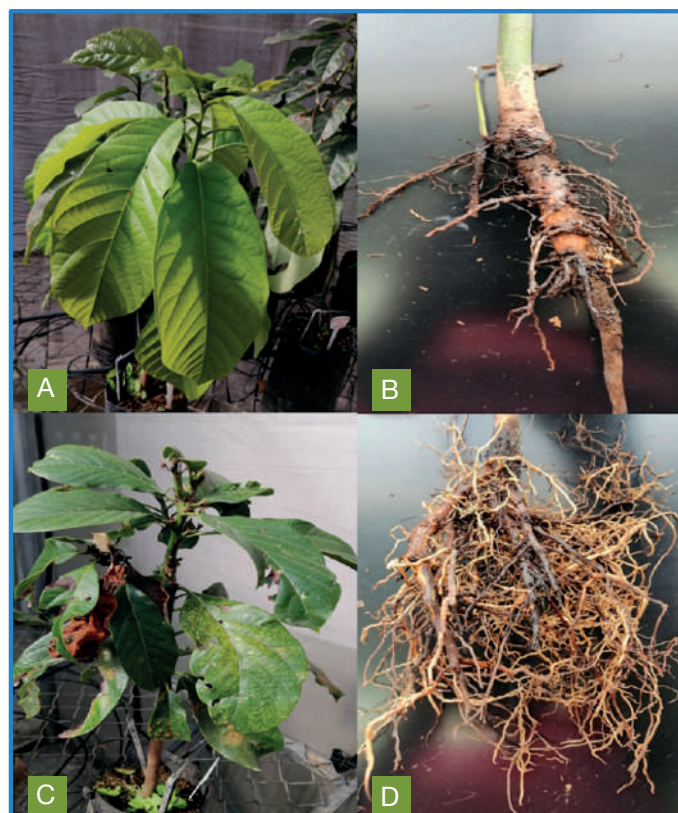


Figura 6. Verificación de los postulados de Koch. A y B. Síntomas provocados por *C. pseudofasciculare*. C y D. Síntomas provocados por *P. cinnamomi*.

Se obtuvo un 67 % de infección en las plantas inoculadas, para cada patógeno. La mezcla de ambos organismos en una misma planta provocó un 33 % de infección, asimismo, en una inoculación previa no se obtuvo infección. Esto se puede deber a que *Phytophthora* presenta una limitada capacidad competitiva, una reducida actividad

saprofítica y poco crecimiento en presencia de otros microorganismos en el suelo (Gadek 1999), por lo que es posible que la población del segundo patógeno, redujo la incidencia del oomicete.

En el caso de *C. pseudofasciculare*, con base en lo obtenido en este ensayo y una prueba

posterior en invernadero con resultados similares, es posible que este patógeno no sea un buen competidor. Asimismo, la condición de alta humedad del sustrato pudo haber afectado la capacidad de infección en la planta al momento de la inoculación y se mantuvo como saprófito, sin embargo, es necesario más investigación para determinar las interacciones de este hongo con otros organismos y su efecto en su capacidad de infección en el huésped, ya que hasta el momento no se reporta información al respecto. Además, Santos *et al.* (2014) mencionan que este organismo inoculado individualmente en el cultivo de uva presentó un periodo de incubación de cuatro

meses, lapso en el cual es probable que se afecte su desarrollo en nuevos tejidos en presencia de otros organismos, tanto benéficos como patogénicos.

Por último, se debe considerar la interacción planta-patógeno en donde es posible que los genotipos inoculados, por provenir de semilla, podrían presentar un nivel de tolerancia a uno o a ambos patógenos. Álvarez *et al.* (2018) reportan una variabilidad genética de hasta un 84 % en materiales criollos, lo cual influye en el comportamiento de las poblaciones de aguacate ante organismos patogénicos.

Pruebas de confrontación dual

Campylocarpon pseudofasciculare

Trichoderma harzianum

Ambas trichodermas mostraron una inhibición superior al 50 % sobre *C. pseudofasciculare*. A los tres días después del inicio del estudio, cada hongo benéfico hizo contacto con el patógeno (Figura 7), y a los seis días se dio la colonización de estos sobre el organismo perjudicial, por lo que alcanzaron el grado uno de la escala de Bell (Cuadro 4). Esta velocidad de colonización y la capacidad de parasitación permite considerar a ambas cepas como altamente antagonistas (Bell *et al.* 1982, Sánchez 2016).

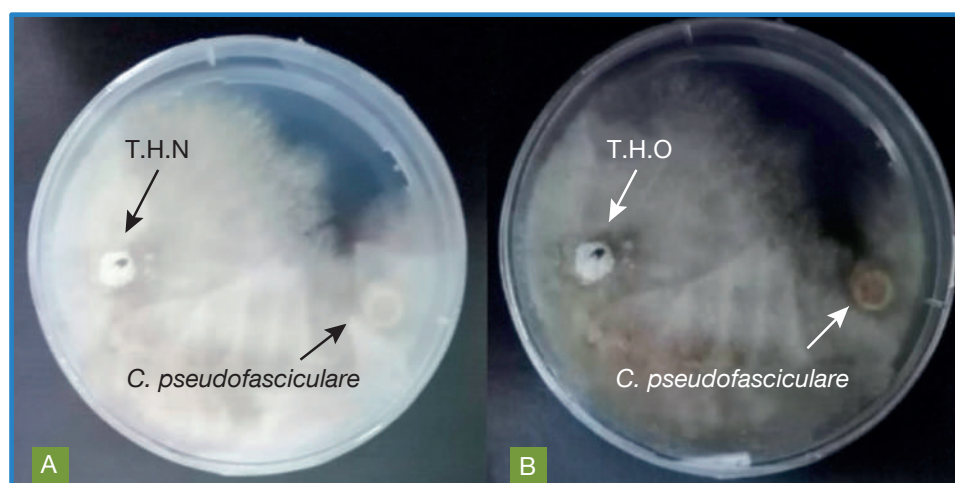


Figura 7. De izquierda a derecha, crecimiento de *Trichoderma harzianum* frente a *C. pseudofasciculare*, a los tres días en confrontación dual. A. Cepa obtenida de Finca el Porvenir, Nandayure. B. Cepa aislada de la Finca Cavar, Orotina.

El patógeno mostró una velocidad de crecimiento baja, por lo que los hongos de biocontrol colonizaron el medio con rapidez. A partir de este resultado, se puede asumir que estos últimos presentan una potencial ventaja competitiva para

colonizar la rizosfera frente al ascomicete. Cabe destacar que *T. harzianum* presenta un sistema quitinolítico compuesto de dos β -1,4- *N*-acetilglucosaminidasas, cuatro endoquitinasas y 1,3-glucanasas (moduladas según el organismo que parasitan), las

cuales provocan degradación celular de los hongos de raíz. Ambos mecanismos limitan la incidencia del patógeno en el huésped (Haran *et al.* 1996, Ait-Lahsen *et al.* 2001). Bajo la condición del ensayo, es posible que los mecanismos descritos influyeron en el reducido crecimiento del patógeno.

Otros mecanismos de control que se reconocen de esta y otras especies de *Trichoderma* son la detoxificación de toxinas excretadas por los patógenos y la desactivación de enzimas de estos producen en el proceso de infección. Además,

inducen mecanismos de defensa bioquímicos y fisiológicos en la planta (Harman 2000, Infante *et al.* 2009).

Respecto a la comparación del crecimiento radial de las trichodermas frente a este patógeno, no se obtuvo diferencias entre sí (Cuadro 4). Sin embargo, bajo condiciones limitantes de baja humedad y alta temperatura la cepa de Nandayure tiene un mayor potencial de establecimiento y control, lo cual es un aspecto relevante ante la variabilidad climática actual.

Cuadro 4. Competencia por sustrato de las cepas de *Trichoderma harzianum* contra patógenos radicales de árboles de aguacate, en pruebas *in vitro*. Laboratorio de Fitoprotección, INTA, San José.

Confrontación	Grado (Escala Bell)	Crecimiento radial de T.H. (cm)*	Tiempo contacto (días)
<i>T. harzianum</i> Nandayure vs <i>C. pseudofasciculare</i>	I	4	3
<i>T. harzianum</i> Orotina vs <i>C. pseudofasciculare</i>	I	5,1	3
<i>T. harzianum</i> Nandayure vs <i>Phytophthora cinnamomi</i>	I	4,0	3
<i>T. harzianum</i> Orotina vs <i>Phytophthora cinnamomi</i>	I	4,4	3

* n.s. Diferencias no significativas, según Tukey ($p<0,01$).

Fertibiol

En el caso de este producto comercial, no se obtuvo efecto inhibitorio sobre el desarrollo del patógeno (Figura 8). Esto se debe a que, según el control de calidad del producto, no se encontraron los organismos que en la etiqueta se declaran. No obstante, se reconoce que los microorganismos que se indica que contiene el producto, tienen potencial para el control biológico. Lo anterior tanto por las interacciones amensalismo y antagonismo que cada bacteria puede ejercer contra patógenos de suelo, así como por las relaciones de competencia que estas bacterias desarrollan en la raíz contra estos organismos nocivos (Rodríguez *et al.* 2016, Pedraza *et al.* 2020).

Al respecto, Arriola (2018) reporta que no obtuvo inhibición de este producto frente a *Ralstonia solanacearum*, bajo condiciones *in vitro*. Sin embargo, al realizar evaluaciones en invernadero, los organismos redujeron la incidencia del patógeno a un 24 %. La autora explica que estas diferencias en los resultados obedecen a que posiblemente las bacterias tuvieron una movilidad reducida en el medio de cultivo o a que la producción o difusión de los compuestos antimicrobianos producidos por estas pudo ser lenta. Asimismo, se debe valorar si la solución comercial contiene alguna sustancia que inhibe el crecimiento de los organismos en caja Petri con el fin de proteger las cepas.

Bacterias BP-16 y INTA-B37

En la confrontación con la bacteria BP-16 (cepa de *Bacillus subtilis*), se obtuvo un 5,2 % de inhibición del crecimiento del hongo, lo cual puede ser considerado como un efecto leve de control (Figura 8). A pesar de este resultado, se reporta que esta cepa, bajo condiciones *in vitro*, redujo el crecimiento de *Fusarium oxysporum* en un 57 % y de *Rhizoctonia solani* un 45 % (Vargas 2020).

Las diferencias entre lo anterior y los resultados obtenidos requieren de más investigación, para determinar si existen mecanismos bioquímicos del hongo que bloquean las sustancias inhibitorias que produce la bacteria. A pesar del bajo porcentaje de reducción del crecimiento alcanzado, esta bacteria puede ser útil en la disminución de la incidencia de este y otros patógenos en la raíz debido a la competencia por espacio y nutrientes, además, induce la respuesta sistémica en plantas mediante la producción de lipopéptidos y refuerza las respuestas basales de las plantas (Chandler *et al.* 2015, Allard *et al.* 2016).



Figura 8. Crecimiento de *C. pseudofasciculare* a los siete días en confrontación con la bacteria BP-16

En el caso de la bacteria INTA-B37, la inhibición sobre el patógeno fue de 39,4 %. Este valor fue menor que el alcanzado por Vargas (2020) quien obtuvo un 69 % de reducción del crecimiento de este organismo sobre *F. oxysporum* y un 61 % sobre *R. solani*. Lo anterior indica el

potencial que tiene esta para el control de hongos perjudiciales para las plantas (Figura 9).

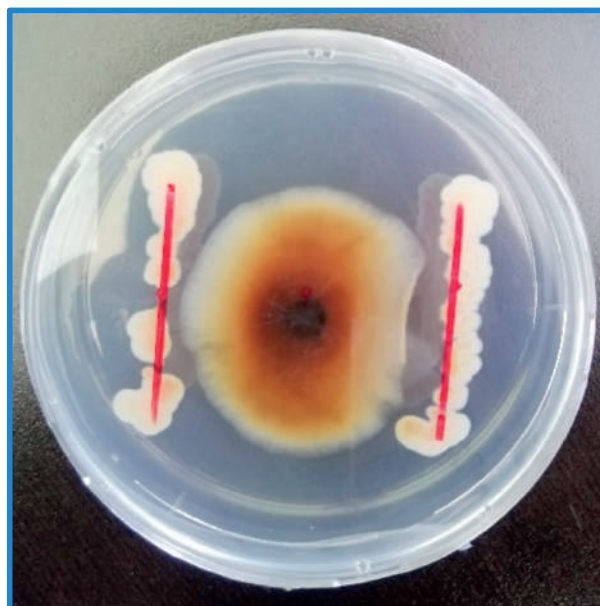
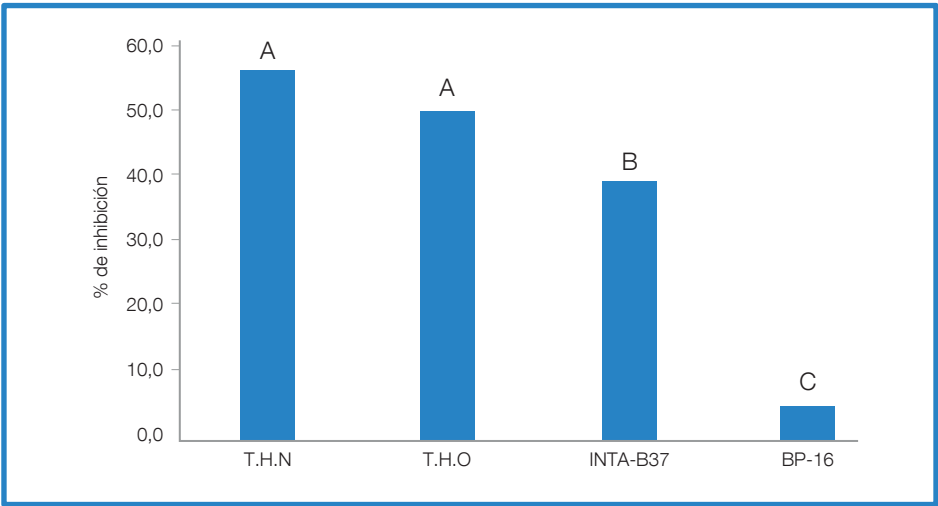


Figura 9. Crecimiento de *C. pseudofasciculare* a los ocho días en confrontación con la bacteria INTA-B37.

En este ensayo no se determinó los metabolitos implícitos en esta habilidad inhibitoria, pero se reconoce que las bacterias del género *Bacillus* producen compuestos antimicrobianos, tales como péptidos de síntesis no ribosomal (NRPs) y policétidos (PKs). Además, generan enzimas líticas como quitinasas, glucanasas, proteasas y acil homoserin lactonasas AHL, compuestos orgánicos volátiles y hormonas, cuya expresión varía en forma y cantidad según la interacción organismo benéfico-planta-patógeno (Pedraza *et al.* 2020).

Análisis estadístico

El porcentaje de la variación en la variable evaluada sobre este hongo que es explicado por el modelo lineal fue $R^2 = 0,75$ ($p < 0,05$). La cepa de *T. harzianum* proveniente de Nandayure obtuvo el mayor valor de inhibición sobre el patógeno con un 56,3 %, seguido por la cepa de *T. harzianum* obtenida de Orotina con un 50,1 %, sin diferencias significativas entre ellas. La bacteria INTA-B37 presentó un 39,4 % de inhibición y BP-16 un 5,2 %, con lo cual ambas bacterias presentaron diferencias estadísticas en el porcentaje de reducción de crecimiento del hongo (Figura 10).



Letras distintas indican diferencias significativas entre medias de los tratamientos (DGC $p<0,05$).

Figura 10. Porcentaje de inhibición del crecimiento de *Campylocarpon pseudofasciculare* en presencia de *T. harzianum* Nandayure (T.H.N), *T. harzianum* Orotina (T.H.O), *Bacillus* BP-16 y *Bacillus* INTA-B37.

De acuerdo con los contrastes realizados (Cuadro 5), se comprobó que las dos cepas de trichoderma no presentan diferencias significativas entre sí en esta variable ($p= 0,6425$). Asimismo, se determinó que la bacteria INTA-B37 redujo un 34,2 % más que BP-16 el crecimiento de *C. pseudofasciculare* ($p<0,0001$).

Al comparar el efecto inhibitorio de las dos trichodermas contra la reducción del desarrollo alcanzado por las dos bacterias sobre el patógeno se obtuvo que ambas cepas del hongo benéfico disminuyeron el avance de *C. pseudofasciculare* un 30.9 % más que las dos cepas de *Bacillus subtilis* ($p=0,0006$) (Cuadro 5). Estos resultados demuestran la capacidad de control de los organismos evaluados sobre este patógeno y permite asumir el potencial uso de estos en consorcios para el combate del hongo.

Cuadro 5. Estimadores de lasdiferencias de las medias de los porcentajes de inhibición alcanzados por los organismos de control evaluados sobre *C. pseudofasciculare*

Tratamiento	Porcentaje	p-valor
T.H.N vs T.H.O	6,23	0,6425
INTA-B37 vs BP-16	34,20	<0,0001
T.H.N*T.H.O vs BP-16*INTA-B37	30,91	0,0006

Phytophthora cinnamomi

Trichoderma harzianum

Ambas cepas de este organismo benéfico tuvieron un efecto inhibitorio medio frente *P. cinnamomi*. La que se obtuvo de Nandayure alcanzó un 34,5 % y la que se aisló de Orotina un 44.7 % de reducción de crecimiento del patógeno. Estos valores se consideran bajos, sin embargo,

fueron influenciados por una mayor velocidad de desarrollo mayor del oomicete en presencia de las trichodermas, en comparación con el testigo. Debido a esto, en ambos casos, a los tres días del inicio del ensayo se dio el contacto entre cada hongo benéfico y el patógeno, y a los cuatro días las dos trichodermas llenaron por completo la respectiva caja Petri (Figura 11).

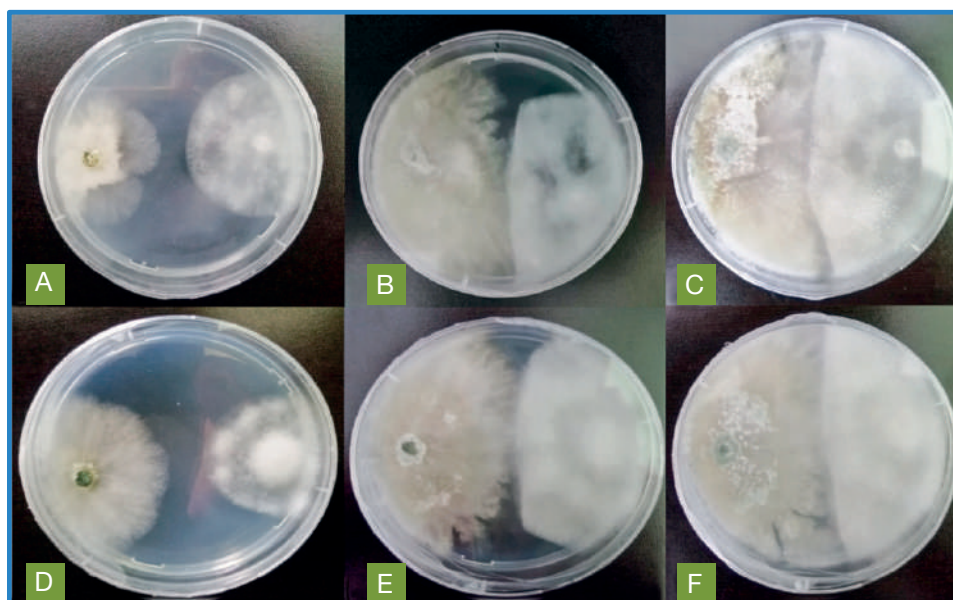


Figura 11. De izquierda a derecha, confrontación dual (CD) de dos cepas de *Trichoderma harzianum* frente a *Phytophthora cinnamomi*. A. T.H.N a los dos días. B. T.H.N a los tres días. C. T.H.N a los cuatro días. D. T.H.O a los dos días. E. T.H.O a los tres días. F. T.H.O a los cuatro días.

Esta reacción de crecimiento se puede deber a un mecanismo de defensa del patógeno frente a *T. harzianum*. En el caso de la cepa que se obtuvo de Nandayure, se dio un crecimiento mayor al testigo en 0,35 cm y 0,68 cm, en el primer y segundo día, respectivamente. En relación con la aislada de Orotina, se obtuvo una diferencia de 0,17 cm, únicamente para el segundo día. En el resto del periodo, en ambos casos, se dio un decrecimiento por la interacción con el otro organismo en la caja Petri (Figura 12).

No existen reportes previos de este comportamiento de desarrollo, sin embargo, se menciona que, en el caso de *P. capsici*, esta produce más esporangios en presencia de *Trichoderma* spp., en respuesta a la inhibición que ejerce este organismo (Ahmed *et al.* 1999). Esto indica un posible efecto del hongo benéfico sobre la fisiología de estos oomicetes.

Cabe destacar que el comportamiento descrito también ocurrió con las dos bacterias en estudio. En el caso de BP-16, para el primer día *P. cinnamomi* frente creció 1,1 cm más que el testigo y para el segundo día el radio fue igual al testigo, en el resto de periodo de evaluación se dio un decrecimiento por el efecto inhibitorio. Con respecto a INTA-B37, este patógeno se expandió 1,1 cm y 0,7 cm más que el testigo, en los mismos días indicados. En los días restantes hubo una tendencia de crecimiento similar al testigo (Figura 13).

En ensayos *in vitro* similares con distintas cepas de *T. harzianum* sobre *P. cinnamomi*, se reporta una inhibición en un rango de 21,8 - 53,8 %. Estas diferencias obedecen a la procedencia de los aislamientos y a variaciones en la habilidad antagónica y parasítica del hongo benéfico (Sánchez 2016).

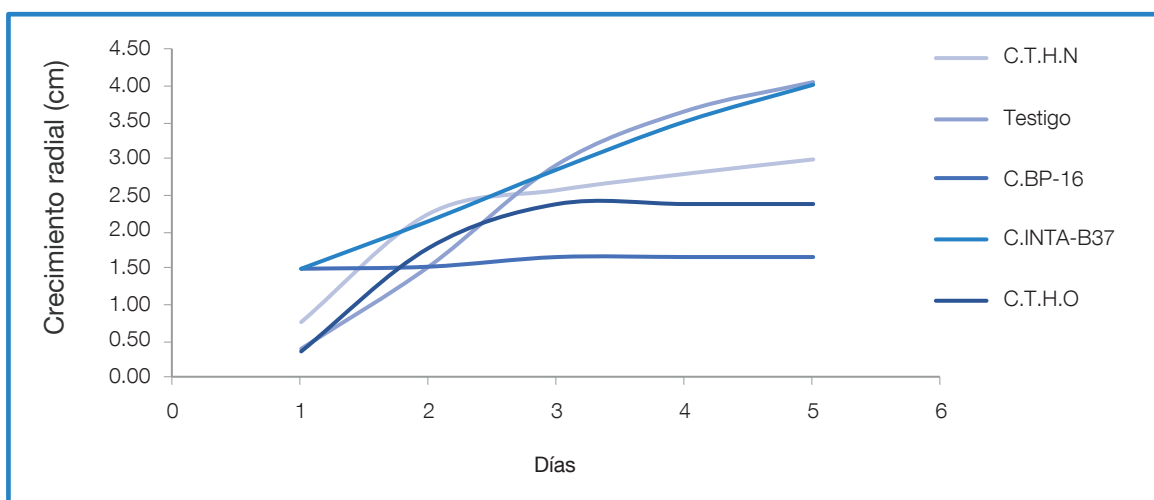


Figura 13. Crecimiento radial de *Phytophthora cinnamomi* en PDA acidificado en confrontación dual con los organismos en estudio.

Fertibiol

No se obtuvo inhibición del crecimiento del patógeno por la razón expuesta en el apartado anterior. Asimismo, este resultado pudo ser influenciado por la reacción de crecimiento del patógeno que se indicó en el subapartado anterior.

Bacterias BP-16 y INTA-B37

De acuerdo con las evaluaciones, la bacteria INTA-B37 no tuvo efecto de inhibición sobre el crecimiento del oomicete. Esto se puede deber a que el patógeno no es susceptible a los metabolitos que libera la bacteria o bien a que la tasa de crecimiento de *P. cinnamomi*, en respuesta a la presencia del organismo benéfico, superó la concentración de dichos compuestos, por lo cual no fue suficiente para reducir el desarrollo de patógeno de forma evidente (Figura 14).

En el caso de la bacteria BP-16, esta redujo un 55 % el crecimiento de esta phytophthora. Se reporta una cepa de este organismo aislada de raíces de aguacate que alcanzó un 26 % de

inhibición contra este patógeno (Hakizimana *et al.* 2011). Por lo tanto, el resultado obtenido es más del doble del valor anterior por lo que se puede considerar como un organismo con alto potencial para ser utilizado como controlador de *P. cinnamomi* en plantaciones de aguacate (Figura 15).

Los mecanismos de inhibición de *B. subtilis* ya fueron mencionados en el apartado anterior y han sido ampliamente descritos en diversos ensayos. Las diferencias en la reducción de crecimiento obtenidas con los dos patógenos de este estudio indican la posibilidad de una variación en la liberación de metabolitos entre cepas de *Bacillus subtilis*, tanto en tipo como en concentración.

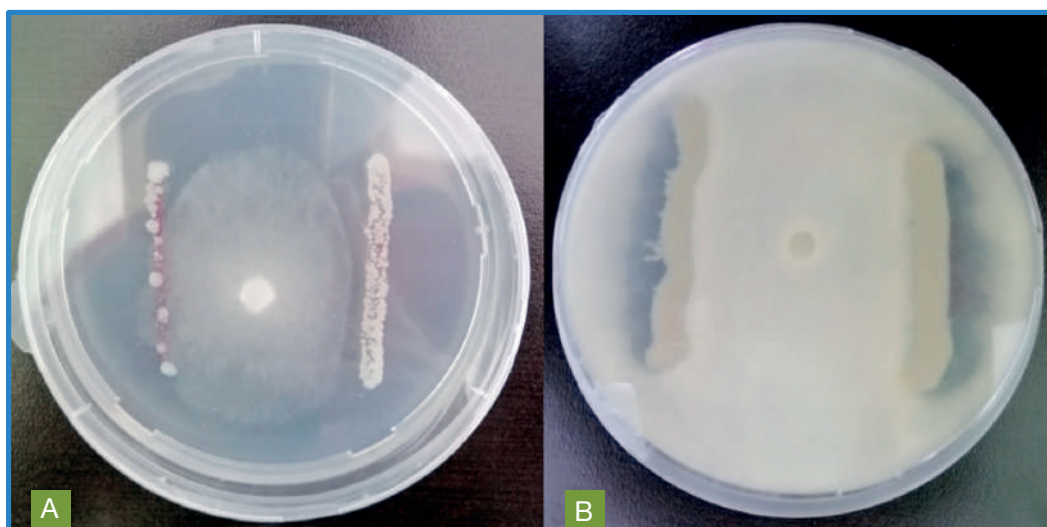


Figura 14. Crecimiento de *P. cinnamomi* en confrontación con la bacteria INTA-B37. A. Crecimiento un día después del inicio del ensayo. B. Tres días después del inicio del ensayo.

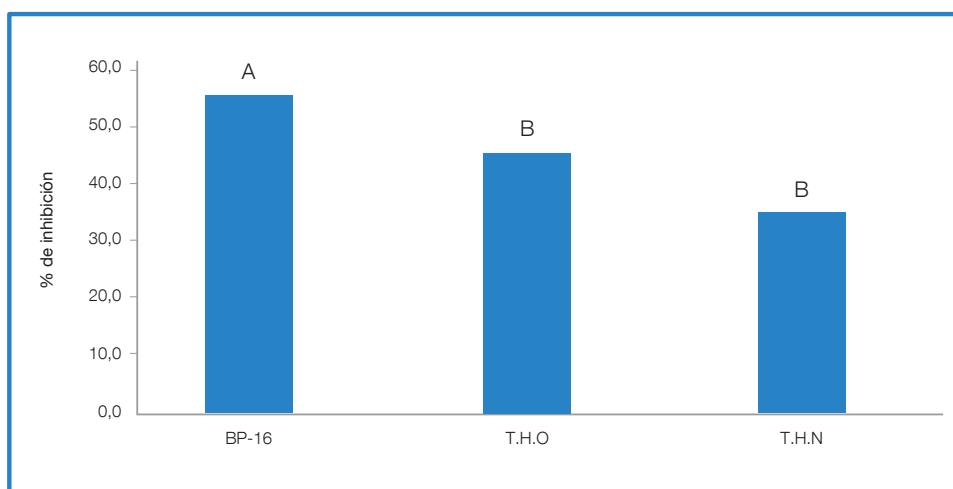


Figura 15. Crecimiento de *P. cinnamomi* en confrontación con la bacteria BP-16. A. Crecimiento un día después del inicio del ensayo. B. Cuatro días después del inicio del ensayo.

Análisis estadístico

El porcentaje de la variación en la variable evaluada sobre este oomicete que es explicado por el modelo lineal fue $R^2 = 0,74$ ($p < 0,05$). De acuerdo con los resultados de este ensayo, la bacteria BP-16 presentó el mayor porcentaje de inhibición del patógeno con un 55 %, valor que

difiere estadísticamente en comparación con la reducción alcanzada por las dos *T. harzianum*, las cuales presentaron un 44,7 % (O) y 34,5 % (N). Entre estas cepas de hongos benéficos no se presentaron diferencias significativas (Figura 17).



Letras distintas indican diferencias significativas (DGC $p < 0,05$).

Figura 17. Porcentaje de inhibición del crecimiento de *Phytophthora cinnamomi* en presencia de *Bacillus* BP-16, *T. harzianum* Nandayure, *T. harzianum* Orotina.

En relación con los contrastes entre las medias de los valores obtenidos, se obtuvo que la *T. harzianum* proveniente de Orotina redujo un 10,2 % el desarrollo del patógeno en relación con la cepa originaria de Nandayure ($p = 0,0482$). Además, el efecto de inhibición de la bacteria BP-16 versus ambas cepas del hongo benéfico, fue mayor un 15,52 % ($p < 0,0052$) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Estimadores de las diferencias de las medias de los porcentajes de inhibición alcanzados por los organismos de control evaluados sobre *P. cinnamomi*.

Tratamiento	Porcentaje	p-valor
T.H.O vs T.H.N	10,23	0,0482
BP-16 vs T.H.N y T.H.O	15,52	<0,0052

Al comparar las medias del porcentaje de inhibición de los organismos evaluados sobre *C. pseudofasciculare* (C) y *P. cinnamomi* (P), se obtuvo que no hubo diferencias entre estos grupos ($p = 0,1604$), sin embargo, al contrastar las medias de los valores de reducción del crecimiento obtenido con las trichodermas para cada patógeno, las confrontadas con *C. pseudofasciculare* tuvieron un 13,6 % más de efectividad que en el caso del oomicete ($p = 0,0461$) (Cuadro 7), lo cual pudo ser influenciado por la agresiva respuesta de desarrollo de *P. cinnamomi* frente a los organismos de control.

En general, con los resultados obtenidos, se pudo determinar el potencial de control de los organismos benéficos sobre ambos patógenos. Se debe valorar el uso de estos en consorcio para el combate biológico en campo.

Cuadro 7. Estimadores de las diferencias de las medias de los porcentajes de inhibición alcanzados por grupo sobre *C. pseudofasciculare* y *P. cinnamomi*.

Tratamiento	Porcentaje	p-valor
T.H.N, T.H.O y BP-16 (P) vs T.H.N, T.H.O y BP-16 (C)	7,63	0,1604
T.H.N, T.H.O (C) vs T.H.N, T.H.O (P)	13,55	0,0461

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al M.Sc. Luis Vargas Cartagena del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y a la Ph.D. Mónica Blanco Meneses y al Ph.D. Mauricio Serrano Porras de la Universidad de Costa Rica, por su valiosa colaboración para el desarrollo de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Agustí, C.; Armengol J. 2013. Black-foot disease of grapevine: an update on taxonomy, epidemiology and management strategies. *Phytopathologia Mediterranea* 52(2):245–261.
- Agustí, C.; Armengol, J. 2014. El pie negro de la vid: agentes causales, epidemiología y estrategias de control. *Phytoma* (260):32-35.
- Ahmed, A.; Pérez, C.; Egea, C.; Candela, M. 1999. Evaluation of *Trichoderma harzianum* for controlling root rot caused by *Phytophthora capsici* in pepper plants. *Plant Pathology* 48:58–65.
- Ait-Lahsen, H.; Soler, A.; Rey, M.; De la Cruz, J.; Monte, E.; Llobell, A. 2001. An antifungal Exo- α -1,3-glucanase (AGN13.1) from the biocontrol fungus *Trichoderma harzianum*. *Applied and Environmental Microbiology* 67:5833-5839.
- Allard, R.; Tessier, L.; Lécuyer, F.; Lakshmanan, V.; Lucier, J.; Garneau, D.; Caudwell, L.; Vlamakis H.; Bais, D.; Beauregard, P. 2016. *Bacillus subtilis* early colonization of *Arabidopsis thaliana* roots involves multiple chemotaxis receptors. *MBio* 7(6):1-10.
- Álvarez, M.; Pecina, V.; Acosta, E.; Almeyda, I. 2018. Evaluación molecular del aguacate criollo (*Persea americana* Mill) en Nuevo León, México. *Revista Colombiana de Biotecnología* 20(2):38-46.
- Arriola, I. 2018. Evaluación de la eficacia *in vitro* e *in vivo* de productos químicos, microorganismos antagónicos y extractos botánicos, sobre el nivel de inóculo de *Ralstonia solanacearum*, agente causal de la marchitez bacteriana en tomate. Tesis M.Sc. Universidad de Costa Rica. San Pedro, Costa Rica. 110 p.
- Batista, J.; García, R.; Pérez, J.; Zabaleta E.; Montes, R.; Cerrato, R. 2008. Inducción de supervivencia a fitopatógenos del suelo. Un enfoque holístico al control biológico. *INTERCIENCIA* (33):96-102.
- Bell, D; Well, H; Markham, C. 1982. “*In vitro*” antagonism of *Trichoderma* species against six fungal plant pathogens. *Phytopathology* 72:379-38
- Chandler, S.; Van Hese, N.; Coutte, F.; Jacques, P.; Höfte, M.; De Vleeschauwer, D. 2015. Role of cyclic lipopeptides produced by *Bacillus subtilis* in mounting induced immunity in rice (*Oryza sativa* L.). *Physiological and Molecular Plant Pathology* 91:20-30.
- Dobrowolski, M.; Shearer, B.; Colquhoun, I.; O’Brien, P.; Hardy, G. 2008. Selection for decreased sensitivity to phosphite in *Phytophthora cinnamomi* with prolonged use of fungicide. *Plant Pathology* 57:928-936.
- Erwin, D.; Ribeiro, O. 1996. *Phytophthora: Diseases Worldwide*. Minnesota, USA, APS Press. 562 p.
- French, E.; Hebert, T. 1980. Métodos de investigación fitopatológica. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). 288 p.
- Gadek, P. 1999. Patch Deaths in Tropical Queensland Rainforests: association and impact of *Phytophthora cinnamomi* and other soil borne organisms. Cairns, Australia, Cooperative Research Centre for Tropical Rainforest Ecology and Management. 101 p.
- Gallegly, M.; Hong, C. 2008. *Phytophthora*: Identifying species by morphology and DNA fingerprints. Minnesota, USA, APS Press. 158 p.

- Hakizimana, J.; Gryzehout, M.; Coutinho, T.; Van Den Berg, N. 2011. Endophytic diversity in *Persea americana* (avocado) trees and their ability to display biocontrol activity against *Phytophthora cinnamomi*. Cairns, Australia, Proceedings VII World Avocado Congress. p. 1-10.
- Haran, S., Schickler, H., Oppenheim, A., Chet, I., 1996. Differential expression of *Trichoderma harzianum* chitinases during mycoparasitism. *Phytopathology* 86: 980-985.
- Hardham, A. 2005. *Phytophthora cinnamomi*. *Molecular Plant Pathology* 6:589-604.
- Harman, G. 2000. Myths and dogmas of control. Changes in perceptions derived from research on *Trichoderma harzianum* T-22. *Plant Disease* 84(4):377-393.
- Infante, D.; Martínez, B.; González, N.; Reyes, Y. 2009. Mecanismos de acción de *Trichoderma* frente a hongos fitopatógenos. *Protección Vegetal* 24(1):14-21.
- Lawrence D.; Nouri, M.; Trouillas F. 2019. Taxonomy and multi-locus phylogeny of *Cylindrocarpon*-like species associated with diseased roots of grapevine and other fruit and nut crops in California. *Fungal Systematics and Evolution* 4:59-75.
- Martínez, B.; Infante, D.; Reyes, Y. 2013. *Trichoderma* spp. y su función en el control de plagas en los cultivos. *Protección Vegetal* 28(1): 1-11.
- Morales, J.; Morales, V.; López, J. 2005. El aguacate: Manejo integrado del cultivo. Boletín técnico. Bucaramanga, Colombia, Corpoica. 45 p.
- Palacios, L. 2021. Caracterización de microorganismos asociados a la pudrición de raíces de Aguacate *Persea americana* Mill en viveros del Valle del Cauca, Colombia. Tesis Lic. Palmira, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 45 p.
- Parkinson, L. 2017. Investigating soilborne necrotrophic fungi impacting avocado tree establishment in Australia. Tesis Ph.D. Queensland, Australia, The University of Queensland. 252 p.
- Pedraza, L.; López, C.; Uribe, D. 2020. Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con las plantas. *Acta biológica Colombiana* 25(1):112-125.
- Pérez, R. 2008. Significant avocado diseases caused by fungi and oomycetes. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 2:1-24.
- Ramírez, G.; Morales J. 2013. Primer informe de *Cylindrocarpon destructans* (Zinss) Scholten afectando plántulas de aguacate (*Persea americana* Mill) en Colombia. *Protección Vegetal* 28(1):27-35.
- Ramírez, J.; Castañeda, D.; Morales, J. 2013. Dinámica microbial del suelo asociada a diferentes estrategias de manejo de *Phytophthora cinnamomi* Rands en aguacate. *Ceres* 60(6):11-819.
- Rodríguez, J.; Ríos, Y.; Baró, Y. 2016. Efectividad de cepas de *Azotobacter* sp. y *Bacillus* sp. para el control de especies fúngicas asociadas a hortalizas. *Cultivos Tropicales* 37(1):13-19.
- Royse, D.; Ries S. 1978. The influence of fungi isolated from peach twigs on the pathogenicity of *Cytospora cincta*. *Phytopathology* 68: 603-607.
- Sánchez, I. 2016. Caracterización del agente causal de la pudrición radicular del aguacate y *Trichoderma* sp., como potencial agente de control biológico en Nicaragua. Tesis M.Sc. Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. 62 p.
- Santos, R.; Blume, E.; Brião, M.; Harakawa, R.; Garrido, L.; Rego, C. 2014. Characterization of *Campylocarpon pseudofasciculare* associated with black foot of grapevine in southern Brazil. *Phytopathologia Mediterranea* 53(3):406-415.
- Sarandón, J; Flores, C. 2014. Agroecología: Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. EDULP. 466p.
- Tamayo, P. 2007. Enfermedades de Aguacate. *Politécnica* (4):51-70 p.
- Vargas, C. 2020. Selección de microorganismos antagonistas de fitopatógenos que afectan el cultivo de tomate y papa. Informe Final. San José, Costa Rica. INTA. 29 p.
- Whipps, J M. 1987. Effect of media on growth and interactions between a range of soil-borne glass-house pathogens and antagonistic fungi. *New Phytologist*, 107(1): 127-142.

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL AMBIENTE GENERADO EN CUATRO SISTEMAS PRODUCTIVOS SOBRE EL RENDIMIENTO PRODUCTIVO Y ADAPTABILIDAD DE CUATRO CULTIVARES DE CHILE DULCE TIPO BELL

Roberto Ramírez Matarrita¹

RESUMEN

Evaluación del efecto del ambiente generado en cuatro sistemas productivos sobre el rendimiento productivo y adaptabilidad de cuatro cultivares de chile dulce tipo Bell. Se evaluaron cuatro cultivares de chile dulce tipo Bell (*Capsicum annum*), en dos casas de mallas de 3 y 5 m de altura, un invernadero y en campo abierto, en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez, ubicada en Cañas, Guanacaste, durante los meses de diciembre del 2019 a mayo del 2020. El objetivo de la investigación fue analizar la interacción entre el ambiente y el rendimiento productivo de los cultivares de chile. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de bloques completos al azar, con un arreglo de parcelas divididas. Los sistemas productivos en ambiente protegido obtuvieron en la unidad de muestreo de 6 plantas, el mayor número de frutos comerciales con un rango entre 65,92 a 78,58 unidades, el mejor peso de frutos con valores entre 122,69 a 135,41 g, el mayor rendimiento con una producción entre 6102,29 a 7639,17 g y la mejor calidad de frutos que cumplen con las dimensiones de exportación. En estos mismos sistemas se alcanzó el más notable aumento de biomasa y el mejor desarrollo del índice de área foliar (IAF), con un nivel máximo de 3,41 a los 75 DDT. El clima espontáneo fue muy similar en cuanto a temperatura y humedad relativa, pero varió en los niveles de radiación entre los tratamientos de ambiente protegido y campo abierto.

Palabras clave: Sistema productivo, Cultivares, rendimiento, Agro climatología, Rentabilidad.

Keywords: Production system, Cultivars, Yield, Agroclimatology, Profitability.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del chile es una de las hortalizas más importantes del mundo debido a su amplia variabilidad de formas, colores, aromas, sabores y tamaños (De la Cruz; *et al.*, 2017). En el año 2018, se sembró a nivel mundial 1,99 millones de hectáreas para una producción de 36,77 millones de toneladas de fruta fresca, siendo los países más productores China con un rendimiento de 12,35 millones de toneladas, obtenidas en un área de siembra de 771 634 ha y México con una producción de 1,96 millones de toneladas alcanzada en 156 799 ha (FAO, 2019).

¹ MSc. R. Ramírez, Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: rramirez@inta.go.cr

Según Morales y Rodríguez (2010), citado por Ramírez *et al.* (2018), el rendimiento promedio nacional del chile dulce es de 15 t/ha, lo que significa una media de 0,6 kg/planta (p.14). En la provincia de Guanacaste esta actividad hortícola es una de las de mayor extensión, ya que esta especie se adapta a diferentes entornos, lo que ha motivado a los productores a su siembra (INEC, 2015). Cabe destacar que este cultivo no se escapa de la dinámica de la oferta y la demanda, por lo que no mantiene un precio estable durante el año, lo que hace que en ciertos meses los precios bajen, hasta un 62 % con respecto al mayor valor alcanzado en las plazas ocurridas en el año 2018 en PIMA-CENADA (PIMA, 2018).

Se avecinan nuevos retos en la Región Chorotega, como lo son: construir sistemas productivos resilientes ante las variaciones climáticas, mejorar la competitividad del pequeño y mediano productor; así como aprovechar las oportunidades de comercialización tanto a nivel nacional como

internacional con la apertura del Mercado Regional Chorotega, que tiene como premisa dinamizar la economía de esta región (PIMA, 2020).

La competitividad de los sistemas productivos está ligado a la adaptabilidad y productividad de actividades alternativas que se manejen de manera eficiente y sostenible, con el fin de mejorar la economía del medio rural (Bastidas, 2018). Por lo tanto, se hace imprescindible mejorar las técnicas de producción en ambiente protegido, enfocado en un uso óptimo del recurso hídrico, un aumento del rendimiento productivo y el cumplimiento de los requisitos fitosanitarios de los mayores socios comerciales de Costa Rica, con el fin de ofrecer posibilidades de exportación de chile dulce tipo Bell desde Guanacaste.

El objetivo general fue evaluar el efecto de las condiciones ambientales generadas en 4 sistemas productivos sobre el rendimiento, calidad y adaptabilidad de 4 cultivares de chile dulce tipo Bell.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en Cañas, Guanacaste, (E00411952 y N00258587). Durante el periodo de diciembre del 2019 a mayo del 2020. El sitio, según la clasificación de Holdridge posee una temperatura promedio de 28 °C, una precipitación promedio de 1600 mm y se encuentra a 14 m s.n.m., dentro de la zona de vida Bosque Tropical Seco (Quesada, 2007). Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de bloques completos al azar, con un arreglo de parcelas divididas (DPD) con tres repeticiones. El factor A estuvo determinado por el sistema productivo y el factor B (subparcelas) se le asignó los cuatro cultivares de chile dulce tipo Bell.

Parcela grande (Factor A): sistemas productivos

Casa de malla de 5 m de altura (SP1)

El primer sistema productivo fue una casa de malla de 5 m de altura por 7 m de ancho por 14 m de largo, cerrada tanto en el techo como en las paredes con una malla de cedazo de 32 x 32 (32 huecos verticales / 32 huecos horizontales por pulgada lineal). En el interior del módulo se colocó una pantalla de sombreo a 2,90 m de altura para reducir la radiación.

Casa de malla de 3 m de altura (SP2)

El segundo sistema productivo fue una casa de malla de 3 m de altura por 7 m de ancho por 14 m de largo, cerrada tanto en el techo como en las paredes con una malla de cedazo de 32 x 32 (32 huecos verticales / 32 huecos horizontales por pulgada lineal). En el interior del módulo se colocó una pantalla de sombreo a 2,90 m de altura para reducir la radiación.

Invernadero (SP3)

El tercer sistema productivo fue un invernadero de 7 m de ancho por 14 m de largo por 5 m de altura, la cual dispondrá de una ventana cenital de 0,8 m. El techo estará provisto con un sistema de bandas de plástico de polietileno de 150 micras y las paredes con una malla de cedazo de 32 x 32 (32 huecos verticales / 32 huecos horizontales por pulgada lineal). En el interior del módulo se colocó una pantalla de sombreo a 2,90 m de altura para reducir la radiación.

Parcela sin protección (SP4)

El cuarto sistema productivo fue una parcela de 7 m de ancho por 17 m de largo, la cual no contó con ningún tipo de protección contra la lluvia o la radiación.

Parcela pequeña (Factor B): cultivares de chile dulce

Todos los cultivares de chile dulce fueron de tipo Bell, con maduración a rojo y de forma cuadrada. Dentro de cada sistema de producción (factor A) se colocaron 4 hileras con los cultivares de manera aleatoria que representaron la parcela pequeña.

La combinación de los factores dio como resultado un total de 16 tratamientos (ver Cuadro 1). Las unidades experimentales en el interior de cada sistema productivo, fueron de 10 m de longitud por 0,60 m de ancho para un área efectiva de 6 m², donde se sembraron 25 plantas de cada cultivar en forma aleatoria, a una distancia entre plantas de 40 cm y una separación entre lomillos de 1,20 m para una densidad de siembra de 2,08 plantas/m², resultando 20 833 plantas/ha.

Cuadro 1. Nomenclatura de los tratamientos combinando Factor A y B.

Sistema productivo	Cultivar	Código
Casa de malla de 5 m de altura	Canzion	SP1-01
	Fabris	SP1-02
	Rojo Americano	SP1-03
	Zidenca	SP1-04
Casa de malla de 3 m de altura	Canzion	SP2-01
	Fabris	SP2-02
	Rojo Americano	SP2-03
	Zidenca	SP2-04
Invernadero de 5 m de altura	Canzion	SP3-01
	Fabris	SP3-02
	Rojo Americano	SP3-03
	Zidenca	SP3-04
Parcela sin protección	Canzion	SP4-01
	Fabris	SP4-02
	Rojo Americano	SP4-03
	Zidenca	SP4-04

El riego y la fertilización fueron igual para todos los tratamientos y se realizó mediante un sistema presurizado, el cual empleó cintas de goteo con una descarga de 2,1 l/h y una separación entre emisores de 0,20 m, agregándose diariamente una lámina de 6 mm de agua, que es la evapotranspiración de referencia (ET_o) para esta época del año. Según el resultado del análisis de suelo, el mismo presenta niveles óptimos para todos los elementos, por esta razón la nutrición se calculó en función a un rendimiento esperado de 60 t/ha. El manejo fitosanitario se realizó según la presión de enfermedades y plagas en el momento donde se desarrolló la prueba.

Mediante un muestreo probabilístico al azar, se estimó la muestra en 6 plantas por parcela útil. Los datos obtenidos se le estimaron los componentes de varianza por medio del modelo lineal general y mixto, utilizando un procedimiento de corrección de p-valores mediante la prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (DGC), a un nivel de significancia del 5 %, donde el efecto fijo fueron los sistemas productivos y el efecto aleatorio los cultivares. Las variaciones de datos de temperatura, humedad relativa y radiación se interpretaron en forma gráfica, a través de los valores máximos y mínimos durante cada mes de la prueba; así como las mediciones en promedio durante las 24 horas del día.

Variables de respuesta:

- Rendimiento.** Se cuantificó el rendimiento por parcela, según número de frutos/planta, frutos/m², t/ha, peso promedio de fruto.
- Calidad.** Se utilizó la clasificación utilizada por Del Monte según Carrillo (2016), distribuyendo la producción en primera calidad (largo y ancho mínimo de 7,5 cm x 7,5 cm, sin deformidades), segunda calidad (largo y ancho menor de 7,5 cm x 7,5 cm con puntas deformes, manchas y heridas < 1 cm² y estrías y grietas < 3 cm) y rechazo (largo y ancho menor de 7,5 cm x 7,5 cm, muy deformes).
- Grados Brix.** Una vez clasificado el fruto según los parámetros de calidad, se midió los grados Brix con un refractómetro, en todos los frutos la cosecha en la parcela útil.

- Área foliar:** Se estimó el área foliar por planta en tres estados del cultivo (30, 75 y 120 ddt). Utilizando el modelo matemático no destructivo propuesto por De Swart *et al.*, (2004).
- Índice de Área foliar.** Se calculó mediante la fórmula de Escalante y Kohashi (1993), transformando el área total por planta en centímetros cuadrados (cm²) a metros cuadrados (m²) y se dividirá entre el área efectiva de suelo en (m²).
- Altura de la planta.** Se midió la altura de la planta desde la base del tallo hasta el ápice apical de la planta con ayuda de una cinta métrica; se realizará una sola medición al final del ciclo productivo.
- Temperatura.** Se midió la temperatura en intervalos de cada 10 minutos tanto en el interior como en el exterior de los sistemas productivos durante todo el ciclo del cultivo con un medidor Hobo U12-012.
- Humedad relativa.** Se midió la humedad relativa en intervalos de cada 10 minutos tanto en el interior como en el exterior de los sistemas productivos durante todo el ciclo del cultivo con un medidor Hobo U12-012.
- Radiación.** Se midió la radiación (lux) en intervalos de cada 10 minutos tanto en el interior como en el exterior de los sistemas productivos durante todo el ciclo del cultivo con un medidor Hobo U12-012 y posteriormente se transformó a energía fotosintética activa (PAR) mediante el modelo sugerido por (McCree, 1972), ($1W \cdot m^{-2}$ PAR = 247 lux).
- Contenido de humedad volumétrica** por tratamiento una vez por semana. (Medido con una sonda TDR).
- Evapotranspiración de referencia (ET_o).** Se determinó mediante un tanque evaporímetro clase A, en cada tratamiento, tomado lecturas diarias (mm/día).
- Evapotranspiración del cultivo (ET_c).** Se determinó diariamente multiplicando el ET_o por el KC del momento (mm/día).
- Productividad agronómica del agua** utilizada por riego (WP) (kg m⁻³). La WP se estimó para los rendimientos de fruto comercial (EUA_c) y total (EUA_t), como el cociente entre rendimiento (kg) y la ET_c (m³).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número de frutos por unidad de muestreo

No hubo interacción entre el factor sistema productivo y el factor cultivar ($P > 0,05$), sobre las variables de respuesta número de frutos comerciales y de rechazo, pero si hubo un efecto independiente ($P \leq 0,05$) de ambos factores por separado sobre esta variable.

Los sistemas productivos en ambiente protegido: casa de malla de 5 m (SP1), casa de malla de 3 m (SP2) e invernadero (SP3), obtuvieron el mayor número de frutos con características óptimas para ser comercializables en una muestra de 6 plantas (2,90 m²), con un rango entre 65,92 a 78,58 unidades, los cuales mostraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con los frutos obtenidos en campo abierto (SP4) que fue de 27,33 unidades (ver Cuadro 2).

El tratamiento SP4 fue el que alcanzó el mayor número de frutos de rechazo con 67,50 unidades, el cual presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con los tratamientos SP1, SP2 y SP3 que presentaron valores entre 26 y 31,75 unidades (Cuadro 2). Estos frutos no cumplieron con las normas de clasificación de la calidad de fruta de chile Bell, por presentar deformidades y quemaduras en la cutícula, por lo cual no tienen un valor económico en el mercado.

Cuadro 2. Número de frutos promedio comerciales y de rechazo por parcela de muestreo (6 plantas) según el sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema productivo	N° de Frutas comerciales	N° de Frutas de rechazo
SP3	77,58 a	31,75 b
SP1	66,25 a	24,17 b
SP2	65,92 a	26,00 b
SP4	27,33 b	67,50 a

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

El cultivar Canzion fue el que obtuvo el mayor número de frutos comerciales y de rechazo con valores de 79,92 y 53,67 unidades respectivamente, quien mostró en ambos casos diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con Zidenca, Rojo Americano y Fabris (Cuadro 3).

Cuadro 3. Número de frutos promedio comerciales y de rechazo por parcela de muestreo (6 plantas) según el cultivar. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Cultivar	N° de Frutas comerciales	N° de Frutas de rechazo
Canzion	79,92 a	53,67 a
Zidenca	55,25 b	31,25 b
R. Americano	52,83 b	34,33 b
Fabris	49,08 b	30,17 b

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Las plantas de chile dulce sembradas a campo abierto (SP4), produjeron en promedio un 71 % de frutos que no cumplieron con las exigencias del mercado (rechazo), debido a la presencia de deformaciones o quemaduras en los frutos, provocada principalmente por alta radiación característica de la época seca en Guanacaste, durante los meses de diciembre a abril, ya que estas parcelas no contaron con ningún tipo de protección contra la irradiación solar.

Peso de fruta comercial

La combinación de los factores sistema productivo (A) y cultivar (B), afectó el peso promedio de las frutas de chile dulce, lo que demuestra que existe una interacción entre estas combinaciones ($P \leq 0,05$). En los sistemas de producción de casa de malla de 5 m (SP1), casa de malla de 3 m (SP2) e invernadero (SP3), el cultivar Rojo Americano fue el que obtuvo el mayor peso promedio de frutas que cumplían con los parámetros para comercializarse en el mercado según las normas de clasificación de los Estados Unidos de Norteamérica, con un rango de 122,69 a 135,41 g, el cual mostró diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

El cultivar Fabris en los sistemas de producción anteriormente mencionados, alcanzó el segundo mejor rendimiento de peso por fruta para la misma categoría con un rango de 95,02 a 107,13 g, quien mostró diferencias significativas con el resto de las combinaciones (ver Cuadro 4).

Cuadro 4. Peso promedio (g) de frutos comerciales de cuatro cultivares de chile dulce según, el sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4) y el cultivar. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Interacción SP-Cultivar	Peso (g)
SP2-R. Americano	135,41 a
SP3-R. Americano	132,25 a
SP1-R. Americano	122,69 a
SP3-Fabris	107,13 b
SP1-Fabris	95,60 c
SP2-Fabris	95,02 c
SP3-Zidenca	87,94 d
SP4-R. Americano	86,03 d
SP3-Canzion	83,96 d
SP4-Fabris	80,08 d
SP2-Zidenca	79,41 d
SP1-Zidenca	78,14 d
SP1-Canzion	76,98 d
SP4-Zidenca	74,95 d
SP2-Canzion	72,86 d
SP4-Canzion	69,10 d

Todos los cultivares sembrados en el sistema productivo a campo abierto (SP4), más los cultivares Canzion y Zidenca, indistintamente el sistema productivo donde se desarrollaron, llegó a obtener los menores pesos de fruta promedio con un rango de 69,10 a 87,94 g, lo que mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con el resto de los tratamientos. El cultivar Rojo Americano, fue el que obtuvo el mayor peso de fruta comercial, cuando se sembró en un sistema de ambiente protegido, con una diferencia en promedio de 44,10 g por fruta, con respecto a lo obtenido en campo abierto. Mientras que para el cultivar Fabris, en los sistemas anteriormente descritos, la diferencia promedio de peso fue de 19,17 g.

Peso de frutas de rechazo

Los factores de sistema productivo y cultivar tuvieron un efecto independiente sobre el peso promedio de las frutas de chile dulce de rechazo ($P > 0,05$), donde se presentaron las de mayor peso en los sistemas productivos de ambiente protegido (SP1, SP2 y SP3) con un rango de 63,66 a 70,37 g, las cuales mostraron diferencias significativas con el tratamiento de campo abierto (SP4), cuyo peso promedio fue de 42,51 g (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Peso (g) promedio de frutos comerciales y de rechazo según sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema productivo	N° de Frutas comerciales	N° de Frutas de rechazo
SP3	77,58 a	31,75 b
SP1	66,25 a	24,17 b
SP2	65,92 a	26,00 b
SP4	27,33 b	67,50 a

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Rojo Americano y Fabris fueron los cultivares que desarrollaron los mayores pesos promedios de fruta de rechazo con 74,62 y 64,98 g respectivamente, los cuales presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con Zidenca y Canzion. Estos pesos obtenidos por Rojo Americano y Fabris nos indica que las frutas lograron alcanzar un desarrollo importante, pero no cumplieron con las normativas de calidad, debido a deformaciones o presencia de quemaduras en la epidermis (ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Peso (g) promedio de frutos de rechazo según el cultivar. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Cultivar	N° de Frutas comerciales	N° de Frutas de rechazo
Canzion	79,92 a	53,67 a
Zidenca	55,25 b	31,25 b
R. Americano	52,83 b	34,33 b
Fabris	49,08 b	30,17 b

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Rendimiento

Se dio un efecto independiente ($P > 0,05$) de los factores del sistema productivo (A) y cultivar (B), sobre el rendimiento productivo de frutos de chile dulce obtenidos en la parcela útil.

Todos los cultivares iniciaron la cosecha a finales del mes de febrero, a los 72 días después del trasplante y se extendieron por un periodo de 68 días, hasta inicios del mes de mayo. La producción de chile dulce comercial obtenida en las casas de malla de 3 y 5 m; así como en el invernadero alcanzaron en la parcela útil (6 plantas), en un área de 2,88 m², con un rango de 6102,29 a 7639,17 g, los cuales presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con campo abierto, el cual obtuvo un rendimiento de 2077,71 g (ver Cuadro 7).

El mayor rendimiento productivo de chiles de rechazo se produjo en campo abierto con un valor promedio de 2868,42 g, el cual es estadísticamente diferente ($P \leq 0,05$) a los otros sistemas productivos. Este aspecto nos sugiere que existió una mejor condición agroclimática para el desarrollo fisiológico y de producción de chiles dulces, cuando fueron sembrados en sistemas de ambiente protegido, como las casas de malla o invernadero. En el invernadero se logró el mayor rendimiento total de chile dulce (comercial + rechazo) con 9707,88 g, debido a lo cual presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con el resto de los sistemas productivos.

Cuadro 7. Rendimiento productivo (g) en la unidad de muestreo (2,88 m²) de chile dulce tipo Bell clasificado por calidad de fruta (comercial y rechazo) y total, según el sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema productivo	Chile Comercial (g)	Chile de Rechazo (g)	Rendimiento Total (g)
SP3	7639,17 a	2068,71 b	9707,88 a
SP1	6133,33 a	1479,17 b	7612,50 b
SP2	6102,29 a	1452,04 b	7554,33 b
SP4	2077,71 b	2868,42 a	4946,13 c

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Los cultivares con el mayor rendimiento productivo de chiles comerciales en la parcela útil fueron Rojo Americano y Canzion con 6643,96 y 6278,21 g respectivamente, quienes presentaron diferencias significativas con Zidenca y Fabris. Estos mismos cultivares obtuvieron el mayor rendimiento de chiles de rechazo con valores de 2183,13 y 2477,13 g; así como de rendimiento total, con valores de 8827,08 y 8755,33 g, lo que demostró que en ambos casos hubo diferencias significativas con el resto de los cultivares (ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Rendimiento productivo (g) en la unidad de muestreo (2,88 m²) de chile dulce tipo Bell clasificado por calidad de fruta (comercial y rechazo) y total, según el cultivar. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Cultivar	Chile Comercial (g)	Chile de Rechazo (g)	Rendimiento Total (g)
R. Americano	6643,96 a	2183,13 a	8827,08 a
Canzion	6278,21 a	2477,13 a	8755,33 a
Fabris	4617,13 b	1615,25 b	6232,38 b
Zidenca	4413,21 b	1592,83 b	6006,04 b

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Según las normas de calidad para exportar a los Estados Unidos de Norteamérica (Carrillo, 2016) el chile dulce tipo Bell se puede clasificar en grande y mediano, dependiendo de las dimensiones de ancho y largo de la fruta. Bajo estos parámetros en el invernadero se obtuvo el mayor rendimiento por hectárea de fruto grandes y medianos con valores de 1977 y 24 563 kg respectivamente (ver Figura 1).

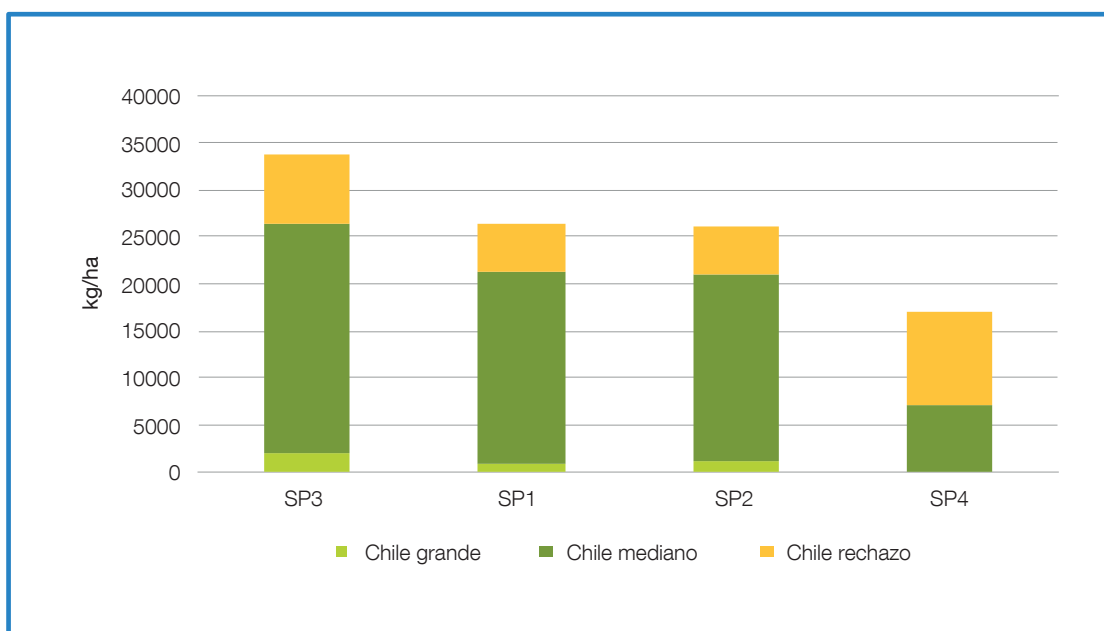


Figura 1. Rendimiento productivo (kg/ha) de frutos comerciales y de rechazo por hectárea en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Este rendimiento supera el promedio mundial de chile dulce de 18 470 kg/ha (FAO, 2019) pero está por debajo de los rendimientos productivos reportados en España, cuando se cultiva en invernadero de 65 000 kg/ha (Reche, 2010) y también por los alcanzados en el mismo centro de Investigación donde se desarrolló esta prueba con una producción total de 39 600 kg/ha, durante el periodo comprendido de octubre 2011 a marzo del 2012, en un invernadero multi capilla (Ramírez *et al.*, 2012).

En la casa de malla de 3 m de altura se logró un rendimiento de frutos grandes y medianos de 1307 y 19 713 kg/ha respectivamente; mientras que, en la casa de malla de 5 m de altura, se situó en 1062 y 20 194 kg/ha correspondientemente. Estos rendimientos, aunque superan el promedio mundial, no alcanzaron los obtenidos en el Estado de Tamaulipas en México, con este mismo sistema productivo, cuando se utilizó el híbrido de chile dulce Bell F1 Abadía con un promedio de 46 000 kg/ha, durante los meses de mayo a agosto del 2013 (INIFAP, 2013). En el sistema productivo en campo abierto, no se produjeron chiles dulces grande y los medianos llegaron a alcanzar un rendimiento promedio de 7220 kg/ha.

Con respecto a la distribución de la producción total, el mayor porcentaje de frutos grandes provino del invernadero (SP3) con 5,86 %, seguido de la casa de malla de 3 m (SP2) con 4,98 % y finalmente la casa de malla de 5 m (SP1) con 4,02 %. En cuanto a los frutos medianos, la mayor proporción se encontró en el SP1 con un 76,40 %, le continuó el SP2 con 75,16 %, posteriormente el SP3 con 72,87 % y finalmente campo abierto (SP4) con 42,04 %. Por su parte la mayor fracción de chiles de rechazo se presentó en el SP4 con 57,96 %, en segundo lugar, el invernadero con 21,26 % y los sistemas de casa de malla SP1 y SP2 obtuvieron un 19,86 %).

Cuando se comparó la información anteriormente expuesta con los resultados obtenidos por Carrillo (2016), en el mismo sitio del estudio durante los meses de julio del 2015 a marzo del 2016, donde se obtuvo una proporción de chiles grandes, medianos y de rechazo de 19,39, 57,02 y 23,35 % respectivamente, con el híbrido de chile dulce Bell F1 Polaris con maduración a amarillo, se pudo apreciar que la relación de frutas de rechazo anduvo muy similar con el actual experimento, pero aunque el porcentaje de chiles comerciales también se comportó parecido, la proporción de frutas grandes fue muy diferente, lo cual se puede deber a la época del año en que se desarrolló la prueba y a la adaptabilidad del material genético.

Longitud de fruta comercial

Se presentó un efecto ($P \leq 0,05$) sobre la longitud de frutas de chile dulce comercial a causa de las variaciones en los niveles de los factores sistema productivo (A) y cultivar (B). El cultivar Rojo Americano obtuvo la mayor longitud de fruta cuando fue sembrado en la casa de malla de 3 m de altura con un promedio de 9,80 cm, el cual presentó diferencias significativas con el resto de los tratamientos. Este mismo cultivar en el resto de los sistemas productivos en conjunto con el cultivar Fabris en los sistemas de ambiente protegido (SP1, SP2 y SP3) alcanzaron longitudes con un rango de 7,52 a 8,27 cm, lo que mostró diferencias significativas con el resto de las combinaciones (ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Longitud promedio (cm) de frutos comerciales de cuatro cultivares de chile dulce, según el sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4) y el cultivar. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Interacción SP-Cultivar	Longitud (cm)
SP2-R. Americano	9,60 a
SP3-R. Americano	8,27 b
SP1-R. Americano	8,20 b
SP3-Fabris	8,06 b
SP1-Fabris	7,75 b
SP2-Fabris	7,71 b
SP4-R. Americano	7,52 b
SP4-Fabris	7,30 c
SP1-Canzion	7,16 c
SP3-Canzion	6,92 c
SP2-Canzion	6,76 c
SP4-Canzion	6,46 c
SP3-Zidenca	6,36 c
SP1-Zidenca	5,77 d
SP4-Zidenca	5,67 d
SP2-Zidenca	5,50 d

El cultivar Zidenca sembrado en los sistemas productivos de casas de mallas (SP1 y SP2) y en campo abierto (SP4) obtuvo la menor longitud de fruta con un rango de 5,50 a 5,77 cm, por lo tanto, resultó ser estadísticamente diferente ($P \leq 0,05$)

al resto de los tratamientos. Según las normas de calidad para exportar a Estados Unidos de Norteamérica, la longitud mínima para clasificarse como chile grande deber ser mayor a 7,5 cm, por tal motivo Rojo Americano, indistintamente del sistema de producción donde se siembre y Fabris en los sistemas de producción de ambiente protegido, cumple con la altura mínima de fruta para ser seleccionados como de talla grande.

Ancho de fruta

No hubo interacción ($P > 0,05$) entre los factores sistema productivo (A) y cultivar (B), por lo que se dio un efecto independiente de los factores sobre la variable ancho de fruta. En los 4 sistemas productivos se obtuvo un ancho de fruta con un rango entre 5,94 a 6,37 cm, sin que se observan diferencias significativas entre ellos ($P > 0,05$). El cultivar que presentó el mayor valor promedio fue Rojo Americano con 6,66 cm, con lo cual mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con el resto de los cultivares (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Ancho promedio de frutos comerciales (cm), según el sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema productivo	Ancho (cm)
SP3	6,37
SP2	6,05
SP4	5,95
SP1	5,94

Al Analizar estos datos, con los de longitud promedio de fruta, nos permitió deducir que los cultivares Rojo Americano, Fabris y Canzion, presentaron una geometría rectangular, mientras que Zidenca una forma cuadrada. Además, se puede apreciar que si bien, los cultivares como Rojo Americano y Fabris cumplieran con la longitud óptima para clasificarse como talla grande, no ocurre lo mismo con el ancho mínimo de esta categoría que es de 7,50 cm, lo que indujo que una gran proporción de la producción se catalogara como mediana (ver Cuadro 11), lo que les resta un valor económico de alrededor de un 50 % por cada kilogramo de fruta.

Cuadro 11. Ancho promedio de frutos comerciales (cm), según el cultivar. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Cultivar	
R. Americano	6,66 a
Fabris	6,08 b
Zidenca	5,83 b
Canzion	5,73 b
Significancia ($p \leq 0,05$)	*

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Grados Brix

No hubo diferencias significativas ($P > 0,05$) en la interacción, ni de forma independiente de los factores sistema productivo (A) y cultivar (B) sobre la variable de respuesta de los grados Brix, la cual presentó una fluctuación de 6,31 a 6,73 °Brix entre los diferentes cultivares.

Aunque las normas de calidad para exportación de chile dulce tipo Bell no especifica el nivel mínimo de grados Brix, al comparar estos datos con los obtenidos por Báez *et al.* (2015), en plantaciones de chile dulce tipo Bell, desarrollados en casas de mallas en Sinaloa, México, los cuales fueron de 8,12 °Brix. Este aspecto evidencia que, con los materiales genéticos y el ambiente agroclimático generado en los sistemas productivos en la provincia de Guanacaste, la calidad de las frutas en términos de concentración de azúcares fue menor, que el obtenido en el norte de México.

Índice de Área Foliar (IAF)

Existe una interacción significativa ($P \leq 0,05$) entre las variables de clasificación sistema productivo y los días después del trasplante (DDT), en los tiempos en que se realizaron los muestreos (30, 75 y 120 DDT), sobre la variable de respuesta, que fue el índice de área foliar (IAF). Mientras que en el factor cultivar se presentó un efecto independiente sobre el IAF ($P \leq 0,05$).

Los mayores IAF promedio en los tres tiempos de muestreo, lo obtuvieron los cultivares Fabris y Canzion con valores de 1,79 y 1,77, por lo que mostraron diferencias significativas con Rojo Americano y Zidenca que desarrollaron un

IAF promedio de 1,62 y 1,61 respectivamente (ver Cuadro 12).

Cuadro 12. Promedio de índice de área foliar (IAF) por cultivar de chile dulce tipo Bell, obtenido en 3 epatas del ciclo productivo (30, 75 y 120 ddt). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Cultivar	IAF
Fabris	1,79 a
Canzion	1,77 a
R. Americano	1,62 b
Zidenca	1,61 b

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

En promedio las plantas de chile dulce sembradas en el invernadero (SP3), la casa de mallas de 5 m de altura (SP1) y de 3 m de altura (SP2), presentaron los mayores IAF de la prueba, a los 75 DDT con valores de 3,41, 2,94 y 2,65 correspondientemente, de modo que obtuvieron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con el resto de las combinaciones entre sistema productivo y tiempo de muestreo (ver Cuadro 13).

La unidad experimental sembrada a campo abierto (SP4), la cual fungió como testigo, tuvo un desarrollo de IAF muy por debajo de los rendimientos anteriormente expuestos, llegando a obtener valores de 0,42, 0,92 y 1,14 a los 30, 75 y 120 DDT respectivamente. El desarrollo del IAF tiene una clara respuesta entre otros factores a los niveles de radiación y temperatura, ya que, a niveles por arriba del límite superior del rango de suficiencia fotosintética, pueden afectar el crecimiento de las plantas, las tasas de transpiración y la posible destrucción de la clorofila (Langhams y Tibbitts, 1997).

Según Giménez (1992), indistintamente del sistema productivo se considera necesario un IAF entre 3 y 4 en el cultivo de chile dulce, para que la interceptación de luz sea de un 95 %, por lo que si comparamos este dato, con los resultados de la presente investigación, se puede deducir que para el mes de marzo a los 75 DDT, las plantas ubicadas en los sistemas en ambiente protegido (SP1, SP2 y SP3), lograron desarrollar una superficie de área foliar lo suficientemente extensa, para no tener limitaciones en la captación de radiación proveniente del sol y su posterior transformación en foto asimilados.

Cuadro 13. Promedio de índice de área foliar de chile dulce, evaluado en tres etapas del ciclo productivo (30, 75 y 120 DDT), según el sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema productivo	DDT	IAF
SP3	75	3,41 a
SP1	75	2,94 a
SP2	75	2,65 a
SP1	120	2,04 b
SP2	120	2,02 b
SP3	120	2,01 b
SP4	120	1,14 c
SP1	30	0,99 c
SP3	30	0,97 c
SP4	75	0,92 c
SP2	30	0,90 c
SP4	30	0,42 d

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$).

Según Castilla (2005), lo normal de una plantación como el chile dulce es que ocurra un crecimiento exponencial de IAF durante la mayor parte del ciclo productivo, por efecto del desarrollo de nuevas hojas en la planta, pero en caso del presente estudio a los 120 DDT en los sistemas productivos de ambiente protegido se presentó una reducción de un 33 % de la biomasa con respecto al segundo muestreo a los 75 DDT. Este fenómeno se debió a un ataque severo del hongo *Sclerotium rolfsii*, lo que confirma lo citado por Lopes y de Ávila (2003), donde indican que un ambiente favorecido por una alta humedad y temperatura del suelo, induce una alta presión de este organismo fitopatógeno, lo cual provoca una muerte descendente, con un alto nivel de defoliación, por tanto, la fase de senescencia del ciclo productivo del cultivo inicia en forma anticipada.

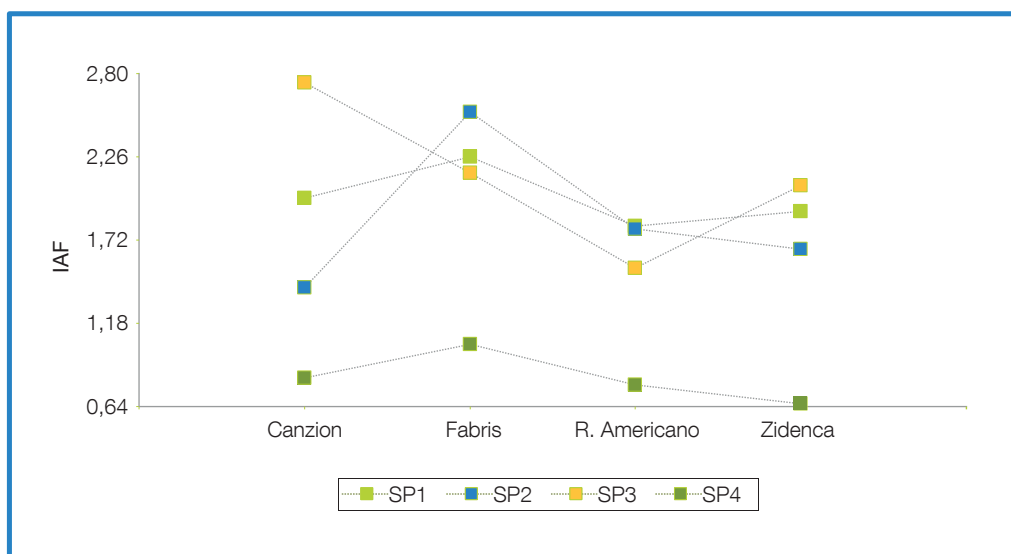


Figura 2. Comportamiento del índice de área foliar (IAF) de cada cultivar de chile dulce tipo Bell, según el sistema productivo donde se sembró: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

La mejor respuesta en cuanto al desarrollo de doseles independientemente del cultivar analizado, se obtuvo en los sistemas productivos en ambiente protegido, el cual llegó a ser hasta 3 veces mayor comparado con el de campo abierto, como fue el caso del cultivar Canzion en invernadero o Rojo Americano que duplicó su IAF cuando se sembró en casa de malla indistintamente de la altura del módulo, lo que indica que los niveles de radiación que llegaron al exterior de estas estructuras, fue contraproducente, ya que según Hanan (1998), las plantas debido a la incapacidad de almacenar todo el almidón producido en la fotosíntesis, una vez que llega al punto de saturación de radiación, provoca que las hojas cesen su actividad asimiladora, por lo que el uso de la cobertura de sombreo para reducir un 50 % la incidencia de la luz sobre el cultivo, fue un método efectivo para revertir esta situación y promover un mayor índice de biomasa (ver Figura 2).

Altura de planta

La mayor altura promedio de las plantas de chile dulce se obtuvo dentro del sistema productivo: casa de malla de 3 m de altura (SP2), casa de malla de 5 m de altura (SP1) e invernadero (SP3) con un rango entre 103,69 a 98,42 cm, de modo que presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) con las plantas sembradas a campo abierto (SP4) (ver Cuadro 14).

Estos resultados indican, que los sistemas productivos en ambiente protegido, generaron un clima espontáneo más óptimo en su interior, para el desarrollo fisiológico de la planta, comparado con el acontecido en campo abierto, lo que favoreció el crecimiento, asociado a un mayor IAF y número de entrenudos, donde se encuentran los meristemos que inducen la floración, que en consecuencia definieron el potencial de producción, aspecto que quedó demostrado, con los rendimientos obtenidos en cada uno de los sistema de ambiente protegido.

Cuadro 14. Altura promedio de plantas (cm) según sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4). (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema productivo	Altura (cm)
SP2	103,69 a
SP1	99,28 a
SP3	98,42 a
SP4	73,83 b

Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba DGC ($p \leq 0,05$)

Temperatura y humedad relativa por hora del día

Las menores temperaturas en todos los sistemas productivos (SP1, SP2, SP3 y SP4), se presentaron en horas de la madrugada (00 a las 06 horas) con valores cercanos a los 25 °C. A partir de las 08 horas la temperatura superó los 31 °C, para llegar a las máximas lecturas a las 14 horas (2 p.m.), con registros promedios de 34,75 °C en la casa de malla de 5 m de altura (SP1), de 36,70 °C en la casa de malla de 3 m de altura (SP2), de 35,81 °C en el invernadero (SP3) y de 35,65 °C en campo abierto (SP4).

Los mayores niveles de humedad relativa que fueron alrededor del 74 %, coincidieron con el mismo horario (00 a las 06 horas) donde se registraron las menores temperaturas del día. Mientras que los menores registros de humedad también concordaron en las horas donde se observaron las mayores temperaturas (09 a las 15 horas). Esta dinámica de la temperatura y humedad relativa despejó las incógnitas de los tiempos en el día en que se puede humidificar el ambiente con el uso de nebulizadores, sin llegar a una higrometría del aire que sobrepase los límites cercanos a la saturación, para así; no promover el desarrollo de organismos fitopatógenos (ver Figura 3).

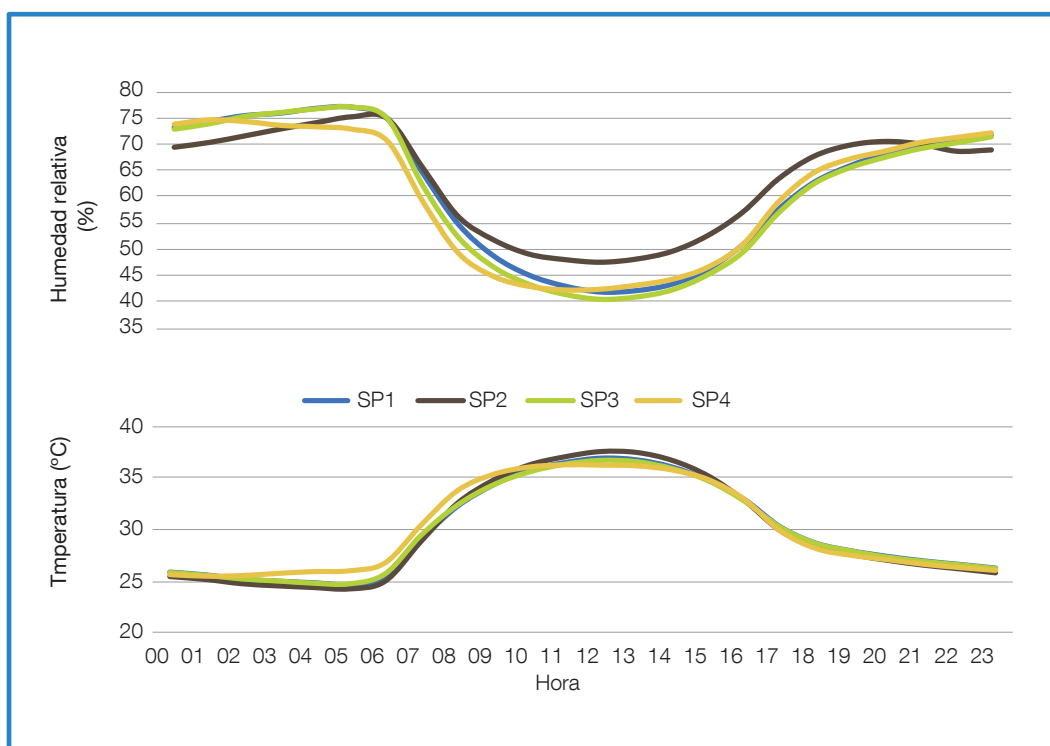


Figura 3. Relación de la temperatura (°C) y la humedad relativa (%) durante las 24 hrs del día registradas en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), de diciembre del 2019 a abril del 2020 (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

La temperatura y humedad relativa, aunque no son inversamente proporcionales, si tienen un estrecho vínculo entre ellos. A partir de las 8 horas iniciaron los cambios más drásticos del día, que provocaron un incremento en la temperatura del 22 % y una disminución de la humedad relativa de un 27 %, después de la salida del sol. Conforme la temperatura promedio llegó a los máximos niveles, a partir de las 10 hasta las 14 horas, la humedad relativa se situó en los niveles más bajos, lo que indica que este periodo de tiempo es cuando se deben intensificar las prácticas de manejo, especialmente lo que se refiere el riego, para mitigar los efectos de la alta temperatura y baja humedad relativa que puede afectar la apertura estomática, limitando la transpiración de la planta y por consiguiente el transporte de agua y nutrientes (Castilla, 2005).

Temperatura mínima y máxima

Las temperaturas mínimas promedio registradas en cada uno de los sistemas productivos fue muy similar, durante todo el periodo en que se realizaron las mediciones (diciembre del 2019 a abril del 2020), con un rango entre 22,53 °C obtenido en campo abierto (SP4) en el mes de diciembre a 24,54 °C en la casa de malla de 5 m de altura (SP1), en el mes de marzo (ver Cuadro 15). Estos datos señalan que durante el periodo de tiempo en que se realizó el estudio las temperaturas mínimas fueron altas, lo que indicó que las madrugadas no fueron tan frías como en otros años.

Cuadro 15. Promedio de temperaturas (°C) mínimas y máximas registradas en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), de diciembre del 2019 a abril del 2020 (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Mes	Temperatura mínima (°C)				Temperatura máxima (°C)			
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP1	SP2	SP3	SP4
Diciembre	23,15	22,75	22,98	22,53	37,49	37,29	36,47	37,53
Enero	23,71	23,35	23,69	23,10	36,88	38,27	37,25	38,53
Febrero	23,60	23,22	23,56	22,87	38,08	38,21	37,73	38,78
Marzo	24,57	24,04	24,54	23,93	38,74	39,54	38,17	39,31
Abril	23,87	23,55	24,09	23,43	40,87	41,44	39,87	41,36
$\bar{X}$	23,78	23,38	23,77	23,17	38,41	38,95	37,90	39,10
Desv.stand.	0,52	0,47	0,58	0,54	1,54	1,60	1,27	1,42

Las máximas temperaturas, indistintamente del sistema productivo se alcanzaron en el mes de abril con valores cercanos a los 40 °C, con lo que se superó el límite óptimo para la mayoría de cultivos hortícolas como el chile dulce que es de 35 °C, para una eficiente respuesta a la actividad fotosintética (Urban, 1997), lo que reveló que los cultivares seleccionados en la prueba, tienen tolerancia para soportar esta temperatura en un lapso de tiempo limitado durante el día.

Humedad Relativa mínima y máxima

El sistema productivo donde se presentó la menor humedad relativa (%) durante el transcurso del día, fue en campo abierto, con un promedio de 35,52 % durante el periodo donde se registraron variables climáticas en el estudio (diciembre del 2019 a abril 2020), mientras que en los sistemas de ambiente protegido se obtuvo una higrometría similar, llegando a 37,82 % en la casa de malla de 5 m de altura (SP1) (ver Cuadro 16), lo que evidenció que a parte de la evaporación del suelo, las plantas tuvieron algún nivel de transpiración, aportando vapor de agua al ambiente, lo que significó que las raíces absorbieron de la solución nutritiva en las horas más calientes del día.

Cuadro 16. Promedio de humedad relativa (%) mínimas y máximas registradas en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), de diciembre del 2019 a abril del 2020 (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Mes	Humedad relativa mínima (%)				Humedad relativa máxima (%)			
	SP1	SP2	SP3	SP4	SP1	SP2	SP3	SP4
Diciembre	44,33	42,17	40,87	42,19	89,60	91,48	90,04	92,61
Enero	40,23	40,71	39,55	37,62	82,41	83,42	82,47	84,88
Febrero	35,25	35,10	35,92	34,10	79,08	80,29	78,95	81,80
Marzo	33,51	31,01	32,36	31,21	72,11	74,65	71,69	74,22
Abril	35,80	32,70	34,61	32,50	89,16	89,71	86,09	89,34
$\bar{X}$	37,82	36,34	36,66	35,52	82,47	83,91	81,85	84,57
Desv.Stand.	4,40	4,91	3,51	4,43	7,32	6,89	7,02	7,11

La mayor humedad relativa promedio de los 5 meses del estudio se presentó en campo abierto (SP4) con 84,57 %, pero los sistemas de producción en ambiente protegido (SP1, SP2 y SP3) alcanzaron valores muy cercanos entre 81,85 y 83,91 % (Cuadro 17). A parte de esto, el rango de la humedad máxima (noche) y mínima (día), demostró lo agreste de las condiciones de humedad en la Región Chorotega, pasando de niveles cercanas al punto de saturación en horas de la noche a higrometrías muy bajas en el día, lo que induce a la planta a una constante apertura y cierre estomático para adaptarse al medio (Castilla, 2005).

Radiación PAR por hora del día

A partir de las 6 horas el único sistema productivo que alcanzó un nivel de radiación óptimo para iniciar el proceso fotosintético fue campo abierto (SP4) con 14,45 $W \cdot m^{-2}$ de radiación PAR. Según Langhams y Tibbitts (1997), los niveles ideales de radiación para cultivos como el chile dulce

oscila entre 12 y 24 $W \cdot m^{-2}$ PAR. Los sistemas de ambiente protegido casa de malla de 5 m de altura (SP1), casa de malla de 3 m de altura (SP2) e invernadero (SP3), estuvieron provistas permanentemente por una pantalla de sombreo de 50 % de reducción de luz, ubicada a 3 m de altura, durante todo el periodo del estudio, por lo que a partir de las 07 horas lograron empezar a captar la energía irradiada por el sol, lo que indica que a tempranas horas del día las plantas en estos sistemas productivos no tuvieron limitaciones para iniciar la producción de foto asimilados.

Desde las 08 hasta las 15 horas se logró registrar niveles de radiación en los sistemas antes descritos, que fluctuaron entre 20,04 a 31,44 $W \cdot m^{-2}$ PAR, lo que indica que las plantas de chile dulce estuvieron cercanas al punto de saturación para potencializar su sistema fotosintético, lo que demostró que en el sitio del estudio los niveles de radiación provenientes del sol, cumplen con los requerimientos de luminosidad del cultivo de chile dulce, aun cuando se utilice un sistema de sombreo (ver Figura 4).

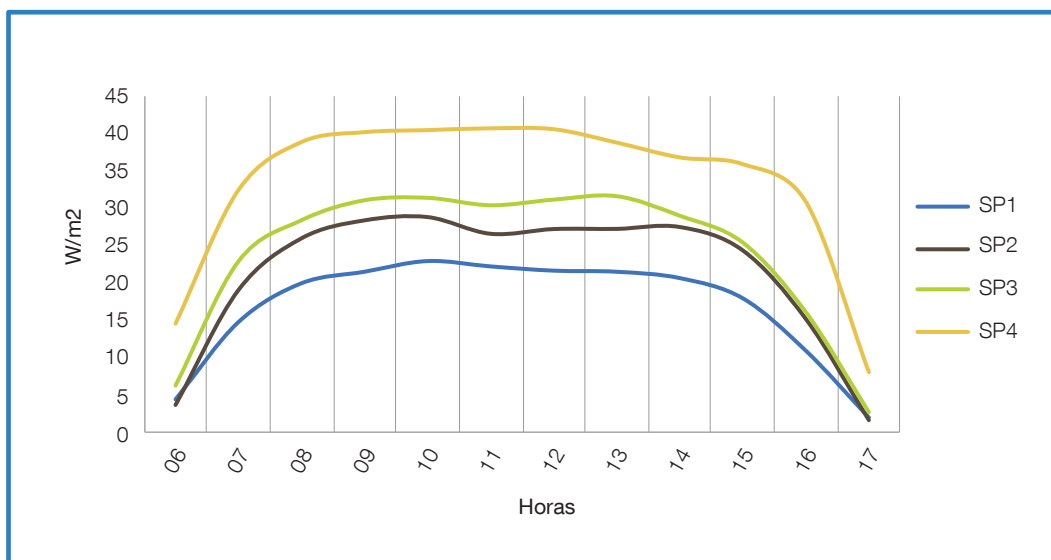


Figura 4. Dinámica de la radiación PAR ($W \cdot m^{-2}$) de las 06 a las 17 horas, en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), de diciembre del 2019 a abril del 2020 (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

En promedio el sistema que redujo en mayor proporción el paso de la luz, con respecto al sistema productivo a campo abierto (SP4), una vez traspasada la cobertura plástica o la malla anti insecto y la pantalla de sombreo fueron: la casa de malla de 5 m de altura con un 49 %, seguido por la casa de malla de 3 m de altura (SP2) con un 36 % y por último el invernadero (SP3) con un 28 %.

Eficiencia del uso del agua

Para determinar la eficiencia del uso del agua en cada uno de los sistemas productivos se midió el contenido de humedad volumétrica del suelo y se determinaron las pérdidas por transpiración de la planta a través de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la evapotranspiración de cultivo (ET_c), para realizar una relación entre el consumo de agua y la producción obtenida.

Humedad volumétrica del suelo

El suelo donde se realizó la investigación se clasificó como franco arcilloso, con una determinación de los parámetros hídricos sobre el contenido de humedad volumétrico en capacidad de campo (CC) de 40 % y del punto de marchitez permanente (PMP) de 21 %.

En el mes de mayo se presentaron los mayores contenidos de humedad volumétrica del suelo, en todos los sistemas productivos, lo que coincide con la mayor incidencia del hongo *Sclerotium rolfsii*, el cual se favorece para su desarrollo y reproducción de condiciones de alta humedad y temperatura del suelo (Lopes y de Avila, 2003). Esto explica la razón del adelantamiento de la etapa de senescencia, en el ciclo de vida del

cultivo de chile dulce, la cual llegó a los 68 días después de iniciada la producción.

En campo abierto (SP4) se presentaron los mayores niveles promedios de humedad volumétrica durante los meses en que se desarrolló la prueba con un 66,27 %. Esta condición se pudo deber a la relación que existió, entre el bajo valor de IAF obtenido en este tratamiento y el limitado potencial de transpiración de vapor de agua a través de las hojas proveniente del suelo, ocasionado por el escaso desarrollo vegetativo, lo que hizo que los sistemas de ambiente protegido (SP1, SP2 y SP3), debido a la modificación de las condiciones ambientales, que favorecieron una mayor crecimiento del área foliar, pudieran aprovechar más el contenido de humedad de suelo para llevar a cabo sus funciones fisiológicas, las cuales se transformaron en un rendimiento productivo superior.

La casa de malla de 5 m de altura (SP1), presentó el menor nivel de humedad volumétrica en el suelo con un rango de 46,30 a 66,78 %, lo que concuerda con el menor registro radiación PAR promedio que ingresó a este módulo. Esto evidenció, que los niveles de evapotranspiración en este sistema productivo fueron mayores que en el resto de los tratamientos de ambiente protegido (ver Figura 5).

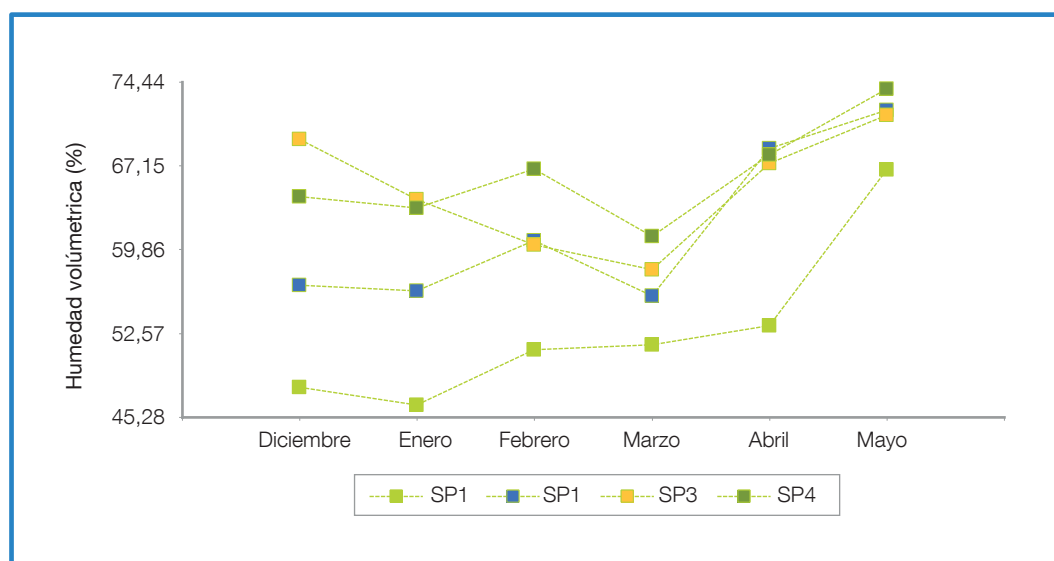


Figura 5. Promedio de humedad volumétrica (%) presente a 20 cm de profundidad en cada sistema productivo: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), desde diciembre del 2019 hasta mayo del 2020. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o), se obtuvo con mediciones diarias en los tanques evaporímetros clase A, ubicados en cada uno de los sistemas productivos en estudio. Estos tanques proporcionaron una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo.

La mayor ET_o se presentó en el sistema productivo de campo abierto (SP4) con un promedio de 4,51 mm, esto debido a que la radiación que llegó a este tanque fue directa, mientras que en los sistemas de ambiente protegido al tener una cobertura plástica o de malla anti insecto y una pantalla de sombreo, provocó que la luz se difuminara y la energía se distribuyera en los tanques, reduciendo la evaporación en un 3 % en la casa de malla de 5 m de altura (SP1), mientras que en la casa de malla de 3 m de altura (SP2) y en el invernadero (SP3) en un 15 % (ver Cuadro 17).

Cuadro 17. Evapotranspiración de referencia (ET_o) promedio de diciembre del 2019 a mayo del 2020, en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), desde diciembre del 2019 hasta mayo del 2020. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Mes	SP1	SP2	SP3	SP4
Diciembre	4,96	4,00	3,86	6,80
Enero	2,80	3,71	2,78	3,84
Febrero	3,92	3,14	4,30	3,60
Marzo	5,04	5,34	4,88	4,72
Abril	4,18	3,44	3,68	3,84
Mayo	4,56	3,38	3,44	4,24
$\bar{X}$	4,24	3,83	3,82	4,51

Evapotranspiración de cultivo (ET_c)

Según el manual 56 de FAO (2006), para el cultivo de chile dulce se considera un K_c de 0,6 para el primer mes después del trasplante, posteriormente hasta un mes antes de finalizar el ciclo productivo el K_c corresponde a 1,15 y por último se concluye con un K_c de 0,90.

La mayor ET_c lo obtuvo el sistema productivo a campo abierto (SP4), con un promedio de 4,38 mm, seguido de la casa de malla de 5 m (SP1) de altura con 4,24 mm y tanto la casa de malla de 3 m de altura (SP2), como el invernadero (SP3) presentaron un promedio de 3,90 mm (ver Cuadro 18).

Estos datos nos indican que la menor demanda evapotranspirativa provino de la casa de malla de 3 m de altura (SP2) y del invernadero (SP3), lo que potencialmente significó un ahorro en el ciclo productivo de 150 días de 720 m³ de agua, comparándolo con el tratamiento a campo abierto (SP4), lo que sugiere que estos sistemas de ambiente protegido no solamente aumentaron el rendimiento productivo, sino también mejoraron las condiciones ambientales para propiciar un menor consumo de agua para riego.

Cuadro 18. Evapotranspiración de cultivo (ETc) luego de aplicar un coeficiente de cultivo (Kc), según sistema productivo evaluado de diciembre del 2019 a mayo del 2020. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Mes	*Kc	SP1	SP2	SP3	SP4
Diciembre	0,60	2,98	2,40	2,31	4,08
Enero	1,15	3,22	4,27	3,19	4,42
Febrero	1,15	4,51	3,61	4,95	4,14
Marzo	1,15	5,80	6,15	5,61	5,43
Abril	1,15	4,81	3,96	4,23	4,42
Mayo	0,90	4,10	3,04	3,10	3,82
$\bar{X}$	-	4,24	3,90	3,90	4,38

* FAO, 2006.

El comportamiento de las fluctuaciones de la ETc en los diferentes meses de las evaluaciones, fue inversa a la dinámica de la humedad volumétrica del suelo, lo que demostró que existe una relación entre ambas variables, por lo que a mayores niveles de ETc, se presentó un aumento en la evaporación del agua contenida en el suelo.

Productividad agronómica del agua utilizada para riego (WP)

La productividad del agua aplicada por riego (WP), es un factor que relacionó el rendimiento productivo y el consumo de agua, lo que nos permitió evaluar la eficiencia del uso del agua para producir los frutos de chile dulce.

El invernadero (SP3) fue el sistema productivo que obtuvo el mayor WP, al tomar en cuenta la totalidad de la producción (frutas comerciales y de rechazo) con un valor de $5,76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, lo que significó que se necesitó de un metro cúbico de

agua para producir 5,76 kilogramos de frutas de chile dulce (ver Cuadro 19).

Los sistemas productivos de casas de mallas de 5 m y 3 m de altura (SP1 y SP2), tuvieron valores de WP de 4,03 y $4,48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ respectivamente, para el total de la producción; mientras que en campo abierto se presentó la mayor demanda de agua para producir un kilogramo de fruta con un WP de $2,61 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Cuadro 19. WP ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), en 4 sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), desde diciembre del 2019 hasta mayo del 2020. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Sistema Productivo	ETc (m^3/ha)	Producción comercial (kg/ha)	Producción total (kg/ha)	WP producción comercial (kg/m^3)	WP total (kg/m^3)
SP1	6554	21256	26432	3,24	4,03
SP2	5854	21021	26230	3,59	4,48
SP3	5849	26540	33707	4,54	5,76
SP4	6574	7220	17174	1,10	2,61

Al comparar los datos alcanzados en esta prueba, con los publicados por González *et al.* (2014), en el cual se determinó una variación entre $3,10$ a $26,20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de WP, para el cultivo de chile dulce en un periodo de 30 años, en Cuba, se puede determinar que los resultados obtenidos se encuentran en el límite inferior de esta escala, por lo que todavía hay margen para mejorar este indicador y aumentar la del uso de agua para riego en este cultivo.

El mayor índice de eficiencia de WP lo obtuvo el invernadero (SP3), al producir 4,13 veces más fruta comercial y 2,21 mayor rendimiento de la producción total por cada metro cúbico de agua consumido, comparado con el sistema de producción en campo abierto (SP4) (ver Figura 6).

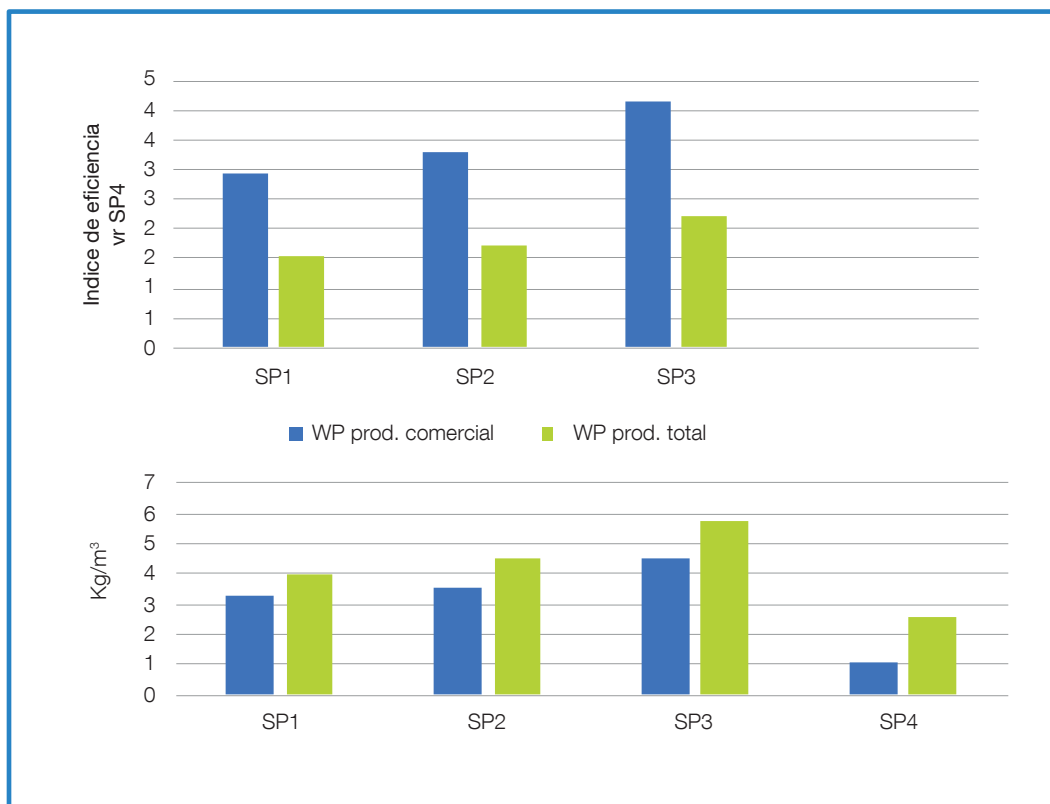


Figura 6. WP ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$), en cuatro sistemas productivos: Casa de malla de 5 m (SP1), Casa de malla de 3 m (SP2), Invernadero (SP3) y Campo abierto (SP4), e índice de eficiencia del WP de los sistemas en ambiente protegido comparado con SP4. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Los sistemas productivos de casas de malla de 5 y 3 m (SP1 y SP2), lograron un índice de eficiencia para frutas comerciales de 2,95 y 3,27 respectivamente, mientras que producción total el indicador se fijó en 1,54 y 1,72 correspondientemente, lo que demostró que la producción de chile dulce en ambiente protegido indistintamente del sistema productivo (SP1, SP2 y SP3), aparte de inducir a mayores rendimientos productivos, aumenta la eficiencia biológica y económica del uso de agua para riego.

LITERATURA CITADA

Báez, M., Contreras, R., Félix, Y. (2015). Análisis de calidad poscosecha de pimiento 'amarillo' producido bajo malla sombra e invernadero de techo retráctil con y sin malla anti-insectos en Culiacán, México. http://www.cravo.com/libs/ckeditor/uploads/file/REPORTE_calidad_poscosecha_de_pimientos_producidos_en_techo_retr%C3%A1ctil_y_malla-sombra.pdf

Bastidas, V. (2018). La estructura organizacional y su relación con la calidad de servicio en centros de educación inicial [Tesis de maestría, Universidad Andina Simón Bolívar]. Repositorio Universidad Andina Simón Bolívar. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6233/1/T2664-MAE-Bastidas-La%20estructura.pdf>

Carrillo, K. (2016). Efecto de la densidad de siembra y el tipo de poda de formación, sobre el rendimiento productivo y la calidad de frutos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) tipo "Bell" bajo ambiente protegido en Cañas, Guanacaste. [Tesis de Licenciatura inédita]. Universidad de Costa Rica.

Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico. Editorial Mundi-Prensa.

de la Cruz-Lázaro, E., Márquez Quiroz, C., Osorio Osorio, R., Preciado Rangel, P., y Márquez Hernández, C. (2017). Caracterización morfológica in situ de chile silvestre Pico de paloma (*Capsicum frutescens*) en Tabasco, México. Acta Universitaria, 27(2), 10–16. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1083>

de Swart, E. A. M., Groenwold, R., Kanne, H. J., Stam, P., Marcelis, L. F. M., Voorrips, R. E. (2004). Non-destructive estimation of leaf area for different plant ages and accessions of *Capsicum annuum* L. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 79(5), 764-770. http://www.jhortscib.org/Vol79/79_5/16.htm

Escalante, E; Y Kohashi, S. (1993). El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Agrociencia.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) a. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. <https://www.fao.org/3/ca6030es/ca6030es.pdf>

Giménez, C.(1992). Bases Fisiológicas de la producción hortícola. Editorial Mundi-Prensa.

Gonzales, F; Herrera, J; López, T; Cid, G. (2014). Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, ISSN -1010-2760, RNPS-0111, Vol. 23, No. 4 (octubre-noviembre-diciembre). Pp. 22-26.

Hanan, J.J. (1997). Greenhouses: advanced technology for protected horticulture (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203719824>

INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2015). VI censo nacional agropecuario. https://admin.inec.cr/sites/default/files/media/reagropecce-nagro2014-ti-006_6.pdf

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2013). Producción de pimiento morrón en casa de malla para el Sur de Tamaulipas. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/942.pdf>

LANGHAMS, R. Y TIBBITTS, T. (1997). Plant growth chamber handbook. USA. Ed. Iowa State University.

Lopes, C Y de Ávila, A. (2003). Doenças do pimentão. diagnose e controle. <https://www.info-teca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/424975/1/cot132.pdf>

McCree, K.J. (1972) Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agricultural Meteorology, 9, 191-216. [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)

Morales, D. Y Rodríguez, R. (2010). Estudio de viabilidad técnica y económica para el desarrollo de opciones de cosecha de lluvia y manejo adecuado en sistemas de riego en la producción agropecuaria. Alternativas rentables productivas por región. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F06-5896.pdf>

Programa Integral De Mercadeo Agropecuario (PIMA). (2020). Mercados Regionales. <http://www.pima.go.cr/mercados-regionales/>

Programa Integral De Mercadeo Agropecuario (PIMA). (2018). Índices estacionales 2018. <http://bpm.pima.go.cr:8080/ap/cm/PG29L2/AuraPortal.aspx>

Quesada, R. (2007). Los Bosques de Costa Rica. IX Congreso Nacional de Ciencias. <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>

Ramírez Martarrita, R., Aguilar Rodríguez, J., Mesa Rodríguez, L. (2018). Adaptabilidad de seis cultivares de chile dulce bajo invernadero en Guanacaste. Alcances Tecnológicos, 12(1), 13 - 23. <https://doi.org/10.35486/at.v12i1.35>

Ramírez, R; Aguilar, J; Meza, L. (2012). Evaluación del rendimiento y adaptabilidad de nueve cultivares de chile dulce (*Capsicum annum* L) tipo Bell bajo cobertura plástica en la Región Chorotega. Archivos Técnicos del INTA.

Reche, J. (2010). Cultivo del Pimiento Dulce en Invernadero. https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160265Cultivo_Pimiento_Invernadero.pdf

Urban, L. (1997). Introduction a la production sous serre. En: CASTILLA, N. Invernaderos de plástico. Editorial Mundi-Prensa.

ANEXOS



Figura 1 Sistemas productivos utilizados en la evaluación, ubicados en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez, Cañas, Guanacaste



Figura 2. Evaluación del desarrollo de la planta de chile dulce (Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez, Cañas, Guanacaste).

EVALUACIÓN *IN VITRO* DE HONGOS ENTOMOPATÓGENOS EN EL CONTROL BIOLÓGICO DEL PICUDO DEL CHILE DULCE *ANTHONOMUS EUGENII* CANO

Vargas-Chacón Cristina¹

RESUMEN

Evaluación *in vitro* de hongos entomopatógenos en el control biológico del picudo del chile dulce *Anthonomus eugenii* Cano. El objetivo fue evaluar la eficacia biológica de hongos entomopatógenos a fin de que sean utilizados en el manejo integrado de la plaga. Un total de 14 hongos de los géneros *Beauveria*, *Metarhizium* y *Paecilomyces*, preparados en una suspensión acuosa a la máxima concentración de conidias que se pudo obtener de cada uno, oscilando entre 1×10^8 a 1×10^9 conidias/mL. Se utilizaron adultos de *A. eugenii* de dos días de emergidos del fruto. Se empleó un diseño irrestricto al azar con 16 tratamientos, cinco repeticiones con cinco insectos cada una. Los insectos se colocaron individualmente en viales de vidrio y se observaron diariamente hasta su muerte y la aparición de micelio sobre el cuerpo. Se obtuvieron diferencias significativas en los porcentajes de mortalidad entre los tratamientos y el testigo. Los mejores resultados se lograron con cepas del género *Beauveria* sp. Las cepas de *Beauveria bassiana*, INTA-H-49 e INTA-H-168 lograron una mortalidad del 100 % después de seis días de haber sido aplicados, pero no se evidenció la emergencia de micelio del cuerpo del insecto, lo que no favorece la diseminación del hongo en el medio ambiente ni la posibilidad de eliminar otros individuos. Las cepas de *Beauveria* sp. INTA-H-140 e INTA-H-181 lograron una mortalidad del 100 % a los 8 días posteriores a la aplicación del tratamiento y produjeron micelio que cubrió el cuerpo del insecto con una abundante formación de conidias, lo cual favorece la diseminación del hongo. Este nivel de parasitismo los constituye en las cepas más promisorias para seguir siendo estudiadas.

Palabras clave: Pimiento, Ají, Barrenillo del chile, Capsicum, Coleóptero, Biocontrol.

Keywords: Pepper, Chili pepper, Pepper weevils, Capsicum, Beetle, Biocontrol.

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: mvargasch@inta.go.cr

INTRODUCCIÓN

El coleóptero *Anthonomus eugenii* Cano es una plaga reglamentaria de interés cuarentenario. Es originaria de México, donde esta ampliamente distribuida, se encuentra además en Estados Unidos, El Salvador, Guatemala, Honduras, Costa Rica y en algunas islas del Caribe (INFOAGRO 2016), Belice, Nicaragua, Panamá, República Dominicana, Cuba, Jamaica (EPPO 2023). Esta plaga ataca principalmente los cultivos del género *Capsicum* y *Solanum*. No se sabe con exactitud cuando se presentó la plaga en Costa Rica por primera vez, pero desde el año 1995 se encuentra información que indica su presencia en las provincias de Alajuela y Heredia. (Coto 1996, EPPO 1998).

Una vez que la plaga este presente en un sitio, su erradicación es muy difícil por las características propias de su ciclo biológico (MAPA 2020), durante el ciclo del cultivo una hembra puede concebir varias generaciones dado su alta fecundidad (350-600 huevos/hembra en su vida y en promedio de 5-7 huevos por día), un ciclo de vida de huevo a adulto de 14 días con una temperatura de 26 y 28 °C y ovoposición de hasta 51 días, capacidad de vuelo y el que las larvas se desarrollan dentro de los frutos en donde completan su ciclo y emergen como adultos (INFOAGRO 2016). Los adultos de *A. eugenii* pueden sobrevivir hasta por 3 meses y en condiciones de bajas temperaturas hasta por 10 meses (EPPO 2023).

En el cultivo de chile dulce o picante, puede ocasionar daños con pérdidas de hasta el 100 % de la fruta. El adulto se alimenta de las hojas e inflorescencias y las larvas de los botones florales y de la parte interna de los frutos produciendo una pudrición, desprendimiento prematuro o deformación del fruto. Las primeras infestaciones en el campo ocurren con las primeras inflorescencias del cultivo y luego se incrementan por la emergencia de adultos entre dos y tres semanas posteriores, logrando entre tres y cuatro ciclos desde el primer brote (INTAGRI s.f.).

En el manejo de la plaga se han utilizado tradicionalmente insecticidas químicos los cuales tienen alto valor económico, contaminan el ambiente, disminuyen la biodiversidad, pueden provocar intoxicaciones y efectos negativos en el

ambiente, a la salud humana y la generación de resistencia a las moléculas utilizadas. Una alternativa a esta práctica es el uso de controladores biológicos los cuales no perjudican al ser humano ni el ambiente (Gutiérrez *et al.* 2013).

Estudios sobre el control biológico de esta plaga son escasos. Sin embargo, hay experiencias con el uso de parasitoides como *Catolaccus hunteri* Crawford, y *Triapsis eugenii*; éste último con un parasitismo de un 30 % se constituyó como el controlador biológico más prometedor (INTAGRI 2016). En el estudio realizado por Rodríguez-Leiva *et al.* (2007) sobre la bioprospección de insectos parasitoides de *A. eugenii* se destacaron como los más promisorios los parasitoides *T. eugenii* y *Urosigalphus* sp. por su especificidad y capacidad de parasitar la plaga en el estadio de huevo. En el estudio realizado por Murillo (2022) el mayor parasitismo reportado en campo (40 %), se obtuvo con *T. eugenii*.

Se ha evaluado la eficacia biológica de la bacteria *Bacillus cereus* (Bac F315), la cual demostró una mortalidad del 92 % contra *A. eugenii* en condiciones controladas en laboratorio (Escobar 2008). En el año 1998 se evaluó en el país, la efectividad de plaguicidas químicos y del hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* contra *A. eugenii*. Para ese año, los plaguicidas químicos producían una mortalidad del 100 % de la plaga. Además, las dosis bajas del insecticida fipronil en combinación con *Beauveria bassiana*, mostraron ser una alternativa de control del picudo del chile, debido a que el químico disponía al insecto al ataque del hongo. Otros plaguicidas químicos no fueron compatibles con el hongo al afectar su viabilidad, por lo que es importante recalcar que el manejo de la plaga con controladores biológicos hay dependencia no solo de su efectividad sino de la compatibilidad con otros insecticidas (Mora 1998).

En el año 2020, se presentaron graves problemas sanitarios en el cultivo de chile dulce debidos a los ataques de la plaga *A. eugenii* así como, los primeros indicios de que la plaga estaba adquiriendo resistencia a los plaguicidas. Para salvar la cosecha, los productores aplicaron químicos en exceso lo cual ocasionó que se

sobrepasaran los límites máximos de residuos (LMR) de los plaguicidas permitidos. El 72 % de las muestras de chile dulce analizadas por el Servicio Fitosanitario de Costa Rica no cumplieron con los LMR, por lo que el cultivo fue considerado el de mayor importancia en el incumplimiento de esta regulación. El mayor incumplimiento se dio con el Fipronil seguido por metamidofós, ometoato, clorpirifos, carbendazina, acefato, oxamil, clorotalonil, procloraz, iprodiona, BAC, propomocrab y profenofós entre otros (SFE 2021).

Es evidente la necesidad de nuevas moléculas químicas eficaces o bien de alternativas biológicas que puedan contribuir al manejo de la plaga. Por ello, el gobierno indica que es fundamental hallar una alternativa de manejo integrado del cultivo que incluya la aplicación de sustancias químicas y de controladores biológicos que permitan el control de *A. eugenii*, plaga considerada actualmente como la que más afecta el cultivo de chile en nuestro país (SFE 2022).

Se han realizado estudios donde algunos hongos entomopatógenos han sido eficaces en el control de *A. eugenii*. Los hongos *B. bassiana* y *M. anisopliae* aplicados en suspensiones acuosas de 1×10^9 conidias/ml, han logrado mortalidades del 80 al 100 % después de cuatro a siete días de aplicados (Barba *et al.* 2020). En el estudio realizado por Samaniego *et al.* (2015), se

sumergieron adultos de la plaga en una suspensión de $1,5 \times 10^8$ conidias/ml del hongo *Metarhizium anisopliae* CBOC 071002 y se logró un parasitismo del 100 % dentro de los 7 días posteriores a la aplicación del tratamiento. En el estudio realizado por García-Carrucini *et al.* (2017) se evaluaron hongos entomopatógenos aislados de la broca del café (*Hypothenemus hampei*) y del picudo del plátano (*Cosmopolites sordidus*) en *A. eugenii*. Se utilizaron suspensiones aproximadas de 1×10^6 conidias/ml de *Beauveria bassiana*, *B. caledonica*, *Paecilomyces fumosorosea* y *P. lilacinus*. El 100 % de la mortalidad de los insectos se alcanzó entre los cuatro y seis días luego de aplicados los tratamientos, mientras que los insectos control lograron sobrevivir hasta por 11 días sin alimentación. En el estudio de Carballo *et al.* (2021) se determinaron las cepas más virulentas de *B. bassiana* aplicando una suspensión de conidias de diferentes concentraciones en adultos de *A. eugenii*.

El objetivo de esta actividad fue evaluar los hongos entomopatógenos de la colección del INTA y algunos productos comerciales, a fin de encontrar alternativas de control biológico que puedan ser útiles en el manejo integrado del cultivo de chile dulce en el país. Además, los hongos promisorios revigorizados fueron almacenados a fin de que su potencial de patogenicidad pueda ser mantenido para futuros estudios en invernadero y campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó durante el periodo comprendido entre agosto del 2021 y setiembre del 2021 en el Laboratorio de Fitoprotección del INTA, San José, Mata Redonda.

En el cuadro 1 se muestra la lista de los tratamientos utilizados, origen de los mismos y la concentración utilizada. Se evaluaron 14 hongos entomopatógenos de los géneros, *Beauveria*, *Metarhizium* y *Paecilomyces*. Cada uno de los hongos fue sembrado en placas Petri, con medio de cultivo comercial agar papa dextrosa (PDA por sus siglas en inglés) y se incubaron a temperatura ambiente hasta

que el crecimiento del hongo abarcó toda la placa. Para la suspensión de conidias, se le agregó a cada placa 5 ml de agua destilada estéril y se raspó el hongo con una hoja de bisturí para soltar las conidias y suspenderlas en el líquido. La suspensión de conidias se vertió en un frasco conteniendo 45 ml de agua destilada estéril. En el caso de los frascos destinados a los tratamientos con el hongo *Beauveria*, el agua se preparó con Tween 20 % al 0,1 % a fin de romper la tensión superficial común con este hongo. La concentración de conidias de cada suspensión se obtuvo mediante el uso de una cámara de conteo de células, tipo Neubauer.

Cuadro 1. Hongos utilizados en la revigorización con *E.eugenii*. San José, 2021.

Trat	Código	Nombre científico	Origen/insecto	Concentración aplicada (conidias/ml)
1	INTA-H31	<i>Beauveria bassiana</i>	Heredia. San Antonio de Belén/ <i>Hypothenemus hampei</i>)	3 x 10 ⁹
2	INTA-H49	<i>Beauveria bassiana</i>	Alajuela, Los Chiles/mosca blanca	1 x 10 ⁹
3	INTA-H181	<i>Beauveria</i> sp.	Limón, Pococí/ <i>Rhynchonphorus</i>	1 x 10 ⁹
4	Testigo 1	NA	NA	NA
5	<i>M. acridium</i>	<i>Metarhizium acridum</i>	México facilitado por OIRSA	1,1 x 10 ⁸
6	INTA-H164	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Facilitado por DIECA	2,6 x 10 ⁸
7	INTA-H51	<i>Metarhizium anisopliae</i>	Comercial	4,0 x 10 ⁸
8	INTA-H159	<i>Paecilomyces</i> sp.	Guanacaste/mosca blanca	1,5 x 10 ⁸
9	INTA-H146	<i>Paecilomyces</i> sp.	Comercial	6,4 x 10 ⁸
10	INTA-H29	<i>Beauveria bassiana</i>	Desconocido	1,1 x 10 ⁹
11	INTA-H168	<i>Beauveria</i> sp.	<i>Rhynchophorus palmarum</i>	1 x 10 ⁹
12	INTA-H149	<i>Beauveria</i> sp.	Alajuela, Grecia /hormiga	1 x 10 ⁸
13	INTA-H19	<i>Paecilomyces cinnamomeus</i>	Puntarenas, Osa/larva de lepidóptero	1,5 x 10 ⁸
14	INTA-H131	<i>Paecilomyces</i> sp.	comercial	1 x 10 ⁹
15	INTA-H140	<i>Beauveria</i> sp.	Desconocido/ <i>Methamasius hemipterus</i>	1 x 10 ⁸
16	Testigo 2	NA	NA	NA

Se recolectaron chiles dulces, de fincas ubicadas en la provincia de Heredia, las cuales reportaron una alta incidencia de la plaga. Los chiles infestados, fueron llevados al laboratorio y colocados en cajas de cría de madera de 70 x 40 cm y dos días posteriores a la emergencia de adultos, se capturó la totalidad de los mismos. Seguidamente, los insectos se dividieron en grupos, a fin de lograr las repeticiones y el número de insectos por repeticiones que se utilizó en el bioensayo.

Se prepararon viales de vidrio con una capacidad de 25 ml a los cuales se les colocó un trozo de papel toalla absorbente en el fondo y un tapón de algodón. Posteriormente fueron autoclavados 15 min a 120 °C y 15 psi.

Se estableció un ensayo irrestricto al azar con 16 tratamientos, cinco repeticiones y cinco insectos por repetición. Los adultos de *A. eugenii*, fueron sumergidos por 10 segundos en la suspensión acuosa de cada tratamiento. Los insectos que correspondieron a los testigos, se sumergieron únicamente en agua con Tween 20 al 0,1 %. Para absorber el exceso de líquido, cada grupo de insectos fue colocado en placas petri

con papel toalla estéril, antes de ser individualizados dentro de los viales.

Los frascos con los insectos fueron colocados en un cuarto a 25 °C. Durante el ensayo únicamente se les suministró agua sin otro tipo de nutriente, tal como lo realizaron Carrucini *et al.* (2017). Diariamente, los insectos fueron observados a fin de determinar el momento de su muerte y la aparición de micelio sobre el cuerpo del insecto. El parasitismo fue confirmado aislando e identificando el hongo dentro del insecto. Este proceso permitió revigorizar su virulencia por lo que seguidamente de la purificación, fueron almacenados en congelación (-20 °C y -80 °C) para su uso en investigaciones futuras.

Los datos de la variable mortalidad, fueron analizados estadísticamente a fin de determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) empleando modelos lineales generales y mixtos y una prueba de separación de medias según Fisher con un nivel de significancia de 0,05 para todas las comparaciones (Di Rienzo *et al.* 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con $p < 0,0001$ y un R^2 de 0,61. En el cuadro 1 se presentan los porcentajes de mortalidades según los días después de la aplicación de los tratamientos. Algunos de los insectos utilizados en los testigos lograron sobrevivir sin alimentación hasta por 16 días. En condiciones naturales el adulto puede vivir de 3 a 4 meses (Elmore *et al.* 1934 citado por Garza 2001) y sin alimento puede sobrevivir de 1 a 3 semanas lo cual coincide con los resultados de este estudio (Intagri 2016).

El día 4 después de aplicados los tratamientos, se presentaron las primeras muertes de los insectos, siendo los tratamientos con el hongo *Beauveria bassiana*, INTA-H-49 e INTA-H-31 diferentes del resto, con porcentajes de mortalidad de 20 y 40 % respectivamente.

Los mejores resultados de mortalidad se dieron con los hongos del género *Beauveria* sp. El día 6 luego de la aplicación de los tratamientos, los hongos INTA-H-149 e INTA H-168, lograron el

100 % de la mortalidad diferenciándose estadísticamente del testigo $p < 0.001$. Todos los insectos testigo, permanecieron activos a esa fecha.

El día 8 luego de la aplicación, los tratamientos INTA-H31, INTA-H49, INTA-H181, INTA-H51, INTA-H146, INTA-H168, INTA-H149, INTA-H-19, INTA-H140 lograron el 100 % de mortalidad con $p < 0.001$ mientras que los testigos apenas alcanzaron una mortalidad máxima del 20 %.

Los tratamientos que tardaron 12 días para lograr la mortalidad del 100 % de la población y que resultaron estadísticamente diferentes al testigo $p < 0.001$, fueron *M. acridum*, INTA-H164 (*M. anisopliae*), INTA-H-159 (*Paecilomyces* sp.) e INTA-H29 (*Beauveria bassiana*).

El tratamiento INTA-H131 (*Paecilomyces* sp.), no se diferenció del testigo y el día 12 luego de la aplicación de los tratamientos, ambos presentaron una mortalidad del 80 %, por lo que se considera que éste hongo no logró el efecto buscado sobre picudo del chile dulce.

Cuadro 1. Mortalidad en porcentaje de *A. eugenii* por diferentes tratamientos, según los días después de la aplicación (dda).

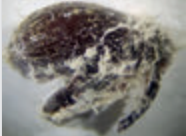
Mortalidad en porcentaje					
TratAM.	2 dda	4 dda	6 dda	8 dda	12 dda
INTA-H-31	0	40	60	100	100
INTA-H-49	0	20	60	100	100
INTA-H-181 (<i>b. bassiana</i>)	0	0	60	100	100
Testigo 1	0	0	0	20	80
<i>M acridum</i>	0	0	0	40	100
INTA-H-164	0	20	40	40	100
INTA-H-51	0	0	0	100	100
INTA-H-159	0	20	20	60	100
INTA-H-146	0	20	20	100	100
INTA-H-29	0	20	40	60	100
INTA-H-168 (<i>b. bassiana</i>)	0	20	100	100	100
INTA-H-149 (<i>b. bassiana</i>)	0	40	100	100	100
INTA-H-19	0	0	0	100	100
INTA-H-131	0	20	40	80	80
INTA-H-140 (<i>b. bassiana</i>)	0	20	40	100	100
Testigo 2	0	0	0	0	80

Es importante destacar que los tratamientos que lograron eliminar el 100 % de la población en el menor tiempo (INTA-H-168 e INTA-H-149) no formaron micelio sobre el insecto ni entre los diferentes segmentos del cuerpo. Al respecto, el mecanismo más común estudiado en para los hongos entomopatógenos, es mediante la adhesión de las conidias (forma infectiva) en las partes blandas del insecto por donde penetra y ramifica sus estructuras invadiendo al insecto hasta que muera y posteriormente hay salida del micelio hacia el exterior del insecto. Sin embargo, con este resultado el mecanismo de acción de estas cepas podría ser diferente, por ejemplo, mediante la producción de algunas toxinas que tienen actividad insecticida o bien que para este aislamiento

en particular, la humedad no fue lo suficientemente alta para que lograra la esporulación hacia el exterior del insecto (Sagar 1999).

Algunos tratamientos, lograron producir una gran cantidad de micelio y conidias fuera del insecto, lo cual es una característica deseable a fin de facilitar la diseminación, establecimiento del hongo en el sitio y el parasitismo de un número mayor de insectos. Esta característica debe de tomarse en cuenta para seleccionar el hongo que se va a aplicar en campo. Las cepas INTA-H-140 e INTA-H-181 sobresalieron en el crecimiento del hongo fuera del insecto con evidente producción de micelio y conidia, lo que los hacen promisorios para ser evaluados en campo (cuadro 2).

Cuadro 2. Producción de micelio y conidias sobre los insectos tratados.

Código	Foto	Porcentaje de insectos con micelio externo	Observación
INTA-H-31 (<i>B. bassiana</i>)		75	Con micelio cubriendo el cuerpo del insecto y presencia de conidias que facilitan la diseminación del hongo
INTA-H-49 (<i>B. bassiana</i>)		80	Micelio envolvente, no evidencia presencia de conidias
INTA-H-181 (<i>Beauveria</i> sp.)		80	Micelio que cubre el cuerpo del insecto con abundante formación de conidias que favorece la diseminación del hongo.
<i>M. acridium</i>		0	Sin micelio ni conidias
INTA-H-164 (<i>M. anisopliae</i>)		40	Micelio entre los segmentos del cuerpo del insecto, con abundantes conidias que facilitan la diseminación del hongo.
INTA-H-51 (<i>M. anisopliae</i>)		0	Sin micelio ni conidias
INTA-H-159 (<i>Paecilomyces</i> sp.)		40	Escaso micelio sobre el cuerpo del insecto, con conidias presentes

Código	Foto	Porcentaje de insectos con micelio externo	Observación
INTA-H-146 (<i>Paecilomyces</i> sp.)		20	Abundante micelio y conidias sobre el cuerpo. Porcentaje muy bajo de insectos que presentan esta condición
INTA-H-29 (<i>B. bassiana</i>)		20	Micelio únicamente en los segmentos del cuerpo del insecto, con pocas conidias.
INTA-H-168 (<i>Beauveria</i> sp.)		0	Sin micelio ni conidias
INTA-H-149 (<i>Beauveria</i> sp.)		0	Sin micelio ni conidias
INTA-H-19 (<i>Paecilomyces cinnamomeus</i> .)		0	Sin micelio ni conidias
INTA-H-131 (<i>Paecilomyces</i> sp.)		0	Sin micelio ni conidias
INTA-H-140 (<i>Beauveria</i> sp.)		100	Micelio que cubre al insecto con abundante formación de conidias que favorece la diseminación del hongo.
Testigo		0	Sin micelio ni conidias

En este estudio se utilizaron las máximas concentraciones del hongo que se lograron en el laboratorio (1×10^8 a 1×10^9 conidias/ml). Sin embargo, en un estudio realizado con otros aislamientos de *Beauveria bassiana* lograron reducir la concentración eficaz a 2.2×10^4 conidias/ml mezclándolo con aceite de soya a una concentración del 3 % además, con esta adición lograron reducir el tiempo de la mortalidad del 50 % de la población de estudio conforme aumentaron la concentración del entomopatógeno (Carballo *et al.* 2021). Se debe valorar en la preparación de los hongos eficientes obtenidos en este estudio una misma concentración, con la incorporación de aceite de soya a fin de mejorar la eficiencia de los tratamientos cuando sean aplicados en los sistemas productivos.

CONCLUSIONES

Los mejores aislamientos para continuar con estudios sobre el parasitismo de hongos entomopatógenos corresponden al género *Beauveria* spp. Los aislamientos INTA-H140 e INTA-H181 fueron los tratamientos más promisorios, ya que lograron eliminar la población en estudio a los 8 días luego de la aplicación y luego de la muerte de los insectos, lograron la producción de micelio y conidias sobre su cuerpo, característica relevante en la propagación y establecimiento del hongo en el sitio de aplicación.

Los aislamientos INTA-H-149 e INTA-H-168 eliminaron los individuos en estudio en 6 días luego de la aplicación. Sin embargo, estos no produjeron micelio ni estructuras infectivas (conidias) externamente. Se deben realizar estudios

detallados para comprobar las mejores condiciones para que estas dos cepas, produzcan dicho micelio o estudiar el mecanismo que están utilizando estas cepas.

Los insectos adultos de *A. eugenii* no tratados con hongos entomopatógenos, lograron sobrevivir entre 14 y 16 días, bajo las condiciones del laboratorio (con agua y sin ningún otro alimento a una temperatura de 25 °C).

Se requieren estudios de eficacia biológica más completos con los cuatro hongos INTA-H149, INTA-H168, INTA-H140 e INTA-H181, aumentando el número de insectos en las repeticiones, con diferentes concentraciones por tratamiento e incorporando aceites en la suspensión de los tratamientos.

AGRADECIMIENTO

A los compañeros de investigación del INTA, Stephany Quirós Campos y Javier Madriz Arrieta por la recolección de frutos afectados con la plaga que hicieron posible realizar este estudio.

LITERATURA CITADA

Barba, A; Aguilera, V; Hirano, M; Gordón, R. 2010. Manejo integrado de *Anthonomus eugenii* Cano (Coleoptera:Curculionidae) en el cultivo de ají. IDIAP (Panamá) 24p. Consultado el 3 may. 2023. Disponible en <https://www.cabi.org/wp-content/uploads/Barba-2009a-IPM-Anthonomus-eugenii.pdf>

Carballo, M; Rodríguez, L; Durán, J. 2021. Evaluación de *Beauveria bassiana* para el control del picudo del chile en laboratorio. Manejo integrado de plagas (Costa Rica). 62:54-59. Consultado el 3 may. 2023. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6257/A2114e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Coto, D. 1996. El picudo del chile (*Anthonomus eugenii* Cano) su reconocimiento y posible manejo. Hoja Técnica Manejo Integrado de plagas (Costa Rica). 42:1-4.

Di Rienzo, J; Casanoves, F; Balzarina, M; González, L; Tablada, M; Robledo, C. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Escobar, P. 2008. Actividad insecticida de bacterias asociadas al cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) y aisladas del *Anthonomus eugenii* Cano como alternativa de control biológico de esta plaga. Tesis de grado. Centro de investigaciones biológicas del Noreste, S.C (CIB). Consultado el 2 may. 2023. Disponible en http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/198/escobar_p.pdf?sequence=1&isAllowed=y

European and Mediterranean Plant Protection organization (EPPO). 1998. EPPO reportin Service N°6-1998. Distribution list for *Anthonomus eugenii* (en línea). Consultado el 3 may.2023. Disponible en <https://gd.eppo.int/reporting/article-3610>

European and Mediterranean Plant Protection organization (EPPO). 2023. *Anthonomus eugenii*. (en línea). Consultado el 2 oct. 2023. Disponible en <https://gd.eppo.int/taxon/ANTHEU/distribution>

García-Garrucini, M; Cartín, V; Estévez, C. 2017. Hongos entomopatógenos nativos con potencial para el control del picudo del pimiento, *Anthonomus eugenii* Cano, en Puerto Rico. *Journal of Agriculture University Puerto Rico* 101:95-106. Consultado el 3 may. 2023. Disponible en <https://revistas.upr.edu/index.php/jaupr/article/download/14296/11887/14086>

Garza, E. 2001. El barrenillo del chile *Anthonomus eugenii* y su manejo en la planicie Huasteca. INIFAP, México. Folleto Técnico N°4. Consultado el 4 may. 2023. Disponible en <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/749.pdf>

Gutiérrez, A; Robles, A; Santillan, C; Ortiz, M; Cambrero, O. 2013. Control biológico como herramienta sustentable en el manejo de plagas y su uso en el estado de Nayarit, México. *Biociencia* 2(3):102-112. Consultado el 2 de may 2023. Disponible en <http://aramara.uan.mx:8080/bitstream/123456789/747/1/CONTROL%20BIOL%20GICO%20COMO%20HERRAMIENTA%20SUSTENTABLE%20EN%20EL%20MANEJO%20DE%20PLAGAS%20Y%20SU%20USO%20EN%20EL%20ESTADO%20DE%20NAYARIT%20M%20C%20XICO.pdf>

INFOAGRO. 2016. Picudo del chile. *Anthonomus eugenii*. Consultado el 2 may 2023. Disponible en <https://mexico.infoagro.com/picudo-del-chile-anthonomus-eugenii/>

INTAGRI. 2016. Manejo integrado del picudo del Chile. Serie Fitosanidad México, N° 54 4p. Consultado el 2 may. 2023. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/manejo-integrado-del-picudo-del-chile>

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). 2020. Programa Nacional para la aplicación de la normativa fitosanitaria. Plan de contingencia de *Anthonomus eugenii* Cano. España. Consultado el 2 may 2023. Disponible en https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/sanidad-vegetal/pnc-anthonomuseugenii_tcm30-544957.pdf

Mora, J. 1998 Uso de *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin como alternativa de manejo del picudo del chile *Anthonomus eugenii* Cano. Tesis de grado. Centro agronómico Tropical de investigación y enseñanza CATIE. Consultado el 2 may. 2023. Disponible en <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/10391/A0425e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Murillo, J. 2022. Potencial de parasitoides para el control biológico de *Anthonomus eugenii* en diferentes variedades de chile. *Avances en Investigación Agropecuaria* 26(2):3-4. Consultado el 2 may. 2023. Disponible en <https://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/agropecuaria/article/view/508/436>

Rodríguez-Leiva, E; Stansly, P; Schuster, D; Bravo-Mosqueda, E. 2007. Diversity and distribution of parasitoids of *Anthonomus eugenii* (Coleoptera: Curculionidae) from Mexico and prospects for Biological Control. *Florida Entomological Society* 90(4):693-702. Consultado el 2 de may. 2023. Disponible en <https://www.jstor.org/stable/20065890>

Samaniego, R; Barahona, L; González, A; Guerra, J. 2015. Evaluación *in vitro* de *Metarhizium anisopliae* para control biológico del picudo del ají. IDIAP. Panamá. Consultado el 3 may. 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/327633952_EVALUACION_IN_VITRO_DE_Metarhizium_anisopliae_PARA_CONTROL_BIOLOGICO_DEL_PICUDO_DEL_AJI/citation/download

Secretaría de agricultura, ganadería y desarrollo rural (SAGAR). 2019. Uso de *Beauveria bassiana* como insecticida microbiano (en línea). Consultado el 2 oct. 2023. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/172882/Ficha_CB_03_Beauveria_bassiana.pdf

Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). 2021. Informe del año 2020. Análisis de residuos de plaguicidas realizados a vegetales frescos. Consultado el 3 may. 2023. Disponible en https://www.sfe.go.cr/DocsResiduosAgroquim/Informe_analisis_de_residuos_de_plaguicidas_2020.pdf

Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). 2022. Informe del año 2021. Análisis de residuos de plaguicidas realizados a vegetales frescos. Consultado el 3 may. 2023. Disponible en https://www.sfe.go.cr/DocsResiduosAgroquim/Informe_de_residuos_de_plaguicidas_2021.pdf

EVOLUCIÓN POBLACIONAL DEL BÚFALO DE AGUA (*BUBALUS BUBALIS*) DURANTE EL PERIODO 1983-2025 EN COSTA RICA

Johnny Montenegro-Ballester¹, Eduardo Barrantes-Guevara²

RESUMEN

Evolución poblacional del búfalo de agua (*Bubalus bubalis*) durante el periodo 1983-2025 en Costa Rica. Con el propósito de desarrollar un modelo de evolución poblacional del búfalo de agua en Costa Rica para el periodo 1983-2025, se recopiló la información de búfalos publicada en Costa Rica hasta la fecha, y con base en ella se determinaron las tasas de mortalidad y reproducción. Se ubicó información en universidades nacionales, INEC, de productores, y de plantas procesadoras de carne. La información fue analizada para extraer parámetros técnicos o estimarlos con los datos publicados y accesados. Basados en la población inicial de búfalos, se desarrolló una hoja Excel para simular la dinámica poblacional considerando las diferentes categorías animales. Con los datos del hato bufalino nacional reportados se realizó la validación del modelo, utilizando como herramienta el RMSE para estimar la certeza de los valores simulados. Los resultados muestran que la producción de información nacional relacionada con estadísticas de esta especie es muy poca, solamente tres publicaciones hacen referencia a la población del hato nacional, y muestran como la población se incrementó significativamente a partir del 2006. El modelo simuló la tendencia observada con un alto grado de certeza según el resultado del análisis realizado con el RMSE, y la proyección realizada muestra una clara tendencia al incremento de la población para el 2025.

Palabras clave: *Bubalus bubalis*, Dinámica poblacional, Tasa de reproducción, Tasa de mortalidad, Modelos.

Keywords: *Bubalus bubalis*, Population dynamics, Reproduction rate, Mortality rate, Models.

INTRODUCCIÓN

El sector ganadero nacional tradicionalmente se ha orientado casi exclusivamente al manejo y producción de los bovinos. Este sector está bien organizado, tanto por su especificidad en sistemas de producción, como también desde el punto de vista organizacional en cámaras de ganaderos y cooperativas.

En el pasado reciente los búfalos comienzan a tomar auge entre los ganaderos. Las características innatas de esta especie han llamado la atención de productores de diferentes zonas del país, quienes ahora los utilizan para producir carne y leche, además del rol que presentan en sistemas de producción agrícola como animales

1 Ph.D., Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA - Instituto Meteorológico Nacional, IMN. Costa Rica. Correos: jmontenegro@inta.go.cr, jmontenegro@imn.ac.cr ORCID: 0000-0001-8526-570X.

2 Master, Universidad Técnica Nacional. Costa Rica. Correo: ebarrantes@utn.ac.cr ORCID: 0000-0002-0383-3388.

de tiro. El interés por esta especie ha crecido, y ante la escasez de los mismos en el mercado nacional, productores han realizado importaciones (Barquero 2007), con el consiguiente incremento del hato nacional.

Lo anterior se produce como resultado del aumento en la demanda a nivel nacional de carne, leche y queso de búfalo (Barquero 2007, López 2019, Núñez 2015), la cual ha estimulado a los productores. Ellos han encontrado en esta especie una alternativa productiva, donde les ha llamado la atención los buenos parámetros técnicos que presenta esta especie. Alta tasa reproductiva, grandes ganancias de peso, rusticidad, facilidad de manejo y adaptación al medio local (Bourne 1988, Almaguer 2007, Rosales 2011, Barboza 2020), así como aspectos relacionados con la calidad de la carne y leche (Núñez 2015, Villegas 2018, López 2019, Gaitán y García 2019) o ecológicos como el caso de recuperación de humedales (Barboza 2020) ha hecho que más productores se interesen en esta actividad.

A pesar de lo anterior, no existe información relacionada con la evolución poblacional, así como tampoco del potencial de crecimiento en el futuro de seguir el interés que se han mostrado en los últimos años los ganaderos por esta especie.

En este sentido, existen investigaciones que muestran datos de población (Rosales y WingChing 2007, Rosales 2011, INEC 2015), y técnicos (Bourne 1988, Barboza y Barrantes 2020). Sin embargo, hasta el momento no existe una herramienta que pueda utilizarse para modelar la evolución poblacional ni para estimar el crecimiento de esta especie bajo los actuales parámetros técnicos. Además, la disponibilidad de información relacionada con datos estadísticos y de parámetros técnicos para esta especie en nuestro país es sumamente reducida, y la que existe se encuentra muy dispersa.

Basado en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un modelo de evolución poblacional del búfalo de agua en Costa Rica para el periodo 1983-2025 utilizando parámetros técnicos nacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se desarrolló en fases. La primera consistió en la búsqueda de bibliografía producida en nuestro país. Para ello se utilizaron las palabras clave tales como: búfalos, sistemas de producción, manejo de búfalos, búfalo de agua, población bufalera. Las búsquedas se realizaron de manera digital en la Universidad de Costa Rica, Universidad Nacional, Instituto Tecnológico de Costa Rica sede San Carlos, así como en Google, de donde fue posible acceder reportes, presentaciones, y artículos de revistas nacionales.

También se realizaron búsquedas de estadísticas utilizando fuentes primarias de datos tales como el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Universidad Técnica Nacional (UTN) y directamente de productores, de los cuales se obtuvieron datos, tanto de población como de diferentes parámetros técnicos de la actividad, así como de importaciones realizadas.

De plantas comerciales de cosecha de carne se logró obtener información de matanza, aunque la misma solo fue posible para el 2019, 2020 y hasta agosto del 2021.

La siguiente fase consistió del análisis de la información recabada para obtener parámetros técnicos. Para ello, la misma se ordenó cronológicamente, y de las diferentes fuentes accesadas se obtuvo información poblacional como también parámetros técnicos. Con los datos reportados se estimaron parámetros técnicos: edad al primer parto, intervalo entre partos, porcentaje de parición y, mortalidad, los cuales se presentan en la sección de resultados.

En la última etapa se desarrolló un modelo de simulación para estimar la dinámica poblacional, y se utilizó para ello una hoja Excel, la cual consideraba: sexo, edad, categoría animal, edad al primer

parto, intervalo entre partos, porcentaje de parición, mortalidad y extracciones, así como también la proporción de machos y hembras en los nacimientos, lo cual se determinó con la información técnica recabada.

El modelo también incluye el aumento del hato debido a la importación de animales en pie. La cantidad y sexo de los mismos se asignaron a la categoría correspondiente en el año o años donde ocurrió el evento.

Para estimar la población de bucerros se utilizó el porcentaje de parición, la edad al primer parto y, el intervalo entre partos, considerando los porcentajes de mortalidad reportados en la literatura nacional, o estimados a partir de información reportada en el país.

Una vez desarrollado el modelo, con los datos poblacionales reportados en la literatura para

años específicos, se validaron los resultados obtenidos con la simulación, al comparar estos con los reportados.

La comparación se realizó en porcentaje, y calculando la raíz cuadrada del error medio (root mean square error: RMSE) para determinar el grado de concordancia con los datos reales, lo cual se realizó según la siguiente ecuación (Barnston, 1992):

$$RMSE_{jo} = \left[\sum_{i=1}^N (z_{fi} - z_{oi})^2 / N \right]^{1/2}$$

Donde:

- Σ = suma
- $(z_{fi} - z_{oi})^2$ = diferencia al cuadrado
- z_{fi} valor simulado
- z_{oi} valor observado
- N = observaciones

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información recopilada

La cantidad de publicaciones efectuadas en Costa Rica relacionadas con información bufalina nacional es sumamente baja. Luego de una metódica búsqueda solamente se logró ubicar 20 publicaciones (Cuadro 1), siendo lo más frecuente los artículos de revista y tesis. El listado de las mismas se puede observar en el anexo 1.

Cuadro 1. Número de publicaciones, según categoría, producidas con datos de Costa Rica.

Medio de publicación	Cantidad
Artículo de revista	7
Tesis	5
Censos	2
Informes	2
Periódicos	2
Presentaciones	2
TOTAL	20

No todas estas publicaciones se relacionan con datos de población del hato bufalino o con información técnica requerida para el desarrollo de índices necesarios para realizar la simulación poblacional. Solo el 50 % de ellas contenían datos numéricos de población, algunos con índices técnicos, y otros con información con la cual se pudieron realizar estimaciones para la obtención de índices reproductivos.

Debido al conocimiento del sector, se pudo contactar a productores que han realizado importaciones de búfalos, obteniéndose de esta forma cantidad, sexo, edad y año de importación, lo cual se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Número de búfalos importados según categoría y año.

Año	Buvillas	Búfalas	Bucerros	Machos adultos
2007	190	230		23
2008		24		
2009	152			
2010		103	33	3
2014		104		

Fuente: consulta a productores.

Análisis de la información recopilada

Existen solo dos publicaciones de estudio de la población nacional en las que se reportan algunos parámetros técnicos, y solamente fue posible la estimación de uno de ellos con los datos proporcionan las publicaciones (Cuadro 3). La tercer publicación, proveniente de un estudio efectuado en una finca, establece otro parámetro. Estos parámetros fueron los que se utilizaron para realizar la modelación de la variación poblacional del búfalo en nuestro país.

Cuadro 3. Parámetros técnicos utilizados en la simulación de la población del hato bufalino nacional.

IEP, días	% parición	Mortalidad bucerros,%	Relación H:M	Mortalidad adultos, %	Fuente
384±5	69*	---	1,3	---	Rosales 2007
380 - 420	80 - 85	2,5 – 3,5	0,82	1	Rosales 2011
		0 – 2,5			Barboza 2020

* Estimación basada en los datos reportados

Desarrollo de la simulación de la dinámica poblacional

La dinámica poblacional simulada muestra que, desde su introducción a nuestro país en 1983 y hasta el 2006, el hato bufalino ha sido muy estable e inferior a 700 cabezas (Figura 1). El crecimiento observado fue de poca magnitud; en términos reales se incrementó en 392 cabezas, pero a nivel porcentual el cambio es significativo (154 %).

A partir del 2006 el hato nacional bufalino inicia una etapa de crecimiento exponencial (Figura 1) motivado por el interés creciente de los productores, quienes son estimulados por la demanda de productos cárnicos y lácteos del búfalo tanto en el mercado nacional como en el internacional

(Almaguer 2007), como por las características productivas y reproductivas de esta especie.

Los datos reportados por Rosales (2007) y Rosales (2011) muestran que esta especie tiene excelente comportamiento reproductivo (Cuadro 3), mientras que los informados por Barboza (2020) señalan muy buenas ganancias de peso (0,82 kg d⁻¹), los cuales hacen de esta especie una excelente alternativa productiva. Similares y aún superiores tasas de reproducción y ganancias diarias de peso son reportadas en otros países (Mendoza y Botero 2001, Hernández-Herrera *et al.* 2018) para esta especie animal.

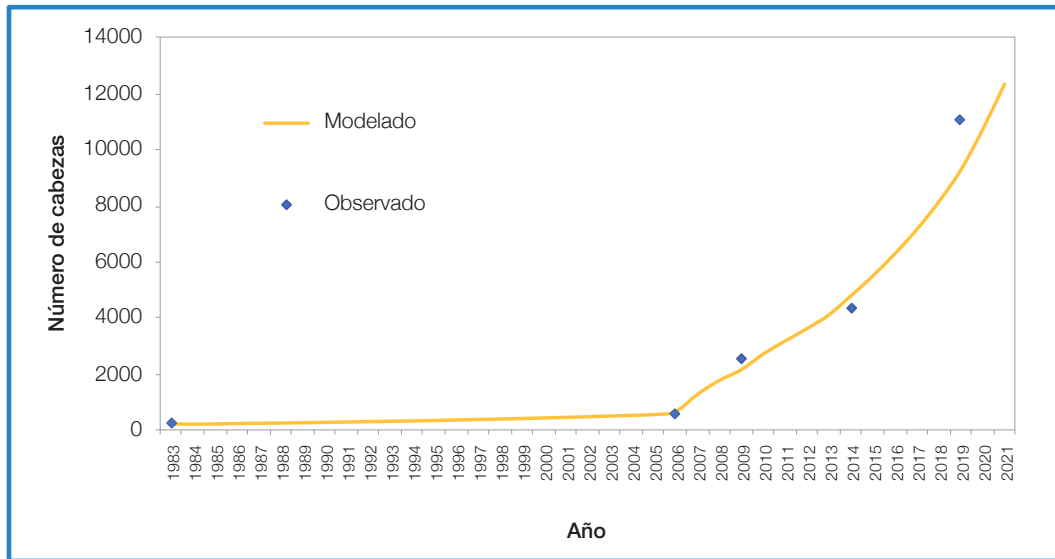


Figura 1. Dinámica poblacional, observada (puntos) y simulada (línea) desde 1983 y hasta el 2021, del búfalo de agua en Costa Rica.

Los datos observados provenientes de diferentes estudios nacionales muestran la clara tendencia al incremento poblacional (Figura 1), siendo el cambio en el hato desde el 2006 y hasta el 2019 de 10 420 cabezas.

Validación del modelo de simulación

La validación del modelo se realizó comparando los datos simulados con los reales reportados en la literatura nacional, para lo cual se utilizó la raíz cuadrada del error medio (root mean square error: RMSE) para determinar el grado de concordancia de ambos grupos de datos. El valor determinado, que se puede interpretar como la desviación estándar de la varianza inexplicada, fue de 12,3 %, el cual es un valor relativamente bajo y muestra que el modelo es bastante preciso realizando la predicción (Soto-Bravo y González-Lutz 2019), lo cual se nota claramente en la figura 1.

Proyección la de población bufalina

De acuerdo con el comportamiento simulado del hato bufalino se realizó la proyección de esta especie hasta el 2025.

Los resultados de la simulación muestran que la población bufalina podría duplicarse en los próximos años (Figura 2) si se continua el manejo como hasta ahora. La simulación proyecta, con

base al comportamiento previo, que el hato nacional podría seguir expandiéndose, lo cual es congruente con lo observado en el campo.

De acuerdo con la simulación, para el 2025 el hato nacional bufalino podría ser de alrededor de 21 000 cabezas.

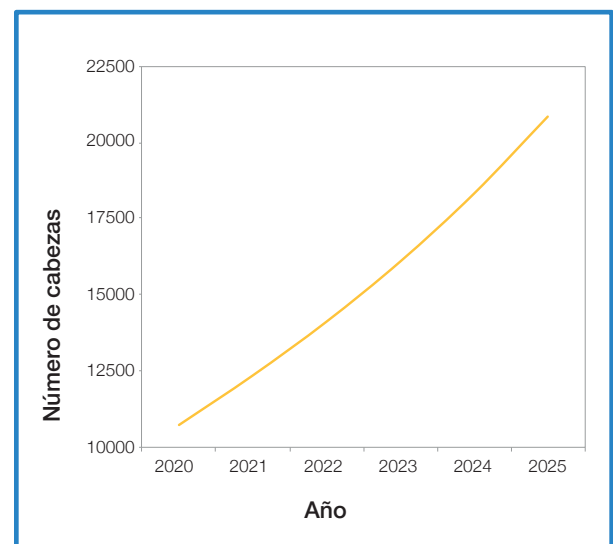


Figura 2. Proyección de la dinámica poblacional hasta el 2025 del búfalo de agua en Costa Rica.

Implicaciones productivas

Aunque no forma parte de los objetivos de esta evaluación, se consideró pertinente la inclusión de una proyección productiva de leche y quesos debido al incremento en la demanda por estos productos. Si bien, también existe gran demanda por productos cárnicos, debido a que no se pudo acceder información relacionada con el peso de los búfalos que se llevan a plantas cosechadoras de carne, no se pudo incluir un análisis en este sentido.

Leche

Una de las razones del crecimiento experimentado por el hato bufalino se explica por el reconocimiento que se le está dando a la leche de esta especie, lo que ha sido comprobado en estudios realizados (Patiño 2011), la cual es utilizada en gran parte para ser convertida a queso.

Debido al crecimiento que se ha experimentado en la demanda de queso, tanto fresco como de mozzarella además de otros productos fabricados con la leche, es importante conocer cuál podría ser el potencial productivo que se puede obtener en Costa Rica dado el crecimiento esperado de la población bufalina.

En este sentido y utilizando información de producción nacional (misma que fue validada con productores de búfalos en actividad denominada Día de Campo Bufalero, UTN, 18 Nov. 2022), la que ha sido estimada en 4 l día⁻¹ búfala⁻¹ durante 250 días de lactancia, se proponen dos escenarios, uno donde se ordeña el 30 % de las búfalas, y otro donde se ordeña el 50 % de ellas, y el total de leche se dedica a la producción de queso mozzarella. Para estos escenarios se utilizó la población simulada de búfalas adultas estimada por el modelo.

Los resultados muestran que, dependiendo de la cantidad de búfalas ordeñadas, la producción de leche se podría incrementar aproximadamente entre 1,1 y 1,8 millones de litros cuando se compara el 2021 con el 2025 (Cuadro 4). En términos diarios, la producción de leche pasaría de 4365 y 7276 l en el 2021 a 7319 y 12 199 l en el 2025 para cada uno de los dos escenarios considerados.

Las anteriores cantidades de leche convertida en queso, utilizando una relación de 4,5 l de leche por kilogramo de queso (4,5:1), totalizaría 594 y 989 t anuales para el 2025 en cada escenario. En términos económicos, la venta de estas cantidades de queso al precio actual, generaría un ingreso de 5,3 y 8,8 millones de dólares anuales en el 2025 considerando un precio de cinco mil colones por kilogramo de mozzarella fresco y una tasa de cambio de ₡560/\$.

Cuadro 4. Proyección de producción anual de leche, t, y queso mozzarella, t, de búfala según escenario de ordeño.

AÑO	Leche, t*	Queso, t*	Leche, t**	Queso, t**
2021	1.593.378	354,1	2.655.630	590,1
2022	1.813.110	402,9	3.021.850	671,5
2023	2.063.158	458,5	3.438.597	764,1
2024	2.347.765	521,7	3.912.942	869,5
2025	2.671.613	593,7	4.452.689	989,5

* Se ordeña 30 % de las búfalas adultas; ** Se ordeña 50 % de las búfalas adultas.

Lo anterior muestra que el sector bufalero tiene un gran potencial productivo, el cual debería ser aprovechado dado el creciente interés por los productos lácteos de esta especie, aspecto que se ha venido reflejando en el aumento de la demanda de estos productos (Barrantes 2017, Barquero 2019).

CONCLUSIONES

Los datos estadísticos y relacionados con parámetros técnicos generados en el país para esta especie son relativamente escasos, por lo que se debe incentivar la recopilación de este tipo de información dado el interés de los productores por expandir el sistema productivo con búfalos. La disponibilidad de mayor y mejor información estadística permitiría, no solo determinar parámetros técnicos con mayor precisión, sino también mejorar aquellos de importancia para la producción.

El modelo de simulación modeló con bastante precisión el desarrollo del hato bufalero nacional, el cual ha crecido sustancialmente, incrementándose significativamente la población principalmente a partir del 2006, y la perspectiva de continuar esa tendencia es muy clara y altamente probable dada las condiciones de mercado que estimula a los productores.

El potencial de producción de productos lácteos es grande, y debe no solamente ser aprovechado, sino también planificado para abarcar diferentes nichos de mercado, tanto a nivel nacional como internacional.

Sería recomendable difundir las propiedades nutricionales de los productos lácteos para favorecer y estimular aún más su consumo, ya que como se mencionó anteriormente, existe el potencial productivo para copar la demanda.

Lo anterior convierte a esta actividad en una alternativa productiva que puede y debe ser no solamente considerada, también apoyada y fortalecida desde el punto de vista técnico para mejorar aún más los rendimientos obtenidos por los productores.

LITERATURA CITADA

- Almaguer, Y. 2007. El búfalo, una opción de la ganadería. Revista Electrónica de Veterinaria, 8(8):1-23.
- Barboza, G.; Barrantes, E. 2020. Sostenibilidad del pastoreo racional con búfalo de agua (*Bubalus bubalis*) en un humedal Tropical: Finca Las Delicias, Guanacaste, Costa Rica. Informe de Investigación UTN. 40 pp.
- Barnston, A. 1992. Correspondence among the correlation, RMSE and Heidke Forecast Verification Measures; Refinement of the Heidke Score. Climate Analysis Center. Notes and Correspondence. Weather and Forecasting 7:609-709. Disponible en: <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Barnston,%20Anthony%20G.,%201992.pdf> Consultado 24 Nov. 2021.
- Barquero, M. 2019. Productos de búfalo ganan consumo poco a poco. Artículo de periódico La Nación. 21 de junio del 2019. Costa Rica.
- Barquero, M. 2007. Búfalos se utilizarán para producir queso especial. Artículo de periódico La Nación. 19 de agosto del 2007. Costa Rica.
- Barrantes, E. 2017. Situación de la Agrocadena del búfalo en Costa Rica. IV Seminario Nacional de Búfalos, Atenas, 22 p.
- Bourne, A. 1988. Evaluación de características reproductivas y productivas de un hato de búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en la región Atlántica de Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Agronomía. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 92 p.
- Gaitán, M, García, M. 2019. Estudio de una línea de elaboración de queso mozzarella ecológico a partir de leche de búfala y de vaca. Tecnología de Industrias Agrarias y Alimentarias, Universidad Politécnica de Madrid. 108 p.
- Hernández-Herrera, G.; Lara-Rodríguez, D.; Velázquez-Luna, P.; Acar-Martínez, N.; Fernández-Figueroa, J.; Velázquez-Silvestre, M. 2018. Búfalo de agua (*Bubalus bubalis*) un acercamiento al manejo sustentable en el sur de Veracruz, México. Agroproductividad, 11(10):27-32.
- INEC. 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. Resultados generales. San José, 146 p.

León, N. 2010. Caracterización físico-química del lomo (*Longissimus dorsi*) de búfalas de agua Murrah x Mediterráneo. Tesis Ing. Agro. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. 71 p.

López, L. 2019. Evaluación del crecimiento, composición de la canal y calidad de la carne de búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en La Vega de Florencia, San Carlos. Tesis Lic. Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 147 p.

Mendoza, G.; Botero, R. 2001. El búfalo de agua (*Bubalus bubalis*), Universidad EARTH, ppt, 26 slides.

Núñez, Z. 2015. Diseño de un sistema de producción de búfalos en pastoreo en la zona sur del país y la fabricación de productos cárnicos y lácteos. Tesis Ing. Industrial. Universidad de Costa Rica. 66 p

Patiño, E. 2011. Producción y calidad de la leche bubalina. Tecnología en Marcha, 24(5):25-35.

Rosales R. 2011. Situación del búfalo de agua en Costa Rica. Tecnología en Marcha, 24(5):19-24.

Rosales, R.; WingChing, R. 2007. Sistemas de producción bufalinos en Costa Rica. I. Cuantificación de la población y caracterización de los sistemas. Agronomía Costarricense 31(2):65-69.

Soto-Bravo, F.; González-Lutz, M. 2019. Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. Agronomía Mesoamericana, 30(2):517-534.

Villegas, D. 2018. Evaluación del rendimiento productivo y calidad de la canal en: Búfalos (*Bubalus bubalis*), Simbrah (F1) y SenepolxBrahman (F1), enteros y castrados, en un sistema estabulado ubicado en Guápiles, Limón. Tesis Lic. Ing. Agrónomo. Universidad de Costa Rica 118 p.

ANEXO 1

Literatura de búfalos producida en Costa Rica

Arias, S. 2010. Repunta producción de búfalos en el país. Boletín de Ciencia y Tecnología, 99:1-4.

Barboza, G. 2011. Bondades ecológicas del búfalo de agua: camino a la certificación. Tecnología en Marcha 24(5):82-88.

Barboza, G.; Barrantes, E. 2020. Sostenibilidad del pastoreo racional con búfalo de agua (*Bubalus bubalis*) en un humedal Tropical: Finca Las Delicias, Guanacaste, Costa Rica. Informe de Investigación UTN. 40 p.

Barquero, M. 2007. Búfalos se utilizarán para producir queso especial. Artículo de periódico La Nación. 19 de agosto del 2007. Costa Rica.

Barquero, M. 2019. Productos de búfalo ganan consumo poco a poco. Artículo de periódico La Nación. 21 de junio del 2019. Costa Rica.

Barrantes, E. 2019. Situación del búfalo en Costa Rica. Presentado en Congreso de ganado bufalino, Upala, 4 y 5 de setiembre, ppt 31 p.

Barrantes, E. 2017. Situación de la Agrocadena del búfalo en Costa Rica. IV Seminario Nacional de Búfalos, Atenas, ppt 22 p.

Bourne, A. 1988. Evaluación de características reproductivas y productivas de un hato de búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en la región Atlántica de Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Agronomía. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 92 p.

Díaz, C.; WingChing, R.; Rosales, R. 2009. Factibilidad del establecimiento de un sistema de producción de engorde búfalos en pastoreo. Agronomía costarricense 33(2):183-191.

Fuentes, E.; Cardona, J. 2014. Digestibilidad de la materia seca *in situ* de cuatro forrajes tropicales en búfalos y bovinos de carne en la Región Huetar Norte, Costa Rica. Revista CES Medicina veterinaria y zootecnia 9(2):355.

INEC. 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. Resultados generales. San José, 146 p.

León, N. 2010. Caracterización físico-química del lomo (*Longissimus dorsi*) de búfalos de agua Murrah x Mediterráneo. Tesis Ing. Agro. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. 71 p.

López, L. 2019. Evaluación del crecimiento, composición de la canal y calidad de la carne de búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en La Vega de Florencia, San Carlos. Tesis Lic. Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 147 p.

Molina-Sánchez, R. 2019. Cría y desarrollo del búfalo de agua en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Revista Tecnología en Marcha, 13(5):67-69. <https://doi.org/10.18845/tm.v13i0.2878>

Núñez, Z. 2015. Diseño de un sistema de producción de búfalos en pastoreo en la zona sur del país y la fabricación de productos cárnicos y lácteos. Tesis Ing. Industrial. Universidad de Costa Rica. 66 p.

Rosales R. 2011. Situación del búfalo de agua en Costa Rica. Tecnología en Marcha, 24(5):19-24.

Rosales, R. 2009. El búfalo de agua en Costa Rica. Una alternativa para la producción de leche y carne. ECAG informa, 50:14-18.

Rosales, R.; WingChing, R. 2007. Sistemas de producción bufalinos en Costa Rica. I. Cuantificación de la población y caracterización de los sistemas. Agronomía Costarricense 31(2):65-69.

Varela, E.; Cardona, J. 2012. Evaluación de un método de crianza artificial de becerros (*Bubalus bubalis*) descendientes de las razas Murrah y Mediterránea, en la Región Huetar Norte de Costa Rica. (FECHA APROXIMADA, NO DICE DONDE PUBLICÓ) 6 p.

Villegas, D. 2018. Evaluación del rendimiento productivo y calidad de la canal en: Búfalos (*Bubalus bubalis*), Simbrah (F1) y SenepolxBrahman (F1), enteros y castrados, en un sistema estabulado ubicado en Guápiles, Limón. Tesis Lic. Ing. Agrónomo. Universidad de Costa Rica 118 p.

Zava, M. 2013. Crece el interés por la cría de búfalos en Costa Rica. La Nación, p. 11.

POTENCIAL USO DE MICROORGANISMOS ANTAGONISTAS DE FITOPATÓGENOS QUE AFECTAN EL CULTIVO DE TOMATE Y PAPA¹

Cristina Vargas-Chacón²

RESUMEN

Potencial uso de microorganismos antagonistas de fitopatógenos que afectan el cultivo de tomate y papa. El objetivo fue evaluar la potencial eficacia biológica de bacterias endofíticas y rizosféricas, sobre patógenos de plantas solanáceas. Se aislaron los fitopatógenos *Ralstonia solanacearum*, *Pectobacterium carotovorum*, *Fusarium oxysporum* y *Rhizoctonia solani*, de plantas con síntomas de enfermedad. Se evaluó la inhibición del crecimiento de estos fitopatógenos con 61 aislamientos de bacterias del género *Bacillus* spp., aisladas de las raíces y tallos de solanáceas y la bacteria INTA-B37 de la colección del INTA, la cual en estudios anteriores demostró la eficacia biológica con fitopatógenos. Se determinó el halo de inhibición en mm en las evaluaciones con las bacterias fitopatógenas y el porcentaje de inhibición en caso de los hongos. Se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos $p < 0.01$. La mayor inhibición de la bacteria *R. solanacearum* la ejerció el aislamiento BP31 y *P. carotovorum* fue significativamente inhibida por los aislamientos BP8 e INTA-B37. El tratamiento con INTA-B37 fue el que mayor porcentaje de inhibición logró contra *F. oxysporum* y *Rhizoctonia solani*, 60,5 % y 69 % respectivamente. El tratamiento con BP16, fue el que obtuvo la mayor reducción en la producción de estructuras de resistencia de *R. solani* (45 %), con relación al testigo y un porcentaje de inhibición del crecimiento del hongo en un 45.73 %. Tanto la bacteria BP16 e INTA-B37 demostraron un efecto inhibitorio en el crecimiento de los cuatro fitopatógenos evaluados. Se evidencia que existen alternativas biológicas, que pueden valorarse en campo, para ser incorporadas en el manejo integrado de las enfermedades causadas por los fitopatógenos estudiados.

Palabras clave: Control biológico, Solanaceae, Halo de inhibición, Porcentaje de inhibición.

Keywords: Biologic control, Solanaceae, Inhibition, Percentage inhibition.

INTRODUCCIÓN

Muchas de las enfermedades en los cultivos de papa y tomate son debidas a hongos y bacterias habitantes del suelo las cuales, en sistemas de cultivo convencionales, tradicionalmente se controlan con el uso de agroquímicos sintéticos. Las bacterias *Ralstonia solanacearum* y *Pectobacterium carotovorum* (anteriormente llamada *Erwinia carotovora*) y los hongos *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani*, son fitopatógenos de

¹ FITTACORI e Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica.

² Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: mvargasch@inta.go.cr.

ambos cultivos, causan pérdidas económicas al productor y representan un problema mayor para los agricultores orgánicos o para aquellos que desean reducir el uso de agroquímicos.

R. solanacearum es el agente causal de la marchitez bacterial o Maya en tomate causando una muerte rápida del cultivo (Chavez 2010; López 2016). En papa también produce la marchitez bacteriana o podredumbre parda (Rueda-Puente *et al.* 2014). La bacteria *P. carotovorum* produce pudrición suave o necrosis de la médula en tomate (López 2016) y pudrición del tallo y tubérculo en papa (Acuña *et al.* 2015). El hongo *Fusarium oxysporum* es uno de los fitopatógenos de mayor importancia agrícola por contar con una amplia gama de cultivos que afecta, algunos de alta restricción como el FocR4T del cultivo de banano y que no tiene cura. Tiene muchas formas especiales según los géneros de plantas que enferman. Se trata de un hongo que tiene varios mecanismos metabólicos que le permiten permanecer en el suelo por largo tiempo, entre ellos están el rápido crecimiento micelial, la producción de microconidias, macroconidias y clamidosporas, esta última es una estructura de resistencia de paredes gruesas que le permite al hongo permanecer vivo aún en condiciones adversas (Arbeláez 2000). Este hongo se caracteriza por causar marchitez, tizones y pudriciones en diferentes cultivos (Villa-Martínez *et al.* 2014) entre ellos la papa y el tomate. El fitopatógeno *Rhizoctonia solani* es un hongo que causa la necrosis del tallo en tomate y papa además de sarna o costra negra en tubérculos de papa (Escalona *et al.* 2011, Guedez *et al.* 2012).

Para el control de fitopatógenos de suelo, como los mencionados, tradicionalmente se han utilizados agroquímicos sintéticos. Sin embargo, se han estudiado bacterias como las del género *Bacillus*, que forman relaciones simbióticas benéficas con las plantas que favorecen los mecanismos de defensa contra fitopatógenos. Estas bacterias se pueden encontrar en la rizósfera o dentro de los tejidos vegetales (Narula *et al.* 2009) y producen sustancias bioactivas que pueden inhibir el crecimiento e incidencia de estos fitopatógenos mediante diferentes rutas metabólicas, muchas de ellas aún desconocidas (Ferrera y Alarcón 2001, Manzi y Mayz 2003, Monroy y Lizarazo 2010).

Otra de las características de las bacterias del género *Bacillus* spp., y que las hace interesantes para su estudio en el entorno de cambio climático en que vivimos, es que tienen la capacidad de crecer en condiciones ambientales desfavorables (Radhakrishnan *et al.* 2017) son bacilos Gram positivos, móviles, facultativos, forman esporas elipsoidales y pueden mantenerse vivas y reproducirse a temperaturas que van desde los 5 °C hasta los 45 °C (Blanco 2008). Se les reconoce su capacidad biocontroladora por sus múltiples mecanismos como la antibiosis, competencia por nutrientes e inducción de resistencia sistémica en plantas (Chowdhury *et al.* 2015, Fan *et al.* 2017). Con el estudio de estas bacterias se pueden seleccionar alternativas para el control biológico en la reducción de químicos y posiblemente como opción en los sistemas de producción orgánica o en transición. Por lo anterior, el objetivo de esta actividad fue evaluar la potencial eficacia biológica de bacterias endofíticas y rizosféricas, sobre patógenos de plantas solanáceas

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Servicios de Fitoprotección del INTA de marzo del 2019 a agosto del 2020.

Se aislaron los microorganismos fitopatógenos de plantas de tomate y papa con síntomas de enfermedad. Los hongos fueron aislados en

placas Petri con el medio de cultivo comercial, agar papa dextrosa (PDA) acidificado con ácido láctico al 25 % en la cantidad suficiente para lograr un pH de 5.0. Las bacterias fueron aisladas en placas Petri con el medio de cultivo comercial agar nutritivo (AN), sin ningún aditivo.

Aislamiento de bacterias provenientes de plantas sanas

Para el aislamiento de microorganismos endófitos y rizosféricos se tomaron muestras, en Oreamuno de Cartago y en Zarcero de Alajuela, de plantas de papa visiblemente vigorosas y sanas, las raíces con suelo y tallo fueron depositados en bolsas plásticas y se llevaron al laboratorio a fin de aislar aquellos microorganismos con potencial uso en el control biológico de enfermedades.

Una vez en el laboratorio, las raíces se sacudieron un poco a fin de dejar solo una pequeña cantidad de suelo adherida y con ayuda de un pincel, ese suelo rizosférico fue depositado en una placa Petri estéril. Se siguió el método descrito por Niedmann (2006), el cual utiliza la pasteurización como proceso selectivo de bacterias termorresistentes, como lo son las del género *Bacillus* spp, las cuales producen esporas que les permiten resistir estos cambios bruscos de temperatura. Para ello, se pesó 1g de suelo rizosférico y se colocó en un tubo de ensayo con 10 ml de agua destilada estéril. Seguidamente, el tubo se colocó en un baño maría a 65 °C por 30 minutos luego de los cuales se pasó inmediatamente a un baño de hielo, donde se mantuvo por 30 min. Transcurrido ese tiempo, se transfirieron 10 ml a un tubo cónico de 2 ml y se agregaron 190 ml de agua destilada estéril. Finalmente, con un asa bacteriológica se tomó una asada y se rayó por dilución en una placa Petri con el medio comercial agar Luria Bertani (LB) y se incubó a 28 °C por 24 horas, a fin de obtener un crecimiento de bacterias separadas. Las bacterias fueron observadas por la morfología de la colonia, bordes, elevación, color y se repicaron separadamente en placas Petri con agar LB, se les asignó un código y se almacenaron a -20 °C hasta su uso.

Para el aislamiento de microorganismos endófitos se tomaron los tallos y raíces de plantas sanas, se lavaron con abundante agua potable y se pasaron a una solución de hipoclorito de sodio al 3.5 % por dos minutos. Seguidamente, se lavaron tres veces con abundante agua destilada estéril y se colocaron sobre servilletas estériles para eliminar el exceso de agua. El material vegetal fue colocado en placas Petri estériles, se cortaron en trozos de aproximadamente 0.5 cm de longitud y se sembraron en placas Petri con agar nutritivo (AN).

Las placas fueron incubadas en oscuridad a 30 °C por 2 a 5 días. Los microorganismos que crecieron fueron aislados en colonias individuales. Una vez puros, se almacenaron a -20 °C hasta su uso.

Tinciones y pruebas bioquímicas

A las bacterias aisladas se les realizó las tinciones de Gram y de esporas. Además, se les realizó las pruebas bioquímicas de catalasa y oxidasa a fin de confirmar que pertenecían al grupo de los bacilos esporulados, los cuales son Gram positivos, producen esporas, son catalasa positivo y oxidasa negativo.

Para la tinción de Gram, se realizó un frotis de la bacteria pura, de 24 h de cultivada, en un portaobjetos y se fijó pasándola varias veces por la llama. Seguidamente, se le colocó el tinte cristal violeta y se dejó por un minuto y se lavó con agua de tubo. Posteriormente, se dejó secar y se cubrió con la solución de lugol durante un minuto. Se eliminó el exceso de lugol y se decoloró con metanol al 95 %, se lavó con abundante agua y finalmente se agregó el colorante safranina por medio minuto, luego se lavó con agua y se dejó secar. Las bacterias Gram positivas se tiñeron de color violeta-azul y las Gram negativas de rosado.

Para la tinción de esporas un frotis de la bacteria fijado en la llama, se cubrió con el colorante verde de malaquita y se aplicó vapor de agua durante 5 minutos, luego se lavó con abundante agua de tubo y se le agregó el colorante safranina por un minuto, luego del cual se lavó con agua y se dejó secar. Al observar la lámina en el microscopio de luz, en el lente de inmersión de 100X, se observaron las esporas de color verde.

Para la prueba de catalasa, se colocó una colonia de la bacteria de 24 h sobre un portaobjetos y se le agregó unas gotas de peróxido de hidrógeno. Las bacterias catalasa positivo producen burbujas al agregar el peróxido.

Para la prueba de oxidasa, una colonia de la bacteria de 24 h se colocó sobre una tira de reacción de oxidasa. Las bacterias oxidasa positiva produjeron un color azul-negro y las negativas no produjeron ningún color.

Pruebas preliminares

Dado el gran número de bacterias con potencial biocontrolador aisladas, se realizaron pruebas preliminares a fin de seleccionar, mediante observación de la reducción del crecimiento radial de hongos fitopatógenos y la formación de halos de inhibición con bacterias fitopatógenas. Estas pruebas se realizaron por duplicado. Las bacterias con mayor potencial para ser usadas en el control biológico fueron utilizadas para realizar los bioensayos.

La metodología de las pruebas preliminares y las del bioensayo fue igual, excepto porque en las preliminares se realizan por duplicado en una misma placa Petri y su evaluación fue cualitativa; mientras que en los bioensayos se realizaron más repeticiones en placas diferentes y la valoración fue cuantitativa.

Método para evaluar el efecto de bacterias aisladas de plantas sanas sobre hongos fitopatógenos

Se colocó un disco del hongo fitopatógeno (crecido previamente en PDA), de aproximadamente 5 mm de diámetro en el centro de una placa Petri con el medio de cultivo PDA sin ácido. Seguidamente, se trazó una línea con la bacteria (de 48 horas de crecimiento previo), a cada lado del disco central a una distancia de 2,0 cm del borde de la placa (Figura 1). En el caso del hongo fitopatógeno de rápido crecimiento *R.solani*, la bacteria se colocó un día antes que el hongo. Los platos se incubaron a temperatura ambiente durante 3 a 6 días (según fue la velocidad de crecimiento del hongo).

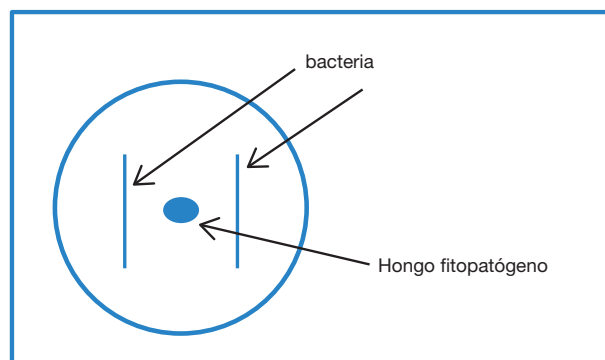


Figura 1: Ubicación de los microorganismos en la prueba de antagonismo.

La inhibición del crecimiento del hongo se evaluó para las pruebas preliminares, observando la inhibición del crecimiento radial del hongo y para los bioensayos se cuantificó el porcentaje de inhibición, para lo cual se midió la expansión de micelio R2, comparado con los controles en la misma placa (R1, lados sin bacteria) mediante la fórmula de Whipps (1987): $(R1-R2)/R1 \times 100$ (Figura 2).

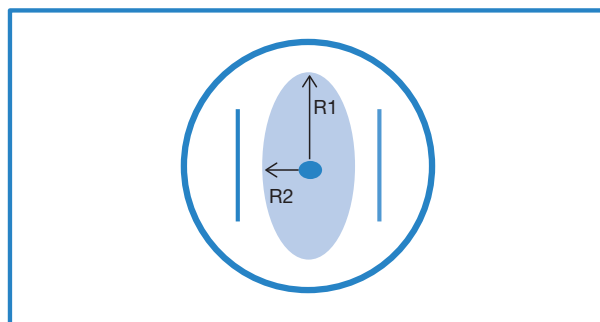


Figura 2: Líneas de medición para determinar el porcentaje de inhibición de crecimiento.

Método para evaluar el efecto de bacterias aisladas de plantas sanas sobre bacterias fitopatógenas

Para determinar este tipo de antagonismo se siguió el principio de estudio de doble capa propuesto por Dopazo (1988) con una modificación (uso de luz UV por 2 horas en lugar de cloroformo para matar la bacteria).

Las bacterias aisladas de plantas sanas, se cultivaron en caldo nutritivo comercial (CN) durante 18-24 horas hasta tener un crecimiento abundante, observable por la turbidez que alcanza el tubo. En una placa Petri con agar nutritivo, se colocaron tres gotas de 10 ml de la bacteria cultivada y se incubaron durante 4 días a temperatura ambiente. Luego de la incubación, se colocaron las placas bajo la luz ultravioleta por 2 horas a fin de matar la bacteria y solo dejar sus metabolitos. En la metodología original de Dopazo (1988) las bacterias se matan con vapores de cloroformo, pero dado que no se dispone de capilla de extracción, se realizó con luz UV a fin de evitar los vapores del solvente en el ambiente.

Con la bacteria fitopatógena, se preparó una solución bacteriana con el estándar de McFarland 2 equivalente a 6×10^8 UFC/ml y se agregó a un medio de cultivo tibio de AN, en una proporción del 10 %, y se agregó una segunda capa de 7 ml aproximadamente (segunda capa) sobre la placa Petri que contenía la bacteria muerta (primera capa) y se dejó gelificar. Los platos se incubaron por 2 a 4 días a temperatura ambiente. Pasado este tiempo se observó la existencia de halos alrededor de la colonia “benéfica”, lo cual es indicativo de la actividad antibacteriana de los metabolitos producidos. En el caso de las pruebas preliminares, solo se observó la presencia o ausencia de halos de inhibición y en los bioensayos se midió el halo de inhibición en cada repetición.

Bioensayos y pruebas estadísticas

Luego de las pruebas preliminares se seleccionaron las bacterias que evidenciaron mayor actividad antagonista, con las que se establecieron cuatro bioensayos, uno para cada fitopatógeno aislado. Se evaluaron siete tratamientos, incluido el testigo y cada tratamiento con seis repeticiones. Los tratamientos se dispusieron en un diseño irrestricto al azar.

Las variables a evaluar fueron: el halo de inhibición en el caso de bacterias fitopatógenas y el porcentaje de inhibición con los hongos fitopatógenos.

Para el hongo fitopatógeno *R.solani* además del porcentaje de inhibición se determinó el número de estructuras de resistencia (esclerocios) característicos de este hongo, producidos al tercer día de establecido el ensayo.

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) para las variables de tamaño y porcentajes de inhibición empleando modelos lineales generales y mixtos y una prueba de separación de medias según Fisher a una probabilidad de $p < 0,05$ para todas las comparaciones (Infostat 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se aislaron dos bacterias y dos hongos fitopatógenos de las plantas enfermas. Las bacterias fitopatógenas identificadas fueron *Ralstonia solanacearum* causante de la marchitez bacteriana en papa y en tomate (también conocida como maya) y *Pectobacterium carotovorum*, causante del pie negro en el tallo y la pudrición blanda en tubérculos de papa y el tallo suave o necrosis de la médula en tomate y los hongos aislados fueron *Fusarium oxysporum* causante de la marchitez fungosa o vascular en papa y tomate y *Rhizoctonia solani* agente causal de la necrosis del tallo en tomate y papa además de sarna o costra negra en tubérculos de papa.

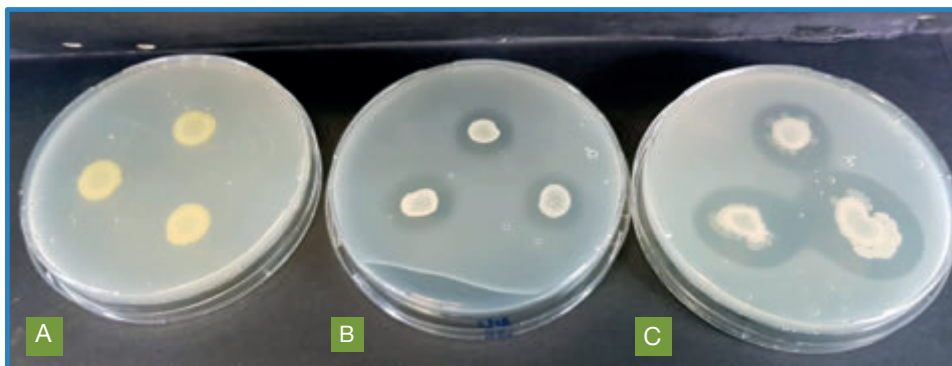
En total se aislaron 102 bacterias de plantas sanas de las cuales, se seleccionaron 61 aislamientos que, mediante las tinciones de Gram, esporas y las pruebas bioquímicas, catalasa y oxidasa fueron caracterizadas como bacterias del grupo de los *Bacillus* spp., al ser Gram positivas, producir esporas, y ser catalasa positivo y oxidasa negativo (Figura 3). Las esporas formadas por algunas de las bacterias aisladas fueron tan grandes (3-4mm), desde el punto de vista microbiológico, que no fue necesario tñirlas con verde de malaquita para poder ser observadas al microscopio a aumento de 100X.



Figura 3. Pruebas ejecutadas para selección de *Bacillus* spp. A) oxidasa negativo reacción sin color. B) oxidasa positivo, reacción con color. C) catalasa positivo con formación de burbujas. D) bacterias bacilares Gram positivos con endosporas.

Pruebas preliminares de bacterias del grupo *Bacillus* spp., sobre bacterias fitopatógenas

La formación de un halo de inhibición alrededor de la bacteria del grupo *Bacillus* spp., fue indicativo de que producto de su metabolismo se excretaron sustancias que se dispersaron por el medio de cultivo en forma radial y que impidieron la reproducción de la bacteria fitopatógena, en el área donde lograron llegar dichos metabolitos. En la figura 4, se observan los diferentes resultados obtenidos con la técnica utilizada. En el centro de las placas se encuentra la bacteria *Bacillus* spp., y lo opaco corresponde a la segunda capa que contiene la bacteria fitopatógena.



Bacillus spp.: Puntos centrales de crecimiento en las placas Petri.

Bacteria fitopatógena: área turbia en las placas Petri.

Metabolitos de *Bacillus* spp., con efecto antagonístico: Halo alrededor de los *Bacillus* spp.

Figura 4. Reacciones de inhibición. A) no hay inhibición. B) y C) hay inhibición en grado ascendente.

Pruebas preliminares de bacterias del grupo *Bacillus* spp., sobre hongos fitopatógenos

En la evaluación del efecto de bacterias contra hongos fitopatógenos, se observó una reducción en el crecimiento radial de hongo, así como un halo en el sitio donde se dispersaron los metabolitos excretados por la bacteria, que impiden el crecimiento del hongo (figura 5). Se observa en la figura 5a, que la bacteria BP8 liberó sustancias que inhiben el desarrollo del hongo *R. solani*, mientras que BP 41 no inhibe dicho desarrollo. En la figura 5b, la bacteria benéfica inhibió el crecimiento radial de *F. oxysporum* observándose un crecimiento alargado hacia donde la bacteria no está presente y en la figura 5c, se observa que la bacteria colocada a los lados del hongo no produjo sustancias inhibitorias del crecimiento, por lo que el hongo logró un crecimiento radial continuo e incluso el micelio se sobrepuso y sobrepasó a la bacteria.

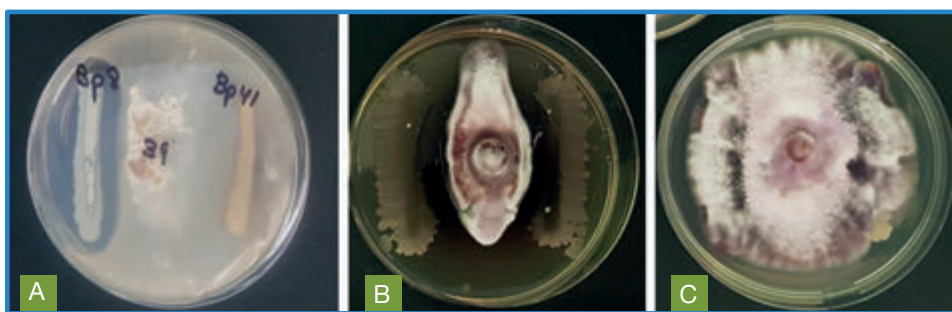


Figura 5. Inhibición de hongos fitopatógenos por efecto de metabolitos liberados por bacterias benéficas. A) bacteria PB8 inhibiendo el crecimiento del hongo *R. solani*, mientras que BP 41 no lo inhibe. B) efecto inhibitorio de una bacteria sobre *F. oxysporum*. C) hongo fitopatógeno sobrepasando el crecimiento bacterial.

En el cuadro 1 (anexo 1), se presentan el detalle de resultados de las pruebas preliminares. Un total de 23 *Bacillus* spp., produjeron halos de inhibición contra la bacteria fitopatógena *R. solanacearum* y solamente tres lo hicieron con *Pectobacterium carotovorum* (BP16, BP37 y B60).

Un total de ocho bacterias limitaron el crecimiento radial de *F. oxysporum* y cinco bacterias limitaron el crecimiento radial del hongo *Rhizoctonia solani*. Se debe destacar que las bacterias codificadas como BP8 y BP 16 lograron inhibir ambos hongos.

La bacteria BP16 presentó una inhibición en el crecimiento de tres de los fitopatógenos estudiados, lo cual la hace muy promisoría para continuar el estudio con otros microorganismos fitopatógenos.

Estos resultados preliminares indican que, si bien solo se tomaron muestras de dos zonas geográficas, la biodiversidad bacteriana de uso benéfico fue bastante grande a pesar de que solo se trabajaron bacterias del género *Bacillus* por lo que existe un gran potencial en nuestro país para trabajar con bacterias que tienen un efecto antagónico contra bacterias y hongos fitopatógenos. Como se observa en el anexo 1, el número de bacterias del género *Bacillus* spp., con efecto antagónico contra bacterias fitopatógenas fue mayor que contra hongos fitopatógenos. En el

INTA se ha trabajado por largo tiempo en el control biológico mediante el uso de hongos benéficos contra hongos fitopatógenos, pero los estudios con bacterias benéficas han sido escasos y en su mayoría han sido con productos comerciales, por lo que este estudio preliminar nos da una base para profundizar en el estudio de bacterias biocontroladoras existentes en diferentes sistemas agroecológicos.

Las bacterias que no presentaron ninguna inhibición con los fitopatógenos estudiados, pueden seguirse estudiando, ya que como se observa en el cuadro 1, los *Bacillus* spp., tuvieron un efecto variable con los patógenos evaluados, y eventualmente podrían tener un efecto benéfico con fitopatógenos diferentes a los incluidos en este estudio. Además, su acción benéfica podría ser la producción de sustancias que contribuyen a la sanidad y desarrollo de la planta, que la hacen más resistente a la presencia de fitopatógenos en el ecosistema. Al respecto, el trabajo realizado por Corrales y colaboradores (2017) indica que este tipo de bacterias puede formar asociaciones con la planta que contribuyen a la fertilización de los cultivos, favoreciendo el crecimiento vegetal produciendo enzimas que solubilizan fósforo, fijan nitrógeno o producen hormonas reguladoras del crecimiento. También se ha determinado, que algunas bacterias pueden inducir o encender los mecanismos de defensa de la planta (García 2014, Pedraza 2020).

Bioensayos

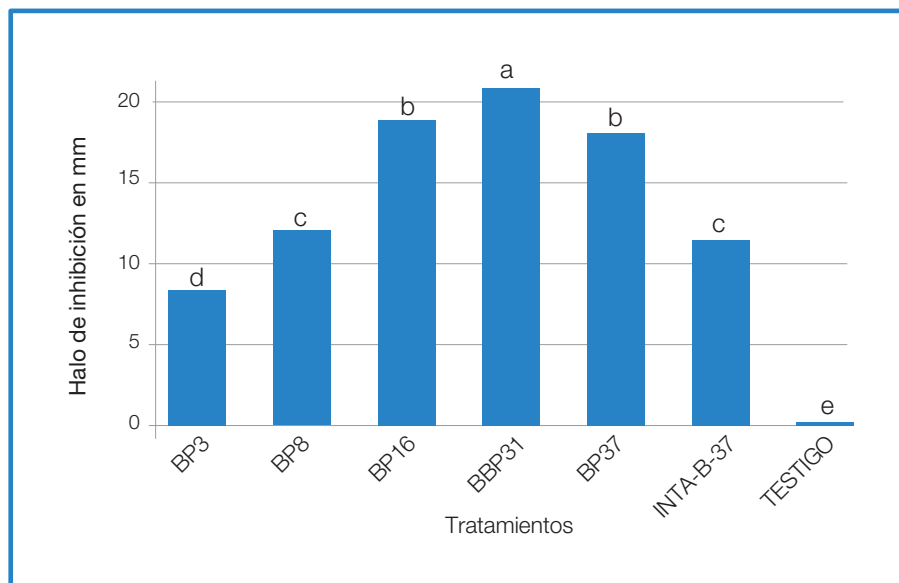
A partir de los resultados del estudio preliminar, se escogieron las seis bacterias indicadas en el cuadro 2. Las bacterias BP3, BP8 y BP16 fueron aisladas de la rizosfera de solanáceas sanas y la BP31 y BP37 son endófitas de la raíz de solanáceas sanas.

Cuadro 2: Tratamientos utilizados en los bioensayos.

Tratamiento	Código de la bacteria <i>Bacillus</i> spp.	Origen
1	BP3	Estación Experimental Carlos Durán
2	BP8	Estación Experimental Carlos Durán
3	BP16	Estación Experimental Carlos Durán
4	BP31	Estación Experimental Carlos Durán
5	BP37	Zaracero, Tapezco
6	INTA-B37	Desconocido contaminante en el laboratorio.
7	Fitopatógeno (testigo)	<i>R. solanacearum</i> : Nicoya, Guanacaste
		<i>P. carotovorum</i> : Oreamuno, Cartago
		<i>F. oxysporum</i> : Desconocido.
		<i>R. solani</i> : Guanacaste

Eficacia biológica de seis aislamientos de bacterias del género *Bacillus* spp. contra la bacteria fitopatógena *Ralstonia solanacearum*

Todos los tratamientos con las bacterias *Bacillus* spp., lograron inhibir el crecimiento de la bacteria fitopatógena *R. solanacearum* en placas Petri. Los seis tratamientos fueron estadísticamente diferentes al testigo con una $p < 0.0001$ y un R^2 de 0.96. El tratamiento BP31 fue el que mayor halo de inhibición logró diferenciándose de BP16 y BP37 ambos con inhibiciones bastante cercanas entre sí. Los tratamientos BP8 e INTA-B37 no se diferenciaron entre ellos e inhibieron al fitopatógeno, en aproximadamente la mitad del halo de inhibición lo que hizo BP31. El tratamiento BP3 se diferenció estadísticamente del resto, siendo el que formó el halo de inhibición del fitopatógeno más pequeño (7,9 mm) lo cual indica que fue el tratamiento que menos efecto tuvo en el desarrollo del fitopatógeno *R. solanacearum* (figura 4).



Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0,001$

Figura 4. Inhibición *in vitro* de la bacteria fitopatógena *Ralstonia solanacearum* por bacterias del género *Bacillus* spp.

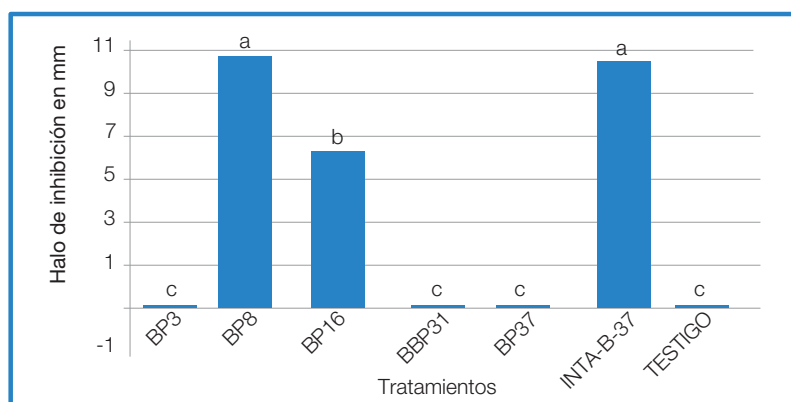
Los tratamientos BP31, BP16 y BP37 son las mejores opciones para continuar los estudios de control biológico, mejorar en los procesos de producción de metabolitos, y elaboración de un producto formulado que pueda ser utilizado en el manejo de la bacteria *Ralstonia solanacearum* en los cultivos de papa y tomate, siendo más relevantes por la escasa viabilidad del manejo químico de la enfermedad por pequeños y medianos productores (Hernandez y Bunstamante 2001) y su imposibilidad en la agricultura orgánica. Además, el uso del control químico resulta costoso, poco eficaz sumado al impacto en el ambiente por el

uso de este tipo de sustancias (Universidad de Valencia sf).

Estos resultados también permiten cuestionarse, analizar y desarrollar mayor investigación sobre la identificación de las sustancias que están produciendo estas bacterias y la interacción de dichas sustancias a lo interno de la planta, siendo que BP31 y BP37 son bacterias endófitas. No menos interesante, resulta investigar la asociación y los mecanismos de defensa que puede ejercer la bacteria rizosférica BP16, desde la parte externa de la planta.

Eficacia biológica de seis aislamientos de bacterias del género *Bacillus* spp. contra la bacteria fitopatógena *Pectobacterium carotovorum*

Se hallaron diferencias estadísticamente significativas, con $p < 0.0001$ y un R^2 de 0.89 entre los tratamientos entre los tratamientos BP8, BP16 e INTA-B-37 con relación al testigo en su capacidad de inhibir el crecimiento de la bacteria fitopatógena *Pectobacterium carotovorum*. Los tratamientos BP3, BP31 y BP37 no se diferenciaron estadísticamente del testigo. Los mejores tratamientos fueron BP8 e INTA B-37 los cuales no se diferenciaron entre ellos, pero si con BP16 (figura 5).

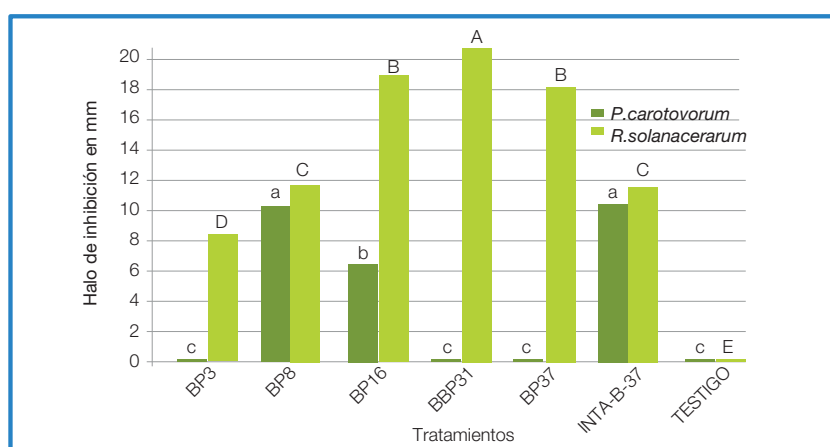


Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.001$

Figura 5. Inhibición *in vitro* de la bacteria fitopatógena *Pectobacterium carotovorum* por bacterias del género *Bacillus* spp.

En la figura 6, se puede observar con mayor claridad el efecto de los tratamientos con las dos bacterias fitopatógenas evaluadas y nos facilita seleccionar el mejor tratamiento según sea el agente biótico causal de la enfermedad.

A la luz de los resultados, ante la ocurrencia de un problema causado por *R. solanacearum* la mejor opción sería el tratamiento con BP31. Sin embargo, es usual que una planta enferma, sea afectada por más de un fitopatógeno por lo que posiblemente, la mejor opción sea una formulación utilizando una mezcla de éstos *Bacillus* spp. Con estos resultados obtenidos pareciera ser, que una formulación de un consorcio microbiano compuesto por BP31, INTA-B-37 ó BP8 sería la mejor opción para el manejo de las bacterias fitopatógenas en estudio.

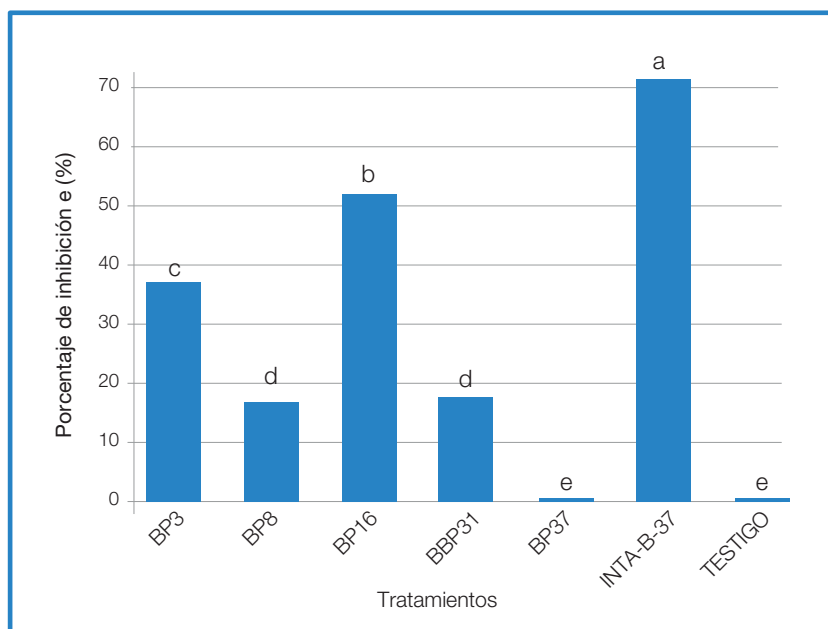


Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.001$

Figura 6: Inhibición *in vitro* de las bacterias fitopatógenas (*Pectobacterium carotovorum* y *Ralstonia solanacearum*) por bacterias del género *Bacillus* spp.

Eficacia biológica de seis aislamientos de bacterias del género *Bacillus* spp. contra el hongo fitopatógeno *Pectobacterium carotovorum*

En este caso, un total de cinco tratamientos lograron inhibir el crecimiento del hongo fitopatógeno *F. oxysporum*. El tratamiento BP37 no se diferenció estadísticamente del testigo. Se hallaron diferencias estadísticamente significativas, con $p < 0.0001$ y un R^2 de 0.95, entre los tratamientos BP3, BP8, BP16, BP31 e INTA-B-37 y el testigo. El mejor porcentaje de inhibición del crecimiento de *F. oxysporum* fue el tratamiento INTA-B-37 con un 69 %, le siguieron BP 16 y BP3 con un 57 % y un 42 % respectivamente. Los tratamientos que menor inhibición en el crecimiento del fitopatógeno fueron BP31 y BP8 con un 15 % y 10 % de inhibición respectivamente, estos tratamientos no se diferenciaron estadísticamente entre ellos (figura 7).



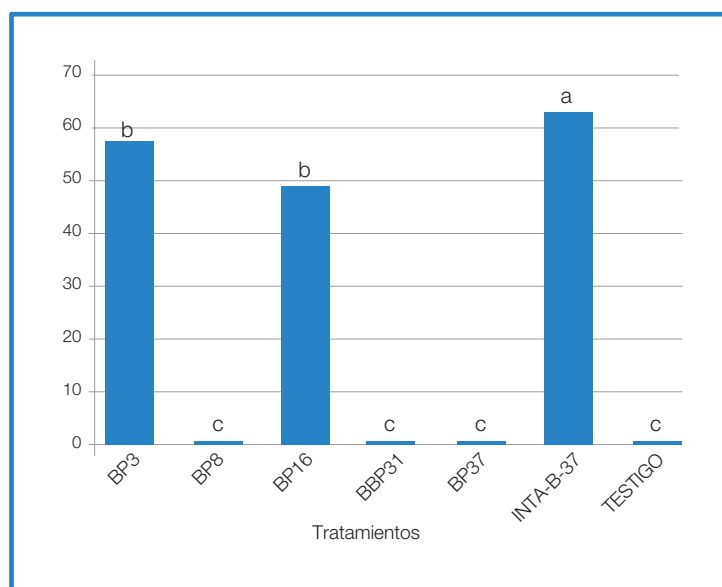
Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.001$

Figura 7. Inhibición en el crecimiento de *Fusarium oxysporum* por bacterias del género *Bacillus* spp.

Siendo éste un hongo fitopatógeno que afecta una gran cantidad de cultivos de importancia agrícola y que posee muchos mecanismos para permanecer en los sistemas productivos por largo tiempo, resulta importante continuar evaluando la producción de los metabolitos producidos por las bacterias estudiadas. Al respecto se ha determinado que algunos aislamientos de *B. subtilis* producen el antibiótico Iturina A, que a una concentración de 151.805 mg/L inhibió el crecimiento de *Fusarium* sp., en condiciones *in vitro* entre el 70 al 100 % (Ariza y Sánchez 2012). En este estudio, como se mencionó anteriormente, el bacilo INTA-B-37 logró una inhibición del 69 % queda pendiente determinar los metabolitos y mejorar el proceso de producción los mismos.

Eficacia biológica de seis aislamientos de bacterias del género *Bacillus* spp. contra el hongo fitopatógeno *Rhizoctonia solani*

De los seis *Bacillus* spp., evaluados, tres lograron inhibir el crecimiento del hongo fitopatógeno *R. solani*. Los tratamientos BP8, BP31, BP37 no lograron inhibir en absoluto al fitopatógeno. Se hallaron diferencias estadísticamente significativas, con $p < 0.0001$ y un R^2 de 0.89, entre los tratamientos BP3, BP16 e INTA-B-37 y el testigo. El mejor porcentaje de inhibición del crecimiento de *R. solani* fue logrado por el tratamiento INTA-B-37 con un 61 %, le siguieron BP3 y BP16 con un 46 % y un 45 % respectivamente. Los últimos dos tratamientos no se diferenciaron estadísticamente entre ellos (figura 8).



Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0,001$

Figura 8: Inhibición en el crecimiento de *Rhizoctonia solani* por bacterias del género *Bacillus* spp.

Se logró observar un efecto de los tratamientos respecto al número de estructuras de resistencia (esclerocios) producidos por el hongo fitopatógeno (figura 9).

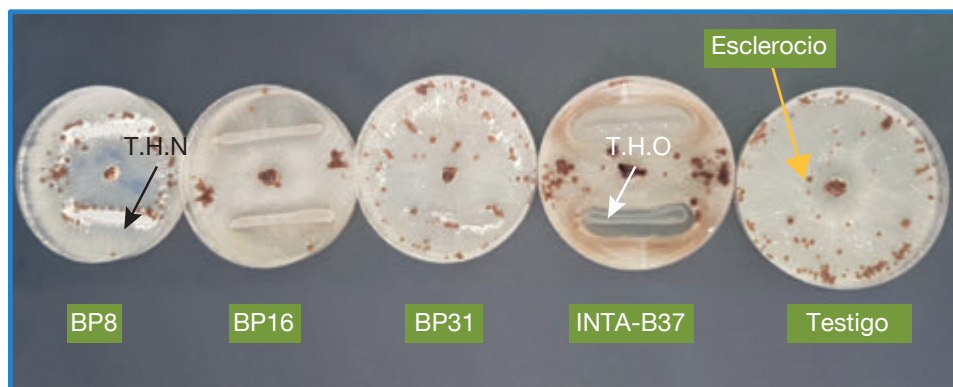
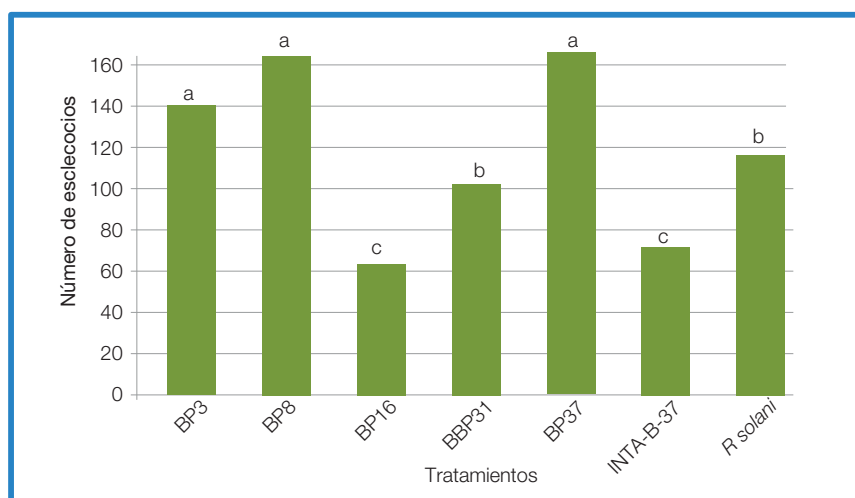


Figura 9. Esclerocios producidos con varios tratamientos.

Se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos (figura 10) con $p < 0.0001$ y un R^2 de 0.71. Los tratamientos BP3, BP8 y BP37 incentivaron entre un 20 % y un 43 % la producción de las estructuras de resistencia (cuadro 3), lo cual no es conveniente ya que estas estructuras le permiten al hongo permanecer y resistir mayor tiempo en el suelo. La producción de esclerocios por el tratamiento BP31 no se diferenció estadísticamente del testigo.

Los únicos tratamientos que redujeron la producción de esclerocios fueron los tratamientos BP16 e INTA-B37. El hongo fitopatógeno sin efecto de ningún tratamiento produjo en promedio 112 esclerocios, por efecto del tratamiento BP 16 se redujo el número promedio a 64 esclerocios y con INTA-B37 a 69, equivalentes 43 % y 38 % respectivamente.



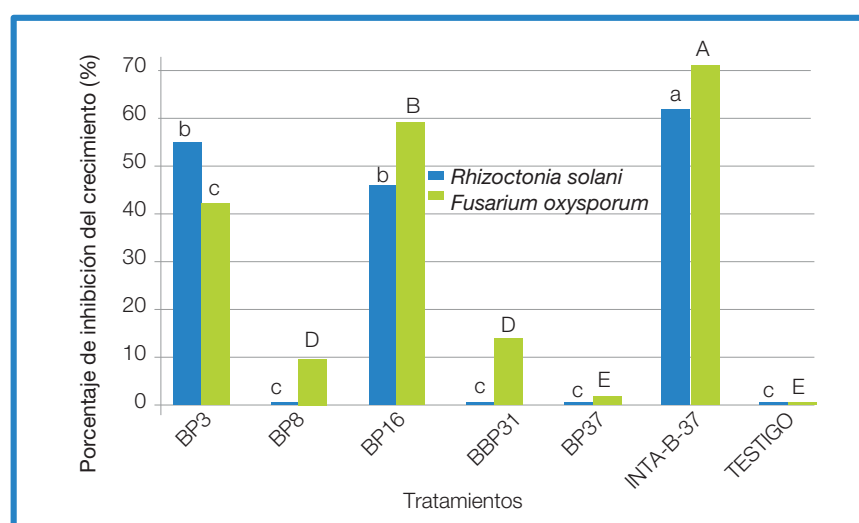
Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0,001$

Figura 10: Esclerocios producidos por *Rhizoctonia solani* en los diferentes tratamientos.

Cuadro 3: Porcentaje de incremento o reducción en el número de esclerocios según los tratamientos.

Tratamiento	N° de esclerocios	Porcentaje de reducción de esclerocios	Porcentaje de aumento de esclerocios
BP3	135	-	21
BP8	159	-	42
BP16	64	42	-
BP31	105	6	-
BP37	160	-	43
INTA-B37	69	38	-
Testigo (<i>R.solani</i>)	112	-	-

En la figura 11 se observa la combinación de los resultados de los tratamientos contra los dos hongos fitopatógenos de este estudio.



Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0,001$

Figura 11. Inhibición en el crecimiento de hongos fitopatógenos (*Rhizoctonia solani* y *Fusarium oxysporum*) por bacterias del género *Bacillus* spp.

La bacteria benéfica INTA-B-37, es una buena opción para continuar los estudios de inhibición del desarrollo de hongos fitopatógenos. Sin embargo, si tomamos en cuenta la inhibición de la producción de esclerocios la combinación de esta bacteria con la BP16 puede ser beneficiosa ya que la BP16 inhibe mejor la producción de estas estructuras que la que hace INTA-B37.

CONCLUSIONES

En los sistemas agroproductivos existe una gran biodiversidad microbiana que debe seguirse estudiando a fin de explorar opciones de control biológico de fitopatógenos de suelo.

Para el manejo de las bacterias fitopatógenas en estudio, los *Bacillus* sp., que mejor resultado dieron fueron BP8, BP31 e INTA-B-37.

Para el manejo de los hongos fitopatógenos en estudio, los *Bacillus* sp., que mejor resultado dieron fueron BP16 e INTA-B-37.

A pesar de que la bacteria BP3 inhibe el desarrollo del hongo fitopatógeno *Rhizoctonia solani* no se recomienda ya que promueve la formación de esclerocios que son estructuras de resistencia que favorecen la permanencia del hongo en el suelo.

RECOMENDACIONES

Se deben realizar estudios para determinar los metabolitos producidos por las bacterias promisorias.

Realizar investigaciones a fin de mejorar los procesos de producción de metabolitos eficientes por los *Bacillus* promisorios.

Realizar estudios con mezclas o consorcios microbianos promisorios en el control biológico para una posible formulación.

Realizar estudios en campo, con base en los resultados obtenidos de este estudio.

LITERATURA CITADA

Acuña, I; Muñoz, M; Snadaña, P; Orena, S; Bravo, R; Kalazich, J; Tejeda, P; Castro, M; Sandoval, C. 2015. Manual interactivo de la papa (en línea). INIA, Chile. Consultado el 30 ene. 2021. Disponible en <https://manualinia.papachile.cl/?page=home>

Arbeláez, G. 2000. Algunos aspectos de los hongos del género *Fusarium* y de la especie *Fusarium oxysporum* (en línea). Agronomía Colombiana 17:11-22. Consultado el 30 ene. 2021. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/21538/22543>.

Ariza, Y; Sánchez, L. 2012. Determinación de metabolitos secundarios a partir de *Bacillus subtilis* con efecto biocontrolador sobre *Fusarium* sp (en línea). NOVA 10(18) 149-155. Consultado el 30 ene.2021. Disponible en <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/1003>

Blanco, W. 2008. Aislamiento y caracterización parcial de *Bacillus cereus* toxigénicos en productos lácteos con especias o deshidratados (en línea). Trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Microbiología y Química Clínica. UCR. San José, Costa Rica. 65p. Consultado el 30 de enero del 2021. Disponible en <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/1057/1/29082.pdf>

- Chaves, A. 2010. Identificación, control de plagas y enfermedades en hortalizas con el uso de extractos naturales, hongos antagonistas y entomopatógenos (en línea). Consultado 18 ene. 2018. Disponible en <http://inta.go.cr/images/documentos/manuales/HongosAntagonistas.pdf>
- Chowdhury, SP; Hartmann, A; Gao, X; Borriss, R. 2015. Biocontrol mechanism by root-associated *Bacillus amyloliquefaciens*. *Frontiers Microbiology* 6:780.
- Corrales, L; Caycedo, L; Gómez, M; Ramos, S; Rodríguez, J. 2017. *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. *Nova* 15(27):45-65.
- Dopazo, C; Lemos, M, Lodeiros, C; Bolinches, J; Barja, J; Toranzo, A. 1988. Inhibitory activity of antibiotic-producing marine bacteria against fish pathogens (en línea). *Journal of applied bacteriology*. Consultado 24 ene. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/227815245_Inhibitory_activity_of_antibiotic-producing_marine_bacteria_against_fish_pathogens
- Escalona, Y; Rodríguez, D, Hernández, A. 2011. *Rhizoctonia solani* Kühn aislado de papa (*Solanum tuberosum* L) en los estados Táchira, Mérida, Trujillo y Lara. I. Caracterización cultural (en línea). *Bioagro* 23(3):161-168. Consultado el 30 ene. 2021. Disponible en http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S1316-33612011000300002&lng=es&tlng=es
- Fan, H; Zhang, Z; Li, Y; Zhang, X; Duan, Y; Wang, Q. 2017. Biocontrol of bacterial Fruit Blotch by *Bacillus subtilis* 9407 via surfactin-mediated antibacterial activity and colonización. *Frontiers in Microbiology* 8:1973.
- Ferrera, R; Alarcón, A. 2001. La microbiología del suelo en la agricultura sostenible (en línea). *Ciencia Ergo-sum*. V8(2). Consultado 15 ene. 2019. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10402108>.
- García, A. 2014. Mecanismos de defensa inducidos por la combinación de *Trichoderma harzianum* y quitosano en nochebuena (*Euphorbia pulcherrima*) contra *Phytophthora drechsleri*. Tesis de grado. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. México. 158 p.
- Guedez, C; Cañizales, L; Castillo, C; Olivar, R. 2012. Control de *Rhizoctonia solani* en tomate con el hongo *Trichoderma harzianum* (en línea). *Revista academia*. 11(24):207-213. Consultado 30 ene. 2021. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/236852505_Control_de_Rhizoctonia_solani_en_tomate_con_el_hongo_Trichoderma_harzianum
- Hernández, L; Bustamante, E. Control biológico de la marchitez bacterial en tomate con el uso de enmiendas orgánicas (en línea). *Manejo integrado de plagas (Costa Rica)* 62:18-28. Consultada 14 ene.2021. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2111e/A2111e.pdf>
- López, L. 2010. Manual técnico del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). INTA (en línea). Consultado 18 ene. 2018. Disponible en http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/06/Manual_tecnico_del_cultivo_de-tomate-3-min.pdf.
- Manzy, LV; Mayz, JC. 2003. Valorando los microorganismos (en línea). *Revista Sociedad Venezolana de Microbiología*. V23(1): 85-88. Consultado ene. 2019. Disponible en http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562003000100018
- Monroy, L; Lizarazo, L. Identificación de hongos fitopatógenos asociados al roble (*Quercus humboldtii Bonpl*) en los municipios de Encino (Santander), Arcabuco y Tipacoque (Boyacá) (en línea). *Revista Colombia Forestal Vol* 13(2): 347-356. Consultado ene. 2019. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v13n2/v13n2a11.pdf>.
- Narula, N; Kothe, E; Behl, R. 2009. Role of root exudates in plant-microbe interactions (en línea). *Journal of Applied Botany and Food Quality* 82: 122-130. Consultado el 25 ene. 2019. Disponible en <https://ojs.openagrar.de/index.php/JABFQ/article/.../2090/2475>
- Niedmann, L. Meza-Basso, L. 2006. Evaluación de cepas nativas de *Bacillus thuringiensis* como alternativa de manejo integrado de la polilla del tomate (*Tuta absoluta* Meyrick; Lepidoptera: Gelechiidae) en Chile. *Agricultura técnica*. 66(3): 235-246.

Pedraza, L; López, C; Uribe-Vélez, D. 2020. Mecanismos de acción de *Bacillus* spp. (Bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con las plantas (en línea). Acta Biológica Colombiana. 25(1):112-125. Consultada 14 ene. 2021. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v25n1/0120-548X-abc-25-01-112.pdf>.

Radhakrishnan, R; Hashem, A; Abd-Allah, EF. 2017. Bacillus: a biological toll for crop improvement through Bio-molecular changes in adverse environments. Frontiers Physiology 8:667.

Rueda-Puente, E; Hernández-Montiel, L; Holguín-Peña, R; Ruiz, F; López, J; Huez, M; Jiménez, J; Borboa, J; Ortega-García, J. 2014. *Ralstonia solanacearum*: una enfermedad bacteriana de importancia cuarentenaria en el cultivo de *Solanum tuberosum* L (en línea). INVURNUS, 9(1):24-36. Consultado 30 ene. 2021. Disponible en <file:///Users/cristinavargaschacon/Downloads/RuedaPuenteycol20141.pdf>

Samaniego-Gámez, B; Reyes-Ramírez, A; Moreno-Valenzuela, O; Tun-Suárez, J. 2017. Resistencia sistémica inducida contra virus fitopatógenos mediada por la inoculación con la rizobacteria *Bacillus* spp (en línea). Revista de Protección Vegetal (32):1. Consultado el 14 ene. 2021. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-27522017000100002

Universidad de Valencia. Sf. Procedimiento de control biológico de la marchitez causada por *Ralstonia solanacearum*, a través del uso de bacteriófagos específicos para ello (en línea). Banco de Patentes, España. Consultado el 14 ene. 2021. Disponible en <http://bancodepatentes.gva.es/documents/161324488/161643401/marchitez+gonzalez+E.pdf/5d293cbd-2403-48f2-aa41-dc2230ad8010>

Villa-Martínez, A; Pérez-Leal, R; Morales-Morales, A; Basurto-Sotelo, M; Soto-Parra, J; Martínez-Escudero, E. 2014. Situación actual en el control de *Fusarium* spp., y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales (en línea). Acta agronómica 64 (2):194. Consultado el 30 ene. 2021. Disponible en https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/43358/49856

Whipps, JM. 1987. Effect of media on growth and interactions between a range of soil-borne glass-house pathogens and antagonistic fungi. New Phytologist 107(1): 127-142.

ANEXO 1

INHIBICIÓN DEL CRECIMIENTO DE FITOPATÓGENOS

Pruebas preliminares

Cuadro 1. Resultados de la inhibición del crecimiento de hongos y bacterias fitopatógenas por efecto de bacterias del género *Bacillus* spp., INTA, 2019.

Bacteria	Rs	Pc	Fo	Rzs
BP 1	-	-	-	-
BP2	-	-	-	-
BP3	-	-	-	++++
BP5	-	-	-	-
BP6	-	-	-	-
BP7	-	-	-	-
BP8	-	-	++	++++
BP9	-	-	-	-
BP10	-	-	++++	indefinida +/-
BP11	-	-	++	-

Bacteria	Rs	Pc	Fo	Rzs
BP12	-	-	indefinida +/-	indefinida +/-
BP13	-	-	-	-
BP14	-	-	-	-
BP16	-	+++	+++	++
BP17	-	-	-	-
BP18	+	-	-	-
BP19	-	-	-	-
BP22	-	-	-	-
BP25	-	-	-	-
BP28	-	-	-	-
BP30	++	-	-	+
BP31	++++	-	-	+
BP33	-	-	+	-
BP34	-	-	+	-
BP35	++	-	-	-
BP36	-	-	+	-
BP37	++++	++++	-	-
BP38	-	-	-	-
BP39	-	-	-	-
BP41	-	-	-	-
BP42	-	-	-	-
BP43	-	-	-	-
BP44	-	-	-	-
BP46	-	-	-	-
BP48	-	-	-	-
BP49	-	-	+	-
BP50	+	-	-	-
B29	++++	-	-	-
B30	++++	-	-	-
B32	-	-	-	-
B34	++++	-	-	-
B35	++++	-	-	-
B36	++++	-	-	-
B38	-	-	-	-
B39	++++	-	-	-
B41	++++	-	-	-
B42	++++	-	-	-
B43	++++	-	-	-
B44	++++	-	-	-
B46	++++	-	-	-
B47	-	-	-	-
B48	++++	-	-	-
B50	++++	-	-	-
B51	++++	-	-	-
B52	-	-	-	-
B53	-	-	-	-
B54	-	-	-	-
B58	++++	-	-	-
B59	++++	-	-	-
B60	-	++	-	-
B61	++++	-	-	-

Rs: *Ralstonia solanacearum*. Pc: *Pectobacterium carotovorum*. Fo: *Fusarium oxysporum*. Rzs: *Rhizoctonia solani*.

+: hubo reacción de inhibición

- : No se dio inhibición

+/- Indefinida: la reacción inhibitoria no se mantuvo en el tiempo evaluado.

Cada + representa aproximadamente 1 mm en la inhibición del fitopatógeno

PRESENCIA DE *PSEUDACYSTA PERSEAE* (HEIDEMANN, 1908) HEMIPTERA: TINGIDAE EN EL CULTIVO DE AGUACATE (*PERSEA AMERICANA*) EN COSTA RICA

Kenneth Retana Sánchez¹, Ruth León González², Andrey José Peraza Sánchez³

RESUMEN

Presencia de *Pseudacysta perseae* (Heidemann, 1908) Hemiptera: Tingidae en el cultivo de aguacate (*Persea americana*) en Costa Rica. Se observó la presencia de una población de chinches sobre tejido foliar en plantas de aguacate variedad Simmonds injertado sobre material criollo, bajo condiciones de vivero. Se asoció al insecto *Pseudacysta perseae* la formación de manchas irregulares amarillentas sin borde definido que posteriormente crecieron y se tornaron de color marrón con borde definido y halo clorótico. En el envés se presentó el tinguado en diferentes estadios, así como la ocurrencia de puntos translúcidos que coalescieron, se tornaron amarillentos y posteriormente adquirieron una coloración marrón. El insecto se identificó morfológicamente como *Pseudacysta perseae* (Heidemann, 1908) (Tingidae: Tinginae: Tingini) por medio de técnicas morfológicas. Este es el primer reporte de la presencia de este insecto en aguacate en Costa Rica.

Palabras clave: *Pseudacysta perseae*, Nuevo registro, Costa Rica, Aguacate.

ABSTRACT

Presence of *Pseudacysta perseae* (Heidemann, 1908) Hemiptera: Tingidae in avocado (*Persea americana*) in Costa Rica. A population of bugs feeding on leaf tissue was observed in avocado plants, variety Simmonds grafted on creole material, under greenhouse conditions. The main symptoms were related to the insect *Pseudacysta perseae*, which included the formation of irregular yellowish spots with no defined border on the upper surface of the leaf, followed by brown color lesions with a defined border and a chlorotic halo. On the underside, the lace bug were found in different stages, also the presence of translucent small circular lesions that coalesced, turned yellowish and finally acquired a brown coloration. The insect was morphologically identified as *Pseudacysta perseae* (Heidemann, 1908) (Tingidae: Tinginae: Tingini) using morphological techniques. This is the first report of the presence of this insect in avocado in Costa Rica.

Keywords: *Pseudacysta perseae*, First record, Costa Rica, Avocado.

1 Investigador en Frutales del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: kretana@inta.go.cr ORCID: 0000-0003-1937-7249.

2 Investigadora en Entomología del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: rleong@inta.go.cr ORCID: 0000-0002-5011-6680.

3 Universidad Estatal a Distancia, UNED. Costa Rica. Correo: andrey.peraza@uned.ac.cr. ORCID: 0000-0002-1940-3673.

INTRODUCCIÓN

El aguacate es originario de una amplia zona geográfica, que abarca desde las sierras centrales y orientales de México y Guatemala, hasta el norte de Perú. Se cultiva en el mundo bajo condiciones ambientales y climáticas diversas, que varían desde zonas desérticas en Israel y sur de California, tierras altas subtropicales y bosques húmedos tropicales como América Central, hasta regiones de Sur de África y Australia sometidas a condiciones de niebla (MAG-IICA 2019).

Esta fruta es de alto consumo a nivel mundial, en el periodo 2014-2018, la demanda tuvo un incremento de 15 % anual, lo que superó la oferta del mismo. En el año 2019 se registró un volumen mundial de exportación de 2,1 millones de toneladas, con México y Perú como principales exportadores de la fruta hacia Estados Unidos (77 %) y Canadá (7 %). El mercado europeo es suplido principalmente por Chile e Israel y por la reexportación que realiza Holanda (FAO 2020).

Debido a que en Costa Rica esta actividad productiva está en crecimiento, el aumento de problemas fitosanitarios es un riesgo latente. En el caso de los insectos, al concentrarse las fuentes de alimento en un sitio y debido a un medio simplificado donde se da la disminución de organismos de control como depredadores y parasitoides (aspecto inherente a los monocultivos), las poblaciones de insectos se pueden establecer y desarrollar con facilidad en las plantaciones (Sarandón y Flores 2014).

El chinche de encaje del aguacate, *Pseudacysta perseae* fue descrito por primera vez a partir de dos especímenes recolectados sobre hojas de aguacate

en Miami, Florida (Heidemann, 1908). Actualmente la distribución conocida se delimita a Bermuda, Cuba, Guadalupe, Islas Vírgenes (US), Jamaica, Martinica, Puerto Rico, República Dominicana, San Cristóbal y Nieves, Santa Lucía, Trinidad y Tobago, Estados Unidos (California, Georgia, Louisiana, Texas), México, Guatemala y Panamá, Guyana Francesa y Venezuela. En Europa, únicamente se reporta su presencia en Portugal (Madeira) (Sandoval y Cermeli 2005, Hoddle *et al.* 2008, Humeres *et al.* 2009, FVO 2015, Barba *et al.* 2020, Cazorla y Knudson 2021).

De la familia Lauraceae, se reporta que este hemíptero se hospeda en *Cinnamomum camphora* (L.) J. Presl y las especies pertenecientes al género *Persea*. Los adultos se ubican en el envés de las hojas bajas y posteriormente, con el desarrollo de la población, avanzan hacia hojas jóvenes. Estos tinguídos succionan la savia de las plantas colonizadas, tanto en vivero como árboles en producción (De la Torre *et al.* 1999, Hoddle *et al.* 2008, Ávila *et al.* 2015, Morales y Grillo 2020).

Este insecto se disemina con facilidad entre las plantas en las que se reporta su presencia. En Cuba a mediados de 1996 fue vista por primera vez y para el 2008 se encontró en todas las plantaciones de aguacate, con un 37 % de estas bajo alta infestación (Almaguel *et al.* 1999; Sandoval y Cermeli 2005, Morales y Grillo 2008).

En el caso de Costa Rica, no se registra la presencia del chinche de encaje en este frutal. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue describir la relación biótica entre el chinche *Pseudacysta perseae* y el cultivo de aguacate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de especímenes

Los especímenes fueron recolectados en hojas plantas de aguacate (*Persea americana* Mill) de un año de edad, material Simmonds injertado sobre patrón criollo, bajo condiciones de vivero. Estos se ubicaron en la Estación Experimental Diamantes, Guápiles, Limón, Costa Rica, 253 m s.n.m.. Coordenadas geográficas: N 10°12'45 O 83°46'16 (Figura 1).



Figura 1. Punto de recolección del chinche de encaje del aguacate (*Pseudacysta perseae*) en Costa Rica. Guápiles, Limón, Costa Rica. Abril, 2022.

Se tomaron muestras de hojas con poblaciones del insecto en diferentes estadios, así como plantas enteras. Estas se llevaron al laboratorio de Fitoprotección del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Agropecuaria para su correspondiente identificación.

Identificación del insecto

Se compararon las características morfológicas del insecto con la descripción de la clave taxonómica de Torres (1985). Esto se realizó estudio con la colección del Museo de Insectos del Centro de Investigaciones en Protección de Cultivos (CIPROC), Escuela de Agronomía, Universidad de Costa Rica. Asimismo, se ratificó la identificación del chinche con el especialista Alexander Harris Knudson⁴.

Descripción de síntomas asociados a la presencia del chinche

Se observó el tejido foliar por el haz y en el envés y se caracterizó el desarrollo de los síntomas asociados a la presencia del insecto. Esto se realizó por un periodo de 30 días.

Aspectos del desarrollo del insecto

Se evaluaron los aspectos principales del desarrollo de este artrópodo mediante la observación de características durante la oviposición, los estadios ninfales y el adulto. Se relacionó cada una de estas etapas con el desarrollo de síntomas en las plantas evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación del chinche

Con base en la morfología del insecto, este se identificó como *Pseudacysta perseae* (Hemiptera: Heteroptera: Tingidae: Tinginae: Tingini) (Figura 2). El género *Pseudacysta* se caracteriza porque el paranoto se reduce a planos areolados en los ángulos humerales y por el área discoidal abierta apicalmente (Torres 1985, Knudson 2018).

De acuerdo con la caracterización de los adultos y la descripción realizada por Hernández *et al.* (2004), Morales y Grillo (2008) y Matsunaga y Silva (2020), estos miden aproximadamente 2 mm, el cuerpo es ovalado alargado y presenta un color de marrón oscuro a negro pero con las patas y las antenas con tonalidad blanquecina amarillenta. Estas últimas tienen forma de garra, y la mitad apical del cuarto antenómero negra.

Los hemiélitros están extendidos mucho más allá del extremo del abdomen, los cuales tienen

reticulación (apariencia de encaje) y son redondeados en los ápices. En el tercio basal del hemiélitro se observa una raya marrón oscuro-negro, la cual alcanza levemente la superficie del área discoidal.

El pronoto es subpentagonal con los márgenes de la cara frontal obtusa, encorvado hacia el ápice. La parte posterior es plana, triangular, puntiaguda; disco fino y densamente punteado.

Las ninfas son más pequeñas que los adultos y presentan tonalidades en rojo oscuro a negro, sin desarrollo de los hemiélitros. El color de las patas y las antenas, así como la forma de estas, es igual al que se describió en los adultos. Morales y Grillo (2008), reportan que este insecto tiene cinco estados ninfales consecutivos, los cuales se diferencian principalmente por el diámetro de la cabeza, longitud total del cuerpo y coloración del mismo.



Figura 2. Morfología de los adultos de *P. perseae* en el envés de hojas de aguacate material Simmonds. INTA-CIPROC (UCR). Abril- Julio, 2022.

4 Knudson, A. 7 abr. 2022. Identificación del chinche de encaje encontrado en aguacate (correo electrónico). Dakota del Norte, USA, Universidad Estatal de Dakota del Norte.

Síntomas asociados a la presencia del chinche en plantas de aguacate

Asociado a las poblaciones del hemíptero, en el envés de las hojas, en diferentes sitios, se da la formación de puntos translúcidos que coalescen, se tornan amarillentos y por último adquieren una coloración marrón de tamaño variable. Sobre las venas de la lámina se presentan pequeñas lesiones del mismo color, las cuales crecen y cubren por completo estas estructuras (Figura 3). Los síntomas mencionados concuerdan con lo indicado por Peña *et al.* (1998) y Hoddle *et al.* (2008).

La presencia del insecto se le asocia una reducción de hasta un 50 % de la actividad fotosintética, lo cual tiene efectos sobre los rendimientos del cultivo. Además, síntomas descritos pueden ser puntos de entrada para la infección de patógenos como *Colletotrichum gloesporioides* (Penz.) Penz. y Sacc. y otros patógenos (Peña *et al.* 1998, Hoddle *et al.* 2008 Cambero *et al.* 2019).



Figura 3. Síntomas asociados *P. perseae* en el envés de hojas de aguacate material Simmonds. Guápiles, Limón, Costa Rica. INTA. Abril, 2022.

En cada una de las etapas de desarrollo de los síntomas se observó la presencia de puntos negros sobre las manchas y lesiones generadas en el envés. Estos corresponden a los huevos recubiertos, ninfas y pupas donde se presenta un orificio de salida, así como individuos adultos (Figura 4).

Cabe señalar que se encontró la presencia de un hongo como parásito de huevos y ninfas, el cual se identificó morfológicamente como *Penicillium* spp. (Figura 4). Se requiere de más investigación para determinar su potencial como controlador biológico.



Figura 4. A) Huevos y ninfas de *P. perseae* parasitados por *Penicillium* spp. B) Pupas con orificio por donde salió el adulto. C) Heces fecales en el envés de las hojas de aguacate material Simmonds. INTA. Abril, 2022.

En el haz se observan manchas amarillentas de apariencia circular-irregular que a los pocos días se tornan de color naranja y, por lo general, del centro hacia los costados se da la necrosis del tejido, el cual se observa de color marrón oscuro (Figura 5). Bajo alta infestación, ocurre necrosis de toda la lámina y defoliación de la planta. Lo anterior coincide con lo descrito por Ventura (2008).



Figura 5. Síntomas en el haz de hojas de aguacate material Simmonds causados por *P. perseae*. Guápiles, Limón, Costa Rica. INTA. Abril, 2022.

Es importante mencionar que no se observó este insecto sobre tejido lignificado. Esta misma situación fue reportada por Hoddle *et al.* (2008). Asimismo, hasta el momento, este insecto no se ha asociado con síntomas en el fruto.

Aspectos del desarrollo de *Pseudacysta perseae*

La colonización del artrópodo ocurrió en hojas maduras bajas y posteriormente las poblaciones ascendieron a estratos superiores de la planta. Este mismo comportamiento fue reportado por Ventura (2008).

El movimiento entre plantas se dio gradualmente entre árboles afectados por hongos radicales, con menor diversidad biológica en el suelo. Esto se puede explicar por la teoría de la trofobiosis, la cual indica que las plantas que se encuentran bajo un estrés que limite su adecuado desarrollo, producen sustancias poco complejas y solubles (aminoácidos y carbohidratos simples) que demandan menor gasto energético para los insectos al consumirlas, por lo cual los tejidos vegetales son más propensos a la presencia y propician el crecimiento poblacional de artrópodos (Cano 2013).

Con respecto al proceso de oviposición, este ocurrió en el envés de la hoja sin patrón definido sobre las venas y la lámina. Se observó sobre los huevos un recubrimiento viscoso inicialmente y que posteriormente endurece de color negro, que

corresponde a las heces del adulto (Figura 6). Este comportamiento fue reportado por Morales y Grillo (2008).

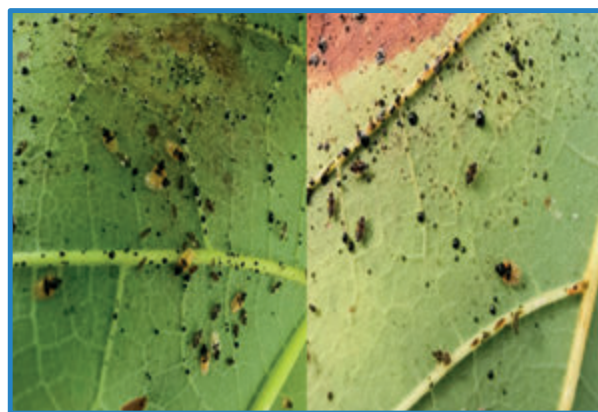


Figura 6. Distribución y apariencia de los huevos de *P. perseae* en el envés de las hojas de aguacate material Simmonds. Guápiles, Limón, Costa Rica. INTA. Abril, 2022.

Es la primera vez que se informa de la presencia de este tígido en el cultivo de aguacate en Costa Rica. Es importante realizar más investigación sobre este insecto para limitar su expansión y desarrollo,

sobre todo en aguacates de piel verde, debido a que se reporta que *P. perseae* tiene preferencia por materiales antillanos, sin embargo, también se ha encontrado en aguacate Hass en México, por lo cual su distribución en los diferentes materiales de aguacate es amplia (Romero *et al.* 2015, Cambero *et al.* 2019).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Alexander H. Knudson, investigador de la Universidad Estatal de Dakota del Norte, EE. UU. por confirmar la identificación de *Pseudacysta perseae*, y al Lic. Humberto Lezama Ulate del Museo de Insectos de la Escuela de Agronomía de la Universidad de Costa Rica por la colaboración en el montaje y toma de las imágenes sobre la morfología del insecto.

LITERATURA CITADA

Almaguel, L.; Blanco, E.; Suárez, P.; De La Torre, P.; Cáceres, I.; Nieves, C.; Márquez, M.; Blanco, L. 1999. Control de la chinche del aguacate (*Pseudacysta perseae* (Heidemann)) en ciudad de La Habana. *Fitosanidad* 3(2):69-74.

Ávila, N.; Cambero, C. J.; Estrada, V. M. O; Peña, S. G.; Rodríguez, P. M.; Luna, E. G. 2015. Organismos plaga asociados al cultivo de Aguacate (*Persea americana* Mill) en Nayarit, México. 10(1):91.

Barba, A.; Aguilera, C.; Herrera, V. 2020. Presencia de *Pseudacysta perseae* (Heidemann, 1908) (Insecta: Hemiptera: Tingidae) en Panamá. *Idesia* 38(3):123-127.

Cano, M. 2013. Artrópodos chupadores de savia y mecanismos para su adaptación a nichos deficientes en nutrientes. *Boletín del Museo Entomológico Francisco Luis Gallego*. 8 p.

Cambero, C.; Rodríguez M.; Robles, A.; Coronado, J.; Ríos, C.; Cambero, O. 2019. Distribución y enemigos naturales de la chinche de encaje del aguacate *Pseudacysta perseae* (Hemiptera: Tingidae) en Nayarit, México. *Revista Colombiana de Entomología* 45(1):1-7.

Cazorla, D.; Knudson, A. 2021. Listado de Tingidae (Hemiptera-Heteroptera) de Venezuela. *Revista Entomológica Nicaragüense* (226): 56 p.

De la Torre, P.; Almaguel, L.; Blanco, E. 1999. Daños, distribución y enemigos naturales de la chinche de encaje del aguacate *Pseudacysta perseae* (Heidemann) (Hemiptera: Tingidae). *Fitosanidad* 3(2):65-67.

FVO (Food and Veterinary Office). 2015. Harmful Organisms in the European Union. European Commission. 24 p.

Heidemann O. 1908. Two new species of North American Tingidae. *Proceedings of the Entomological Society of Washington* 10:103-108.

Hernández, J.; Blanco, G.; Linares, B.; Hernández, L.; Pérez, A. 2004. Detección del chinche de encaje del aguacate *Pseudacysta perseae* (Heidemann), Hemiptera:Tingidae en el estado Yaracuy. *Revista Luz* 21(1):161-165.

Hoddle, M.; Morse, J.; Stouthamer, R. 2008. *Pseudacysta perseae* Biology and Management of Avocado Lace Bug in California. *Production Research Report - California Avocado Commission*. 17 p.

Humeres, E.; Morse, J.; Stouthamer, R.; Roltsch, W.; Hoddle, M. 2009. Evaluation of natural enemies and insecticides for control of *Pseudacysta perseae* (Heidemann) (Hemiptera: Tingidae) on avocados in Southern California. *Florida Entomologist* 92: 35-42.

Knudson, A. 2018. The tingidae (Hemiptera: Heteroptera) of southern Central America (with an emphasis on Costa Rica). Thesis M.Sc. North Dakota, USA, North Dakota State University of Agriculture and Applied Science. 314 p.

Ministerio de Agricultura y Ganadería e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (MAG-IICA). 2019. Plan Nacional de Fortalecimiento del Sector Aguacatero. La Salle, San José. MAG-IICA. 36 p.

Matsunaga, J.; Silva, J. 2020. Avocado lace bug *Pseudacysta perseae* (Heidemann) (Hemiptera: Tingidae). New Pest Advisory, Department of Agriculture State of Hawaii. 3p.

Morales, I.; Grillo, H. 2008. Conozca mejor y aprenda a combatir a un enemigo de sus aguacateros. Agricultura Orgánica 2:42-44.

Morales, L.; Grillo, V. 2020. La chinche de encaje del aguacatero: *Pseudacysta perseae* (Heid.) (Hemiptera: Tingidae). Bioecología y lucha biológica en las condiciones de Cuba. Centro Agrícola 47:59-62.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2020. Análisis del mercado de las principales frutas tropicales. Roma, Italia, FAO. 20 p.

Peña, J.; Sundhari, S.; Hunsberger, A.; Duncan, R.; Schaffer, B. 1998. Monitoring, damage, Natural enemies and control of the avocado lace bug, *Pseudacysta perseae* (Hemiptera: Tingidae). Proceedings of the Florida State Horticultural Society 111:330-334.

Romero, L.; González, X.; Milián, M.; González, L. 2015. Relación entre la preferencia de *Pseudacysta perseae* (Heid.) y caracteres morfoagronómicos en variedades de aguacateros. Protección Vegetal 30:137.

Sandoval, M.; Cermeli, M. 2005. Presencia de *Pseudacysta perseae* (Heidemann, 1908) (Insecta: Hemiptera: Tingidae) en Venezuela. Entomotropica 20(3):271-273.

Sarandón, J; Flores, C. 2014. Agroecología: Bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables. La Plata, Argentina, EDULP. 466p.

Torres, L. 1985. Revisión genérica de la familia Tingidae en México (Hemiptera: Heteroptera). Tesis Lic. Ciudad de México, México, UNAM. 99p.

Ventura, V. 2008. Manejo de *Pseudacysta perseae* (Heid.) (Heteroptera: Tingidae) mediante el empleo de hongos entomopatógenos en plantaciones de aguacateros de fomento en la Empresa de Cultivos Varios La Cuba. Tesis Bach. Santa Clara, Cuba, Universidad Central "MartaAbreu" de la Villas. 33 p.

TENDENCIA DE LA EMISIÓN DE GASES CON EFECTO INVERNADERO EN BANANO Y PLÁTANO EN COSTA RICA

Johnny Montenegro-Ballesteros¹

RESUMEN

Tendencia de la emisión de gases con efecto invernadero en banano y plátano en Costa Rica. En Costa Rica, la producción de banano y plátano es muy importante por la generación de empleo y divisas, sin embargo, en el proceso productivo se emiten gases con efecto invernadero (GEI) que estimulan el calentamiento global, razón por la cual existe interés en el desarrollo de opciones de mitigación. Para lograrlo, es necesario conocer la magnitud de estas por lo cual se desarrolló esta investigación para determinar la evolución de las emisiones GEI generadas en el proceso productivo primario en banano y plátano y su relación con producción, productividad y el valor de la producción. Para ello se recopiló información de áreas sembradas, producción anual, manejo agronómico de los cultivos y precio del producto pagado al productor desde 1990 y hasta el 2019. Para calcular la emisión de GEI provenientes de la fertilización nitrogenada, enmiendas al suelo y del uso de hidrocarburos en la aplicación de productos fitosanitarios se utilizó la metodología del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático. Con la información anterior, se confeccionaron figuras para mostrar tendencias y se estimaron las relaciones antes mencionadas. Se determinó que la emisión GEI se incrementó en la década de los 90's para mostrarse relativamente estable a partir del 2000. La eficiencia de emisión expresada en kg CO₂eq t⁻¹ producida y en t CO₂eq millón⁻¹ colones mejoraron con el tiempo, ya que disminuyeron sus valores; en plátano con colones constantes se muestra un comportamiento inverso en los últimos años. Se presentan opciones de mitigación que podrían mejorar los valores de las relaciones determinadas. Se concluye que la emisión ha mostrado estabilidad a partir del 2000 y que el precio ha sido modelador de la misma, siendo la fertilización nitrogenada la principal fuente de emisión.

Palabras clave: Banano, Cambio climático, Cultivos tropicales, Eficiencia de emisión, Mitigación, Plátano.

ABSTRACT

Greenhouse gas emission trend in banana and plantain in Costa Rica. In Costa Rica, banana and plantain production is very important due to the generation of employment and foreign exchange, however, GHGs are emitted in the production process, and because of that there is interest in developing mitigation options. This research was carried out to determine the GHG emission trend in the primary production process in bananas and plantains crops, and their relationship with production, productivity and its economic value. Data of area, annual production, crop agronomic management, and price paid to the producer were collected since 1990 and up to 2019. The IPCC methodology was used to calculate GHG emissions from nitrogen fertilization, soil amendments, and hydrocarbons utilized for the application of phytosanitary products. With this information, figures were made

¹ Investigador en Cambio Climático y Agricultura, Convenio: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Agropecuaria, INTA – Instituto Meteorológico Nacional, IMN, Costa Rica. Correos: jmontenegro@imn.ac.cr, jmontenegro@inta.go.cr. Teléfono: (506) 2222-5616. ORCID:0000-0001-8526-570X.

to show trends and the aforementioned relationships were estimated. It was determined that the GHG emission grew in the 90's decade to be relatively stable after 2000 (with important oscillations in the plantain crop). Emission efficiency ($\text{kg CO}_2\text{eq t}^{-1}$ produced) improved over time as the values have been decreasing. A direct and positive effect of income was also determined, since the relationship $\text{t CO}_2\text{eq million}^{-1}$ colones decreased its values over time, although in plantain with constant colones an inverse trend has been shown in recent years. Mitigation options are presented that could improve the values from the determined relationships. It is concluded that the emission has shown stability since 2000, and the price has modeled the GHG emission, with nitrogen fertilization being the main emission source.

Keywords: Banana, Climate change, Emission intensity, Mitigation, Plantain, Tropical crops.

INTRODUCCIÓN

El banano es un cultivo muy importante, del cual se obtiene un alimento de gran calidad nutricional, y durante el proceso productivo genera gran cantidad de empleos. En Costa Rica esta actividad por el volumen de exportación produce ingresos que representan 7,6 % de las exportaciones totales y 43 % del Producto Interno Bruto Agrícola (CORBANA, 2021).

Este sector productivo, al igual que otros del sector agropecuario son afectados de manera negativa por el cambio climático que se produce como resultado del calentamiento global por la acumulación en la atmósfera de los gases con efecto invernadero (GEI), lo cual pone en riesgo económico y social la actividad misma y a las personas que de ella dependen.

La emisión de GEI se presenta en diferentes actividades desarrolladas por la actividad humana, entre las cuales la agricultura no es excepción. Este tipo de gases se genera en diferentes prácticas agrícolas implementadas durante el proceso productivo.

De acuerdo con el Inventario Nacional de GEI (INGEI) realizado para el 2015 (MINAE 2019), la emisión del cultivo del banano y plátano, en equivalentes de CO_2 , sin incluir las actividades donde se usa maquinaria de combustión interna representó 10,7 % del sector agrícola.

El peso relativo que este sector tiene en las emisiones del país es importante, y es por ello que existe gran interés en su cuantificación y dar seguimiento a las emisiones de GEI. Esto permite

determinar patrones, y conocer variables que influyen el comportamiento determinado. Esta información es muy importante ya que permitirá de manera más técnica, desarrollar opciones de mitigación, logrando con ello un producto más sostenible y amigable con el ambiente.

El sector bananero consiente de esta situación, ha decidido participar activamente para contribuir a la solución de la problemática global del cambio climático y apoya la formulación de Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA por sus siglas en ingles) en musáceas.

El NAMA vendrá a desarrollar opciones de mitigación de acuerdo con el sistema de producción y condiciones propias de las regiones donde se ubican estos cultivos, por lo que se requiere disponer de información tan precisa como sea posible de manera que se pueda utilizar con confianza, pero también con base técnica sólida.

En concordancia con lo anterior, el presente documento mediante el análisis de información histórica y actualizada, y utilizando la metodología sugerida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en ingles), pretende proporcionar una visión amplia de la tendencia en la emisión de GEI derivada de la actividad primaria de estos cultivos desde 1990.

No existe documento alguno que haya realizado un estudio de tendencias en el tiempo de la emisión generada en el sector primario para ambos cultivos en Costa Rica, ya que el único trabajo disponible se limitó al cultivo del banano e incluyó solo las emisiones de óxido nitroso proveniente de

la fertilización nitrogenada (Montenegro 2016). De igual forma, la disponibilidad de estudios similares realizados a nivel internacional es sumamente reducido, lo cual limita la comparación de principales fuentes, magnitudes, y eficiencia.

Actualmente en Costa Rica existe gran interés, tanto de parte del Gobierno de la República como de la empresa privada, en procurar reducir la emisión de GEI a la atmósfera por el beneficio generado a nivel global; como también, por la obtención de productos ambientalmente más limpios que podrían ser comercializados y colocados en mercados preferenciales.

El sector agrícola constituye uno de los sectores interesados en disponer de este tipo de estudios por las implicaciones positivas que de los mismos se derivan, y especialmente, por poder demostrar mediante evaluaciones, las bondades ambientales

ligadas a la producción primaria. En este sentido, la actividad bananera costarricense ha mostrado ser proactiva y visionaria en esta iniciativa y emprendimiento, ya que se ha preocupado por desarrollar e implementar medidas y regulaciones protocolarias orientadas a establecer tanto buenas prácticas agrícolas (BPA), como las dirigidas a la reducción del uso de agroquímicos durante el proceso productivo con el propósito fundamental no solo de reducir las implicaciones ambientales ligadas al cambio climático, sino también para mejorar la ecoeficiencia en el proceso productivo.

Basado en lo anterior, los objetivos de esta investigación fueron: determinar la evolución de las emisiones GEI, desde 1990 y hasta el 2019, que se generaron durante el proceso productivo primario en los cultivos de banano y plátano, y determinar si existe relación de la emisión con la productividad y, con el valor de la producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recopilación de información

El análisis desarrollado abarcó desde 1990 y hasta el 2019. Para esta investigación se utilizaron estadísticas de área sembrada de banano, así como de producción, reportada en diferentes informes anuales por la Corporación Bananera Nacional (CORBANA 1995, CORBANA 1998, CORBANA 2004, CORBANA 2009, CORBANA 2013, CORBANA 2017, CORBANA 2018). También se utilizaron diferentes números del Boletín Agropecuario de la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA 1998, SEPSA 2000, SEPSA 2002, SEPSA 2004, SEPSA 2007, SEPSA 2011, SEPSA 2014, SEPSA 2017), para complementar la información productiva. Con estos datos se calculó la productividad.

Con datos del Banco Central suministrados por SEPSA se obtuvo la información del valor bruto de la producción (VBP), tanto en colones corrientes como encadenados al 2012. Utilizando estos datos se obtuvo el precio promedio pagado al productor por caja y por tonelada, tanto para banano como para plátano.

Para el cultivo de plátano, la información de área sembrada y producción provino de los boletines de SEPSA antes referenciados.

Cálculo de la emisión de gases con efecto invernadero

La metodología utilizada en este proceso es la sugerida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2006) misma que utiliza el Instituto Meteorológico Nacional para realizar el INGEI.

Emisión de N_2O -N del suelo

Para estimar la emisión de óxido nitroso proveniente del suelo en el cultivo de banano, se utilizaron los factores de emisión (FE) resultado de investigaciones realizadas en el país (Veldkamp y Keller 1997, Montenegro y Abarca 2001, Montenegro *et al.* 2012). Debido a que no se dispone de resultados de investigación en FE para el cultivo de plátano, se utilizó el FE sugerido por el IPCC.

Emisión de CO₂ por la aplicación de enmiendas calcáreas al suelo

La disponibilidad de datos relacionados con el uso y la aplicación de productos para corregir la acidez del suelo, y con ello favorecer el desarrollo de radicular y por ende el del cultivo, es baja y difícil de conseguir. Por lo anterior se utilizó la opinión de expertos ligados al manejo de estos cultivos para estimar la utilización de enmiendas. Mediante consulta se estimó que en el cultivo de banano en promedio se aplica aproximadamente una tonelada por hectárea cada dos años. En el caso del plátano la aplicación es menor, siendo de alrededor del 10 % de la del banano.

Emisión GEI por la aplicación aérea de productos fitosanitarios

La aplicación de productos fitosanitarios, especialmente fungicidas, se realiza con la utilización de avioneta tipo Thrush, de la cual se estimó el consumo de combustible de acuerdo con datos confidenciales accesados de una finca comercial de banano. Para estimar el total de combustible utilizado por año, el consumo de combustible por hectárea se multiplicó por el área total cultivada de banano y por la cantidad de aplicaciones realizadas por año. El número de aplicaciones se obtuvo de Vargas *et al.* (2017), y se realizó interpolación lineal entre los años en los cuales no se dispuso de información al respecto.

Con el empleo de los factores de emisión sugeridos por el IPCC se obtuvo la cantidad de metano, óxido nitroso y CO₂ liberado por la combustión de esta fuente energética. En el cultivo de plátano no se utiliza la aplicación aérea debido al tamaño relativamente pequeño de las fincas.

Lo emisión proveniente de cada uno de los gases de las diferentes fuentes para cada cultivo se transformaron a dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) de acuerdo con los valores establecidos por la Convención Marco para el Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCCNU).

Eficiencia de emisión

Para calcular la eficiencia de emisión también conocida como intensidad de la emisión

(cantidad de gas emitido por unidad de producto obtenido), el total de CO₂eq emitido en cada cultivo se dividió entre las toneladas producidas. También se estimó esta relación para la emisión con respecto al ingreso en colones generado para cada cultivo.

Límites del estudio

Esta evaluación se desarrolló enfocando exclusivamente la producción primaria que se lleva a cabo en las áreas productoras, por lo que considera solo las emisiones de N₂O-N provenientes de la fertilización nitrogenada, así como también de este gas, el metano y el CO₂ generado durante la combustión interna de combustible utilizado por las avionetas que aplican productos fitosanitarios. También se incluye la emisión de CO₂ proveniente de la aplicación de enmiendas calcáreas al suelo.

Debido a que no se dispone de información detallada de variaciones en las dosis de fertilizante aplicadas, entre años y entre productores, se utilizó una cantidad constante de 300 kg de nitrógeno ha⁻¹ ciclo⁻¹ de cultivo, de acuerdo con Montenegro *et al.* (2012).

Este análisis no incluyó el potencial cambio que podría estar ocurriendo con el carbono orgánico del suelo en los terrenos dedicados a la siembra de banano o plátano debido a que no se dispone de información concluyente al respecto.

No se incluye tampoco las emisiones de motores de combustión interna terrestres utilizados en diversas operaciones durante el proceso productivo, ni se incluye la fase de selección y empaque de la fruta.

Manejo estadístico de los datos

Con los datos disponibles se procedió a realizar figuras para mostrar tendencias y se calcularon relaciones entre las siguientes variables: emisión GEI con producción e ingreso. También se realizaron análisis de correlación con las siguientes variables: área, productividad, precio pagado al productor, valor de la producción y, emisión de GEI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Banano

Generalidades

Área y productividad

El área sembrada de banano, luego del crecimiento que se observó al inicio de la década del 90 donde alcanzó la mayor extensión entre 1994 y 1996, se redujo posteriormente y hasta el 2002, para mantenerse relativamente estable a partir de ese año (Figura 1). La reducción en la disponibilidad de terreno y el precio de este limitaron la expansión de esta actividad agrícola a partir del 2000.

Con respecto a la productividad, la misma presenta variaciones interanuales, las cuales están directamente ligadas a fenómenos meteorológicos extremos, principalmente inundaciones (Vallejos *et al.* 2012), lo cual condujo a reducciones importantes (Figura 1). Sin embargo, particularmente a partir del 2000 se observa una clara tendencia al incremento de la productividad, aunque se mantiene la variabilidad interanual que resulta del efecto climático antes mencionado.

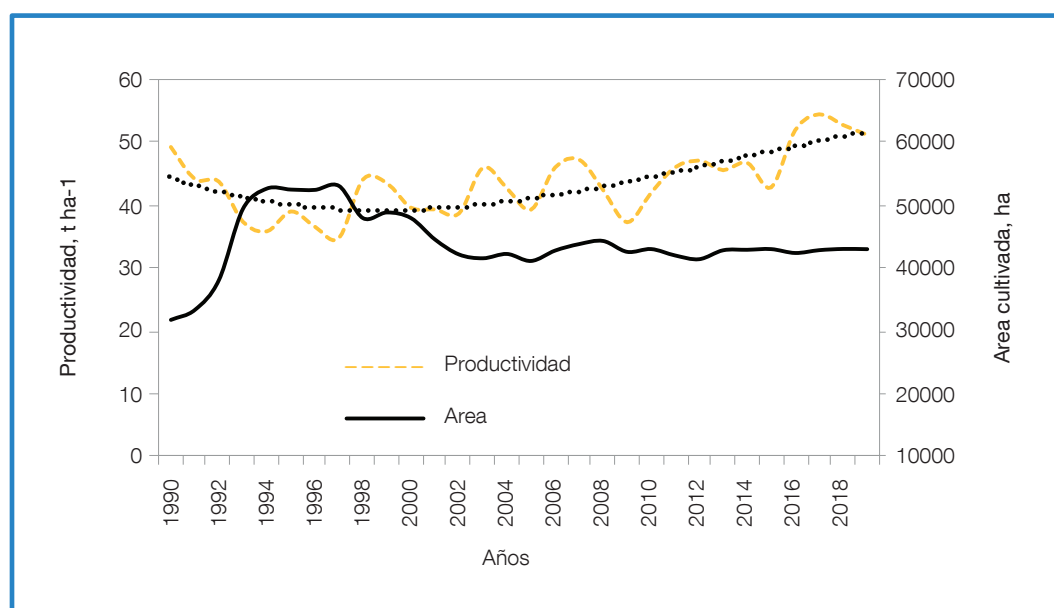


Figura 1. Área cultivada de banano, ha, y productividad, t ha⁻¹, desde 1990 y hasta el 2019. Costa Rica.

Precio por caja exportada

El precio en colones corrientes, que los productores reciben por caja de banano exportada, ha mantenido clara tendencia al alza (Figura 2). La figura también muestra algunos periodos donde el precio se ha estabilizado, tal como ocurrió desde el 2010 y hasta el 2013, y nuevamente a partir del 2015.

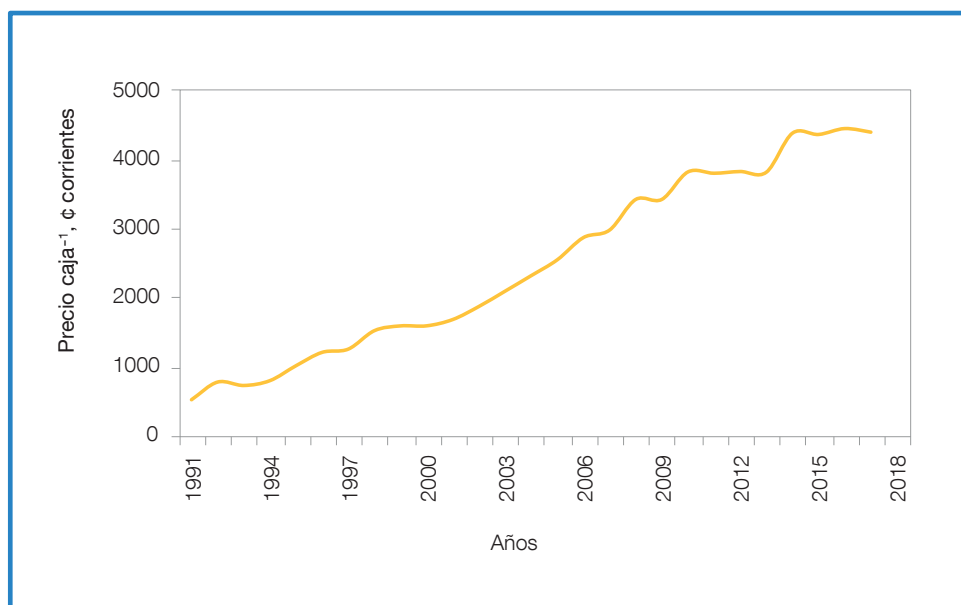


Figura 2. Precio, en colones corrientes, pagado al productor por caja de banano exportada. Costa Rica.

El precio pagado al productor durante la década de los 90's estimuló el incremento del área sembrada (Figura 3a), lo cual es mostrado por la correlación determinada entre estas dos variables ($P < 0,0283$). Sin embargo, a pesar de que el precio continuó incrementándose, ello no se tradujo en más área de siembra a partir del 2000 (Figura 3b), lo cual se explica en parte por la reducción de terrenos disponibles y el precio de estos.

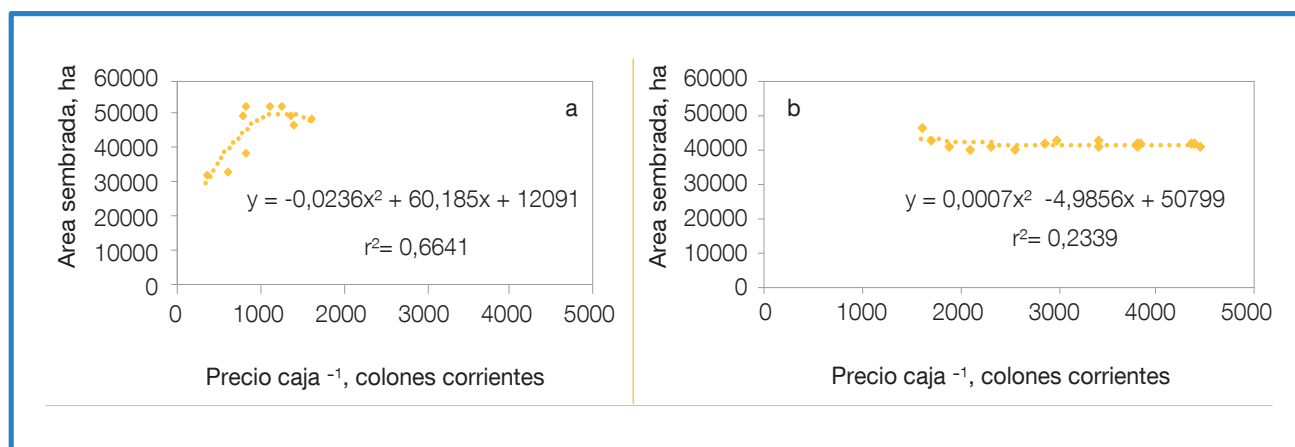


Figura 3. Relación entre el precio pagado al productor, colones corrientes por caja, y área cultivada de banano, a: en los 90's y b: después del 2000. Costa Rica.

Emisión GEI

La emisión de GEI proveniente de la aplicación de fertilizantes nitrogenados es la principal fuente, y representa el 82,6 % del total, en segundo lugar (12,8 %) aparece la aplicación de enmiendas al suelo para corregir la acidez de este, y finalmente, la aplicación de productos fitosanitarios por medios aéreos representa menos del 5 % del total.

La emisión total de GEI, en equivalentes de CO_2 , se ha mantenido relativamente estable en los últimos años (Figura 4) después del incremento observado en la década del 90 como resultado

del aumento del área de siembra (Figura 1), donde el mejoramiento de la productividad parece no afectar la emisión total (Figura 4).

En términos nacionales, la emisión GEI en esta actividad de acuerdo con el más reciente Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero del 2017 (MINAE 2021), representó el 15,7 % del sector agrícola, 2,9 % del sector agropecuario, 0,8 % de la emisión bruta nacional y, 0,6 % de la emisión neta nacional.

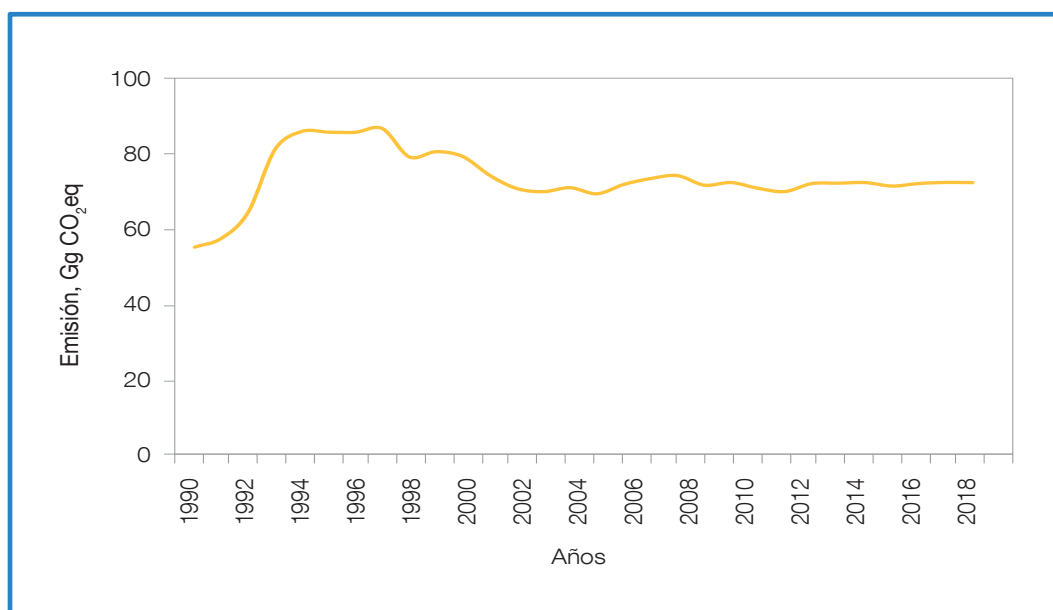


Figura 4. Emisión total de CO_2eq , t año^{-1} , proveniente del suelo bajo el cultivo de banano. Costa Rica.

Eficiencia de emisión

Emisión vs producción

La emisión de $\text{CO}_2\text{eq t}^{-1}$ de banano ha fluctuado en el tiempo, y a pesar de las variaciones interanuales observadas, se nota de manera clara como esta relación tiende a mejorar, especialmente después del 2002, ya que los valores han ido disminuyendo con el tiempo (Figura 5), es decir, en promedio cada vez se emite menor cantidad de CO_2eq por tonelada de banano producido.

De acuerdo con la tendencia observada con la curva de mejor ajuste, del 2000 al 2019, la emisión de CO_2eq se redujo $9,8 \text{ kg t}^{-1}$ banano exportado. Ello indica que, el sector bananero dejó de emitir 478,7 toneladas de $\text{CO}_2\text{eq año}^{-1}$ en el periodo referenciado. Es importante resaltar el hecho de que en el último año evaluado (2017) se produjeron más toneladas de banano que en el 2000.

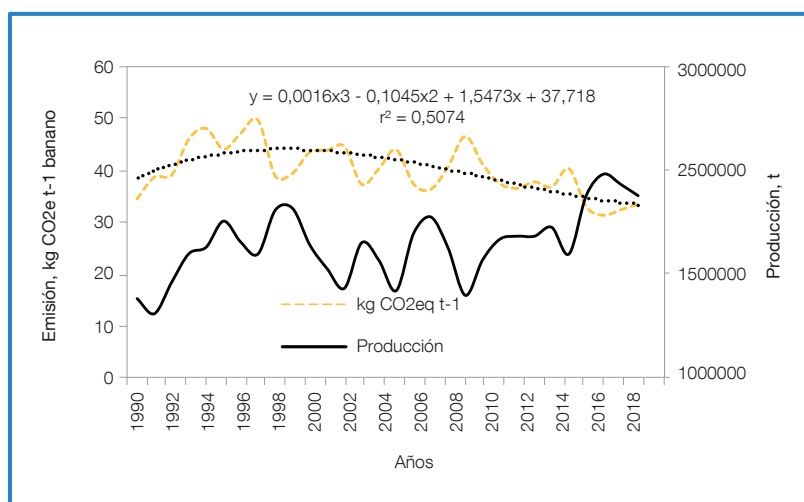


Figura 5. Relación entre la emisión y la producción de banano. Costa Rica.

El mejoramiento en esta relación es el resultado del incremento en la productividad (Figura 1), y no del aumento del área sembrada (Figura 1) y refleja la mejora en la eficiencia productiva que este sector ha alcanzado en los últimos años. Esto también demuestra que es posible incrementar los rendimientos productivos al mismo tiempo que se logra mitigar las emisiones de GEI.

El valor de la eficiencia de emisión fue de 0,041 kg de CO₂eq kg⁻¹ de banano, para el promedio del periodo considerado y de 0,034 kg de CO₂eq kg⁻¹ de banano para último año analizado. Ambos valores son bastante inferiores a los reportados para Colombia (1,2,3) y Guatemala (0,11) por Páez (2017). Diferencias metodológicas y de los alcances de los estudios explican las diferencias en los valores señalados.

Emisión vs ingreso

El valor de la relación entre la emisión y el ingreso, independientemente si son colones corrientes o constantes, se ha venido mejorando en el tiempo (Figura 6).

En el caso de colones corrientes, es claro el mejoramiento de esta relación puesto que, a partir de 1990, cada año se redujo en promedio la emisión en 0,063 t de CO₂eq por cada millón de colones que ha ingresado al país como resultado de la venta de esta fruta. Al comparar los valores de esta relación del 2019 con los de 1990, se obtiene la disminución de 1,2 t de CO₂eq emitido por cada millón de colones (Figura 6).

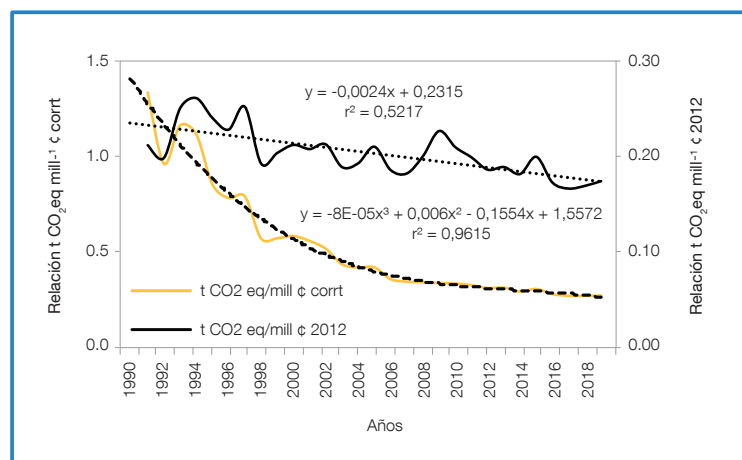


Figura 6. Emisión de CO₂eq por millón de colones en la actividad bananera. Costa Rica.

En colones constantes, referenciados al 2012, la tendencia de la reducción es lineal con pendiente negativa, y el valor pasó de 0,19 t de CO₂eq t⁻¹ banano en 1991 a 0,16 en el 2019. Sin embargo, si se observa que el mayor valor (0,26) se presentó en 1994, la reducción determinada es de 0,10 t de CO₂eq por cada millón de colones de ingreso por la exportación de banano.

En todo caso, lo interesante a observar es que, en cualquiera de las dos modalidades, colones corrientes o constantes, la tendencia es clara, se disminuye la emisión por millón de colones que ingresa al país. Esto es muy importante pues

indica que el sector bananero ha venido mejorado paulatinamente su eficiencia productiva, contribuyendo al mismo tiempo con el ambiente, en este caso ligado al cambio climático.

Se determinó correlación significativa ($P < 0,0001$) entre el precio que los productores recibieron por tonelada de banano y la emisión de GEI en la década de los 90's (Figura 7a). Esto se explica por el hecho de que el incremento en el precio (Figura 2) estimuló el incremento del área sembrada (Figura 1), lo cual a su vez aumentó la emisión de GEI (Figura 4), aunque ello no fue de manera proporcional.

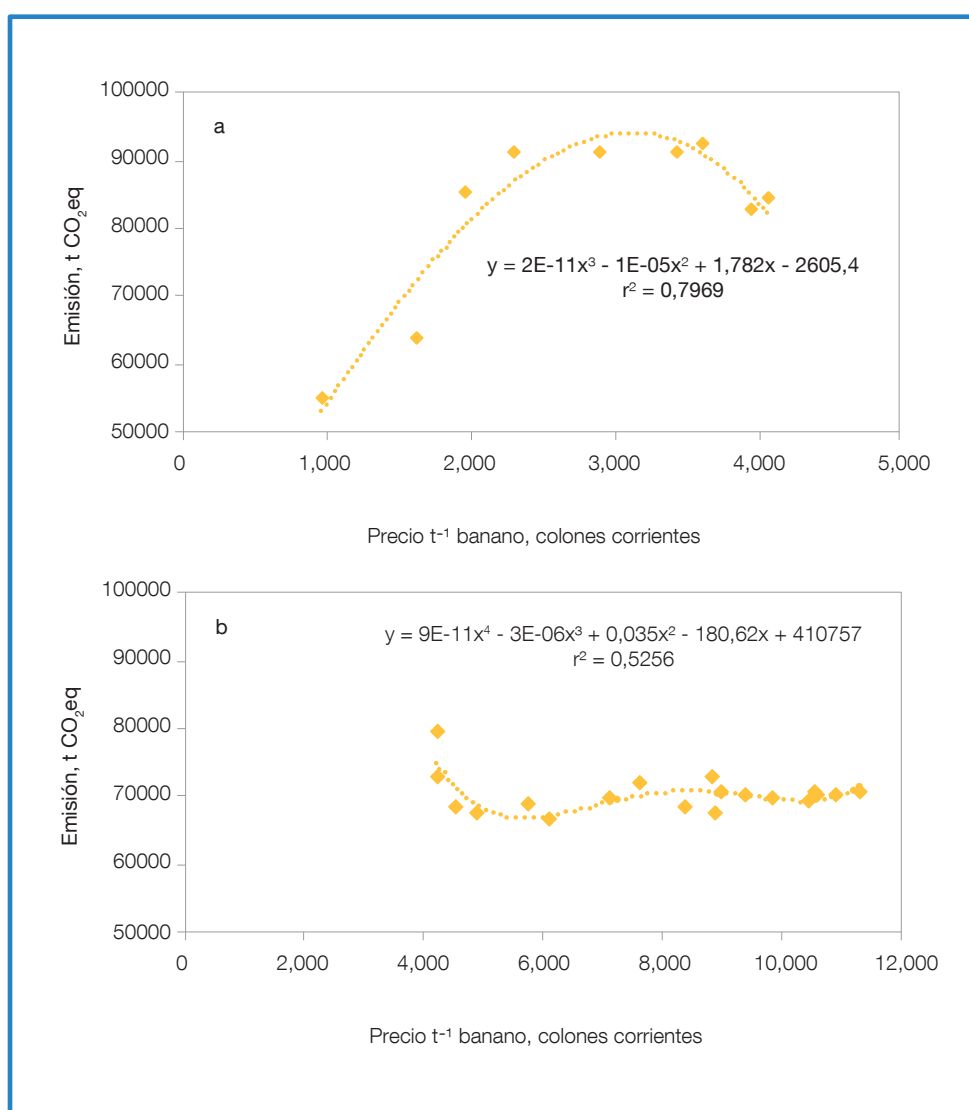


Figura 7. Relación entre la emisión y el ingreso en colones corrientes por exportación de banano en (a) los 90's y (b) después del 2000. Costa Rica.

Después del 2000 la correlación entre el ingreso y las emisiones no fue significativa (Figura 7b). Ello se explica por el hecho de que el ingreso crece como resultado del incremento de la productividad, no por aumento del área productiva (Figura 1), lo que en consecuencia hace que no se incrementen las emisiones GEI. Limitaciones para expandir el área de siembra hace que los productores busquen la forma de producir más en el mismo terreno, y al producir más, consecuentemente generan más ingresos sin que ello impacte positivamente las emisiones, lo cual es lo que se refleja en la figura 7b.

Plátano

Área sembrada y productividad

El área sembrada de plátano se incrementó desde 1990 y hasta el 2002 (Figura 8), con reducciones en algunos años (1994 y 2000) como consecuencia de problemas causadas principalmente por inundaciones (Vallejos *et al.* 2012). A partir de ese año, y con la excepción de la disminución observada en el 2005 y el 2008 resultado de pérdida de plantaciones por inundaciones (Vallejos *et al.* 2012), el área cultivada se ha mantenido relativamente estable (Figura 8).

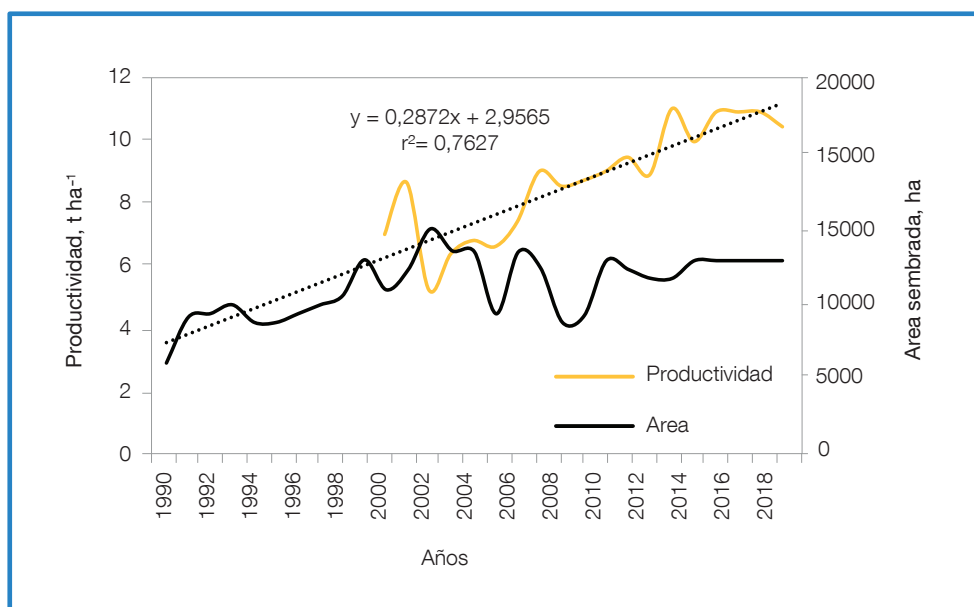


Figura 8. Área cultivada de plátano, ha, y productividad, t ha⁻¹. Costa Rica.

La productividad, cantidad producida por unidad de área, muestra un incremento lineal, pasando de 5,0 t ha⁻¹ en el 2002 a 10,5 t ha⁻¹ en el 2018 (Figura 8), lo cual implica un incremento promedio de 0,34 t ha⁻¹ año⁻¹. La limitada disponibilidad de terreno ha contribuido con el incremento de la productividad, ya que los productores mejoran el manejo para aumentar la producción en la misma área sembrada.

Las reducciones observadas en productividad se explican en buena medida por la reducción de

la producción como consecuencia de la afectación de las plantaciones por las inundaciones. De igual forma, los incrementos observados se explican por la mejora en la producción que ocurre normalmente durante el primer año luego de la siembra, debido a que toda la plantación tiende a producir al mismo tiempo por la uniformidad de edad de la cepa.

Lo anterior se aprecia claramente en el desacople de la producción con el área sembrada, particularmente en los últimos años (Figura 9).

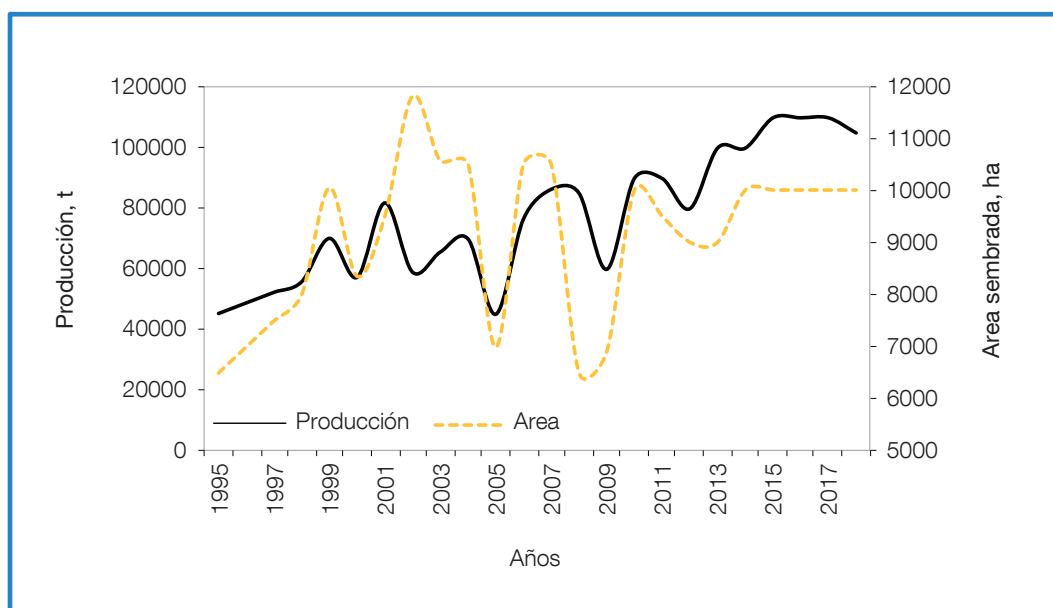


Figura 9. Producción, t, área sembrada, ha, de plátano. Costa Rica.

Precio por tonelada

El precio, en colones corrientes que recibe el productor por tonelada de plátano, ha fluctuado en el tiempo, donde destaca el descenso observado a finales de los 90's e inicio del 2000, y el incremento posterior y hasta el 2005 y en el 2009 (Figura 10). Luego de 4 años con alguna fluctuación, pero relativamente estable, a partir del 2014 se nota una tendencia al alza. Esas fluctuaciones se presentan como resultados de oferta y demanda, ya que el área cultivada (Figura 9) se ha mantenido estable en los últimos años.

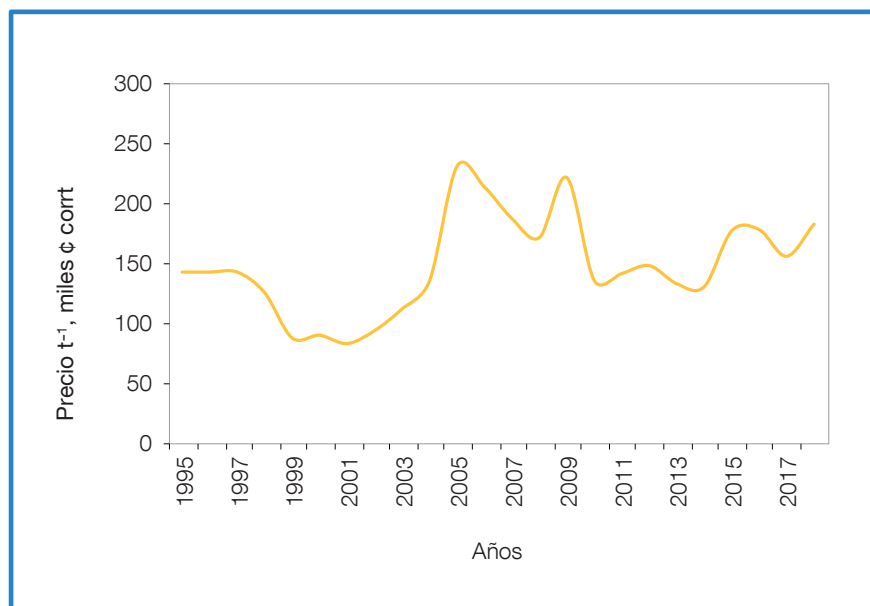


Figura 10. Precio, en colones corrientes, pagado al productor por tonelada de plátano. Costa Rica.

Los problemas causados por las inundaciones reducen la producción y consecuentemente la oferta, por lo que al mantenerse la demanda los precios se incrementan. Eso se puede apreciar claramente en el incremento de precio determinado en el 2005 y el 2009 (Figura 10), que es el resultado de reducción del área sembrada y de la producción (Figura 9) por problemas causados por inundaciones (Vallejos *et al.* 2012). El sentido opuesto de esta relación, más oferta con efecto negativo en los precios, se puede observar en 1999, 2001, 2008, 2010, 2014 y 2017 (Figura 10).

El análisis de correlación mostró que el precio está directamente ligado con la productividad ($P < 0,0001$), observándose que conforme el precio mejora también lo hace la productividad (Figura 11). La reducción en los valores de la relación cuando los precios son altos se explica por fenómenos meteorológicos extremos relacionado con inundaciones, las cuales afectaron negativamente las plantaciones y en consecuencia la producción y la productividad obtenida, lo cual causó el incremento del precio.

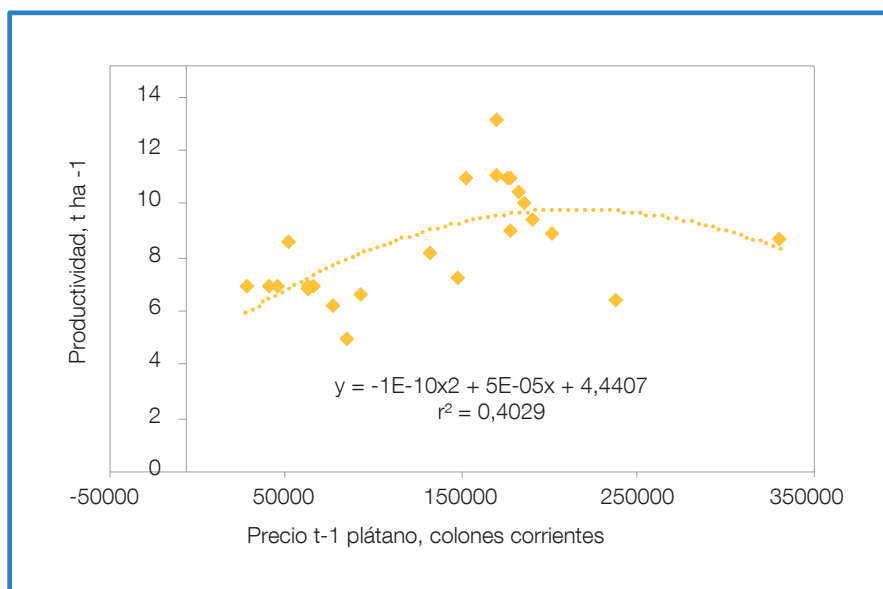


Figura 11. Relación entre la productividad, t ha⁻¹, y el precio en colones corrientes t⁻¹ de plátano pagado al productor. Costa Rica.

Emisión GEI

La emisión de GEI en este cultivo se debe mayoritariamente a la utilización de fertilizante nitrogenado (93 %) representando la aplicación de enmiendas al suelo el 7 %.

La emisión de GEI se incrementó durante la década de los 90's (Figura 12) como resultado del aumento del área sembrada (Figura 8), y se puede observar claramente como la reducción observada en el 2000, 2005 y el 2008, producto de fenómenos meteorológicos extremos (Vallejos *et al.* 2012), influenciaron la emisión. De igual forma, aquellos años donde se registraron las mayores áreas sembradas es donde se presenta la mayor emisión (Figura 12).

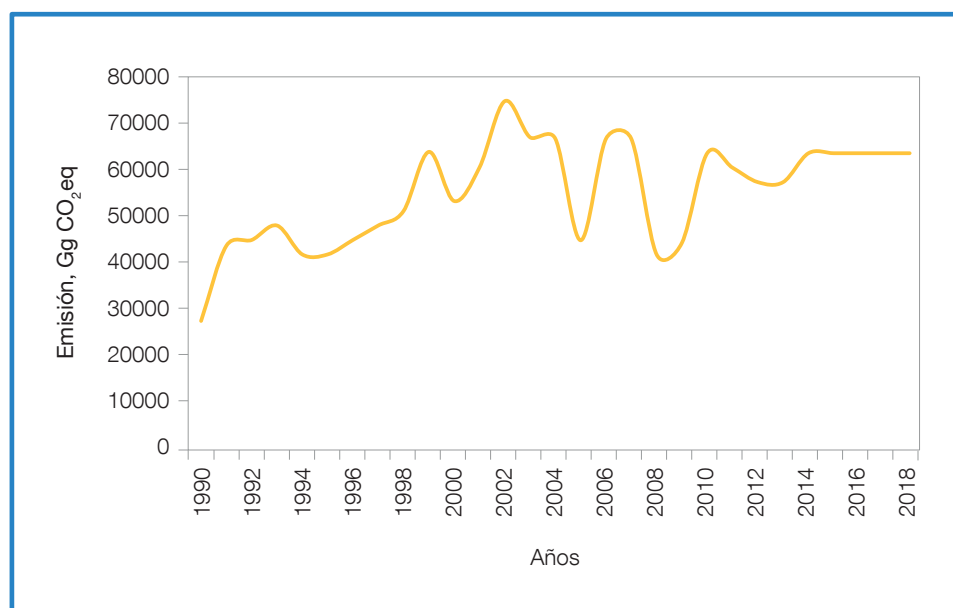


Figura 12. Emisión, t de CO₂eq, proveniente del suelo bajo el cultivo de plátano. Costa Rica.

Eficiencia de emisión

Emisión y producción

La relación de la emisión con la producción ha mejorado en el tiempo, observándose tendencia a la reducción de la emisión por tonelada de plátano producida (Figura 13). La reducción total desde el 2000 y hasta el 2018 ha sido de 31,6 t de CO₂eq t⁻¹ de plátano, para una disminución promedio anual de 1,75 kg de CO₂eq t⁻¹ de plátano producido (Figura 13).

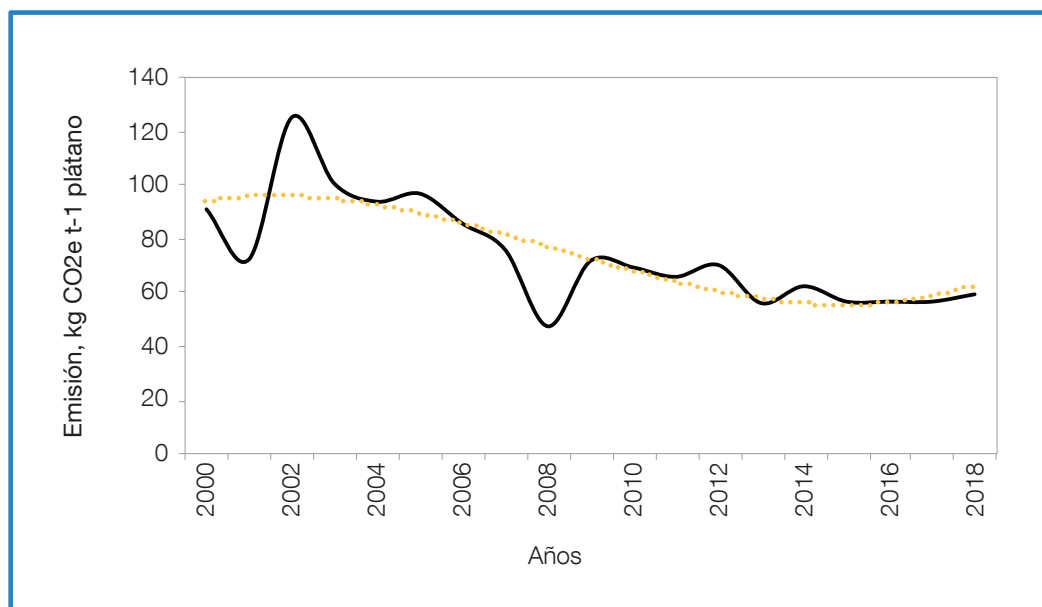


Figura 13. Relación entre la emisión de CO₂eq y la producción de plátano. Costa Rica.

Si el punto de comparación iniciara en el 2002, donde se determinó la mayor emisión, la reducción promedio anual sería aún mayor (4,1 kg de CO₂eq t⁻¹ de plátano producido); en todo caso la relación muestra la mejora en la eficiencia productiva que se ha venido presentando en el tiempo en este sector productivo, con tendencia a estabilizarse en los últimos años (Figura 13).

Las variaciones observadas en el valor de esta relación (Figura 13) se explican por el efecto de las condiciones climáticas extremas comentadas anteriormente y que afectaron negativamente la actividad, y ello incrementó los valores. En el caso de las reducciones determinadas, las mismas suceden por el aumento de la producción y productividad de las plantaciones recién sembradas.

Emisión GEI y Valor Bruto de la Producción

La emisión de CO₂eq por millón de colones corrientes, presenta un mejoramiento en esta relación, ya que los valores se redujeron de 4,21 t de CO₂eq millón⁻¹ en 1991 a 0,32 t de CO₂eq millón⁻¹ en el 2018. Ello significa que se han dejado de emitir 3,9 t de CO₂eq por cada millón generado por la venta de la producción (Figura 14a), lo que para el intervalo considerado (27 años) el promedio anual es de 0,14 t de CO₂eq por cada millón. Lo anterior se explica mayoritariamente por el incremento de la productividad, la cual ha mejorado linealmente desde el 2002 (Figura 8)

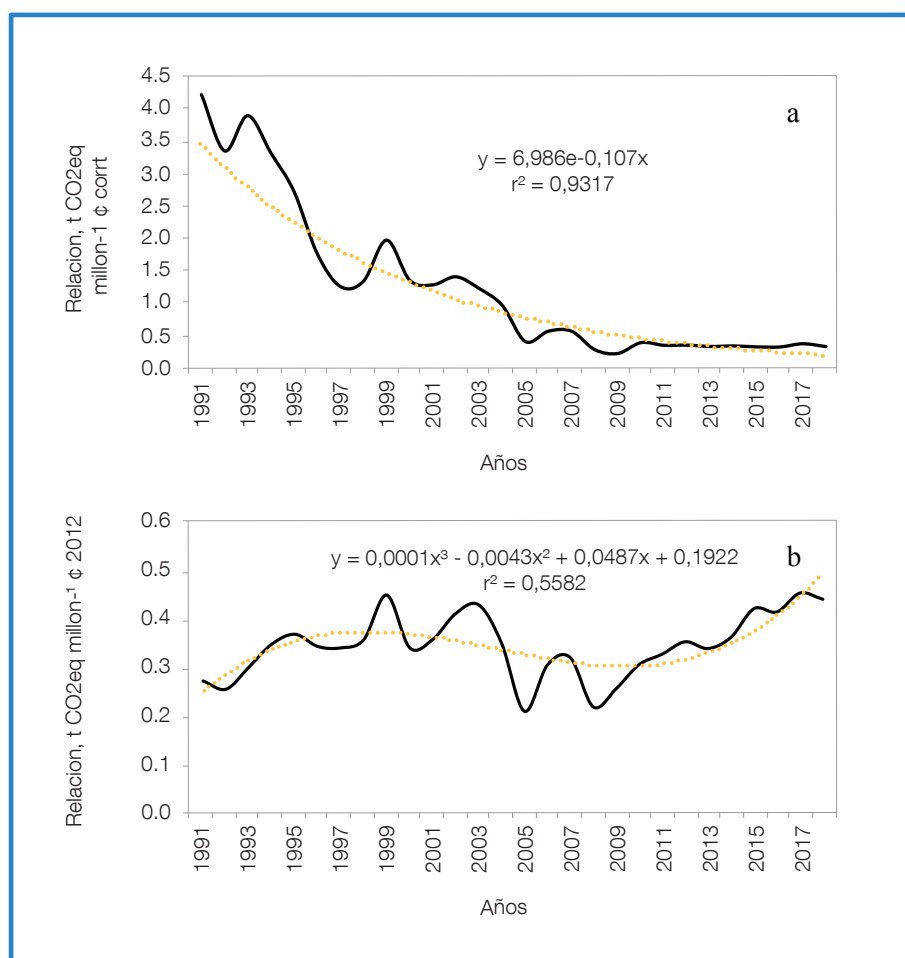


Figura 14. Emisión de CO₂eq, por millón de colones corrientes (a) y constantes del 2012 (b), en la actividad platanera. Costa Rica.

El incremento en la productividad muestra claramente el esfuerzo que hace el productor, que, si bien recibe más colones corrientes por su producto, ello no hace que sus ingresos reales sean mejores. Esto queda claramente demostrado cuando se utilizan para esta relación colones constantes, en este caso encadenados al 2012 (Figura 14b).

La relación obtenida con colones constantes es diferente a la observada con colones corrientes, pues muestra un comportamiento polinomial (Figura 14b). En la década del 90 se presentó un incremento del valor de esta relación, lo cual indica que de 1991 a 1999 se emitió mayor cantidad de CO₂e por cada millón generado en la venta de la producción, pues la emisión pasó de 0,26 a 0,44 t CO₂e por cada millón. En la siguiente década, del 2000 al 2009, se presentó tendencia a la baja, aunque con bastante variación; a partir del 2010 nuevamente la tendencia es al incremento (Figura 14b).

El incremento general observado, es de una magnitud promedio anual de 6,3 kg de CO₂e por millón de colones cuando se comparan los valores de esta relación correspondiente a 1991 con respecto a la estimada en el 2018.

Opciones de mitigación

Diferentes prácticas podrían ser implementadas en el cultivo del banano y plátano con el propósito de contribuir a la reducción de la emisión del óxido nitrroso que se deriva de la utilización de fertilizantes nitrogenados, principal fuente de emisión, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

Una posibilidad es la aplicación de fertilizantes nitrogenados de lenta liberación que se constituye en una alternativa interesante, dado que no solamente reduce la cantidad aplicada, sino también la disponibilidad inmediata de este elemento luego de su aplicación, lo cual podría reducir además de los costos de producción, la emisión del óxido nitrroso. Investigación realizada en nuestro país en diferentes cultivos (Montenegro *et al.* 2012, Montenegro y Herrera 2013) ha mostrado la ventaja de la utilización de este tipo de fertilizante.

La aplicación de fertilización en función de los requerimientos del cultivo, nivel de producción y condiciones de suelo y clima, bajo el concepto de agricultura de precisión (Alcaraz y Jiménez 2018), es una forma de lograr no solo mejor eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado aplicado, sino también de mejorar la producción y productividad, al tiempo que se podrían reducir los costos económicos y los ambientales ligados a la generación y liberación del óxido nitrroso. Una herramienta fundamental que ayuda a definir las dosis óptimas de fertilización en los cultivos es la curva de extracción de nutrientes por la planta (Bertsch 2009). De tal forma que utilizando este enfoque es posible lograr objetivos de diversa índole: de costos, productivos y, ambientales, dentro de los cuales se encuentra la mitigación.

La utilización de coberturas vegetales es una práctica que se ha venido incentivando en diferentes cultivos y las musáceas no son la excepción, donde la presencia de leguminosas podría ser de gran valía por el aporte de nitrógeno que pueden hacer vía la simbiosis con bacterias quimioorganotrofas aerobias, grupo al que pertenece *Rhizobium* (Martínez *et al.* 2003, Mia *et al.* 2013). La reducción potencial en la cantidad de nitrógeno sintético que se podría lograr no solo disminuiría la emisión de este gas, sino también un importante ahorro en los costos de producción, volviendo más competitiva la fruta nacional en los mercados. También, es importante mencionar el aporte de carbono orgánico al suelo que realizan las coberturas vegetales orgánico (Montenegro y Segura 2021), lo cual además de mitigar se constituye en una opción para el incremento de la microfauna y mejorar la salud del suelo (Nielsen y Winding, 2002), la persistencia y la sostenibilidad del cultivo, dada la mejora en las características del suelo que lo hacen aún más apropiado para la producción de las musáceas.

La incorporación de los residuos de las plantas como también de la cosecha, p.e. pinzotes, en las áreas de cultivo contribuyen no solo a incrementar la producción (Álvarez 2013), sino también a mantener la fertilidad del suelo. Además, son una fuente importante de carbono orgánico (Montenegro y Segura 2021) que estimula la microflora del suelo mejorando la salud de este e incrementando la cantidad de carbono del suelo.

La utilización de drones para la aplicación de productos fitosanitarios puede ser una herramienta tanto para reducir la emisión por la menor utilización de aviones para las aspersiones (Arboleda y Massuh, 2014), como también para extender las áreas de cultivo, lo cual tendría un impacto favorable en la producción y la sostenibilidad de esta actividad productiva.

La evolución de la emisión GEI en ambos cultivos mostró que luego del incremento observado en la década de los 90's ligado a la expansión de estas actividades agrícolas, a partir del 2000 las emisiones tienden a estabilizarse.

Se evidenció que el precio que los productores reciben por su producción influye en la eficiencia productiva ($t \text{ producto ha}^{-1}$), de emisión ($kg \text{ CO}_2eq \text{ t}^{-1}$ producida), y económica ($t \text{ CO}_2eq \text{ millón}^{-1}$ de ingreso).

La eficiencia de la emisión con respecto a la producción se ha visto mejorada en el tiempo con tendencia a mantener los valores en los últimos años, sin embargo, la tendencia de la eficiencia de emisión económica depende de la utilización de colones corrientes o constantes.

Deben realizarse esfuerzos enfocados a la fertilización nitrogenada para mitigar los GEI que se derivan de su aplicación, ya que constituyen la principal fuente de emisión.

Existe potencial para reducir las emisiones GEI en ambos cultivos mediante la implementación de diferentes opciones de mitigación, con lo cual se obtendrían mejores valores en los diferentes parámetros analizados, tanto biológicos como económicos y ambientales ligados al cambio climático.

LITERATURA CITADA

Alcaraz, J; Jiménez, J. 2018. La aplicación de la agricultura de precisión en el proceso de fertilización: un caso de estudio para el sector bananero del Urabá-Antioqueño. Tesis Mag. Sc. en Economía Aplicada. Medellín, Colombia. Universidad EAFIT. 88 p.

Álvarez, W. 2013. Efecto del raquis flora de banano procesado sobre el vigor de la planta y la incidencia del desorden fisiológico conocido como "Balastro" en banano (*Musa* sp. AAA Gran Nain) en Río Frío, Sarapiquí, Heredia. Tesis Lic. San Carlos, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 62 p.

Arboleda G; Massuh, F. 2014. Análisis de factibilidad del uso de drones en las plantaciones bananeras de la provincia de El Oro. Tesis Lic. Guayaquil, Ecuador, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. 97 p.

Bertsch, F. 2009. Absorción de nutrientes por los cultivos. Asociación Costarricense de la Ciencia del suelo. San José, Costa Rica. 307 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2021. Estadísticas. Beneficios del sector bananero (en línea) San José, Costa Rica. Consultado 02 jul. 2021. Disponible en <https://www.corbana.co.cr>

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2018. Estadísticas de exportación bananera 2017. San José, Costa Rica. 95 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2017. Estadísticas de exportación bananera 2016. San José, Costa Rica. 86 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2013. Estadísticas de exportación bananera 2012. San José, Costa Rica. 80 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2009. Estadísticas de exportación bananera 2008. San José, Costa Rica. 77 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 2004. Estadísticas de exportación bananera 2003. San José, Costa Rica. 58 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 1998. Estadísticas de exportación bananera 1997. San José, Costa Rica. 52 p.

CORBANA (Corporación Bananera Nacional). 1995. Estadísticas de exportación bananera 1994. San José, Costa Rica. 48 p.

SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2017. Boletín estadístico agropecuario No. 27. MAG, San José, Costa Rica. 218 p.

SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2014. Boletín estadístico agropecuario No. 25. MAG, San José, Costa Rica. 188 p.

- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2011. Boletín estadístico agropecuario No. 21. MAG, San José, Costa Rica. 182 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2007. Boletín estadístico agropecuario No. 17. MAG, San José, Costa Rica. 74 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2004. Boletín estadístico agropecuario No. 15. MAG, San José, Costa Rica. 58 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2002. Boletín estadístico agropecuario No. 13. MAG, San José, Costa Rica. 34 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2000. Boletín estadístico agropecuario No. 11. MAG, San José, Costa Rica. 30 p.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 1998. Boletín estadístico agropecuario No. 9. MAG, San José, Costa Rica. 28 p.
- Martínez, L; Caballero-Mellado, J; Orozco, J; Martínez-Romero, E. 2003. Diazotrophic bacteria associated with banana (*Musa* spp.). *Plant and Soil* 257:35-47.
- Mia, A; Hossain, M; Shamsuddin, Z; Islam, T. 2013. Plant-associated bacteria in nitrogen nutrition in crops, with special reference to rice and banana. *Gazipur, Bangladesh*. 31 p.
- MINAE. 2021. Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 1990-2017. Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 380 p.
- MINAE. 2019. Inventario Nacional de Emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases con Efecto Invernadero en Costa Rica 2015. Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 76 p.
- Montenegro, J; Segura, R. 2021. Fijación de carbono orgánico en un suelo cultivado con banano con cobertura vegetal en Costa Rica. *Revista CORBANA*, en prensa.
- Montenegro, J. 2016. Comportamiento histórico de la emisión de gases con efecto invernadero del sector agropecuario de Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 15:53-63.
- Montenegro, J; Herrera, J. 2013. Determinación de la emisión de óxido nitroso en pasto kikuyo (*Kikuyuochloa clandestina*) bajo pastoreo: Efecto de diferentes fuentes y niveles de nitrógeno. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 12:9-21.
- Montenegro, J; Laprade, S; Ortega, R; Sandoval, J. 2012. Desarrollo de opciones de mitigación de óxido nitroso en el cultivo del banano. Evaluación de diferentes fuentes nitrogenadas. *In IV Congreso Internacional sobre el banano* (4, 2012, San José, Costa Rica). Memoria. San José, Costa Rica. 15 p.
- Montenegro, J; Abarca S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del cambio climático. MAG-IMN, San José, Costa Rica. 135 p.
- Nielsen, M; Winding, A. 2002. Microorganisms as indicators of soil health. National Environmental Research Institute, Aarhus, Denmark. Report No. 388. 85 p.
- Páez, J. 2017. Estudio comparativo sobre la huella de carbono en cultivos de banano en los países de Colombia, República Dominicana, Ecuador y Guatemala. Tesis Lic. Bogotá, Colombia, Universidad Militar Nueva Granada. 31 p.
- Vallejos Vásquez, S; Esquivel Valverde, L; Hidalgo Madrigal, M. 2012. Histórico de desastres en Costa Rica (febrero 2013 - setiembre 2012). CNE, San José, Costa Rica. 48 p.
- Vargas, A; Watler, W; Morales, M; Vignola, R. 2017. Prácticas efectivas para la reducción de impactos por eventos climáticos en el cultivo de banano en Costa Rica. Ficha técnica cultivo de banano. CATIE-MINAE-DCC-Adaptation Fund-Fundecooperación. San José, Costa Rica. 56 p.
- Veldkamp, E; Keller, M. 1997. Nitrogen oxide emissions from a banana plantation in the humid tropics. *Journal of Geophysical Research* 102(15):889-898.

NOTA TÉCNICA

COMPARACIÓN FINANCIERA DE CUATRO SISTEMAS PRODUCTIVOS DE AGUACATE HASS

Gabriel Camacho¹, Luis Alfonso Sánchez Chacón², Víctor Rodríguez Lizano³

RESUMEN

Comparación financiera de cuatro sistemas productivos de aguacate Hass. La actividad aguacatera en la zona de Los Santos es la segunda actividad agrícola a nivel productivo y económico de la región después del café. Se ha convertido en una alternativa de cultivo que ha diversificado la fuente de ingresos de muchos productores, al disminuir el riesgo de depender solamente de la actividad cafetalera. Sin embargo, el cultivo presenta importantes desafíos para asegurar su sostenibilidad financiera, entre ellos, la baja productividad, la dificultad para mecanizar y una fuerte presencia de mercados regionales competitivos. Debido a esto, se planteó el presente estudio, cuyo objetivo fue determinar cuál tipo de manejo productivo genera mejores rendimientos financieros. Se utilizó el cálculo de la Relación Ingreso/Costo (RIC) y Tasa de Retorno Marginal (TRM) para estimar la rentabilidad de los sistemas. Asimismo, se realizó un análisis de riesgo a través de una simulación de Montecarlo donde se sensibilizó la RIC en 1000 escenarios, donde se determinó que los cuatro sistemas son rentables en un amplio espectro de probabilidades. El estudio mostró que el “Monocultivo Convencional Intensivo” presentó el mejor indicador de RIC (4,20) y TRM (578,58 %), aunque sistemas como el “Monocultivo enfocado en Múltiples Tecnologías” es una opción viable al considerar el manejo ambiental sostenible al usar insumos orgánicos y bioinsumos a un retorno financiero importante (RIC de 3,28). Cabe mencionar que estos resultados solo toman en cuenta aspectos financieros, sin embargo futuras investigaciones podrían evaluar dimensiones sociales y ambientales para obtener el mejor sistema desde un punto de vista integral.

Palabras clave: Economía agrícola, Presupuestos parciales, Análisis costo beneficio, Estudio comparativo, Finanzas.

ABSTRACT

Financial analysis of four systems of production of Hass avocado. Avocado production in the Los Santos area is the second most productive and economic agricultural activity in the region after coffee. It has become an alternative that has diversified the source of income for many producers by reducing the risk of depending solely on coffee production. However, the crop presents important challenges to ensure its financial sustainability, including low productivity, the difficulty of mechanization, and the strong presence of highly competitive regional markets. The objective of this study was to determine which type of productive

1 Universidad de Costa Rica, UCR. Costa Rica. Correo: gavier.camacho@gmail.com

2 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: lsanchez@inta.go.cr

3 Universidad de Costa Rica, UCR. Costa Rica. Correo: victorantonio.rodriguez@ucr.ac.cr

management generates the best financial returns. The calculation of the Income/Cost ratio and the calculation of the Marginal Rate of Return were used to estimate the profitability of the systems. Likewise, a risk analysis was carried out through a Monte Carlo simulation where the Income/Cost Ratio was sensitized in 1000 scenarios, where it was determined that the four systems are profitable in a wide range of probabilities. The study showed that the "Traditional Conventional" system presented the best Income/Cost Ratio (ICR) indicator (4,20) and Marginal Rate of Return (578,58 %), although systems such as monoculture focused on multiple technologies is a viable option when considering sustainable environmental management by using organic inputs and bio-inputs at a significant financial return (ICR of 3,28). It is worth mentioning that these results only take into account financial aspects; however, in future research, social and environmental dimensions could be evaluated to obtain the best system from an integral point of view.

Keywords: Agricultural economics, Parcial budgets, Cost benefit analysis, Comparative study, Financials.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el aguacate es una de las frutas tropicales más importantes del mundo, para el año 2020 se tuvo una producción entre los 5,7 y 6,5 millones de toneladas como respuesta a la creciente demanda mundial (Arias *et al.* 2018). Cerca del 80 % de la fruta producida corresponde a la variedad Hass (Callejas *et al.* 2015), la cual ha tenido un crecimiento importante en Costa Rica en los últimos años.

Durante los años de 1990 se decidió potenciar la actividad en las zonas altas del país, especialmente en la zona de Los Santos, donde el material podía adecuarse y desarrollarse comercialmente gracias a su resistencia a las bajas temperaturas, convirtiéndose en una alternativa de diversificación agrícola junto al cultivo del café (FAO 2012). Actualmente en nuestro país existen unas dos mil hectáreas sembradas, donde la región de Los Santos cuenta con unas 900 hectáreas destacándose como la más importante la variedad Hass (IICA y MAG 2019), lo que la ha convertido en uno de los principales focos de producción al posicionarla como la segunda actividad en importancia a nivel productivo y económico, después del café (Cerdas *et al.* 2006).

A nivel nacional, para el año 2019 la producción fue de 16 mil toneladas con rendimientos de 5,3 toneladas/hectárea (FAO 2021). Desde el 2012 se dio un aumento del área sembrada de aproximadamente un 56 %, explicado principalmente por el comportamiento del cultivo en la Zona de los Santos. Aun así, no puede suplir el mercado

local de aguacate (especialmente de Hass) ya que solo se logra cubrir el 40 % de la demanda nacional del producto (IICA y MAG 2019). Dado lo anterior, el país se abastece principalmente de los mercados internacionales (FAO 2021).

Aunque los datos indican una tendencia positiva en la producción mundial y nacional, resulta necesario que este crecimiento sea ordenado a través de un uso eficiente de los recursos utilizados. Esto promovería la existencia de sistemas productivos más eficientes y de una mejor rentabilidad para el productor, asimismo, esto favorecería una oferta de producto de calidad. En este caso el Plan Nacional de Fortalecimiento del Sector Aguacatero impulsado por la Comisión Nacional de Aguacate, con el MAG e IICA, es un esfuerzo de varios sectores para el fortalecimiento de la actividad al ejecutar varios ejes estratégicos: fortalecimiento organizacional, investigación, innovación, transferencia, asistencia técnica, inversión, financiamiento, comercialización, agregación de valor y buenas prácticas en el manejo de la agrocadena de Aguacate (IICA y MAG 2019).

Debido a la importancia del aguacate para el sector agropecuario nacional se planteó este estudio, cuyo objetivo fue determinar cuál tipo de manejo productivo genera mejores rendimientos financieros mediante indicadores como la Relación Ingreso/Costo (RIC) y Tasa de Retorno Marginal (TRM), además de un análisis de riesgo y sensibilidad.

Los resultados de esta investigación pueden servir de insumo para generar propuestas de sistemas más sostenibles a nivel financiero al brindar información sobre la rentabilidad de la actividad. Adicionalmente, proporciona

datos que permiten a productores y tomadores de decisiones incrementar la eficiencia económica de las unidades productivas para mantener su presencia en el mercado nacional e internacional.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en dos fincas ubicadas en la zona de Los Santos, en las cuales se identificó las tipologías de sistemas necesarias con el fin de aplicar las metodologías consideradas. En este primer lugar una de las fincas está ubicada en Copey de Dota a una altitud de 2208 m s.n.m.. Esta tuvo dos sistemas, un Monocultivo con Múltiples Tecnologías (en adelante MMT) con un manejo convencional, orgánico y de aplicación de bioinsumos y un Monocultivo con Tecnología Convencional de Baja Aplicación de Insumos (en adelante MTCBA). En estos sistemas la distancia de siembra fue de 6x6 metros, y la edad de los árboles se ubicó entre los ocho y quince años.

La otra finca se ubicó en San Pablo de León Cortés a unos 1826 m s.n.m. y se contó con un Monocultivo con Tecnología Convencional Intensivo (en adelante MTCl) donde el manejo fue tradicional con mayor aplicación de agroquímicos. Además de un sistema Mixto con tecnología convencional (en adelante MITC), siendo un asocio de aguacate y café. La distancia de siembra en estos fue de 4,25x4,25 metros donde la edad de los árboles estuvo entre siete y diez años. Una observación importante de realizar es que esta finca se identificó como una de tipo modelo o experimental donde el manejo agronómico fue más técnico, por lo que en los resultados el paquete tecnológico fue más caro en relación al común de fincas de la zona (esto en el caso particular del MTCl) influenciado además por la distancia de siembra que permitió contar con más árboles por área.

En los cuatro sistemas se utilizaron árboles con estabilidad de cosecha, con más de siete años de establecidos. La variedad de aguacate fue la Hass, mientras que en el sistema mixto las variedades de café fueron el Caturra y Catuai (especie *Arábica*).

La duración del estudio fue de año y medio (marzo de 2019 a julio de 2020), ya que las cosechas y actividades de campo de los cultivos involucrados no coincidieron en un mismo momento de tiempo. Por lo anterior para el aguacate se recolectó información de marzo (2019) a abril (2020) y para el café de junio (2019) a julio (2020), esto con el fin de contar con un año de información por cultivo para poder estimar los indicadores utilizados que requerían recolectar información durante los lapsos de tiempo establecidos.

Estimación de la Relación Ingreso-Costo (RIC)

En el caso de la RIC se utilizó un lote de una hectárea por sistema. Se aclara que se aproximaron los resultados a esta unidad de medida ya que se contaron con sistemas de diferentes áreas al dificultarse contar con fincas uniformes, esto para realizar las comparaciones necesarias. Para estimar la RIC se utilizó la fórmula 1.

$RIC = \frac{IN}{CTP}$	(1)
------------------------	-----

Donde:

RIC: Relación ingreso/costo

IN: Ingresos totales

CTP: Costos totales de producción

Interpretación: $RIC > 1$, se cubren los costos y se presentan retornos financieros.

Para el caso del aguacate primero se cosecho la fruta y luego se calculó los kilos por árbol al dividir lo cosechado por el número de árboles presentes. Seguido se aproximó este resultado a una hectárea al multiplicar lo obtenido por el total de árboles contenido en esa unidad de superficie, este dato corresponde al rendimiento de aguacate antes de obtener la merma en aguacate por daños físicos y de apariencia. Al restar este rendimiento y la merma se obtiene el rendimiento de calidad comercial.

Después, de este rendimiento se calcula un 70 % de aguacate de primera y un 30 % de segunda y tercera calidad para el MMT, MTCI y MITC. Para el MTCBA el de primera es 60 % y el de segunda y tercera es de 40 %, esto porque se evidenció a nivel de campo una afectación de la calidad con respecto a estas categorías. Con estos rendimientos se calculan los ingresos totales al multiplicar estos rendimientos por los precios pagados al productor. Los precios utilizados fueron en aguacate de ¢1 375,00 (primera) y ¢600,00 (segunda y tercera). Por otra parte, para el caso de las fanegas de café el proceso fue similar, es decir aproximando el resultado a una hectárea, utilizando en este caso un precio por fanega de ¢100 000,00.

Para estimar los costos totales de producción se utilizó el costeo por actividades (Morillo y Varela 2009) al considerar los materiales e insumos directos (CMID) y la mano obra directa (CMOD). Además se toman en cuenta costos indirectos de producción (CIP) como los materiales e insumos indirectos (CMII) y la mano de obra indirecta (CMOI).

Análisis de riesgo de la RIC

En este caso se implementó una simulación de Monte Carlo, en el cual se generaron mil iteraciones y escenarios aleatorios de ingresos y costos totales para obtener múltiples indicadores con el fin de simular lo esperado en un sistema real. Para ello se utilizaron variables como el rendimiento, porcentajes de merma y ajustes por calidad, precios y costos por kilo o fanega, al establecer cambios en las mismas basados en información de campo, productores involucrados y referencias bibliográficas relacionada con la temática del estudio. Este último punto se basó en la información

mencionada por Cerdas (2006), Villalobos (2009), OFINASE (2011), Macas (2013), Betanco (2015), Acuña y Mora (2015), Cruz *et al.* (2016), Barquero (2017), Caro-Sánchez (2018), González *et al.* (2019), Gonzales (2019) e ICAFE (2019).

Para implementar lo anterior se desarrolló un Macro programado en el lenguaje Visual Basic de Excel (Windows), con el fin de facilitar el análisis al generarse la simulación automáticamente. Así, el proceso permitió plantear una gráfica de probabilidad (histograma) para el indicador. Además, con el fin de reforzar los resultados obtenidos, se utilizaron indicadores de tendencia central y dispersión para apreciar la variabilidad de los datos y poder establecer el nivel de riesgo financiero de los sistemas estudiados.

Análisis de presupuestos parciales para calcular la Tasa de Retorno Marginal (TRM)

Para la obtención de la tasa de retorno marginal (TRM) se utilizó un lote de 300 m² por sistema productivo. En este caso se aplicó esta metodología al seguir lo descrito por el CIMMYT (1988) y Reyes (2001) los cuales estipulan los siguientes pasos:

1. Determinar los Costos que Varían entre alternativas relacionados con insumos, mano de obra, maquinaria y equipos.
2. Calcular el Precio de Campo del Insumo o puesto en finca, este es el precio de mercado más los costos de transporte y almacenamiento.
3. El Precio de Campo del Cultivo al que se vende la producción antes de cosecharla, que se obtiene al restar del precio pagado al productor por kilogramo o fanega, el costo unitario por cosecha, almacenamiento y transporte al centro de acopio o beneficio.
4. Obtener el Rendimiento Ajustado, donde el rendimiento experimental más alto por un manejo técnico se ajusta a uno más semejante al real. En aguacate el ajuste fue del 13,43 % que es un promedio general derivado del estudio de Mora y Acuña (2015), quienes tomaron cuatro productores en la zona de Los Santos para medir el porcentaje de daño en frutos de aguacate por mordeduras de

animales, picudo, golpe por cosecha, fruta sin pedúnculo, deformación por trips, sobre-maduración, roña y anillamiento. El porcentaje de rendimiento ajustado por categoría de calidad es el utilizado en la RIC. Además con base en Bustamante *et al.* (1999); Aristizábal *et al.* (2006); OFINASE (2011); Camilo (2014); Betanco (2015); Cruz *et al.* (2016) y Mesa *et al.* (2017) se utilizó un parámetro de un 5 % como punto intermedio de daño para la merma por grano vano y daño por broca en café.

5. Calcular el Beneficio Bruto y Neto, donde primero se multiplica el precio de campo por el rendimiento ajustado para luego sustraerle los costos totales que varían.
6. Realizar el Análisis Marginal, que considera los cambios incrementales entre tratamientos, determina si mejoran los resultados de quien toma las decisiones.
7. Llevar a cabo el Análisis de Dominancia, este considera un tratamiento dominado cuando no conduce a incrementar los beneficios netos ya que existe otro tratamiento con menores o iguales costos pero con mayores beneficios.
8. Calcular La Tasa de Retorno Marginal (TRM), aquí se dividen los incrementos de costos y beneficios netos al cambiar entre tratamientos no dominados. Indica el retorno en términos de ganancias por unidad monetaria de incremento en costos.

La fórmula 2 expresa el cálculo para obtener la TRM.

$$TRM = \frac{\Delta BN}{\Delta CV} * 100 \quad (2)$$

9. Determinar la Tasa de Retorno Mínima Aceptable (TAMIR o TREMA), que es el costo del capital de trabajo para financiar la práctica evaluada. Para su cálculo se consideraron las variables del cuadro 1, donde la sumatoria de las variables utilizadas se multiplicaron por dos para obtener un rango de maniobra y generar mejores conclusiones de los resultados obtenidos. Este valor refleja expectativas sobre variables económicas y valora instrumentos de financiamiento a los que acceden los productores, además de reflejar el comportamiento del mercado en que se desempeñan.
10. Determinar el Tratamiento más Rentable, al comparar la TRM y TREMA, donde el que resulta con una TRM mayor o igual que la TREMA es seleccionado.

Cuadro 1. Cálculo de la TREMA

Variable	Porcentaje
Rendimiento bonos soberanos (10 años)	9,35 %
Tasa Básica Pasiva	3,90 %
Coefficiente de variación de los precios de aguacate (primera calidad)	14,10 %
Sumatoria	27,35 %
TREMA	54,70 %

Fuente: Elaboración con base en CENADA (2020), BCCR (2021a) BCCR (2021b).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de la RIC

Los resultados obtenidos por sistema productivo para el indicador de la RIC se presentan el cuadro 2, el mismo es un indicador útil que mide el desempeño de la unidad productiva y refleja la conversión de los costos en retornos financieros para los productores.

Cuadro 2. Estimación de la RIC por sistema productivo, por hectárea y en colones.

Variable	Sistema Productivo			
	Monocultivo con Tecnología Convencional de Baja Aplicación (MTCBA)	Monocultivo con Múltiples Tecnologías (MMT)	Mixto con tecnología convencional (MITC)	Monocultivo con Tecnología Convencional Intensivo (MTCI)
Rendimiento aguacate (kg)	7 116,17	11 829,42	17 944,98	28 806,82
Merma (kg)	955,79	1 588,84	2 410,75	3 869,12
Rendimiento Comercial (kg)	6 160,38	10 240,59	15 534,75	24 937,70
Ingresos totales	¢ 6 560 800,13	¢ 11 699.868,76	¢ 24 973 368,89	¢ 28 491 325,01
Costos Totales de Producción	¢ 2 826 231,73	¢ 3 547 246,44	¢ 10 086 381,51	¢ 6 785 161,76
Relación Ingreso/Costo	2,32	3,28	2,48	4,20

La RIC indica que los cuatro sistemas presentan rentabilidad, al cubrir sus costos de producción y se deduce que existe un incremento de los retornos financieros al presentarse un valor mayor a 1. El MTCI presentó los mejores resultados al contar con mejores rendimientos e ingresos. El nivel de producción de este sistema aunque es bastante alto es probable dada a las condiciones de densidad identificadas y a un manejo agronómico más técnico e intensivo a nivel de insumos, ya que la finca donde se desarrolló el estudio es una de tipo experimental.

Sin embargo, sus resultados deben de manejarse con cuidado ya que se alejan por mucho de la media de fincas aguacateras de la zona que cuenta con rendimientos aproximados de unas 6 a 10 toneladas/hectárea, esto para sistemas similares. No obstante esto se modera y explica de cierta forma dado el paquete tecnológico utilizado en el MTCI, el cual es más caro en comparación al utilizado en la demás fincas. Por ejemplo en el caso del MTCI este es aproximadamente el doble del coste por hectárea de aguacate para una finca similar al común de monocultivos convencionales de la zona el cual correspondió a unos ¢3 834 427,55⁴ esto al momento de realizar el estudio; considerando edades similares para plantaciones de unos 10 años.

El MMT mostró el segundo mejor resultado, por lo que se constituye en una buena opción como incentivo por el uso de múltiples tecnologías. Este sistema evidencia buenos rendimientos además de costos menores por el uso de insumos fabricados en la propia finca.

El MITC presentó un menor resultado dado a que fue el sistema con los costos más altos, por lo que la sinergia entre cultivos (aguacate y café) no logró superar al convencional tradicional y al de múltiples tecnologías, posiblemente a un aspecto de competencia entre los cultivos. Esto se evidencia al desagregar los ingresos y costos por cultivo, donde se obtuvo en el de aguacate un ingreso total de ¢17 748 449,80 con un costo total de ¢5 581 439,69, mientras que para el cultivo de café el ingreso total fue de ¢7 224 919,09 con un costo total de ¢4 473 973,25 (Cuadro 2)).

Otro punto importante es que el rendimiento de café para este sistema fue de 72 fanegas. Este dato es alto al compararlo con el promedio nacional para sistemas en monocultivo el cual ronda las 28 fanegas, inclusive al considerar el manejo y unidad productiva el rendimiento podría ser más alto (Barquero 2022), además para variedades resistentes a la roya se han identificado rendimientos de entre 60 y 80 fanegas, siendo este dato significativo (Barquero 2017). En vista de lo planteado, los rendimientos obtenidos podrían deberse a que la finca donde se desarrolló el estudio es una de tipo experimental, donde el contar con un manejo agronómico más técnico favoreció estos rendimientos por lo que deben manejarse con precaución.

Por último, el MTCBA presentó la relación más baja esto a pesar de contar con los costos más bajos, favorecido por un bajo rendimiento y afectación de la calidad ya que posiblemente se dejaron de aplicar insumos que afectaron la producción. Adicionalmente se presenta el cuadro 3 donde se muestra los kilogramos producidos por árbol como un indicador de productividad para los sistemas estudiados.

4 Montero, A. 1 ene. 2020. Modelo de costos de producción de aguacate (correspondencia personal). San José, Costa Rica. MAG-SEPSA.

Cuadro 3. Kilogramos producidos por árbol, por tipo de sistema.

Indicador	Sistema Productivo			
	Monocultivo con Tecnología Convencional de Baja Aplicación (MTCBA)	Monocultivo con Múltiples Tecnologías (MMT)	Mixto con tecnología convencional (MITC)	Monocultivo con Tecnología Convencional Intensivo (MTCI)
Kilogramos por árbol	29,20	48,90	27,73	52,45

Como se muestra el cuadro anterior el MTCI muestra el mejor valor de productividad en relación con los demás sistemas, mientras que el segundo mejor resultado lo obtiene el MMT. En el caso de estos dos primeros sistemas se muestra la importancia que tiene la aplicación de los nutrientes necesarios para una buena productividad. Por otra parte los sistemas de MTCBA y MITC presentan una baja productividad por árbol, en el primer caso se evidencia el efecto de una baja aplicación de insumos, y en el segundo sistema por la competencia generada con el cultivo de café además de una alta densidad de siembra.

Análisis de riesgo de RIC

Con la simulación de Montecarlo se estableció múltiples indicadores de la RIC, lo cual permitió realizar un análisis probabilístico mediante histogramas que muestran la distribución de frecuencia relativa del mismo por sistema productivo (Figura 1). En este caso se muestra para todos los sistemas

una RIC por encima de 1, lo que es indicador estabilidad ante los cambios planteados.

Por sistema existen zonas de mayor probabilidad para el indicador, por ejemplo en el de MTCBA los indicadores que van de 1,77 a 2,95 concentran el 74 % de los datos, mientras que en el MMT de 2,56 a 4,59 se acumulan en un 82 %. Por otra parte, en el MTCI entre 2,95 y 5,35 se ubican el 73 %, y para el MITC desde 2,04 a 3,11 se concentran un 89 % de los datos (Figura 1). El que se presente esta situación destaca el hecho de que los sistemas pueden enfrentarse a fuertes impactos externos como disminuciones drásticas de precios, aumentos excesivos en los costos de insumos y disminuciones de la producción por los efectos de enfermedades y plagas.

El cuadro 4 presenta información estadística obtenida de las iteraciones, con el fin de visualizar la variabilidad de los resultados del análisis de riesgo. Así mismo establece cuál es el nivel de riesgo para la actividad según los sistemas analizados.

Cuadro 4. Estadísticos generados a partir de la simulación de Montecarlo.

Estadístico	Sistema Productivo			
	Monocultivo con Tecnología Convencional de Baja Aplicación (MTCBA)	Monocultivo con Múltiples Tecnologías (MMT)	Mixto con tecnología convencional (MITC)	Monocultivo con Tecnología Convencional Intensivo (MTCI)
<i>Promedio</i>	2,55	3,60	4,60	2,74
<i>Mediana</i>	2,50	3,52	4,47	2,69
<i>Moda</i>	2,25	3,01	4,48	3,03
<i>Varianza</i>	0,29	0,59	1,00	0,19
<i>Desviación Estándar</i>	0,54	0,77	1,00	0,43
<i>Coef. de Variación</i>	20,98 %	21,32 %	21,76 %	15,78 %
<i>Curtosis</i>	2,89	2,78	2,73	3,00
<i>Coef. de Asimetría</i>	0,53	0,43	0,53	0,51

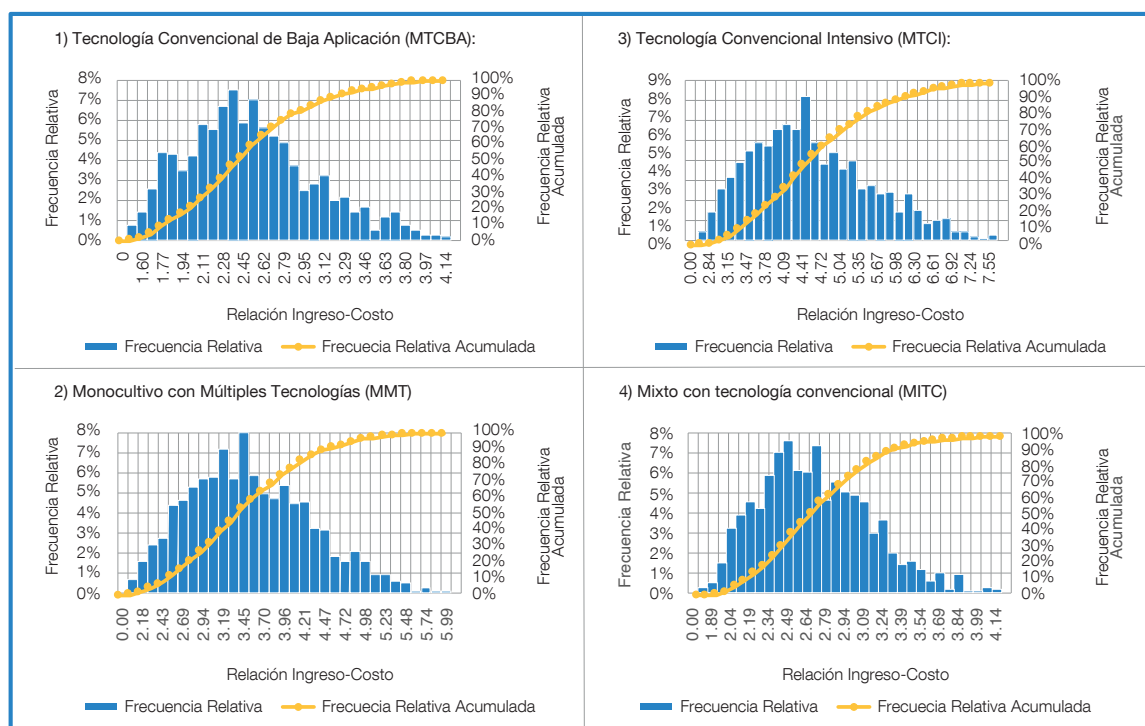


Figura 1. Distribución de la frecuencia relativa para la relación ingreso-costo generadas por la simulación de Montecarlo para los sistemas productivos.

En el cuadro 4 se muestra para todos los sistemas que la mediana, moda, promedio y la RIC obtenida en el estudio se ubican dentro del rango de mayor probabilidad. Por otra parte, la desviación estándar y coeficiente de variación evidencia una variación relativamente baja, además el coeficiente de simetría permitió no sobreestimar los resultados. En general el riesgo puede ser considerado como moderado, pero el sistema más estable fue el MITC (ver coeficiente de variación), debido a la disminución por riesgo de pérdida en cosecha, donde la pérdida en un cultivo puede ser absorbida por otro (Gómez y Zavaleta 2001).

Estimación de los beneficios netos de campo según sistema productivo

Se presenta el cuadro 5 con la información respectiva, así como datos adicionales para ampliar el análisis, en este caso relaciones porcentuales entre los costos variables y los beneficios netos con respecto a los beneficios brutos.

Cuadro 5. Estimación del beneficio neto por sistema productivo de 300 m², colones.

Variable	Sistema Productivo			
	Monocultivo con Tecnología Convencional de Baja Aplicación (MTCBA)	Monocultivo con Múltiples Tecnologías (MMT)	Mixto con tecnología convencional (MITC)	Monocultivo con Tecnología Convencional Intensivo (MTCI)
Rendimiento ajustado (kg)	202,22	340,04	384,02	726,47
Beneficio Bruto (BB)	¢209 528,73	¢378 825,01	¢567 424,75	¢810 032,48
Costos Variables Totales (CV)	¢70 297,62	¢95 492,29	¢194 828,63	¢159 037,74
Beneficios Netos (BN)	¢139 231,11	¢283 332,73	¢372 596,12	¢650 994,73
Relación Porcentual (BN/BB)	66,45 %	74,79 %	65,66 %	80,37 %
Relación Porcentual (CV/BB)	33,55 %	25,21 %	34,34 %	19,63 %

El cuadro 5 muestra que el sistema con los beneficios netos más altos es el MTCl gracias al mayor beneficio bruto obtenido, se aprecia además una relación BN/BB de 80,37 %, por lo que obtener un mayor rendimiento sopesa costos más altos. El MITC tuvo un beneficio neto menor al esperado al presentar una mayor cantidad de costos variables, por ejemplo, la relación CV/BB fue de 34,34 %, esto sería evidencia del impacto adicional en la estructura de costos del cultivo de café.

El MMT presenta un beneficio neto aceptable al considerar la proporción CV/BB de 25,21 %, favorecido por el uso de insumos preparados en

la finca (bioinsumos y productos orgánicos) que representó un ahorro, esto a pesar de que el monto monetario de los beneficios brutos es menor en comparación al mixto y convencional tradicional, aunque su relación BN/BB es positiva. Por último, el de MTCBA presentó resultados menos destacados, a pesar de presentar costos más bajos.

Con base en el análisis de dominancia entre sistemas del cuadro 6, el único dominado es el MITC con respecto al MTCl al presentar beneficios menores y costos mayores.

Cuadro 6. Análisis de dominancia para los sistemas productivos de 300 m².

Sistema Productivo	Variable		
	Costos Variables Totales	Beneficio Neto	Condición
Monocultivo con Tecnología Convencional de Baja Aplicación (MTCBA)	¢70 297,62	¢139 231,11	No dominado
Monocultivo con Múltiples Tecnologías (MMT)	¢95 492,29	¢283 332,73	No dominado
Monocultivo con Tecnología Convencional Intensivo (MTCl)	¢159 037,74	¢650 994,73	No dominado
Mixto con tecnología convencional (MITC)	¢194 828,63	¢372 596,12	Dominado

Determinación de la TRM

El cambio del sistema de MTCBA a uno de MMT arroja una TRM de 571,95 %, recuperándose cada colón de incremento en costos y obteniéndose ¢5,72 adicionales. Por otra parte, el cambio del sistema de MMT a uno MTCl da una tasa de 578,58 %, por lo que se recuperaría cada colón de incremento en costos y se obtendrían ¢5,79 adicionales. Con base en lo anterior, desde un punto de vista financiero, sí es conveniente cambiar entre los sistemas ya que en ambos casos la TRM es mayor a la TREMA de 54,70 %.

A partir de los resultados obtenidos con la RIC y la TRM se plantea la siguiente discusión. En primer lugar es importante mencionar que los sistemas mixtos se presentan como una alternativa para contrarrestar cambios ambientales, incrementar la fertilidad del suelo, generar supresión de malezas y enfermedades. En el caso del MICT

estudiado la alta densidad poblacional pudo haber afectado los rendimientos en el cultivo de aguacate debido a la interferencia por competencia con el cultivo del café (Gómez y Zavaleta 2001; Arcila 2007; Chaimsohn *et al.* 2007; Vera 2008). En base a lo anterior se podrían analizar la utilización de densidades para trabajar en sistemas mixtos con café para generar una menor competencia, esto si el productor apuesta por un sistema mixto.

Sin embargo, desde un punto de vista económico y financiero los sistemas en monocultivo (MMT o MTCl) son la opción más viable por la que podrían apostar los productores, además el mercado mundial de aguacate es cada vez más competitivo y prefiere un aguacate que provenga de monocultivos en el cual se pone todo el esfuerzo y recursos para obtener un producto de calidad. PROCOMER en esa línea indica la necesidad de

implementar medidas y esfuerzos para aumentar la producción y disponibilidad de aguacate con calidad suficiente para buscar la apertura de los mercados de consumo tradicionales y con potencial como Estados Unidos, Europa, Asia y el Medio Oriente (PROCOMER 2023).

Por otra parte, la TRM y RIC muestra en primera instancia que no es conveniente un MTCBA. Es contraproducente para el cultivo del aguacate, desde un punto de vista financiero, el limitar insumos agrícolas ya que esto podría afectar el rendimiento obtenido y la calidad de fruta. Esto afectaría los retornos obtenidos y no compensaría el bajo costo, ya que en un producto como el aguacate Hass al aspecto físico y tamaño del mismo son determinantes claves del precio.

Lo anterior implica que se presente el reto de migrar de sistemas convencionales a sistemas con aplicación baja de insumos sintéticos, ya que estos últimos no superan a los primeros en rendimientos ni ganancias; esto a pesar del éxito de sistemas orgánicos tecnificados (Nicholls 2007). Sin embargo, la agricultura de bajos insumos puede generar beneficios económicos, esto al aplicar en la práctica un sistema productivo donde se aprovechen muchos de los derivados generados (Busetto 2010). Por ejemplo, un aguacate con una baja calidad puede explotarse en procesos industriales (extracción de aceite por ejemplo), lo que podría aumentar la rentabilidad de las unidades productivas.

Por otra parte se identificó al MTCl como el mejor a nivel de resultados obtenidos, donde un mayor rendimiento generó mayores ingresos, ya que se compensa el incremento en los costos que este sistema exhibió. Para este caso, la densidad de siembra se relacionó con un tamaño de árbol más pequeño que permitió más árboles y un mayor rendimiento por unidad de área (Gardiazabal, 2017).

Este punto es importante de estudiar para aprovechar el área disponible, sin embargo existen barreras por aspectos lumínicos, la pendiente de la zona y los materiales usados en Costa Rica que hacen que los arreglos más utilizados sean 6x6 o 6x5 metros. En este caso sería

ideal contar con materiales enanizantes, pero falta más investigación para determinar la relación patrón-copa más exitosa⁵. Igualmente es importante agregar como este tipo de sistemas se relacionan con el ambiente y el uso intensivo de agroquímicos, ya que es evidente el impacto que cualquier actividad agrícola tienen esto a pesar de que se evidencia en el caso estudiado la utilización de buenas prácticas agrícolas.

Para el caso del MMT, este sistema presentó costos menores e indicadores de rentabilidad aceptables. Por este motivo, su réplica como sistema debe de ser considerada como beneficiosa en relación con temas como la sostenibilidad ambiental por el tipo de productos utilizados (orgánicos o bioinsumos). Además de que la integración de tecnologías apropiadas ha demostrado su beneficio en la producción de cultivos (Bruulsema 2002), y permite además contar con un menor riesgo de gasto o inversión en capital de trabajo e insumos.

Este aspecto es importante ya que el productor debe buscar la diversificación del uso de insumos agrícolas sintéticos para que de forma paulatina no dependa de estos (Busetto 2010). Para lo anterior, es necesario implementar estudios que revelen dosis de insumos orgánicos e inorgánicos (sintéticos) que permitan optimizar el beneficio-coste de su uso sin sacrificar con ello el nivel productivo y la calidad del producto. Vinculado a lo anterior son necesarias fórmulas para agroquímicos menos contaminantes y de menor costo, considerando densidades de siembra que no generen barreras para mejorar la producción.

Lo anterior es un tema y reto importante de la agricultura para muchas de las instituciones vinculadas al sector, al considerar la exigencia de los mercados actuales de prácticas de producción y manejo más sostenibles⁶, hecho que favorece a incrementar la cantidad y calidad de los alimentos producidos (Bruulsema 2002). En el país esto

5 Retana, K. 15 sept. 2023. Comentarios y aportes técnicos agronómicos sobre cultivo de aguacate (correspondencia personal). San José, Costa Rica. INTA-MAG.

6 Retana, K. 15 sept. 2023. Comentarios y aportes técnicos sobre cultivo de aguacate (correspondencia personal). San José, Costa Rica. INTA-MAG.

se refleja en instituciones como el INTA, donde se apuesta por un lineamiento sobre producción sustentable, con el fin de cumplir con estos requerimientos. También el IICA y el MAG a través del Plan Nacional de Aguacate exponen metas orientadas a que entre un 40 % y 50 % de fincas lleguen a usar bioinsumos o que estén involucradas en algún tipo de distinción por sostenibilidad (certificación orgánica, bandera azul, Rain Forrest Alliance-BPA) en un plazo de 5 a 10 años (IICA y MAG 2019).

Igualmente este tema engloba el uso de recursos naturales como el agua, donde se debe de mejorar la imagen que ha tomado la huella hídrica del cultivo de aguacate buscando un uso eficiente de la misma en su agrocadena, considerando que a nivel mundial se ha dado el aumento exponencial de la demanda de agua necesaria para satisfacer las crecientes necesidades de la población como la provisión de alimentos en cantidad y de calidad (Naranjo y Reyes 2021).

Lo anterior debe ir de la mano de esfuerzos de otros sectores que motiven a los productores a producir responsablemente, en este caso los decisores políticos vinculados al sector agropecuario y aguacatero deben favorecer medidas como el mejoramiento genético y asistencia técnica con el fin de que las plantaciones de aguacate sean más productivas, resilientes al cambio climático y resistentes a las enfermedades.

Como cierre a este apartado es importante de destacar que la producción de aguacate en la zona de Los Santos presenta desafíos importantes para su sostenibilidad financiera, entre ellos, la baja productividad, la dificultad para mecanizar y una fuerte presencia de mercados regionales muy competitivos. Esto ha hecho necesario la búsqueda de acciones, como una mayor asistencia técnica e investigación por ejemplo, que permitan que las fincas sean eficientes financieramente, y con ello, generar políticas que le den tanto sostenibilidad financiera como ambiental al sistema de producción.

LITERATURA CITADA

Altieri, M; Nicholls, C. 2007. Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas* 16(1):3-12.

Arcila, J. 2007. Densidad de siembra y productividad de los cafetales. In Marin, SM; Ospina HF (eds.). *Sistemas de producción de café de Colombia*. Chinchiná, Colombia, CENICAFÉ. p. 131-143.

Arias, F; Montoya, C; Velásquez, O. 2018. Dinámica del mercado mundial de aguacate. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte* 55(55): 22-35.

Aristizábal, L; Bustillo, A; Jiménez, M; Trujillo, H. 2006. Evaluación de métodos para cuantificar poblaciones de broca del café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), en fincas de caficultores experimentadores. *Revista Colombiana de Entomología* 32(1):39-44.

Barquero, M. 2017. Ensayos en café logran hasta 80 % más de producción con nuevas variedades. *La Nación* (en línea, diario digital). Consultado 30 ene. 2019. Disponible en <https://www.nacion.com/economia/agro/ensayos-en-cafe-logran-hasta-80-mas-de-produccion-con-nuevas-variedades/ATWO5WL7GZEGNO5357333PWBBBA/story/>

Barquero, M. 2022. Productividad del café en Costa Rica cayó 30 % en últimos 20 años. *La Nación* (en línea, diario digital). Consultado 28 sep. 2022. Disponible en [https://www.nacion.com/economia/productividad-del-cafe-en-costa-rica-cayo-30-en/R3Z76KZV4RH6FKHJXFFHPE3WJA/story/#:~:text=La%20productividad%20promedio%20del%20caf%C3%A9,de%20Costa%20Rica%20\(lcaf%C3%A9\).](https://www.nacion.com/economia/productividad-del-cafe-en-costa-rica-cayo-30-en/R3Z76KZV4RH6FKHJXFFHPE3WJA/story/#:~:text=La%20productividad%20promedio%20del%20caf%C3%A9,de%20Costa%20Rica%20(lcaf%C3%A9).)

Betanco, W. 2015. Calidad física-organoléptica del café (*Coffea arabica* L.), en manejo orgánico y manejo convencional en fincas de San Juan del Río Coco-Madriz, ciclo 2013-2014. Tesis MSc. Managua, Nicaragua. UNA. 57 p.

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2021a. Curvas de rendimientos soberana (al 30 de abril del año 2020). Consultado 30 abr. 2021. Disponible en <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiN2M1O-TU2YTMtMDM5MDY1LWI5NDgtM2E5ZGQzM-DdiNDkzliwidCI6IjYxOGQwYTQ1LT1YTYtNDYxOC-05ZjgwLTNmNzBhNDM1ZWU1MiJ9>

- Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2021b. Tasa básica pasiva (al 30 de abril del año 2020). Consultado 30 abr. 2021. Disponible en <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%2017>
- Bruulsema, T. 2002. Productividad de los sistemas orgánicos convencionales de producción de cultivos. *Informaciones Agronómicas* (51):8-11.
- Busetto, B. 2010. Todo lo que debe saber sobre la agricultura de bajos insumos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA/FAO). Consultado 2 ene. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/3/v2865s02.htm>
- Callejas, N; Gómez, G; Hernández, J; Peña, L; Rebollar, S. 2015. Análisis de viabilidad económica para la producción comercial de aguacate Hass. *Revista Mexicana de Agronegocios* (36):1325-1338.
- Camilo, J. 2014. Impacto económico de la broca del café (*Hypothenemus hampei*) en la caficultura de Jarabacoa. Jarabacoa, República Dominicana Clúster de Café de Jarabacoa-Consejo Nacional de Competitividad. Proyecto Mejora del rendimiento de cafetales en Jarabacoa. Banco Interamericano de Desarrollo. 23 p.
- Caro-Sánchez, R. 2018. Aplicación de 1-metilciclopropeno en frutos de palta (*persea americana mill*) cv. Has en poscosecha. Tesis Ingeniería Agronómica. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 104 p.
- Cerdas, M; Montero, M; Díaz, E. 2006. Manual de manejo Pre y Poscosecha de Aguacate (*Persea Americana*). Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 95 p.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). 1988. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. CIMMYT: Programa de Economía. México DF, México. 86 p.
- Chaimsohn, F; Mora, J; Villalobos, E. 2007. Densidades de siembra, arreglos espaciales y fertilización en pejobaye (*Bactris gasipaes* cv 'Diamantes-10') para palmito. *Agronomía Mesoamericana* 18(2):205-220.
- Cruz, G; Escamilla, E; López, F; Zamarripa, A. 2016. Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica*.) en Veracruz, México. *Revista Fitotécnica Mexicana* 39(3): 297-304.
- Gardiazabal, F. 2017. Palto Hass de altísima densidad con bioreguladores al suelo. *Red Agrícola* (en línea, Revista Digital). Consultado 4 feb. 2021. Disponible en <https://www.redagricola.com/cl/palto-hass-de-altisima-densidad-bioreguladores-al-suelo/>
- Gómez, O; Zavaleta, E. 2001. La Asociación de Cultivos una Estrategia más para el Manejo de Enfermedades, en Particular con *Tagetes* spp. *Revista Mexicana de Fitopatología* 19(1): 94-99.
- González, G; Herrera, C; Núñez, J. 2019. Estudio sobre el sector productivo de aguacate hass en la Zona de los Santos, Costa Rica; y el efecto que produce en el mercado costarricense la importación de aguacate Hass y otras variedades provenientes de Chile, Nicaragua y Perú, periodo 2014-2017. Tesis Lic. Alajuela, Costa Rica. UTN. 287 p.
- Gonzales, B. 6 de feb 2019. Consulta de información sobre precios de café pagados por VOLCAFE (correspondencia personal). San Pablo de León Cortés, San José, Costa Rica. APACCOOP.
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). 2019. Precio de liquidación final cosecha 2018-2019. Disponible en http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/liquidaciones_beneficios/Cosecha%201819%20Publicacion%20Liquidacion%20Final.pdf
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). 2021. Regiones cafetaleras: Tarrazú. Consultado 6 jun. 2021. Disponible en <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/regiones-cafetalaras/tarrazu/>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura; Ministerio de Agricultura y Ganadería. 2019. Plan Nacional de Fortalecimiento del Sector Aguacatero. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E14-11087.pdf>
- Macas, G. 2013. Estudio de las características de calidad pre y poscosecha en dos variedades de aguacate (*persea americana* Mill) provenientes de dos localidades de la provincia de Pichincha. Tesis Ingeniería Agronómica. Riobamba, Ecuador. ESPOCH. 277 p.
- Mesa, M; Molina, O; Pulgarin, A. 2017. Estimación de la tasa de infestación de la broca en un cafetal, utilizando un modelo tipo sir. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* 24(2):257-276.
- Mora, J; Acuña, J; (comps.). 2015. Memoria. Curso Producción de Aguacate de Bajura realizado en el Pacífico Central de Costa Rica. INTA. San José, Costa Rica. 85 p.

Morillo, M; Varela, M. 2009. Un sistema de costos basado en actividades para las unidades de explotación pecuaria de doble propósito. Caso: Agropecuaria El Lago, S.A. Revista Innovar 19(35):99-117.

Naranjo, J; Reyes, H. 2021. Huella hídrica del cultivo de aguacate cv. Hass (*Persea americana* Mill.), en el Distrito de Conservación de Suelos Barbas - Bremen, Quindío, Colombia. Entre Ciencia e Ingeniería 15(29):63-70.

Oficina Nacional de Semilla (OFINASE). 2011. Reglamento Técnico para la Certificación de Semilla de Café (*Coffea arabica*). 8 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2012. Costa Rica ofrece manuales de aguacate a los agricultores para mejorar su producción. Consultado 1 ago. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/510562/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2021. Cultivos y productos de ganadería. Consultado 1 ago. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

PROCOMER. 2023. El aguacate será la fruta tropical más vendida en el mundo en 2030. Consultado el 13 oct. 2023. Disponible en https://www.procomer.com/alertas_comerciales/exportador-alerta/el-aguacate-sera-la-fruta-tropical-mas-vendida-en-el-mundo-en-2030/

Reyes, M. 2001. Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: Re-enseñando el uso de este enfoque. Boletín Informativo GEOCITIES. San Carlos, Guatemala. N° 2001-01. 32 pp.

Villalobos. 2009. Metodologías de análisis de factores de calidad en frutas tropicales y subtropicales, implementadas por el laboratorio de poscosecha de la Universidad de California En Davis, Estados Unidos. Práctica Bachillerato. Cartago, Costa Rica. ITCR. 155 pp.

NOTA TÉCNICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA EXPORTACIÓN DE CHILE DULCE TIPO BELL DESDE LA REGIÓN CHOROTEGA

Roberto Ramírez Matarrita¹, Luis Sánchez Chacón²

RESUMEN

Estudio de factibilidad económica para la exportación de chile dulce tipo Bell desde la Región Chorotega. Se realizó un estudio cuyo objetivo fue determinar la factibilidad económica para exportar chile dulce tipo Bell, mediante dos sistemas de ambiente protegido ubicados en la Región Chorotega, y con destino al mercado de Houston, en Estados Unidos. La evaluación se desarrolló en dos etapas, la primera correspondió a un análisis de económico utilizando la metodología de Presupuestos Parciales aplicada a los tratamientos de chile dulce tipo Bell Canzion y Rojo Americano en casa de malla (SP2) y en invernadero (SP3). La segunda estaba consistió en un estudio de factibilidad con las mejores opciones productivas obtenidas de la primera etapa, para determinar la factibilidad se utilizó el indicador de Beneficio/Costo. En el sistema SP2, fue donde se presentó el mayor ingreso económico por hectárea de ambos cultivos, con valores de US\$ 69 867,91 para Canzion y US\$ 77 936,29 para Rojo Americano. El sistema productivo de invernadero (SP3), fue el que requirió de una mayor inversión por hectárea, alcanzando los US\$ 247 780,30. Los costos de producción no variaron según el sistema productivo (SP2 y SP3), pero sí, según el cultivar, ya que Canzion presentó un mayor costo de semilla. El costo de comercialización, independientemente del sistema productivo, fue de US\$ 9 063 por contenedor y de US\$ 3,92 por caja exportada. El sistema productivo que presentó la mayor relación beneficio – costo, fue la casa de malla (SP2), con un valor de 1,45 con el cultivar Canzion y de 1,73 con Rojo Americano.

Palabras clave: Chile dulce, Exportación, Ambientes protegidos, Ingresos, Costos.

Keywords: Sweet pepper, Exportation, Protected environments, Income, Costs.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile dulce tipo Bell tiene gran importancia a nivel mundial y ocupa el tercer lugar en superficie cultivada en ambientes protegidos, después del tomate y pepino, pero es el segundo en importancia económica (Intagri, 2015). En el año 2020, México lideró la exportación de este tipo de chile, superando a naciones como Los Países Bajos y España, con una participación del 23,9 % en el mercado mundial, lo que significó un ingreso para ese país de 1 453 millones de dólares (El economista, 2021).

1 MSc. R. Ramírez, Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: rramirez@inta.go.cr

2 MBa. L. Sánchez, Departamento de Investigación. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: lsanchez@inta.go.cr

En el año 2020 se produjeron en el mundo más de 36,000 millones de kilos de chiles dulces, sobre una superficie que superó los dos millones de hectáreas, siendo Estados Unidos de Norteamérica el principal importador, al comprar, el 32,17 % de la producción internacional, seguido de Alemania y Reino Unido, con un 11,50 y 6,79 % respectivamente (Horto Info, 2021).

Este cultivo para fines de exportación a los Estados Unidos de Norteamérica debe cumplir con una serie de requisitos fitosanitarios, entre los que se encuentran: la certificación de baja prevalencia de la mosca de la fruta *Anastrepha obliqua* y una garantía que están libres de síntomas del virus rugoso del tomate (conocido también por sus siglas en inglés ToBRFV) (ICEX, 2020).

Para cumplir con estos requerimientos la producción debe realizarse en casas de malla o invernaderos, pero con este último sistema el agricultor, pese a lograr mayores rendimientos,

implica una inversión importante que debe analizarse cuidadosamente, ya que puede afectar la tasa de retorno (Mete 2014).

Según FAO (2019), la sostenibilidad económica de una actividad productiva se estima a través de indicadores financieros que permiten conocer la rentabilidad de los sistemas, entre estos, uno de los de mayor uso es la relación beneficio-costos. (B/C). El B/C cuantifica a través de un ratio, el balance de ingresos y egresos asociados a la implementación de un proyecto o política para un inversor. La aplicación es de mucha relevancia en proyectos que presentan alternativas viables, ya que permite seleccionar entre una u otra a partir de un criterio económico objetivo.

El objetivo del presente estudio fue determinar la factibilidad económica para exportar chile dulce tipo Bell, produciendo en sistemas de ambiente protegido al mercado norteamericano desde la Región Chorotega.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información utilizada para el estudio de factibilidad económica se tomó los resultados obtenidos en el ensayo denominado “Evaluación del efecto del ambiente generado en cuatro sistemas productivos sobre el rendimiento productivo y adaptabilidad de cuatro cultivos de chile dulce tipo Bell”, efectuado en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en Cañas, Guanacaste, durante el periodo de diciembre del 2019 a mayo del 2020.

Para el análisis económico se realizó un estudio económico utilizando la metodología de presupuestos parciales (CIMMYT, 1988); con la modificación planteada por Ávalos Cerdas y Villalobos Monge en su análisis económico (Ávalos Cerdas y Villalobos Monge, 2018), que omitió 6 pasos del algoritmo de (Reyes, 2001). Los pasos que se incluyeron en el proceso fueron: la

identificación de los costos relevantes, la estimación de los costos que varían, la estimación del beneficio económico, análisis de dominancia y la tasa de retorno marginal.

Dentro del análisis, se incluyeron tanto los costos operativos de los tratamientos como el de las inversiones a largo plazo, ya que estas últimas son parte de los costos variables a evaluar en los tratamientos. Se estandarizaron a un metro cuadrado todos los costos operativos de cada uno de los tratamientos, asimismo, el monto total de las inversiones fue estandarizado a un metro cuadrado y se cargó todo el egreso al ciclo de cosecha evaluado.

Posteriormente, se realizó un estudio de factibilidad con las mejores combinaciones de tratamientos, para determinar la viabilidad económica de exportar chile dulce tipo Bell hacia el mercado de los Estados Unidos por medio del puerto del Houston.

El escenario de exportación se realizó tomado en cuenta el rendimiento productivo obtenido con los cultivos de chile dulce tipo Bell Canzion y Rojo Americano (frutos de color rojo), según las normas de clasificación de calidad de la fruta empleada por la empresa Del Monte (ver Cuadro 1), sembrados en los sistemas productivos de casa de malla de 3 metros de altura (SP2) e invernadero (SP3).

Cuadro 1. Normas de clasificación de la calidad de fruta de chile Bell, empleada por la empresa Del Monte en el año 2010; información tomada de: (Carrillo, 2016).

Chile de primera	Chile de segunda	Chile de rechazo
Largo y ancho mínimo de 7,5 cm x 7,5 cm. Con puntas bien definidas y sin manchas, estrías o grietas	Largo y ancho menor de 7,5 cm x 7,5 cm. Con puntas deformes. Manchas y heridas < 1 cm² y estrías y grietas < 3 cm	Largo y ancho menor de 7,5 cm x 7,5 cm. Muy deformes. Manchas, heridas y quemaduras del sol > 1 cm²

La capacidad de exportación se estimó calculando el aforo de un contenedor tipo “Refeer” de 19 m de longitud (40 pies), utilizando cajas de cartón con una dimensión para transportar 5 kg de chile dulce tipo Bell. La determinación de ingresos se realizó con el promedio del valor de la caja de 5 kg, obtenidos desde el año 2016 hasta el 2020, según la clasificación de calidad del chile dulce tipo Bell.

Los costos o egresos se clasificaron según su origen en: costos de inversión, costos de producción y costos de comercialización, tomado en cuenta el puerto de Houston como punto de entrada. La evaluación de la rentabilidad de cada sistema productivo se determinó dividiendo los ingresos entre los egresos para determinar la relación beneficio – costo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cumplir con el objetivo, el estudio se realizó en dos etapas, correspondiendo la primera fase a un análisis económico mediante la metodología de presupuestos parciales en los tratamientos evaluados cuyo fin fue determinar las combinaciones que presentaban el mejor desempeño. La segunda parte estuvo compuesta por un estudio de factibilidad con las mejores opciones productivas (de la etapa 1), y estimar la rentabilidad de exportar chile dulce tipo Bell al mercado

de los Estados Unidos de Norteamérica, por medio del puerto de Houston.

Se identificaron y estimaron los costos que variaron en los cuatro cultivos de chile dulce tipo Bell, cultivados en dos casas de mallas de 3 y 5 m de altura, un invernadero y en campo abierto, siendo la semilla y el costo de inversión en infraestructura los únicos costos que variaron entre los tratamientos. (ver Cuadro 2).

Cuadro 2. Costos que variaban en los tratamientos para el experimento de 4 variedades de chile dulce (Capsicum annum) en tres sistemas de ambiente protegido y un sistema a campo abierto, Costa Rica, 2020.

T-2	Canzión- SP2	\$ 0,72	\$ 0,48	\$ 1,19
T-3	Canzión- SP3	\$ 0,72	\$ 17,43	\$ 18,15
T-4	Canzión- SP4	\$ 0,72	\$ 0,00	\$ 0,72
T-5	Fabris- SP1	\$ 0,72	\$ 2,82	\$ 3,54
T-6	Fabris- SP2	\$ 0,72	\$ 0,48	\$ 1,19
T-7	Fabris- SP3	\$ 0,72	\$ 17,43	\$ 18,15

Tratamiento	Descripción *Tratamiento	Costo que varían		Total
		Costo/m ² semilla	Costo/m ² infraestructura	
T-8	Fabris- SP4	\$ 0,72	\$ 0,00	\$ 0,72
T-9	Zidenca-SP1	\$ 0,72	\$ 2,82	\$ 3,54
T-10	Zidenca-SP2	\$ 0,72	\$ 0,48	\$ 1,19
T-11	Zidenca-SP3	\$ 0,72	\$ 17,43	\$ 18,15
T-12	Zidenca-SP4	\$ 0,72	\$ 0,00	\$ 0,72
T-13	R. Americano- SP1	\$ 0,17	\$ 2,82	\$ 2,99
T-14	R. Americano- SP2	\$ 0,17	\$ 0,48	\$ 0,64
T-15	R. Americano- SP3	\$ 0,17	\$ 17,43	\$ 17,59
T-16	R. Americano- SP4	\$ 0,17	\$ 0,00	\$ 0,17

* SP1: Casa de malla de 5m de altura sistema protegido; SP2: Casa de malla de 3 m de altura; SP3: Invernadero; SP4: campo abierto.

Los beneficios económicos de los tratamientos (cuadro 3), se calcularon a partir de la producción estimada en el experimento contemplando las calidades de primera y segunda de chile dulce (*Capsicum annuum*) multiplicado por el precio. El rendimiento obtenido por las frutas de rechazo no se les asignó valor económico.

Cuadro 3. Beneficios económicos de los tratamientos para el experimento de 4 variedades de chile dulce (*Capsicum annuum*) en tres sistemas de ambiente protegido y un sistema a campo abierto, Costa Rica, 2020.

Tratamiento	Beneficio	
	Descripción Tratamiento	Beneficio Neto
T-1	Canzión- SP1	\$ 5,22
T-2	Canzión- SP2	\$ 5,36
T-3	Canzión- SP3	\$ 8,92
T-4	Canzión- SP4	\$ 1,77
T-5	Fabris- SP1	\$ 5,65
T-6	Fabris- SP2	\$ 5,43
T-7	Fabris- SP3	\$ 3,82
T-8	Fabris- SP4	\$ 2,34
T-9	Zidenca-SP1	\$ 3,38
T-10	Zidenca-SP2	\$ 4,40
T-11	Zidenca-SP3	\$ 5,94
T-12	Zidenca-SP4	\$ 1,48
T-13	R. Americano- SP1	\$ 7,09
T-14	R. Americano- SP2	\$ 7,77
T-15	R. Americano- SP3	\$ 9,14
T-16	R. Americano- SP4	\$ 1,55

* SP1: Casa de malla de 5m de altura sistema protegido; SP2: Casa de malla de 3 m de altura; SP3: Invernadero; SP4: campo abierto.

Mediante un análisis de dominancia se determinó cuales opciones tuvieron un mejor rendimiento económico, a través de la relación de los costos que variaron y el beneficio neto, considerándose los mejores tratamiento aquellos no dominados. (ver Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de dominancia de los tratamientos para el experimento de 4 variedades de chile dulce (*Capiscum annuum*) en tres sistemas de ambiente protegido y un sistema a campo abierto, Costa Rica, 2020.

Tratamiento	CV	Costo que varían		Observación de cambio de tratamiento	Conclusión de la observación
		BN	BN		
T-16	\$ 0,17	\$ 1,55		No Dominado	
T-14	\$ 0,64	\$ 7,77	De T-16 a T-14	No Dominado	
T-4	\$ 0,72	\$ 1,77	De T-14 a T-4	Dominado	
T-8	\$ 0,72	\$ 2,34	De T-14 a T-8	Dominado	
T-12	\$ 0,72	\$ 1,48	De T-14 a T-12	Dominado	
T-2	\$ 1,19	\$ 5,36	De T-14 a T-2	Dominado	
T-6	\$ 1,19	\$ 5,43	De T-14 a T-6	Dominado	
T-10	\$ 1,19	\$ 4,40	De T-14 a T-10	Dominado	
T-13	\$ 2,99	\$ 7,09	De T-14 a T-13	Dominado	
T-1	\$ 3,54	\$ 5,22	De T-14 a T-1	Dominado	
T-5	\$ 3,54	\$ 5,65	De T-14 a T-5	Dominado	
T-9	\$ 3,54	\$ 3,38	De T-14 a T-9	Dominado	
T-15	\$ 17,59	\$ 9,14	De T-14 a T-15	No Dominado	
T-3	\$ 18,15	\$ 8,92	De T-15 a T-3	Dominado	
T-7	\$ 18,15	\$ 3,82	De T-15 a T-7	Dominado	
T-11	\$ 18,15	\$ 5,94	De T-15 a T-11	Dominado	

CV= costos que varían BN = beneficio neto

Los tratamientos no dominados fueron el tratamiento T-16, T-14 y T-15. Se realizó una estimación de la Tasa de Retorno Marginal (TRM) para cada uno de los tratamientos no dominados (mejor desempeño según el análisis de dominancia), para determinar a cuáles opciones productivas se les aplicaba el estudio de factibilidad (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Cálculo de la tasa de retorno marginal (TRM) según el análisis de dominancia para los tratamientos no dominados, Costa Rica, 2022.

Tratamiento	CV	BN	Análisis de Dominancia		TRM
			ΔBN	ΔCV	
T-16	\$ 0,17	\$ 1,55			
T-14	\$ 0,64	\$ 7,77	6,22	0,48	1 309,49
T-15	\$ 17,59	\$ 9,14	1,37	16,95	8,09

Según el estudio de análisis de presupuestos parciales los sistemas productivos SP1, SP2 y SP3, con el cultivar Rojo Americano fueron los que mostraron el mejor desempeño, por lo que fueron los prospectos para realizar el estudio de factibilidad. Esto sistemas fueron de casa de malla de 3 m (SP2) y en invernadero (SP3). Se tomaron en cuenta la producción únicamente de frutos comerciales de los cultivos con mayor rendimiento productivo, que fueron Canzion y Rojo Americano.

El invernadero (SP3) obtuvo un porcentaje de frutas de talla grande y mediana de 7,81 y 92,19 % respectivamente y la casa de malla de 3 m de altura (SP2) mostró un porcentaje de 10,15 y 89,85 % de frutas grandes y medianas, por lo que fueron finalmente seleccionados para el estudio de factibilidad.

Capacidad para exportación

El mercado de los Estados Unidos de Norteamérica comercializa el chile dulce tipo Bell en cajas de 5 kg (11 libras) y para su transporte vía marítima, se requiere de contenedores tipo “Refeer” de 19 m de longitud (40 pies), con sistema de refrigeración que conserve la temperatura entre 10 a 12 °C.

Aunque las dimensiones de la caja de cartón para acopiar los frutos de chile pueden variar, la medida más estándar es la de 40 cm de largo, 30 cm de ancho y 20 cm de altura, con lo que se pueden colocar 110 cajas por pallet (tarima) de 1 x 1,2 m, lo que significa 21 pellets por contenedor de 40”, con una carga total de 2310 cajas y un peso neto de producto de 11 550 kg (ver Cuadro 6).

Cuadro 6. Capacidad de transporte por contenedor refrigerado de 19 m de longitud (40 pies) para número de cajas, número de pellets y peso neto de fruta fresca (kg); información suministrada por: (K, Coto, comunicación personal, 5 de mayo de 2020).

Dimensión de caja/5kg (cm)	Dimensión/pallets (m)	N° cajas/pallets	N° pallets/contenedor 40”	Total cajas/contenedor 40”	Capacidad peso neto/contenedor (kg)
40 x 30 x 20	1 x 1,2	110	21	2310	11 550

Al no existir diferencias significativas en el rendimiento productivo obtenido entre los sistemas productivos de invernadero (SP3) y de la casa de malla de 3 m de altura (SP2), se realizó un escenario con el rendimiento promedio de los cultivares Canzion y Rojo Americano, alcanzado en los tratamientos de ambiente protegido, según la clasificación de calidad (grandes y medianos), mientras que la producción de rechazo se descartó algún valor económico.

En el sistema productivo conformado por la casa de malla de 3 m de altura (SP2), se registraron los mayores rendimientos de frutas comerciales de chile dulce de talla grande con un valor para los cultivares Canzion y Rojo Americano de 2706 y 3018 kg/ha respectivamente, mientras que en el invernadero se presentó la mayor cantidad de frutas medianas con una producción de 24 573 y 27 404 kg/ha, siguiendo el orden de los cultivares anteriormente mencionados (ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Rendimiento productivo comerciable en kilogramos por hectárea, por categoría de calidad (grande y mediana), según norma de exportación a Estados Unidos de Norteamérica (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Tratamiento	Rend. Fruta grande (kg/ha)	Rend. Fruta mediana (kg/ha)	Total (kg/ha)
SP2-Canzion	2706	23 947	26 653
SP3-Canzion	2081	24 573	26 653
SP2-R. Americano	3018	26 707	29 725
SP3-R. Americano	2321	27 404	29 725

Determinación de ingresos

La caja de 5 kg (11 lbs) tiene un precio que varía según las normas de calidad, sobre todo por la talla, la ciudad de destino; así como por factores de oferta y demanda. Según la lista de precios mayoristas publicada en el mercado norteamericano para chile dulce tipo Bell, el

promedio de precio por año desde el 2016 hasta el 2020, fue de US\$ 23,54 para la caja de talla grande y de US\$ 11,93 para la caja de chile mediano, para el destino del mercado de Houston (CNP 2020). (ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Promedio de precios de la caja de chile dulce de 5 kg según la norma de calidad del mercado de los Estados Unidos de Norteamérica desde el año 2016 hasta el 2020; (CNP, 2020).

Año	Valor caja fruta mediana (US\$)			Valor caja fruta grande (US\$)		
	Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
2020	11,90	13,10	12,50	19,90	28,50	24,20
2019	10,50	13,00	11,75	21,50	25,83	23,67
2018	11,00	12,75	11,88	21,75	26,67	24,21
2017	10,83	12,00	11,42	21,67	23,50	22,58
2016	10,17	14,00	12,08	21,67	24,42	23,04
Promedio	10,88	12,97	11,93	21,30	25,78	23,54

El sistema productivo de casa malla de 3 m (SP2), fue donde se presentó el mayor ingreso económico por hectárea, tanto para el cultivar Canzion como para Rojo Americano, con un valor de US\$ 69 867,91 y US\$ 77 936,29 respectivamente, ya que en este sistema se produjeron más frutas de talla grande. Por su parte el ingreso que se generó en el invernadero fue un 2,07 % menor comparado a la casa de malla, presentando un monto para Canzion de US\$ 68 428,59 y para Rojo Americano de US\$ 76 310,89 (ver Cuadro 9).

Cuadro 9. Ingreso total (US\$) por hectárea según tratamiento y calidad de fruta para exportación a Estados Unidos de Norteamérica (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Calidad	Canzion		Rojo Americano	
	SP2	SP3	SP2	SP3
Grande				
Cajas	541	416	604	464
Ingreso	12 735,14	9 792,64	14 218,16	10 922,56
Mediana				
Cajas	4789	4915	5341	5481
Ingreso	57 132,77	58 635,95	63 718,13	65 388,33
Ingreso total (US\$)	69 867,91	68 428,59	77 936,29	76 310,89

Para completar un contenedor de 40 pies con chile dulce proveniente de un invernadero (SP3) se ocuparía de un área de producción de aproximadamente 0,43 ha, de donde se obtendrían tanto para el cultivar Canzion, como para Rojo Americano 180 cajas de chile grande y 2130 cajas de fruta mediana, esto debido ambos cultivos mantienen las mismas relaciones entre la calidad de las frutas, lo que significaría un ingreso de US\$ 29 648,10.

La casa de malla de 3 m de altura requiere de un área de 0,38 ha para completar un envío en contenedor con las dimensiones antes mencionadas a los Estados Unidos de Norteamérica, distribuyendo la producción para los cultivares Canzion y Rojo Americano en 235 cajas de chile grande y 2075 cajas de chile mediano, lo que generaría un ingreso de US\$ 30 286,65 (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Ingreso total (US\$) por contenedor de 40 pies según tratamiento y calidad de fruta para exportación a Estados Unidos de Norteamérica (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Calidad	Canzion		Rojo Americano	
	SP2	SP3	SP2	SP3
Grande				
Cajas	235	180	235	180
Ingreso	5 531,90	4 237,20	5 531,90	4 237,20
Mediana				
Cajas	2075	2130	2075	2130
Ingreso	24 754,75	25 410,90	24 754,75	25 410,90
Ingreso total (US\$)	30 286,65	29 648,10	30 286,65	29 648,10

Costos

Costos de inversión

El sistema productivo de invernadero (SP3), fue el que mayor costo de construcción presentó incluyendo el sistema de riego, requiriendo de una inversión por hectárea de US\$ 247 780,30, lo que significa US\$ 24,78 por metro cuadrado, le siguió la casa de malla de 5 m de altura (SP1) con un

costo por hectárea de US\$ 101 703,44, representando un valor de US\$ 10,17 por metro cuadrado y por último la casa de malla de 3 m de altura (SP2) con una inversión de US\$ 78 257,73 por hectárea, siendo el costo por metro cuadrado de US\$ 7,83 (ver Cuadro 11).

Cuadro 11. Costo de inversión en infraestructura y de sistema de riego (US\$) por hectárea de tres sistemas productivos (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Tratamiento	Valor (US\$) Estructuras*	Valor (US\$) Sist. Riego**	Total (US\$)	Costo/m ² (US\$)
SP1	96 104,62	5 598,82	101 703,44	10,17
SP2	72 658,91	5 598,82	78 257,73	7,83
SP3	242 181,48	5 598,82	247 780,30	24,78

Tipo de cambio: US\$ 548,33 (Promedio últimos 5 años, BCCR)

Notas: * Vida útil de estructura 8 años

** Vida útil de sistema de riego 5 años

El mayor costo de inversión de infraestructura fue para el invernadero, debido a que requirió de una mayor cantidad de materiales, especialmente tubos metálicos, un plástico de 150 micras para cubrir el techo y además se tuvo que contratar a una empresa especializada en la instalación de este tipo de estructuras. Por su parte las casas de mallas el propio productor, con apoyo de personal, las puede construir (ver anexos 1 y 2). Todos estos sistemas productivos se les determinó una vida útil en 8 años, mientras que para el sistema de riego de 5 años.

Costos de producción

Los costos de producción no variaron según el sistema productivo (SP2 y SP3), pero sí, según el cultivar, ya que, aunque el manejo agronómico fue el mismo, se presentó un mayor valor en el precio de la semilla del híbrido F1 Canzion (ver anexos 3 y 4).

El cultivar Canzion alcanzó el mayor costo de producción por hectárea con un monto de US\$ 17 016,12, de los cuales el rubro más alto fue,

la producción de almácigos, lo que representó un 42,28 % del total de los costos, el cual incluyó la semilla y el servicio de manejo de las plántulas.

Por su parte, Rojo Americano, obtuvo un costo de producción por hectárea de US\$ 11 488,10, siendo el rubro más significativo las labores de campo con un 43,56 %, donde se necesitó el uso de la mano de obra para la siembra y manejo del cultivo (ver Cuadro 12).

Cuadro 12. Costo de producción (US\$) de una hectárea de chile dulce para exportación según cultivar (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Rubro	Canzion		Rojo Americano	
	US\$ *	%	US\$ *	%
Labores de campo**	5 004,47	29,41	5 004,47	43,56
Almácigos	7 195,21	42,28	1 667,18	14,51
Preparación de terreno	538,00	3,16	538,00	4,68
Nutrición	1 601,23	9,41	1 601,23	13,94
Insumos Químicos	2 677,22	15,73	2 677,22	23,30
Total	17 016,12	100	11 488,10	100

Nota: * Tipo de cambio: US\$ 548,33 (Promedio últimos 5 años, BCCR)

** Costo por jornal incluye cargas sociales y salario mínimo vigente al segundo semestre (MTSS, 2020).

Para completar un contenedor de chile dulce tipo Bell, el costo de producción varía, según el cultivar, no solamente por las diferencias en el precio de la semilla, sino también debido a que se requieren de diferentes áreas de siembra para lograr una producción que afofe el medio de transporte. El cultivar Canzion ocuparía de un área de 0,43 ha para llenar un contenedor, lo que significaría un costo de producción de US\$ 7 374,72, mientras que Rojo Americano necesitaría de 0,38 ha para lograr el mismo propósito, con una inversión de US\$ 4 463,84 (ver Cuadro 13).

Cuadro 13. Costo de producción (US\$) para completar un contenedor de 40 pies de chile dulce para exportación según cultivar (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Rubro	Canzion		Rojo Americano	
	US\$	%	US\$	%
Labores de campo	2 168,92	29,41	1 944,55	43,56
Almácigos	3 118,37	42,28	647,80	14,51
Preparación de terreno	233,17	3,16	209,05	4,68
Nutrición	693,97	9,41	6 22,18	13,94
Insumos Químicos	1 160,30	15,73	1 040,27	23,30
Total	7 374,72	100	4 463,84	100

Nota: * Tipo de cambio: US\$ 548,33 (Promedio últimos 5 años, BCCR)

** Costo por jornal incluye cargas sociales y salario mínimo vigente al segundo semestre (MTSS, 2020).

Costos de comercialización

Costa Rica está ubicada en un punto estratégico dentro del Istmo centroamericano, teniendo muy cercanos los mercados de Norteamérica y el Caribe. Desde el puerto de Moín en Limón se pueden llevar a cabo las operaciones de exportación hacia el puerto de Houston, mediante la programación de envíos realizados por una empresa servicios logísticos.

El costo por envío de un contenedor refrigerado de 40", con una temperatura entre 10 a 12 °C, se cotizó en US\$ 4 905, basado en el INCOTERM 2010 CFR (el cual incluye el transporte desde Limonal de Abangares, hasta el puerto de Moín, el flete marítimo hasta el puerto de Houston, el pago del seguro y los costos de logística del envío), lo que significó un costo por caja de US\$ 2,12 (ver Cuadro 14).

Cuadro 14 Descripción de costo de transporte vía marítima desde el puerto de Moín, Limón, Costa Rica, hasta el puerto de Houston, Estados Unidos de Norteamérica; información suministrada por: (K, Coto, comunicación personal, 5 de mayo de 2020).

Rubro	Costo (US\$)
Flete marítimo	2 200,00
Terminal handling	550,00
Marine fuel recovery	200,00
Manifest transmission per BL	180,00
Origin landfreight	1 365,00
Document charge per BL	100,00
Handling	120,00
Manejos puerto	40,00
Exportación	150,00
Total US\$ /Contenedor	4 905,00

En nuestro país al no existir información de los costos de manejo pos cosecha del cultivo de chile dulce tipo Bell, se tomó como referencia los incurridos por la empresa exportadora de piña Las Brisas, ubicada en Upala de Alajuela. La producción de chile dulce una vez cosechada, se trasladada a la zona de empaque, donde en primera

instancia se clasifica y desinfecta el producto, lo que significa un costo de US\$ 1 por caja, para posteriormente embalarlo en cajas de cartón, las cuales tienen un costo de US\$ 0,8 cada una.

Cuadro 15. Costos de comercialización (US\$) de chile dulce tipo Bell por contenedor, para exportación al mercado de los Estados Unidos de Norteamérica (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste); según lo indicado por: (K, Coto, comunicación personal, 5 de mayo de 2020 y E, Mosquera, 25 de abril de 2020).

Rubro	Costo (US\$)
Flete terrestre y marítimo	4 905,00
Manejo pos cosecha	2 310,00
Materiales de empaque	1 848,00
Total (US\$)	9 063,00

Independientemente del cultivar y el sistema productivo analizado, el costo de manejo pos cosecha y de materiales para completar un contenedor de 40" es de US\$ 2 310 y US\$ 1 848 respectivamente, a lo cual sumándole el costo de flete terrestre y marítimo dio como resultado un costo de comercialización por cada contenedor enviado de US\$ 9 063 y de US\$ 3,92 por caja exportada (ver Cuadro 15).

Relación beneficio-costo

El análisis de la relación beneficio costo en US\$ se basó en el ingreso y costos ajustados al envío de un contenedor refrigerado de 40" con 2310 cajas de chile dulce (capacidad máxima).

El sistema productivo que presentó la mejor relación Beneficio/Costo fue la casa de malla de 3 m de altura (SP2), con un valor de 1,45 cuando se empleó el cultivar Canzion y de 1,73 cuando se calculó con Rojo Americano, lo que significó que por cada dólar invertido, hubo una recuperación total de la inversión, además de una ganancia de US\$ 0,45 y US\$ 0,73 respectivamente (ver Cuadro 16).

Cuadro 16. Relación beneficio costo entre el sistema productivo de invernadero (SP3), casa de malla de 3 m de altura (SP2), combinado los cultivares Canzion y Rojo Americano por contenedor de 40” (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Rubro	Canzion		Rojo Americano	
	SP2	SP3	SP2	SP3
Ingreso frutas grandes	5 531,90	4 243,29	5 524,63	4 244,09
Ingreso frutas medianas	24 754,75	25 407,81	24 758,43	25 407,41
Ingreso total (US\$)	30 286,65	29 651,11	30 283,07	29 651,50
*Costo de inversión	4 421,56	13 605,36	3 964,16	12 197,91
Costo producción	7 374,72	7 374,72	4 463,84	4 463,84
Costo comercialización	9 063,00	9 063,00	9 063,00	9 063,00
Costo total (US\$)	20 859,28	30 043,08	17 490,99	25 724,74
Saldo neto (US\$)	9 427,37	-391,97	12 792,07	3 926,75
Relación B/C	1,45	0,99	1,73	1,15

Nota: *Se incluye la depreciación correspondiente a un año, relacionada con un ciclo de cultivo

El invernadero resultó ser el sistema de ambiente protegido menos competitivo desde un punto de vista económico, debido a que el costo de construcción e instalación incluyendo el sistema de riego correspondió al 46,27 % del costo total, mientras que, para la casa de malla 3 m de altura, representó un 21,87 %, lo que significó una diferencia en la relación beneficio costo entre los sistemas anteriormente descritos de un 32,79 %, dejando en evidencia que para emprender un proyecto de exportación de chile dulce tipo Bell hacia los Estados Unidos de Norteamérica, el tipo de estructura de protección seleccionada tiene un efecto directo en la retribución económica.

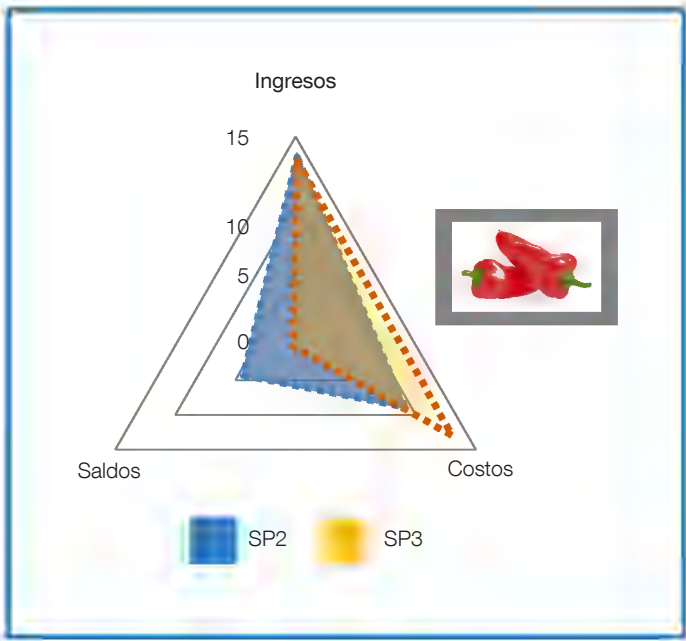


Figura 1. Relación de costos, ingresos y saldos en US\$, por caja exportable de chile dulce Canzion, según el sistema productivo donde se desarrolló (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Los ingresos por cada caja exportable tanto para el cultivar Canzion como para Rojo Americano, al tomar en cuenta las frutas de talla grande y medianas acopiadas en un contenedor, fue de US\$ de 13,11 cuando la producción se desarrolló en la casa de malla de 3 m de altura (SP2) y de US\$ 12,84 cuando provino del invernadero (SP3).

El costo total por caja exportable resultó para el cultivar Canzion en US\$ 9,03 cuando el origen de la fruta provenía del sistema productivo de casa de malla de 3 m de altura (SP2), donde se obtuvo un beneficio neto US\$ 4,08 por caja, mientras que en el invernadero (SP3), el costo fue de US\$ 13,00, lo que dio como resultado un beneficio neto negativo de US\$ 0,17 por caja (ver Figura 1).

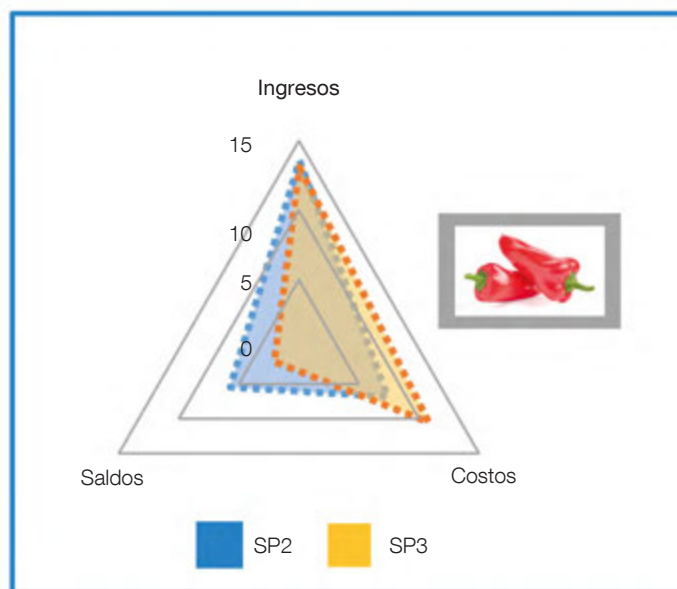


Figura 2. Relación de costos, ingresos y saldos en US\$, por caja exportable de chile dulce Rojo Americano, según el sistema productivo donde se desarrolló (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

El costo total alcanzado por cada caja exportable para el cultivar Rojo Americano en el módulo de casa de malla fue US\$ 7,57, lo que generó un beneficio neto US\$ 5,54 por caja, por su parte en el invernadero se obtuvo un costo de US\$ 11,14, lo que originó un beneficio neto de US\$ 1,70 (Figura 2).

CONCLUSIONES

Se realizaron análisis de dominancia para determinar las opciones con mejor desempeño y se calculó la Tasa de Retorno Marginal (TRM) para dichas opciones. Las mejores opciones resultaron ser la casa de malla de 3 metros de altura y el invernadero, para los cultivos Canzion y Rojo Americano. Se consideraron de valor económico solo las frutas comerciales de mayor calidad para el estudio de factibilidad.

Se evaluó la capacidad de exportación y se calculó la cantidad de cajas de chile que se pueden cargar en contenedores refrigerados. Se analizaron los precios promedio de las cajas de chile en el mercado estadounidense.

Se realizó un análisis de la relación beneficio-costos, que reveló que el sistema de casa de malla de 3 m de altura presentó la mayor rentabilidad con ganancias significativas por cada dólar invertido, tanto para el cultivar Canzion como para Rojo Americano.

El estudio económico proporciona un indicio para la viabilidad de exportar chile dulce tipo Bell al mercado de Estados Unidos, destacando las opciones productivas más rentables y los factores clave que influyen en la rentabilidad del negocio. No obstante, se debe profundizar en un análisis de riesgo para determinar la presión financiera que podría soportar el proyecto ante fluctuaciones de variables relevantes como los precios, la productividad, los insumos y la tasa de interés. Esto podría ser una segunda etapa de esta propuesta.

LITERATURA CITADA

Ávalos Cerdas, J, y Villalobos Monge, A. (2018). Análisis económico: un estudio de caso en *Jatropha curcas* L. mediante la metodología de presupuestos parciales. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 101-111. <https://dx.doi.org/10.15517/ma.v29i1.27901>

Carrillo, K. (2016). Efecto de la densidad de siembra y el tipo de poda de formación, sobre el rendimiento productivo y la calidad de frutos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) tipo "Bell" bajo ambiente protegido en Cañas, Guanacaste. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica]. 12-52 p.

CIMMYT. (1988). La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: un manual metodológico de evaluación económica. México: CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1063/9031.pdf>

Consejo Nacional de la Producción (CNP). (2020). Precios internacionales de la agricultura protegida. https://www.cnp.go.cr/sim/hortalizas.aspx#HERMES_TABS_3_3

El Economista. (2021). México se afianza como líder mundial en exportaciones de pimientos. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Mexico-se-afianza-como-lider-mundial-en-exportaciones-de-pimientos-20210712-0012.html>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2019). Guía de análisis de costo-beneficio. Aplicación para medidas de adaptación al cambio climático en el sector agropecuario en Uruguay. 5 p. <http://www.fao.org/3/ca2795es/ca2795es.pdf>

Horto Info. (2022). En el mundo se producen al año más de 36.000 millones de kilos de pimiento, sobre más de 2 millones de hectáreas. <https://hortoinfo.es/produccion-mundial-pimiento-200622/>

ICEX. (2020). Nuevas reglas para la importación de tomates en Estados Unidos. <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/sectores/bebidas/noticias/NEW2020854997.html?sector=>

Intagri. (2015). Aspectos claves para la producción exitosa de pimiento en invernadero. <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/aspectos-claves-produccion-pimiento-invernadero>

Mete, M. (2014). valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 7(7), 67-85. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2014000100006&lng=es&tlng=es

MTSS (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social). (2020). Lista de salarios mínimos por ocupación año 2020. http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/Documentos-Salarios/lista_salarios_2020.pdf

Reyes, M. (2001). Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: rediseñando el uso de este enfoque. Universidad de San Carlos de Guatemala. https://www.researchgate.net/publication/334655730_Analisis_economico_de_experimentos_agricolas_con_presupuestos_parciales_Re-ensenando_el_uso_de_este_enfoque

ANEXOS

Anexo 1

Costo de construcción e instalación (US\$) por hectárea de un invernadero de 7 m de altura (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Característica	Cant./unidad	Precio unit. (US\$)	Costo (US\$)
Tubo metal (5 cm /2.80 mm)	459	32,62	14 973,04
Tubo metal (3,75 cm/1.50 mm)	1384	13,58	18794,57
Tubo metal (2,5 cm/1 mm)	12	8,90	106,79
Tubo rectangular	204	12,40	2529,86
Varilla lisa # 6	13	14,79	192,27
Varilla deformada # 3	243	3,51	853,09
Perfiles metálicos	1065	7,57	8060,38
Resortes adicionales	1500	1,19	1778,13
Cable de tensión # 1	6	453,00	2718,00
Cemento	73	11,31	825,42
Piedra + Arena (m ³)	12	27,36	318,56
Soldadura (kg)	408	1,31	533,21
Discos para cortar	204	5,25	1071,47
Plástico (rollos)	21	331,00	6951,00
Malla anti insecto	42	439,52	18 459,69
Sarán	7	1288	9016,00
*MO (Servicio profesional)			155 000
Monto total			242 181,48
Valor m ² (US\$)			24,22

Anexo 2

Costo de construcción e instalación (US\$) por hectárea de una casa de malla de 3 m de altura. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Tubo metal (5 cm/2.80 mm)	171	31,42	5372,72
Tubo metal (3,75 cm/1.50 mm)	60	13,08	784,78
Tubo metal (2,5 cm/1 mm)	12	8,57	102,85
Varilla lisa # 6	20	15,36	307,11
Varilla deformada # 3	72	3,51	252,77
Perfiles metálicos	25	7,29	182,24
Cable tensor # 1	9	453,00	4077,00
Cable tensor # 2	1	187,00	187,00
Tapón PVC (5 cm)	60	0,65	38,85
Cemento	65	10,89	707,89

Característica	Cant./unidad	Precio unit. (US\$)	Costo (US\$)
Piedra + Arena (m³)	10	26,35	263,48
Soldadura (kg)	204	1,26	256,78
Discos para corta	150	5,06	758,83
Malla anti insecto	30	423,33	12 699,81
Sarán (rollos)	7	1288,00	9016,00
Equipos industriales	4	702,62	2810,47
MO (Jornales)	1990	17,51	34 840,33
Monto total			72 658,91
Valor m² (US\$)			7,27

Anexo 3

Costos de producción en dólares (US\$) por hectárea para el cultivar Canzion. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Mano de obra (M.O.)			
Rubro	Cant. (jornales)	*Costo/jornal	Total (US\$)
Trasplante	8		154,95
Limpieza	66		1271,09
Amarre de chile	75		1452,68
Fumigaciones	67	19,37	1297,72
Riego	5		101,69
Cosechas	38		726,34
Total			5004,47
Almácigos			
Rubro	Cant.	Valor/unit.	Total (US\$)
Valor de la semilla	20 833	0,30	6249,90
Serv. de almácigo (bandejas)	163	5,80	945,31
Total			7195,21
Preparación de terrenos			
Rubro	Cant.	Valor/unit.	Total (US\$)
Serv. rastra 25 cm prof.	1	91,19	91,19
Serv. rastra 10 cm prof.	2	72,95	145,90
Serv. de encamado	1	127,66	127,66
Serv. de afinado de cama	1	127,66	127,66
Serv. roturación	0,5	91,19	45,59
Total			538,00
Nutrición			

Rubro	Cant./empaques	Valor/unit.	Total (US\$)
Fosfato monopotásico (25 kg)	6,00	29,18	175,08
Nitrato de Potasio (25 kg)	18,00	32,83	590,89
Sulfato de Magnesio (25 kg)	13,00	7,29	94,83
Nitrato de Calcio (25 kg)	18,00	12,77	229,79
Fetrilon (0,20 kg)	80,00	6,38	510,64
Total			1601,23
Productos químicos			
Rubro	Cant./empaques	Valor/unit.	Total (US\$)
Muralla (l)	4	40,12	160,49
Amistar (500 g)	4	127,66	510,64
Movento (l)	4	155,02	620,06
Proclaim (l)	8	29,18	233,44
Bayfolan (l)	16	8,21	131,31
Oro Bor (l)	5	145,90	729,49
Plástico acolchado (rollos)	2	145,90	291,80
Total			2677,22
Total general (US\$)			17 016,12

*Salarios Mínimos Decreto N° 42104-MTSS

Anexo 4

Costos de producción en dólares (US\$) por hectárea para el cultivar Rojo Americano. (E.E.E.J.N., Cañas, Guanacaste).

Mano de obra (M.O.)			
Rubro	Cant. (jornales)	*Costo/jornal	Total (US\$)
Trasplante	8		140,06
Limpieza	66		1148,90
Amarre de chile	75		1313,08
Fumigaciones	67	17,51	1173,02
Riego	5		91,92
Cosechas	38		656,54
Total			4523,55
Almácigos			

Rubro	Cant.	Valor/unit.	Total (US\$)
Valor de la semilla	20 833	0,03	721,88
Serv. de almácigo (bandejas)	163	5,80	945,31
Total			1667,18
Preparación de terrenos			
Rubro	Cant.	Valor/unit.	Total (US\$)
Serv. rastra 25 cm prof.	1	91,19	91,19
Serv. rastra 10 cm prof.	2	72,95	145,90
Serv. de encamado	1	127,66	127,66
Serv. de afinado de cama	1	127,66	127,66
Serv. roturación	0,5	91,19	45,59
Total			538,00
Nutrición			
Rubro	Cant./empaque	Valor/unit.	Total (US\$)
Fosfato monopotásico (25 kg)	6,00	29,18	175,08
Nitrato de Potasio (25 kg)	18,00	32,83	590,89
Sulfato de Magnesio (25 kg)	13,00	7,29	94,83
Nitrato de Calcio (25 kg)	18,00	12,77	229,79
Fetrilon (0,20 kg)	80,00	6,38	510,64
Total			1601,23
Productos químicosMano			
Rubro	Cant./empaque	Valor/unit.	Total (US\$)
Muralla (l)	4	40,12	160,49
Amistar (500 g)	4	127,66	510,64
Movento (l)	4	155,02	620,06
Proclaim (l)	8	29,18	233,44
Bayfolan (l)	16	8,21	131,31
Oro Bor (l)	5	145,90	729,49
Plástico acolchado (rollos)	2	145,90	291,80
Total			2677,22
Total general (US\$)			11 007,18

*Salarios Mínimos Decreto N° 42104-MTSS

NOTA TÉCNICA

EVALUACIÓN DE DOCE CULTIVARES DE CÁÑAMO INDUSTRIAL (*CANNABIS SATIVA* L.) EN CAÑAS Y GUÁPILES DE COSTA RICA

Alfredo Bolaños Herrera¹ Stephanie Quirós Campos² Dan O'Bryan³

RESUMEN

Evaluación de doce cultivares de cáñamo industrial (*Cannabis sativa* L.) en Cañas y Guápiles de Costa Rica. El objetivo del proyecto fue determinar la adaptabilidad de 12 cultivares de cáñamo a las condiciones de Cañas y Guápiles para la producción de aceite, fibra y grano. Las parcelas de evaluación se establecieron en la Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez (EEEJN) en Cañas y en la Estación Experimental Los Diamantes (EELD) en Guápiles. En la EELD, los cultivares se sembraron a campo abierto y en la EEEJN en un invernadero multicapilla entre septiembre 2020 y julio 2022. En la EELD se evaluaron dos cultivares para aceite, de los cuales se obtuvieron bajos rendimientos (menos 51,33 g de flor seca por planta), y un cultivar para fibra el cual no mostró adaptabilidad a la localidad. En la EEEJN se evaluó un cultivar para fibra y grano y 11 para aceite. Las plántulas fueron mantenidas en invernadero hasta que alcanzaron un tamaño adecuado para trasplante. Desde la germinación hasta el estado de madurez, se suministró luz artificial, para cumplir con las 17 a 18 horas luz. Los ciclos de crecimiento y producción variaron entre los 125 y 90 días. En la EEEJN las plantas alcanzaron 1,8 m de altura con producciones promedio entre 323,9 y 345,2 gramos de flor seca por planta, con un rendimiento estimado de fibra entre los 1935 a 2838 kg/ha (110 000 plantas por hectárea). Se reportaron los insectos *Spodoptera* spp., *Bemisia tabaci*, *Rupella albinella*, áfidos, trips y ácaros. Se determinó que los cultivares evaluados en Guápiles no se adaptaron a las condiciones climáticas de esa zona, mientras que si se observó una buena adaptación del cáñamo en Cañas.

Palabras clave: Cannabis, Cannabinoide, CBD, Fibra.

Keywords: Cannabis, Cannabinoid, CBD, Fiber.

INTRODUCCIÓN

La planta *Cannabis sativa* L. se conoce con varios nombres en el mundo. Algunos de ellos hacen referencia a la utilización de su fibra para la industria textil, así como a sus aceites no psicoactivo (CBD) y psicoactivo (THC) para el tratamiento para varias enfermedades (Ángeles López *et al.* 2014). En el ámbito

-
- 1 Investigador responsable de Proyecto. Dirección de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: abolanosherrera@gmail.com
 - 2 Investigadora secundaria. Unidad de Hortalizas, Departamento de Investigación e Innovación. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: mquirosc@inta.go.cr
 - 3 Investigador de la empresa privada ROCO PLANTS S.A. Correo: dano@rocoplants.com

académico ha habido discusión sobre el nombre adecuado según su uso, siendo el nombre de cáñamo industrial el utilizado también cuando se hace referencia a las variedades o cultivares utilizados con fines farmacológicos, debido a la alta producción de cannabidiol (CBD) al cual se le han identificado propiedades medicinales (Avello *et al.* 2017).

Asimismo, se utilizan cultivares para la producción de textiles y cuerdas, papel, cartón, alimentos para humanos y animales, cosméticos, biocombustible, materiales para construcción de casas o industria, generación de plásticos, entre otros usos (Faiz *et al.* 2022). En el ámbito internacional, muchos países establecieron la legalidad del cultivo de cáñamo cuando la concentración de THC, no supera los 0,3 % (Hart 2020).

El cáñamo se clasifica como una planta herbácea anual, caracterizada por desarrollar un tallo rígido. Su altura puede variar entre menos de 1,0 m, hasta los 5,0 m de altura. La capacidad de crecimiento es de hasta 2 cm por día, en condiciones climáticas apropiadas y con cultivares de alto crecimiento vegetativo (García 2016).

La planta de cáñamo responde fuertemente a los factores ambientales como el fotoperiodo, temperatura, composición del suelo y el manejo, por tanto, éstos y otros aspectos determinan la calidad de la fibra (Petit *et al.* 2020), el rendimiento en flores secas o la materia verde en general. Durante sus primeras fases de crecimiento, las plantas de cáñamo requieren suficiente luz solar para garantizar su óptimo crecimiento con fotoperiodos superiores a las 17 horas luz, pero

conforme avanza su ciclo de crecimiento, la necesidad lumínica se reduce en la fase de floración (Magagnini *et al.* 2018).

Las plantas de cáñamo son dioicas (Pino 2019; García 2016) es decir, las estructuras sexuales femeninas y masculinas ocurren en plantas separadas (machos y hembras). La producción de flores masculinas antecede a la de las flores femeninas. Por tanto, mientras las plantas masculinas envejecen, las plantas femeninas inician con la maduración de las semillas, siendo muy difícil el manejo de la producción de cáñamo de esta manera. Para facilitar la producción, se emplean plantas monoicas (ambos órganos florales en la misma planta), para optimizar la producción de plantas femeninas de alto valor productivo (Pino 2019).

Para la producción de fibra se utilizan cultivares con alto crecimiento vegetativo, gran altura y tallos densos; mientras que para la producción CBD se utilizan cultivares femeninos con alta capacidad de producción de flores. Aun cuando existen cultivares de doble propósito, los productores tienden a inclinarse hacia la selección de variedades para un uso específico (Anderson *et al.* 2019).

Las plantas de cáñamo se desarrollan de forma óptima en suelos con buen drenaje con valores entre 6.0 y 7.0 de pH (Anderson *et al.* 2019), siendo un cultivo sensible a los suelos con altos contenidos de arcilla que tienden a compactarse. El cultivo puede ser susceptible a enfermedades como *Botrytis cinerea* (moho gris), *Pythium* spp. (Mal del talluelo) o *Sclerotinia sclerotiorum* (moho blanco) y a insectos como gusanos cortadores, larvas y algunos áfidos.

El objetivo de esta investigación fue la evaluación de la adaptabilidad de doce cultivares de cáñamo en las localidades de Cañas y Guápiles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las parcelas de evaluación se establecieron en las estaciones experimentales Los Diamantes en Guápiles en campo abierto y en la Estación

Experimental Enrique Jiménez Núñez en Cañas en la modalidad de campo abierto y ambiente protegido (invernadero) según cultivar y propósito en estudio. Se evaluaron doce cultivares de cáñamo con tres propósitos: a) producción de fibra, b) aceite CBD y c) grano para alimentación. En la localidad de Guápiles

fueron evaluados solamente tres cultivares (CCB2020DO, CQD2020DO y CMG2020DO) y en Cañas todos los 12 cultivares (Cuadro 1).

Cuadro 1. Cultivares evaluados de cáñamo según propósito y lugar de evaluación. Cañas-Guápiles, Costa Rica. 2020-2022.

Código	Nombre del cultivar	Fotoperiódico	Propósito	Sitio de evaluación
CCB2020DO	Cherry Blossom	si	CBD	Cañas/Guápiles
CQD2020DO	Queen Dream	si	CBD	Cañas/Guápiles
CMG2020DO	Maya Grain	si	Fibra/grano	Cañas/Guápiles
CAA2020DO	Apricot	no	CBD	Cañas
CBG2021DO	GCO CBG17	no	CBD	Cañas
CHB2020DO	Hot Blonde	si	CBD	Cañas
CCS2021DO	Cinderella Story	si	CBD	Cañas
CMC2021DO	GCO 3MC	si	CBD	Cañas
CPV2021DO	GCO C529	si	CBD	Cañas
CJG2021DO	GCO JG	si	CBD	Cañas
CBC2021DO	GBO BC17	si	CBD	Cañas
CCB2021DO	Cherry Blonde	si	CBD	Cañas

Casa comercial: Blue Forest Farms, USA.

La densidad de siembra para ambos lugares de evaluación fue de 1 m entre plantas y 2 m entre lomillos (campo e invernadero). La cantidad de plantas evaluadas fue 75 plantas por cultivar. Las variables evaluadas fueron: rendimiento (fibra, grano y flor seca), duración de los ciclos de cultivo e incidencia de insectos y enfermedades. Se utilizó estadística descriptiva para analizar los datos.

Aclimatación de las plántulas

Se utilizaron plantas *in vitro* y semilla feminizada (semillas que producen plantas con flores femeninas que logran alcanzar su madurez sin ser polinizadas).

Plantas *in vitro*

Las plántulas importadas *in vitro*, fueron trasplantadas a sustrato comprimido de peat moss previamente humedecido; el procedimiento consistió en abrir manualmente el cubo de peat moss e introducir parte del hipocótilo y radícula dentro, colocando las hojas de la plántula sobre la superficie del cubo. Las plantas se mantuvieron en

cámara húmeda durante cinco días bajo un rango de temperatura entre 30 °C y 35 °C y una humedad entre 80 % y 90 %. Durante este periodo se le suministró continuamente agua en el fondo de las bandejas para mantener la disponibilidad de agua y la humedad relativa. Una vez transcurridos los cinco días, se trasplantaron a recipientes pequeños plásticos de 250 cc para realizar el proceso de aclimatación en invernadero previo al trasplante. El sustrato utilizado fue peat moss contenido: turba de *Sphagnum canadiense*, perlita y cal dolomita). Se les suministró un riego de agua con melaza para disminuir el estrés de trasplante durante 10 días. El riego se realizó con agua tratada con ácido fosfórico para llevarla a un pH de 5,2. El área destinada a aclimatación fue protegida por malla anti-insectos. En esta etapa la temperatura se mantuvo entre los 26 °C y 35 °C y la humedad relativa se mantuvo entre los 65 % y los 75 %. Para cumplir con el fotoperiodo de 17 a 18 horas diarias de luz, se instalaron luces fluorescentes de cuatro bulbos cada uno de 24W con interior aluminizado para potenciar el reflejo de la luz a una altura de 80 cm de los recipientes plásticos.

Plantas semillas feminizadas

Para la obtención de plántulas por semilla, se utilizaron semillas feminizadas y se procedió a realizar la germinación en bandejas de 98 celdas,

utilizando el mismo sustrato de peat moss mencionado anteriormente.

Desarrollo del cultivo en campo e invernadero

Una vez transcurridos 22 días, las plantas fueron sembradas en el invernadero donde previamente se instalaron las lámparas fluorescentes compactas (CFL) E39 de 250 W, a una altura aproximada de 1,80 m del suelo.

La nutrición de los cultivares fue suministrada según la etapa fenológica de las plantas. La nutrición de los cultivares en estado vegetativo (periodo luminoso de 18 horas), estuvo compuesta por una formulación nutritiva de 15 ml de fertilizante de crecimiento (composición: 3 % N, 2 % K_2O , 3,21 % Ca y 0,0409 % Fe), además 7.5 ml de una segunda fórmula de crecimiento (composición: 1.0 % N, 3 % P_2O_5 , 6 % K_2O , 1.11 % Mg, 1.44 % S, 0.0119 % B, 0.00384 % Cu, 0.0429 % Mn, 0.00041 % Mo, 0.0201 % Zn. Además, se adicionó 2,5 ml de suplemento (composición: 1 % N, 1 % P_2O_5 y 1 % K_2O), 2,5 ml de 2 % N, 3,25 % Ca, 1,25 % Mg y 0,11 % Fe) y 10 ml de un tercer suplemento (composición: 1,6 % Mg y 1,75 % S), disuelto en 3,78 l (un galón) de agua. El pH de la solución se ajustó con ácido fosfórico en un rango de 5,8 a 6,2, siendo el ideal 6,02. A cada planta se le adicionó aproximadamente 1,0 L de la solución dos veces a la semana. La duración del ciclo de cultivo fue de aproximadamente seis semanas. En estado reproductivo (ciclo de suministro de luz natural, inferior a 12 horas) la formulación estuvo compuesta de

15 ml de 1 % N, 3 % P_2O_5 , 6.0 % K_2O , 1.11 % Mg, 1.44 % S, 0.0119 % B, 0.00384 % Cu, 0.0429 % Mn, 0.00041 % Mo, 0.0201 % Zn. Además, se adicionó 2,5 ml de suplemento (composición: 1 % N, 1 % P_2O_5 y 1 % K_2O), 15 ml de B.C Bloom, 2,5 ml de 2 % N, 11 % P_2O_5 y 8 % K_2O , 2,5 ml de 1 % N, 1 % P_2O_5 y 1 % K_2O , 2,5 ml de 2 % N, 3,25 % Ca, 1,25 % Mg y 0,11 % Fe y 12,5 ml de 1,6 % Mg y 1,75 % S por 3,78 L (un galón de agua). El manejo del pH de la solución se ajustó al mismo valor que en la fase anterior. A cada planta se le adicionó aproximadamente 2,0 L de la solución, dos veces a la semana. La duración del ciclo de cultivo fue de aproximadamente cinco semanas.

El manejo de las plagas y enfermedades se realizó mediante monitoreo diario del estado de las plantas. Se aplicaron repelentes a base de ajo, chile picante y canela. Se utilizó control manual para los cortadores y etológico mediante el uso de trampas amarillas para la captura principalmente de mosca blanca. Se realizaron labores manuales como la germinación, siembra, trasplante, fertilización, riego, poda, monitoreo de plagas y enfermedades, cosecha de plantas y colgado de plantas en cuarto de secado, poda de flores, limpieza y mantenimiento de espacios de invernadero y cuarto de secado.

Las podas de formación se iniciaron en estado vegetativo cuando la planta alcanzó más de 30 cm de altura. Este tipo de poda priorizó la eliminación de hojas que impedían el paso de luz en la parte inferior y central de la planta, además, se eliminaron aquellas hojas enfermas como práctica de saneamiento. En cosecha, se le eliminó la mayor cantidad de hojas debajo del cogollo con

la finalidad de acelerar el proceso de secado y disminuir la humedad en los tejidos. Una vez la flor seca,

se procedió a realizar otra poda para eliminar el resto de hojas de menor tamaño que disminuyen la calidad del cogollo.

RESULTADOS

Estación Experimental Los Diamantes-Guápiles

El cultivar CMG2020DO no se desarrolló favorablemente, la altura de las plantas fue inferior a 1,5 m, lo cual no es favorable para la producción de fibra. Además, el poco crecimiento y desarrollo del tallo principal evidencia la no adaptabilidad del cultivar al sitio de estudio. No obstante, se resalta que se debe incursionar en investigaciones para evaluar este tipo de cultivares a una densidad

mayor a la utilizada en este estudio preliminar y utilizando genética más tropicalizada. Durante el periodo de permanencia de las plantas de CMG2020DO en campo, se observó clorosis en las hojas y rotura de las ramas laterales, producto de las lluvias de la época (figura 1a, b y c). Para el caso de los cultivares para producción de CBD, el peso promedio de flor seca para el cultivar CCB2020DO fue de 41,31 g por planta y 51,33 g por planta para CQD2020DO (Figura 2).



Figura 1. Desarrollo de cultivares de cáñamo en la Estación Experimental Los Diamantes periodo 2020-2021. A) Planta de cultivar CQD2020DO, B) Planta de cultivar CMG2020DO y C) Planta de cultivar CCB2020DO. Guápiles, Limón, Costa Rica, 2020.

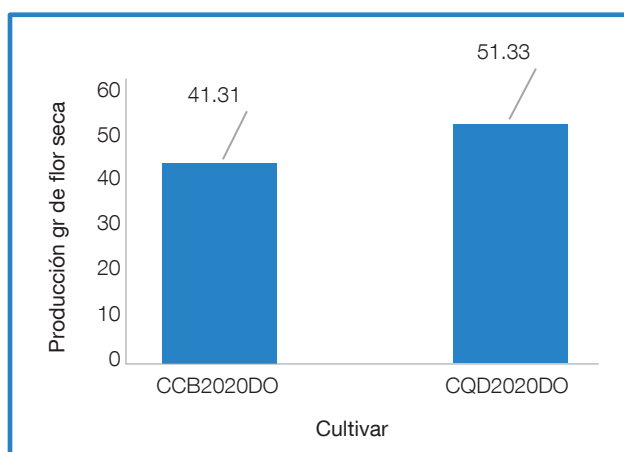


Figura 2. Producción promedio de flores secas por planta según cultivar en Guápiles, Limón, Costa Rica. Periodo 2020-2021.

Dentro de los resultados obtenidos en peso seco de tallos destinados para fibra, los cultivares CCB2020DO y CQD2020DO promediaron 26,54 g y 33,92 g respectivamente.

Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez

Los resultados demuestran que los días transcurridos entre el día de germinación y el día de cosecha varió según el cultivar evaluado (Cuadro 2). Los valores se encuentran entre los 85 días (cultivar CAA2020DO) y los 131 días (cultivar CHB2020DO) respectivamente. El cultivar destinado a fibra (CMG2020DO) tuvo una duración de 114 días para cosecha. CAA2020DO fue el más precoz con una duración de 85 días, esto obedece a que no es un cultivar fotoperiódico.

Cuadro 2. Cantidad de días del ciclo productivo según cultivar evaluado en Cañas, Guanacaste, Costa Rica. Periodo 2020-2022.

Código	Duración ciclo productivo (días)	Código	Duración ciclo productivo (días)
CCB2020DO	114	CCS2021DO	123
CQD2020DO	114	CMC2021DO	119
CMG2020DO	114	CPV2021DO	98
CAA2020DO	85	CJG2021DO	112
CBG2021DO	112	CBC2021DO	99
CHB2020DO	131	CCB2021DO	102

El principal hongo presente durante las evaluaciones fue *Sclerotium cepivorum* (Figura 3), el cual provocó la pérdida de varias plantas por síntomas de marchitamiento. La sintomatología detectada fue la marchitez y posteriormente el estrangulamiento de la base del tallo, donde se apreció el crecimiento de un micelio blanco (Figura 3a). Además, en la cosecha se identificó daño de pudrición de flores por *Botrytis* spp. (Figura 3b).



Figura 3. Enfermedades identificadas provocando marchitamiento de plantas y pudrición de flores A) Signo de masa de esclerocios de *Sclerotium cepivorum* en base de tallo. Fuente foto: Vargas 2022 y B) pudrición en flor en Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2022.

La plaga que causó mayor daño durante el periodo entre setiembre del 2021 y noviembre del 2022 fue *Bemisia tabaci* (mosca blanca). La alta incidencia provocó la disminución del crecimiento de las plantas de cáñamo y presencia de fumagina en los foliolos. También hubo reporte de defoliación de las hojas causado por hormigas zompopas (género *Atta* spp.) y presencia de áfidos, ácaros y trips. Se identificó la presencia de otros insectos asociados al cultivo durante las evaluaciones que no fueron identificados como plaga. Según los resultados, se capturaron arañas (familias: Thomisidae y Salticidae), hormigas de la

familia Formicidae, hemípteros (familias: Flatidae, Pentatomidae y Reduviidae), lepidópteros (familia: Noctuidae) y grillos de la familia Tettigoniidae.

Dentro de los cultivares fotoperiódicos (Figura 4a), los rendimientos que tendieron a ser mayores fueron los cultivares CCB2020DO y CQD2020D con valores de 345,2 g ($\pm 88,67$) y 323,9 g ($\pm 115,91$) de flores secas por planta. Dentro de las producciones registradas para estos dos cultivares, en CCB2020DO se cuantificó una producción máxima de 490 g de flor seca por planta, mientras que para CQD2020DO fue de hasta

638 g por planta (Cuadro 3). El cultivar con menor producción fue CAA2020DO (cultivar no fotoperiódico) con una media de 9,95 g de flor seca planta pues es un cultivar que produce baja cantidad de flores debido a su porte bajo (Cuadro 3) (Figura 4b). Debido al impedimento legal para la movilización del material vegetal, no fue posible determinar la calidad de las flores producidas.

Cuadro 3. Peso promedio (g) de flores secas por planta según cultivar de cáñamo. Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2021.

Cultivar	Media (g)	D.E (±)	Mín (g)	Máx (g)
CAA2020DO	9,95	7,94	1	47
CBC2021DO	66,25	33,03	13	134
CBG2021DO	38,94	21,62	5	92
CCB2020DO	345,2	88,67	125	490
CCB2021DO	114	32,66	23	184
CCS2021DO	74,39	45,33	5	280
CHB2021DO	127,88	37,32	45	222
CJG2021DO	43,89	20,33	5	65
CMC2021DO	92	34,35	21	180
CPV2021DO	78,48	39,99	38	186
CQD2020DO	323,9	115,91	43	638



Figura 4. A) Cultivar de cáñamo CCB2020DO fotoperiódico B) cultivar de cáñamo CAA2020DO no fotoperiódico. Cañas, Costa Rica, 2021

El promedio de peso de tallos secos destinados para fibra del cultivar CMG2020DO fue de 117,30 g por planta. Pero no fue posible determinar el rendimiento en fibra, pues no se tuvo acceso al equipo adecuado. Además, cada planta del cultivar CMG2020DO produjo en promedio 40 g de grano. La alta incidencia de *Bemisia tabaci* provocó disminución de rendimientos de algunos cultivares. Los mejores cultivares con mejor producción de flores secas destinadas para la extracción de CBD fueron CCB2020DO y CCQ2020DO.

CONCLUSIONES

Para el sitio de evaluación de Guápiles, se determinó que los cultivares de cáñamo CQD2020DO, CCB2020DO y CMG2020DO, no se adaptaron a las condiciones en las cuales se desarrolló la investigación. Las plantas mostraron deformaciones, bajo crecimiento y desarrollo, así como baja calidad de las flores. No obstante, no se descarta que en la localidad se pueda producir cáñamo bajo otras condiciones de siembra.

De acuerdo con los promedios obtenidos de los cultivares CQD2020DO, CCB2020DO, se puede aseverar que el cultivo es adaptable a las condiciones agroclimáticas de Cañas, Guanacaste, pues obtuvieron la mejor producción de flores secas por planta.

La búsqueda de material genético más apto para las condiciones climáticas a campo abierto de Guápiles representa una de las primeras estrategias para continuar con los procesos de investigación en esta localidad. Además, es indispensable realizar evaluaciones bajo condiciones de ambiente protegido para determinar si la adaptabilidad es más favorable que a campo abierto.

RECOMENDACIONES

Los interesados en el cultivo, deben continuar con la evaluación de diferente genética disponible a nivel mundial para identificar cultivares aptos según condiciones ambientales de cada localidad del país.

El mejoramiento de las técnicas de producción favorecería el incremento de la producción. Dentro de estas técnicas se incluyen el manejo integrado del cultivo, mediante el uso de control biológico, productos con baja carga química, optimización del ambiente protegido, entre otros. Es indispensable realizar investigaciones utilizando sistemas de producción hidropónicas.

LITERATURA CITADA

Anderson, E. Baas, D. Burns, E. Chilvers, M. DeDecker, J. DiFonzo, C. Thelen, K. Thelen, M. & Wilke, B. (2019). Industrial Hemp Production in Michigan. https://www.canr.msu.edu/hemp/uploads/files/industrialhempinfosheet_2019-05-24.pdf

Ángeles López, G. Brindis, F. & Cristians, S. (2014). *Cannabis sativa* L., una planta singular. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, 45(4), 1-6. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S187001952014000400004&lng=es&tlng=es.

Avello, M. Pastene, E. Fernández, P. & Córdova, P. (2017). Potencial uso terapéutico de cannabis. *Revista médica de Chile*, 145(3), 360-367. <https://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872017000300010>

Faiz Ahmed, F. Zahidul, I. Mahmud, S. Sarker, E. & Islam, R. (2022). Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. *Heliyon* 8 (1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08753>

García J. (2016). Ensayo de variedades de cáñamo en la Vega Baja del Segura Trabajo de graduación para optar por el título de Ingeniería Agroalimentaria y Agroambiental. [Tesis de pregrado, *Universidad Miguel Hernández*], Alicante, España. <https://docplayer.es/44867388-Ensayo-de-variedades-de-canamo-en-la-vega-baja-del-segura.html>

Hart, C. (2020). The opportunities and challenges with hemp Integrated Crop Management. <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2020/03/opportunities-and-challenges-hemp>

Magagnini, G. Grassi, G. & Kotiranta, S. (2018). The effect of light spectrum on the morphology and cannabinoid content of *Cannabis sativa* L. *Revista Med Cannabis Cannabinoids* 2018, 1:19-27. doi: 10.1159/000489030.

Petit, J. Salentijn, E. Paulo, M. Thouminot, C. Van Dinter, B. Magagnini, G. Gusovius, H. Tang, K. Amaducci, S. Wang, S. Uhrlaub, B. Müssig, J. & Trindade, L. (2020). Genetic Variability of Morphological, Flowering, and Biomass Quality Traits in Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Frontiers in Plant Science* (11). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00102/full>

Pino, O. (2019). Estudio de pre factibilidad para la creación de una empresa productora y procesadora de fibra de cáñamo industrial en la provincia de Pichincha para la exportación al mercado alemán en el periodo 2019-2029. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/15967>

NOTA TÉCNICA

DETERMINACIÓN DEL HORARIO ÓPTIMO PARA LA MEDICIÓN DEL ÓXIDO NITROSO EN UNA PLANTACIÓN DE CAFÉ DE UNA ZONA ALTA DE COSTA RICA

Ing. Agr. Francisco José Arguedas Acuña¹

RESUMEN

Determinación del horario óptimo para la medición del óxido nitroso en una plantación de café de una zona alta de Costa Rica. Introducción. Las emisiones de óxido nitroso (N_2O) en el suelo fluctúan durante el día, por lo cual se requiere determinar la hora o momentos en los que se libera este gas al ambiente. Objetivo. Determinar el rango horario diario, donde se presentan las mayores emisiones de N_2O del suelo. Materiales y métodos. El estudio se llevó a cabo en un lote cultivado con café en Santa María de Dota, San José; entre diciembre 2015 y mayo 2016. Se realizaron mediciones durante seis días en dos épocas del año, durante tres días consecutivos, con muestreos cada dos horas, distribuidos entre las seis y las veinte horas. Se utilizó la metodología de cámaras estáticas y se contabilizó la cantidad de gas liberada en diferentes momentos del día. Resultados. La emisión de N_2O presentó una media de $0,021 \pm 0,028 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, durante los períodos muestreados. El patrón de emisión a lo largo del día fue heterogéneo con valores entre 0,001 y 0,032 $\text{mg } N_2O\text{-N.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Se identificó que los momentos de mayor emisión promedio fueron entre las ocho y las diez horas; y entre las dieciséis horas y las dieciocho horas ($p < 0.05$). Se concluye que para el sitio evaluado, hay dos momentos óptimos en el día para un muestreo representativo (promedio emisión de N_2O diaria). Se recomienda la utilización del rango horario para la toma de muestras, entre las ocho y las diez horas de la mañana; y entre las quince y diecisiete horas de la tarde.

Palabras clave: Horas para muestreo, Monitoreo de GEI, Emisiones, Café, Cámaras estáticas.

ABSTRACT

Determination of the optimal time for the measurement of nitrous oxide in a coffee plantation in a highland area of Costa Rica. Introduction. Nitrous oxide (N_2O) emissions in the soil fluctuate during the day, so it is necessary to determine the time or times when this gas is released into the environment. Objective. Determine the daily hourly range, where the highest N_2O emissions from the soil occur. Materials and methods. The study was carried out in a plot grown with coffee in Santa María de Dota, San José; between December 2015 and May 2016. Measurements were taken over six days at two times of the year, for three consecutive

¹ M.Sc. F. Arguedas, Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA. Costa Rica. Correo: farguedasa@inta.go.cr

days, with sampling every two hours, distributed between six and twenty hours. The static chamber methodology was used and the amount of gas released at different times of the day was counted. Results. N_2O emission averaged $0.021 \pm 0.028 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ during the sampled periods. The emission pattern throughout the day was heterogeneous with values between 0.001 and $0.032 \text{ mg } N_2O\text{-N.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. It was identified that the moments of highest average emission were between eight and ten hours; and between sixteen hours and eighteen hours ($p < 0.05$). It is concluded that for the evaluated site, there are two optimal times of day for representative sampling (average daily N_2O emission). It is recommended to use the time range for sampling, between eight and ten o'clock in the morning; and between fifteen and seventeen o'clock in the afternoon.

Keywords: Hours for sampling, GHG monitoring, Emissions, Coffee, Static cameras.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, el cultivo de café representa el tercer rubro económico más importante del sector agropecuario, con ingresos de 285 millones de dólares para el año 2018-19 (PROCOMER 2019). Es una actividad estratégica, concentrada en más de 90 mil pequeños productores, donde el 91,4 % de ellos entrega menos de 100 fanegas al año y en conjunto representan el 38,7 % de la producción nacional (cosecha 2018-19; ICAFE 2020). En los resultados del último Censo Agropecuario Nacional (INEC 2015), en el país se registran 84,133 hectáreas de café, de las cuales 75.184 (89,36 %), están en edad de producción.

El nutrimento que más requiere el cultivo de café es el nitrógeno (N), cuyo requerimiento promedio en Costa Rica es de alrededor de $250 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ (Yara Costa Rica 2022). La necesidad que tiene el café por fertilizantes nitrogenados para tener buenos rendimientos, hace que se produzcan fuertes aplicaciones de los mismos y exista alto riesgo de fuertes emisiones del óxido nítrico (N_2O), un potente gas con efecto invernadero cuyo potencial de calentamiento global es 310 veces mayor que el CO_2 y permanece en la atmósfera durante un promedio de 114 años antes de ser eliminado por disipador o destruidas por medio de reacciones químicas (IPCC 2006). El gas se produce por diversas actividades del ser humano como la agricultura, la combustión de combustibles, el manejo de aguas residuales y los procesos industriales (US EPA 2023). El nivel de este gas se ha incrementado cerca de 50 ppb desde la revolución industrial, siendo el uso de fertilizantes nitrogenados en las actividades

agropecuarias, una de las principales fuentes de emisión (Chacón P.A. 2018). La nitrificación (oxidación de NH_4^+ a NO_3^-) y la desnitrificación (reducción de NO_3^- a N_2O), son los procesos naturales que generan óxido nítrico; ocurren por acción de los microorganismos del suelo, que son estimulados por distintas prácticas agrícolas que ocurren en el proceso productivo, donde la aplicación de nitrógeno es abundante (Butterbach-Bahl *et al.* 2013).

La tasa de producción de óxido nítrico varía en función del contenido hídrico, la disponibilidad de nitratos y la temperatura del suelo entre otros factores; su participación en el proceso, es distinta según la opinión de diferentes autores (Dobbie y Smith 2002; Schindlbacher *et al.* 2004; Jantalia *et al.* 2008). Pero como el contenido de humedad y la disponibilidad de nitratos en el suelo no presentan variaciones diarias tan marcadas como las que presenta la temperatura, es probable que esta última variable es la que tiene mayor influencia sobre los cambios en la emisión de óxido nítrico, que ocurren a lo largo del día (Jantalia *et al.* 2008).

Varios estudios han encontrado una relación cercana entre la variación diurna de la temperatura del aire y la emisión de óxido nítrico, en la cual se da un patrón general de mayor liberación del gas durante el día y una disminución durante la noche, lo que ocurre también con la temperatura del suelo (Ryden *et al.* 1978; Denmead *et al.* 1979; Akiyama *et al.* 2000). Sin embargo, otros autores no han observado esta relación (Chao *et al.* 2000; Du *et al.* 2006; Perdomo y Cardellino 2006).

Ryden *et al.* (1978), sugirieron que la emisión de óxido nítrico podría determinarse en cualquier hora del día, excepto durante la tarde; momento donde se produce la máxima emisión de óxido nítrico, en concordancia con la máxima temperatura del día; lo cual fue ratificado por Alves *et al.* (2012). Laville *et al.* (2011) en un ensayo de campo en Francia, observaron que cuando la temperatura superficial del suelo llegaba a estar cerca de su promedio diario, casi siempre la liberación de óxido nítrico que se obtuvo, representó la emisión promedio diaria.

Debido al transporte vertical, la difusión superficial de óxido nítrico suele encontrarse disminuida en su velocidad de liberación, conforme aumenta la profundidad a la cual se genera (Clough *et al.* 1999). Por esto, la hora del día a la cual la emisión de óxido nítrico en superficie iguala a la emisión promedio del día, varía según la profundidad en el suelo donde se produce y a la capacidad de difusión del gas dentro de ese suelo (Clough *et al.* 2005). La estimación de la emisión de óxido nítrico a partir de la temperatura del suelo, puede conducir a errores metodológicos. Para conocer del momento del día más representativo para determinar la liberación de óxido nítrico promedio diario, requeriría asegurar que las futuras determinaciones, se hagan en un único momento de muestreo diario, hora(s) definidas y que sean representativas (Rochette 2011).

De acuerdo con datos climáticos recopilados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN 2013), en la región de Los Santos, la cual pertenece a la zona de vida denominada Bosque muy húmedo-Montano bajo (Holdridge 1978); ocurre una oscilación entre la temperatura máxima y la mínima del día, principalmente en el periodo que se presenta entre las seis de la mañana y el mediodía. La mayor oscilación ocurre entre diciembre y mayo, llegando a ser máxima con un valor de 12-13 °C; mientras que durante los meses

de agosto a noviembre ocurre la menor con una media de 6 °C. En promedio, la oscilación anual es de aproximadamente 6 °C.

Con respecto a la temperatura media; marzo, abril y mayo son los meses más calientes, mientras que agosto, setiembre y octubre son los meses menos calientes. En general, se conoce que la emisión de N_2O es mayormente controlada por la temperatura del suelo; esto por diferentes resultados obtenidos para varias latitudes en el mundo (Cosentino 2016). Para los trópicos muy húmedos, es escasa la información disponible para tomar decisiones sobre el mejor momento del día para tomar muestras en la determinación de las concentraciones del N_2O ; para esto, el criterio apropiado es medir las emisiones de un gas durante la mayor parte de las horas del día, por varios días y así definir por situación climática y geográfica del sitio; los momentos del día donde se producen las mayores emisiones del gas (Cosentino *et al.*, 2012). A este trabajo se le denomina calibración o monitoreo del gas y se requiere conocer para cada zona ecológica de Costa Rica, para la realización de muestreos de gases de efecto invernadero.

El sector cafetalero costarricense aplica fertilizantes nitrogenados y contribuye a la emisión de N_2O a partir de los mismos, pero no se tiene información recopilada por región ó zona de vida, con respecto al momento óptimo para tomar las muestras de gases y esto es fundamental para lograr la mayor precisión en las determinaciones en fincas y para los inventarios nacionales de gases. Por lo tanto, el objetivo general de la actividad fue determinar los momentos óptimos (en horas) del día, durante los cuales se producen las mayores emisiones de N_2O , en un suelo cultivado con café en Santa María de Dota, San José, Costa Rica. Este estudio de calibración es de tipo exploratorio y pretende encontrar las mayores liberaciones de óxido nítrico ($mg\ N_2O-N.m^{-2}.h^{-1}$) en el campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo en un área recién sembrada de café, de la finca El Tajo (CoopeDota R.L.); ubicada en Santa María de Dota, San José. La zona de vida de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1978), corresponde al Bosque muy húmedo-Montano bajo; el área se ubica a una altitud de 1574 m s.n.m., tiene una precipitación promedio anual de 2200 mm y una temperatura promedio anual de 16.0 °C. Asimismo, presenta un período seco que se extiende desde diciembre hasta finales de abril.



Figura 1. Área de la finca El Tajo (CoopeDota R.L.), donde se ubicaron las cámaras estáticas para los muestreos de óxido nítrico. Santa María, Dota, San José. Diciembre 2015.

Características del sitio seleccionado

El lote seleccionado tenía un área de 5000 m² aproximadamente y las variedades de café sembradas fueron Catuai (rojo y amarillo) y Caturra; con una densidad de siembra de 4784 plantas por hectárea (a 1,90 x 1,10 m). Las partes del lote utilizadas en las dos evaluaciones del ensayo, fueron secciones de la entrecalle de siembra (Figura 1).

METODOLOGÍA

No se implementó un diseño experimental definido, dado que no se evaluaron tratamientos. Se determinó la emisión de N₂O durante cada dos horas, por un periodo de dieciocho horas, durante tres días continuos, bajo las condiciones naturales del sitio y definir los rangos horarios con mayores concentraciones del gas.

Para el muestreo del óxido nítrico, se utilizó la técnica de cámaras estáticas descrita por Klein y Harvey (2012); en la misma se usan cámaras cerradas como la que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Foto de la cámara estática utilizada en los ensayos de campo.

Conformación y distribución de las cámaras estáticas

Las cámaras estáticas utilizadas (Figura 2), tenían forma cilíndrica, confeccionadas en acero inoxidable, con un diámetro de 40,0 cm y 38,0 cm de altura. Asimismo, poseían una tapa acrílica transparente para poder observar el termómetro (que se coloca dentro de la cámara); en ella hay un punto central para la toma de las muestras del gas y la ventilación se realiza en forma manual (usando jeringas). La otra parte de la cámara, estaba compuesta por una base de acero inoxidable, con una cobertura cilíndrica que se profundiza 15,0 cm en el suelo, cuando se instalan en el campo.

En cada proceso de evaluación de la liberación de óxido nítrico, se ubicaron ocho bases de cámaras estáticas en el campo, tratando que estuvieran separadas entre sí al menos tres metros, esto con el fin de abarcar mayor diversidad de puntos en el suelo y que los resultados obtenidos representaran la generalidad del suelo. Luego se introdujeron las aletas de metal de las bases en el suelo, lo cual se realizó golpeando la parte superior de la base con un trozo de madera que tuviera un largo mayor al diámetro de la base y un mazo metálico. En el golpeo se alterna el lado de ubicación del trozo de madera, con el fin de que penetre uniformemente hasta que el anillo superior de la base pegue con la superficie del suelo. Si se presentan problemas por la presencia de piedras enterradas, raíces de árboles u otro obstáculo; se debe trasladar la base a otro punto, hasta que penetre sin

problemas. Las bases de las cámaras se colocaron en los sitios de evaluación con al menos 24 horas de anticipación (entre su instalación y la realización del primer muestreo); para lograr que se estabilizaran las condiciones propias del suelo, por la desagregación que ocurre en el proceso, al momento de la instalación de las bases.

Cada unidad experimental (2 m² de terreno), estuvo compuesta por una cámara estática (base y tapa) y un área para muestrear suelo (determinar características del mismo). En total se utilizaron ocho cámaras estáticas durante cada hora de muestreo. Cada cámara constituyó una repetición y se ubicaron en secciones de entrecalles de siembra (Figura 3). Cada parcela útil fue de 1 m² y el área total del ensayo en cada evaluación fue de 44 m².

La técnica de las cámaras estáticas se basa en abarcar un área determinada del suelo con una cámara cerrada y hermética que permita el intercambio de gas entre el suelo que cubre la cámara y la atmósfera dentro de ésta. La tasa de cambio de la concentración dentro de la cámara a través del tiempo se cuantifica para calcular una tasa de flujo, la cual puede ser extrapolada a un área fuera de la cámara (Pihlatie *et al.* 2013). Según Arenas (2015), esta metodología de medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI), se ha utilizado muy ampliamente en los últimos 30 años.

Muestreo del óxido nítrico

La primera evaluación se realizó entre el 8 y 10 de diciembre del 2015 (al final de la época de lluvias) y la segunda evaluación entre el 17 y 19 de mayo del 2016 (al inicio de la época de lluvias). La definición de las fechas fue fortuita, porque se aprovechó que estaban sin utilizarse las cámaras, debido a la presencia de un período de descanso de otro ensayo sobre óxido nítrico que realizaba en la zona atlántica; donde se utilizaban estas cámaras y que tuvo previamente, una prueba de calibración o monitoreo para determinar las horas óptimas para los muestreos allí.

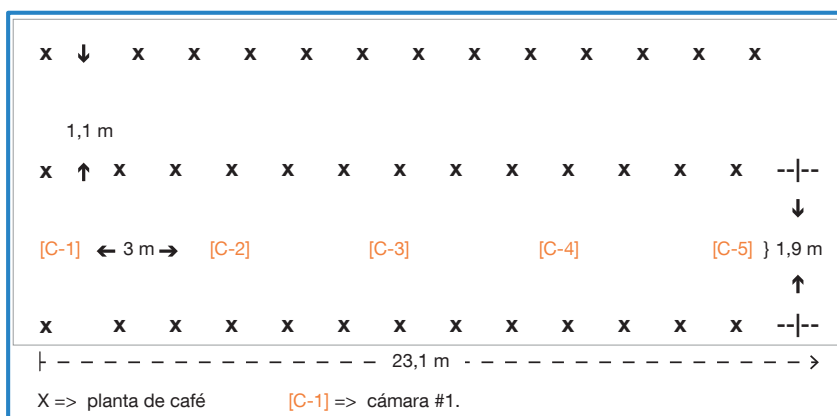


Figura 3. Croquis de ubicación de las cámaras estáticas y áreas de parcela total y unidad experimental.

En cada evaluación se procedió durante tres días consecutivos, a efectuar el proceso de muestreo de N_2O cada dos horas; iniciando a las seis horas de cada día y finalizando con el último muestreo del día a las veinte horas. Cada proceso de muestreo tiene una duración de sesenta minutos y se compone de la toma de tres submuestras del gas contenido en la cámara, a los 0, 20 y 40 minutos luego del cierre de la tapa de la cámara. El intermedio de una hora de tiempo entre muestreos, se utilizó para preparar el equipo para la siguiente determinación y dar un descanso a los operadores del mismo. El cronograma seguido se muestra en el Cuadro 1.

Procedimiento para el muestreo de gases en las cámaras

Para determinar la tasa de cambio, se realizaron extracciones del gas dentro de la cámara (con jeringas conectadas a un punto de muestreo), a intervalos definidos (0, 20 y 40 minutos), después de cerrar la cámara.

Para la toma de cada submuestra, se colocó la tapa de la cámara sobre la base de la misma y se selló herméticamente (ajuste de las tuercas). De

inmediato, se mezcló el aire interno de la cámara mediante la succión/desucción, mediante seis movimientos de la jeringa que está ubicada en el punto central para muestreo, la cual tenía un volumen de 40 ml. Esta mezcla de gases corresponde a la primera submuestra ($t=0$) de las tres requeridas por cámara, durante el muestreo total en la hora de tiempo evaluada.

Cuadro 1. Cronograma del muestreo durante una evaluación de tres días.

Días de Muestreo	Hora de muestreo	Número de cámaras (repeticiones)
1	6 am	8
1	8 am	8
1	10 am	8
1	12 md	8
1	2 pm	8
1	4 pm	8
1	6 pm	8
1	8 pm	8
2	6 am	8
2	8 am	8
2	10 am	8
2	12md	8
2	2 pm	8
2	4 pm	8

Días de Muestreo	Hora de muestreo	Número de cámaras (repeticiones)
2	6 pm	8
2	8 pm	8
3	6 am	8
3	8 am	8
3	10 am	8
3	12 md	8
3	2 pm	8
3	4 pm	8
3	6 pm	8
3	8 pm	8

El volumen de aire retenido por cada submuestra se trasvasó a un vial y se mantuvo a baja temperatura en campo (dentro de recipiente con hielo); mientras se terminaba de desarrollar el cronograma del día. Los viales muestreados cada día, se mantuvieron en una refrigeradora, hasta su traslado definitivo a la Unidad de Gases del Laboratorio de suelos, plantas y aguas del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). En el muestreo de cada hora evaluada, se toma tres submuestras, en tres tiempos distintos (T_0 , T_{20} y T_{40}).

En cada toma de submuestras, se recogió previamente una muestra del aire externo de la cámara, a la misma altura del punto de muestreo dentro de esta. El dato de esta muestra se utilizó como “blanco” en la determinación de gases por el cromatógrafo del laboratorio utilizado.

Precauciones durante el período de muestreos

Durante el periodo de muestreo, no se deben realizar aplicaciones de fertilizantes inorgánicos (líquidos ni granulados) ni orgánicos u otros tratamientos que incluyeran la adición de alguna forma de nitrógeno.

Como durante el período de evaluación de la emisión de gases el muestreo es muy intensivo (cada 2 horas hay uno), se debe tener el cuidado de no afectar mucho el área alrededor de las cámaras; por el frecuente tránsito requerido para realizar la toma de las submuestras. Específicamente para evitar la compactación del suelo, que modificará la liberación natural de los gases emitidos desde adentro del suelo. Para

lograr esto, se debe colocar una cinta plástica de precaución para restringir al máximo el tránsito no requerido en esos puntos; principalmente cuando hay lluvias presentes y se pueda empozar el agua en la superficie del suelo. Lo anterior bloquearía los poros del suelo y estimularía la liberación de N_2O por desnitrificación en condiciones anaeróbicas; afectando los resultados.

Condiciones evaluadas

Se registraron las condiciones ambientales que afectan las emisiones de gases de efecto invernadero que se determinan con cámaras estáticas cerradas en suelos. Entre ellas la temperatura interna de las cámaras, la temperatura externa y la humedad relativa del sitio del ensayo, en esos tres tiempos antes indicados.

Determinación de los gases

Los gases de las submuestras obtenidas, se analizaron por medio de la técnica de cromatografía de gases, se utilizó un detector de captura de electrones (Cromatógrafo), para conocer las concentraciones de N_2O .

Variables evaluadas

En las muestras de gases se determinaron las concentraciones de óxido nitroso en las cámaras estáticas y también se obtuvieron los datos de las variables que afectan la emisión de los GEI (temperatura interna y externa de las cámaras, temperatura del suelo y la humedad relativa en el sitio), durante cada muestreo realizado.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza de las concentraciones de óxido nitroso encontradas en cada evaluación. Se infirieron diferencias entre las concentraciones de N_2O determinadas entre los días muestreados de cada evaluación y las interacciones entre las mismas. Además, se hicieron comparaciones de medias con significancia estadística (Tukey), con el programa Infostat (Di Rienzo *et al.* 2008). Asimismo, se hizo el cálculo de la distribución de la probabilidad para la frecuencia de emisión de N_2O (coeficientes de regresión y estadísticos asociados).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de óxido nitroso en cámaras

Con respecto a la concentración del N_2O dentro de las cámaras, en el Cuadro 2 se observa una tendencia hacia el aumento de la concentración del N_2O durante los tiempos de medición en cada muestreo realizado. Según Alves et al. (2012), se espera que la concentración del gas aumente dentro de la cámara debido a la primera ley de Fick, la cual explica que el flujo de gas es dependiente del gradiente de concentración y de su difusividad en el suelo. Este incremento varía por el comportamiento de la temperatura del suelo, de la temperatura dentro de la cámara y de la temperatura ambiente, externa a la cámara. La emisión del presente estudio fue menor en un 43,55 % (0,35 ppm), a la encontrada por Arguedas-Acuña et al. (2018), en un ensayo similar a este pero en la zona de vida trópico húmedo. Allí el promedio de la concentración de óxido nitroso en las cámaras fue de 0,62 ppm.

Emisión de óxido nitroso del suelo

Con relación a la emisión del óxido nitroso, se obtuvo para la primera evaluación (salida de lluvias) un valor promedio diario de 0,028 $mg\ N_2O-N.m^{-2}.h^{-1}$ y para la segunda evaluación

(entrada de lluvias) un valor promedio diario de 0,014 $mg\ N_2O-N.m^{-2}.h^{-1}$. Es decir, se presentó una diferencia entre la primera y segunda evaluación de 0,014 $mg\ N_2O-N.m^{-2}.h^{-1}$; pero no hubo diferencia estadísticamente significativa entre ambos valores. La razón de la falta de diferencia, se debe a la alta variación de los datos encontrados en las cámaras, durante cada día de evaluación; como se puede observar en el Cuadro 2.

Cabe señalar que no hay estudios similares a este, que se hayan realizado en Costa Rica, para una zona de vida denominada Bosque muy húmedo-Montano, típica de los cafetales de Dota y Tarrazú. Encontré otro estudio donde se realizaron determinaciones de la emisión de N_2O en café durante todo el año, para la zona de Tarrazú (Montenegro-Ballesteros 2019a); pero en el mismo, no se muestran resultados de un estudio de calibración previo al mismo. El bajo valor de la emisión, se podría deber a que el lote de café utilizado en este estudio, tenía entre 4 y 5 meses de edad, lo que indica que estaba empezando a recibir fertilización en bajas cantidades y que no había residuos de fertilizaciones anteriores (plantación vieja). También, podría ser porque el estudio evaluó específicamente sólo tres días por semana, en dos diferentes meses; aunque las fertilizaciones en café, se acostumbra realizarlas en mayo, agosto y noviembre de cada año.

Cuadro 2. Estadística descriptiva para la concentración y emisión de N_2O en dos periodos del año. Santa María de Dota, San José, Costa Rica; 2021.

Variables	n	Prom. ()	Me	D.E.	Mín	Máx	Intervalo de Confianza 95 %	
							Inf	Sup
Concentración 0 min (ppm)	357	0,33	0,34	0,04	0,1	0,6	0,33	0,33
Concentración 20 min (ppm)	357	0,35	0,35	0,04	0,2	0,7	0,35	0,35
Concentración 40 min (ppm)	357	0,37	0,37	0,05	0,3	0,8	0,36	0,38
Emisión N_2O ($mg.m^{-2}.hora^{-1}$)	357	0,0208	0,021	0,028	0,001	0,032	0,003	0,004

Como se observa en la Figura 4, la distribución de la probabilidad de la emisión de óxido nitroso, tuvo una tendencia hacia la derecha. La distribución de probabilidad para la variable emisión de N_2O , ha sido previamente descrita por otros investigadores (Veldkamp et al. 1998; Venterea et al. 2012) y debe ser considerada a la hora del análisis estadístico; dado que un 80 % de los valores que presenta la emisión de N_2O (observados durante el día), son menores a 0,004 $mg.m^{-2}.h^{-1}$ (equipo detecta valores menores a 0,0001 $mg.m^{-2}.h^{-1}$) y existe un 20 % de valores superiores, de hasta un máximo de 0,032 $mg.m^{-2}.h^{-1}$ que ocurren esporádicamente. Por esta razón, es muy importante para el estudio de esta variable, que se reporten ambas medidas de tendencia central (la media y la mediana).

Análisis de varianza

En el Cuadro 3, se muestran los resultados del análisis de varianza realizado a los datos de la variable óxido nítrico, en relación con las horas evaluadas, los días muestreados, las repeticiones utilizadas (cámaras) y sus interacciones. Esto se realizó para evaluar la influencia de las condiciones ambientales en los resultados obtenidos en los muestreos. El ambiente influye mucho en la capacidad del suelo de liberar N₂O a la atmósfera; importante determinar el nivel de influencia de sus factores, bajo las condiciones específicas del sitio evaluado.

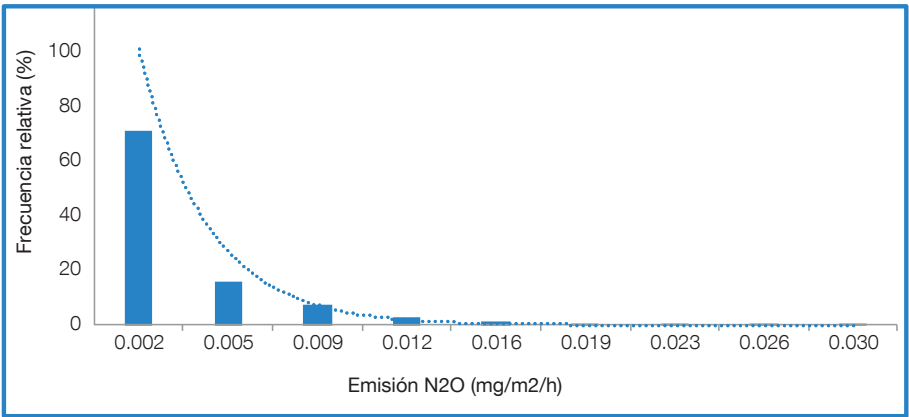


Figura 4. Frecuencia relativa (%) de la difusión de óxido nítrico por metro cuadrado por hora, en el ensayo (con distribución normal).

Como observamos en el Cuadro 3, el valor de R² indica que los datos de la línea de regresión ajustada no están tan cerca entre sí y que existe mucha variabilidad en la emisión de N₂O bajo las condiciones del estudio (diferentes valores durante el año para la precipitación, la temperatura del suelo y aire, la humedad relativa, etc). Asimismo, la concentración de N₂O no tuvo diferencia significativa (ns) entre los distintos valores obtenidos durante todos los días evaluados (p<0,05), mientras que las concentraciones evaluadas por día, por hora de cada día y por repeticiones del muestreo (cámaras); sí mostraron diferencia significativa (p < 0,05). Con respecto a las interacciones evaluadas, se observó que la interacción entre la concentración de N₂O y el día de muestreo, fue altamente significativa (**). En cambio, las otras dos interacciones (concentración de N₂O y hora del día / día de muestreo y hora del día), no tuvieron diferencias significativas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen del análisis de varianza realizado a los datos de los seis días evaluados, de la variable emisión de óxido nítrico.

Variable		n	R ²	R ²	Aj	CV
mg N ₂ O-N.ha ⁻¹ día ⁻¹		223	0,32	0,20	103,36	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef.
Modelo	64749506,74	33	1962106,26	2,71	<0,0001 **	-46,87
[N ₂ O]	2523881,34	1	2523881,34	3,48	0,0636 ns	
DÍA	7429255,97	2	3714627,98	5,12	0,0068 *	
HORA	12665691,05	7	1809384,44	2,50	0,0179 *	
CÁMARA	3040195,46	1	3040195,46	4,19	0,0420 *	
[N ₂ O]*DÍA	17889676,25	2	8944838,13	12,34	<0,0001 **	
[N ₂ O]*HORA	8871665,03	6	1478610,84	2,04	0,0624 ns	
DÍA*HORA	12329141,64	14	880652,97	1,21	0,2675 ns	
Error	137047990,79	189	725121,64			
Total	201797497,53	222				

Comparaciones entre medias

Los momentos evaluados (horas, días y repeticiones) presentaron diferencia significativa ($p < 0,05$), como se muestra en el Cuadro 3.

La mayor emisión de óxido nítrico se encontró al final de las lluvias, al compararla con la encontrada al inicio de las lluvias (906,38 contra 558,60 mg N₂O-N.ha⁻¹.día⁻¹), como se indica en el Cuadro 4. En el resultado, pudo haber influido la presencia de mayor humedad en el suelo y la existencia de menores temperaturas ambientales, porque en el mes de diciembre estaba saliendo la época lluviosa (alta humedad) y las temperaturas estaban bajas; mientras en mayo, se estaba iniciando la época lluviosa (baja humedad) y las temperaturas estaban altas. Es normal la presencia de valores diferentes para las precipitaciones y temperatura ambiental durante el año en cada zona geográfica. Por lo que es importante realizar las evaluaciones en momentos diferentes del año, para homogenizar esas diferencias. (Dobbie y Smith, 2001; Jantalia et al., 2008).

Cuadro 4. Comparación de medias (mg N₂O-N.ha⁻¹.día⁻¹), entre las dos evaluaciones realizadas en el ensayo.

Evaluación	Medias	n	E.E.	
1 (Finalización de lluvias)	906,38	134	76,40	a
2 (Inicio de lluvias)	558,60	89	96,30	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes según prueba de medias de Tukey ($p < 0,05$).

En el Cuadro 5, se muestra el resultado de las comparaciones entre las medias con diferencias significativas, de cada uno de los tres días muestreados en cada evaluación. Como se observa, sólo se presentó diferencia significativa entre el primero y el segundo día muestreados, para las dos evaluaciones. Esto muestra que hay variabilidad intrínseca en la emisión de N₂O cuando se muestrean días consecutivos bajo condiciones ambientales muy similares. Lo que adiciona importancia a la definición de un momento óptimo para muestrear y que presente valores promedio para la emisión diaria.

Cuadro 5. Comparación de medias (mg N₂O-N.ha⁻¹.día⁻¹), entre cada uno de los tres días consecutivos de la semana, cuando se realizó una evaluación del ensayo (salida y entrada de lluvias).

Día	Medias	n	E.E.	
1	935,51	80	98,30	a
2	493,61	70	110,17	b
3	733,57	73	109,20	a b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes según prueba de medias de Tukey ($p < 0,05$).

Evaluación en función de las horas del día muestreadas

En el Cuadro 6, se observa el resultado de la comparación entre medias de la emisión de N₂O (mg.ha⁻¹.día⁻¹) para todas las horas del día muestreadas en las dos evaluaciones (salida y entrada de lluvias). En el mismo, vemos que se presentó diferencia significativa para la difusión de óxido nítrico a las diez, doce y veinte horas del día, con respecto a las demás horas muestreadas. Esto indica que ambas evaluaciones presentan periodos menos variables en magnitud de la liberación de N₂O, los cuales ocurren entre las seis y las ocho horas de la mañana; así como entre las catorce y dieciocho horas de la tarde, de cada día.

En el mismo Cuadro 6, apreciamos que el rango horario que mejor representa el promedio de emisión de N₂O, se encuentra entre las catorce y las dieciocho horas.

Sin embargo, si consideramos que no hubo evaluación del rango horario diario sin luz natural (el cual ocurre entre las veinte horas (noche) y las seis 6 horas (madrugada)); posiblemente esas horas de muestreo hubiesen presentado bajos valores de emisión de N₂O, según lo encontrado por Cosentino *et al.* (2012) y Cosentino (2016) en Argentina. Lo cual haría, que si tomamos ese periodo de muestreo nocturno en cuenta, posiblemente el período entre las seis y las ocho horas (por la mañana) y el período entre las

catorce y dieciocho horas (por la tarde); fuesen los momentos donde se presente el valor real que mejor representa al promedio diario de emisión. Asimismo, los estudios sobre la emisión de óxido nitroso basados en la toma de una sola muestra diaria, los cuales se realizan durante las horas con luz solar; puede que estén generando un grado de sobreestimación del valor de las emisiones, principalmente con las muestras tomadas entre las ocho horas de la mañana y hasta las doce horas del día.

Diferentes autores (Irrisari *et al.* 2012; Arenas 2015; Cosentino 2016 y Núñez *et al.* 2021), indican que no es apropiado realizar muestreos en horas sin luz solar, por los peligros e inconvenientes en los protocolos que se deben seguir. Debido a eso, recomiendan definir las horas óptimas de muestreo para el óxido nitroso, dentro del rango horario diurno.

Por lo tanto, para las doce horas diurnas en que se realizó este estudio, sin la aplicación de fertilizantes de ningún tipo u otros tratamientos que incluyeran la adición de alguna forma de nitrógeno; el muestreo más representativo sería en el rango horario entre las 8 horas de la mañana y las dieciséis horas por la tarde, según se puede apreciar en la Figura 5.

Cuadro 6. Comparación de medias para la variable emisión de óxido nitroso (en $\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), en función de las horas de cada día muestreado, para las dos evaluaciones. Santa María de Dota, San José, Costa Rica; 2021.

HORA	Medias	n	E.E.	α 0,05
6	622	29	161	ab
8	552	32	153	ab
10	1245	35	146	a
12	1051	30	158	a
14	776	28	163	ab
16	733	32	153	ab
18	912	27	166	ab
20	311	10	274	b

Para la estimación de las horas más apropiadas para realizar el muestreo diario, se puede utilizar el modelo de regresión no lineal que se presenta a continuación:

$$Y = -139,1 = 119,6 \text{ hora} - 4,8 \text{ hora}^2$$

El mismo se construyó con los datos surgidos de la ecuación de regresión que involucra variables dependientes e independientes que participan y que se presentan en el Cuadro 7.

En algunos ensayos de determinación de la emisión de óxido nitroso realizados en Costa Rica, se han llevado a cabo muestreos entre las ocho horas y las doce horas (Montenegro-Ballesteros 2019b) ó durante las horas de la mañana (Herrera *et al.* 2014). Mientras que estudios similares al realizado en Santa María de Dota, han determinado rangos horarios para muestreo óptimo de N_2O , entre las ocho horas y las once horas en Colombia con Maíz (Arenas 2015); de las nueve horas a las doce horas en Argentina con Soja (Cosentino 2016); de las diez horas a las trece horas en República Dominicana con pasto (Núñez- Ramos *et al.* 2021) y de las trece horas a las quince horas en Uruguay con arroz (Irrisari *et al.* 2012).

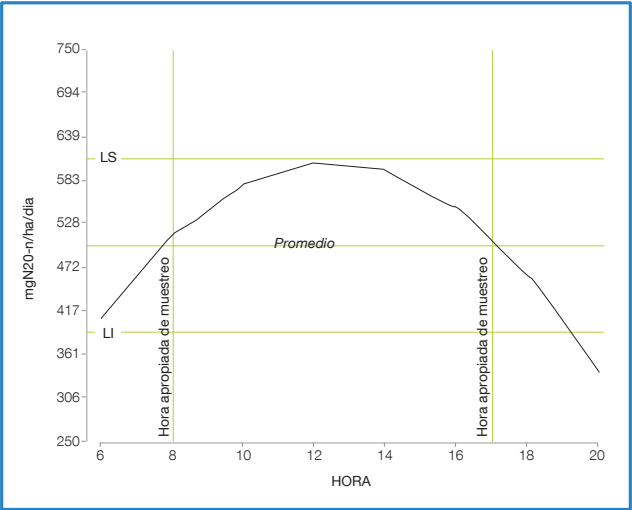


Figura 5. Curva de emisión de N_2O durante las horas del día evaluadas con luz natural ($\text{mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), donde se marcan las horas apropiadas para muestreo en campo.

Mientras que en Costa Rica (Arguedas-Acuña *et al.* 2018), en un ensayo similar al del presente estudio, encontraron que el momento óptimo del día para tomar muestras de N_2O en la zona trópico muy húmedo, se presenta en el rango horario entre las diez y las dieciséis horas.

Cuadro 7. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados a la Figura 5.

Coef	Est.	E.E.	p-valor
Const	-139,06	242,18	0,5665
HORA	119,62	41,85	0,0047
HORA^2	-4,79	1,66	0,0043

CONCLUSIONES

El estudio de calibración demuestra que hay variabilidad en la emisión de N_2O , debida a la hora del día donde se toma la muestra, al día (dentro de la semana) donde se muestrea y al punto de muestreo en campo (repeticiones); bajo las condiciones de la zona de vida Bosque húmedo-Montano bajo donde se realizó el estudio.

La mayor emisión de óxido nítrico se encontró en la primera evaluación (al final de las lluvias), al compararla con la segunda evaluación (al inicio de las lluvias) y fue de 906,38 contra 558,60 mg $N_2O-N.ha^{-1}.día^{-1}$.

Se observó que la interacción entre la concentración de N_2O y el día de muestreo, fue altamente significativa (**). Sólo se presentó diferencia entre el primero y el segundo día del periodo de muestreo, para las dos evaluaciones realizadas.

Hubo diferencia significativa para la difusión de óxido nítrico que se produjo a las diez, doce y veinte horas del día, con respecto a las demás

horas muestreadas; en las dos evaluaciones (salida y entrada de lluvias).

El rango horario que mejor representa el promedio diario de emisión de N_2O , se encuentra entre las ocho horas (de la mañana) y las dieciséis horas (de la tarde). Es el periodo donde se producen la mayores liberaciones de óxido nítrico a la atmósfera. Se recomienda el mismo para la toma de muestras en experimentos de gases de efecto invernadero (GEI).

De acuerdo con los muestreos realizados, el período del día con las mayores emisiones de óxido nítrico, ocurrieron entre las diez y las doce horas y estuvieron en el rango de 1051 y 1245 mg. $ha^{-1}.día^{-1}$.

Se recomienda determinar el horario para cada región agroecológica ya definida en el país y que el mismo sirva para la evaluación de las emisiones de las distintas fuentes N_2O ó de los tratamientos para la reducción de la difusión del óxido nítrico.

LITERATURA CITADA

Akiyama, H; Tsuruta, H; Watanabe, T. 2000. N_2O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere e Global Change Science*. 2: 313-320.

Alves, BJR; Smith, K; Flores, R; Cardoso, AS; Oliveira, WRD; Jantalia, CP; Boddey, RM. 2012. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N_2O flux from soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 46 (July):129–135. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.022>

Arenas, LN. 2015. Diseño de cámara estática cerrada y medición de flujos de gases de efecto invernadero (GEI) en suelos. Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Ambiental. Palmira, Cali, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Administración.

- Arguedas-Acuña, F; Jiménez-Araya, J; Abarca-Monge, S. 2018. Momento óptimo del día para muestrear óxido nítrico en el trópico muy húmedo de Costa Rica. *Revista Alcances Tecnológicos* 12(2):31-44. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA). Costa Rica.
- Butterbach-Bahl, K; Baggs, EM; Dannenmann, M; Kiese, R; Zechmeister-Boltenstern, S. 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of The Royal Society B*. 368: 2013012. In: <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>
- Chacón, PA. 2018. Uso de *Tithonia diversifolia* como forraje alternativo para la reducción de emisiones de óxido nítrico en excretas de vacas. Tesis del Programa de Posgrado del CATIE. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Capítulo #3. 76 p.
- Chao, CC; Young, CC; Wang, YP; Chao, WL. 2000. Daily and seasonal nitrous oxide fluxes in soils from hardwood forest and different agroecosystems of Taiwan. *Chemosphere*.
- Clough, TJ; Jarvis, SC; Dixon, ER; Stevens, RJ; Laughlin, RJ; Hatch, DJ. 1999. Carbon induced subsoil denitrification of ^{15}N -labelled nitrate in 1 m Deep soil columns. *Soil Biology and Biochemistry*. 31: 31-41.
- Clough, TJ; Sherlock, RR; Rolston, DE. 2005. A review of the movement and fate of N_2O in the subsoil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 72: 3-11.
- Cosentino, VR. 2016. Factores y procesos que afectan a la emisión de óxido nítrico en un suelo pampeano manejado con siembra directa. Tesis de Doctorado del área Ciencias Agropecuarias. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires.
- Cosentino, VR; Fernandez, PL; Figueiro Aureggi, SA; Taboada, MA. 2012. N_2O emissions from a cultivated mollisol: optimal time of day for sampling and the role of soil temperature. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*. 36: 1814–1819. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600015>
- Denmead, OT; Freney, JR; Simpson, JR. 1979. Studies of nitrous oxide emission from a grass sward. *Soil Science Society of America Journal*. 43(4): 726-728.
- Di Rienzo, JA; Robledo, CW; Casanoves, F; Balzarini, M. 2008. InfoStat (software estadístico), versión beta. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dobbie, KE; Smith, KA. 2002. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N_2O emissions from an imperfectly drained gleysol. *European Journal of Soil Science*. 52(4): 667-673. En: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00395.x>
- Du, R; Lu, D; Wang, G. 2006. Diurnal, seasonal, and inter-annual variations of N_2O fluxes from native semi-arid grassland soils of inner Mongolia. *Soil Biology & Biochemistry* 38: 474-482.
- Herrera, J; Beita VH; Solórzano, D; Argüello, H; Rodríguez, A. 2014. Determinación de emisiones de CH_4 y N_2O generadas en plantaciones de arroz en Guanacaste, Costa Rica. *Ciencias Ambientales*. 46:5-14.
- Holdridge, L. 1978. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica, IICA. 216p.
- Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). 2020. Informe sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica. Para Delegados al XLIX Congreso Nacional Cafetalero Ordinario. Heredia, Costa Rica, Instituto Del Café. 50p.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). 2013. Temperatura y humedad promedio zona atlántica. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/inicio> (consultado 20 agosto 2016).
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2015. Censo Agropecuario Nacional. San José, Costa Rica. Instituto Nacional de Estadística y Censos <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx> (consultado 11 nov 2015).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Greenhouse Gas Inventory. Reference Manual 4. Intergovernmental Panel on Climate Change. 128 p. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
- Irrisari, P; Pereyra, V; Fernández, A; Terra, J; Tarlera, S. 2012. Emisiones de CH_4 y N_2O en un arrozal: primeras medidas en el sistema productivo uruguayo. *Agrociencia Uruguay*. 16(2).

- Jantalia, CP; dos Santos, HP; Urquiaga, S; Boddey, RM; Bruno, JR. 2008. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 82 (2), 161-173. En: <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9178-y>
- Klein, CAM.; Harvey, MJ. 2012. Nitrous Oxide Chamber Methodology Guidelines. Chapter 3. (Deployment Protocol). Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. In Curso de Capacitación "Investigación en Sistemas Ganaderos y Medición de Gases de Efecto Invernadero" 8-25 de enero 2015. INIA Remehune – Osorno, Chile.
- Laville, P; Lehuger, S; Loubet, B; Chaumartin, F; Cellier, P. 2011. Effect of management, climate and soil conditions on N₂O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 228-240.
- Montenegro-Ballester, J. 2019a. Respuesta polinómica de la emisión de óxido nítrico en plantaciones de café en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales (UNA)*. 53(2): 1-24.
- Montenegro-Ballester, J. 2019b. Determinación de la emisión de óxido nítrico derivado de la aplicación de fertilizante nitrogenado a plantaciones de café en Costa Rica. Informe de Investigación. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). San José, Costa Rica.
- Núñez-Ramos, PA; García-Lagombra, G; Caridad del Rosario, J. 2021. Mediciones de N₂O en suelo manejado bajo pastoreo con bovinos de leche. *Terra Latinoamericana*. 39 (Ene-Dic).
- Perdomo, C; Cardellino, G. 2006. Respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Informaciones Agronómicas*. 33: 17-24. <http://www.ipni.net>
- Pihlatie, MK; Christiansen, JR; Aaltonen, H; Korhonen, JFJ; Nordbo, A; Rasilo, T; Pumpanen, J. 2013. Comparison of static chambers to measure CH₄ emissions from soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172, 124-136. In: <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.11.008>
- Promotora de Comercio Exterior (PROCOMER). 2019. Memoria Institucional. Promotora de Comercio Exterior. San José, Costa Rica, Ministerio de Comercio Exterior. 45 p.
- Rochette, P. 2011. Towards a standard non-steady-state chamber methodology for measuring soil N₂O emissions. *Animal Feed Science and Technology*. 166e167:141-146.
- Ryden, JC; Lund, LJ; Focht, DD. 1978. Direct infield measurement of nitrous oxide flux from soil. *Soil Science Society of America Journal*. 42: 731-737.
- Schindlbacher, A; Zechmeister-Boltenstern, S; Butterbach-Bahl, K. 2004. Effects of soil moisture and temperature on NO, NO₂ and N₂O emissions from European forest soils. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 109 (D17). En: <https://doi.org/10.1029/2004JD004590>
- US EPA. 2023. Emisiones de óxido nítrico. United States Environmental Protection Agency. En: <https://español.epa.gov>
- Veldkamp, E., Keller, M. and Núñez, M. 1998. Effect of management on N₂O and NO emissions from soils in the humid tropics of Costa Rica. *Global Biogeochem. Cy*. 12: 71-79.
- Venterea, RT.; Parkin, TB.; Cárdenas, L.; Petersen, SO.; Pedersen, AR. 2012. Data Analysis Considerations. Chapter 6. Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. In Curso de Capacitación "Investigación en Sistemas Ganaderos y Medición de Gases de Efecto Invernadero" 8-25 de enero 2015. INIA Remehue – Osorno, Chile.
- Yara, Costa Rica. 2022. Nutrición Vegetal-Café-Resumen Nutricional. En: <https://www.yaracr.com>

NOTA TÉCNICA

PRODUCCIÓN, CALIDAD Y COSTO DE ENSILAJE DE MAÍZ UTILIZANDO VARIEDADES COSTARRICENSES

William Sánchez-Ledezma¹, Cinthya Granados Marín², Francisco Gutiérrez Hidalgo³

RESUMEN

Producción, calidad y costo de ensilaje de maíz utilizando variedades costarricenses. El objetivo fue evaluar la producción de biomasa, la calidad y el costo de ensilaje, de dos variedades de maíces costarricenses y un híbrido comercial. El estudio se realizó con las variedades EJN2 y Los Diamantes 8843 y el híbrido comercial HR-960, en los cantones de San Carlos, Upala, Turrubares, Turrialba y Barva durante el 2018-2019. Se evaluó la altura de planta y la producción de biomasa en parcelas de 2000 m² y la calidad y los costos del proceso de ensilaje en un silo de montón. En promedio la altura de planta de las variedades costarricenses (245 ± 19 cm) fue mayor y más estable que el obtenido con el híbrido HR-960 (187 ± 31 cm), sin embargo, el promedio de MS obtenida con el híbrido ($13,5 \pm 1,7$ t ha⁻¹) fue ligeramente superior al logrado con las variedades costarricenses ($12,7 \pm 2,1$ t ha⁻¹). La fermentación organoléptica de los ensilados fue excelente, así como el pH y los contenidos de N-amoniaco, con características y valores semejantes entre las variedades costarricenses y el híbrido. El costo de producción por hectárea fue de ₡720 459, para un valor de ₡16,1 y ₡57,6 kg⁻¹ de ensilado fresco y MS, respectivamente. Se concluye que las variedades costarricenses EJN2 y Los Diamantes 8843 tienen potencial productivo y ser conservadas mediante la técnica del ensilaje.

Palabras clave: Ensilaje de maíz, Forraje de maíz, Alimentación del ganado.

Keywords: Corn silage, Corn forage, Cattle feed.

INTRODUCCIÓN

El ensilaje es una técnica utilizada para conservar forraje de forma anaeróbica, mediante la cual, el proceso de la fermentación inhibe el crecimiento de microorganismos degradadores de la materia orgánica (forraje), permitiendo conservar el forraje original con escasa variación en su calidad nutritiva. Es muy utilizada por los ganaderos para guardar alimento para sus animales, que luego utilizan cuando lo requieren.

En términos generales, la calidad final de un ensilaje depende de dos factores: de las características originales del forraje a ensilar y de la eficiencia del proceso; como la cosecha, el picado, el uso de aditivos, el sellado del silo entre otros (Martínez, 2003).

1. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, INTA, Costa Rica. Correo: wsanchez@inta.go.cr
2. Ministerio de Agricultura y Ganadería, MAG, Región Huetar Norte, Agencia de Aguas Zarcas, Alajuela, Costa Rica. Correo: cmgranados@mag.go.cr
3. Ministerio de Agricultura y Ganadería, MAG, Región Central Sur, Agencia de Carara, San José, Costa Rica. Correo: fgutierrez@mag.go.cr

En cuanto a las características del forraje, el hecho de que un material resulte en un ensilaje de buena calidad, dependerá del contenido de materia seca, carbohidratos solubles, capacidad buffer y de los nitratos que contiene el forraje al momento de la cosecha. Es importante que los contenidos de los dos primeros indicadores sean altos, pero la capacidad buffer y los nitratos bajos (Argentería *et al.*, 1997; McDonald *et al.*, 1991).

Con respecto a las actividades del proceso, es indispensable realizarlas correctamente para reducir las pérdidas ocasionadas por; la respiración celular del forraje después de cosechado, la actividad proteolítica de enzimas, el desarrollo de gérmenes del género *Clostridium* y de microorganismos aeróbicos (Martínez, 2003).

El cultivo de maíz (*Zea mays*) es uno de los forrajes de mayor uso en los países con vocación ganadera, principalmente por su alto rendimiento de biomasa, excelente aporte de energía y adecuadas características para ser conservado mediante la técnica del ensilaje, lo que

favorece el proceso de fermentación (Méndez, 2000; Somarribas, 2007; Martínez, 2003).

En Costa Rica, a pesar de la amplia adaptación del cultivo de maíz (Bonilla, 2009), su uso como recurso forraje es escaso, con mayor presencia en los sistemas de lechería especializada en la zona alta y norte del cantón de San Carlos. No existe una adecuada oferta de variedades e híbridos con aptitud forrajera y adaptadas a las condiciones agroecológicas de nuestro país, por lo que los ganaderos utilizan variedades criollas de porte alto, las cuales tienen problemas de acame y bajos contenidos de materia seca. También suelen usar híbridos importados, con el inconveniente que, no se conoce su adaptación a nuestras condiciones. Además, de que los híbridos, están sujetos a dependencia de semillas importadas a alto costo.

Por lo anterior, se realizó el presente estudio con el objetivo de evaluar la producción de biomasa, la calidad y el costo de ensilaje, de dos variedades de maíces costarricenses y un híbrido comercial en cinco cantones de nuestro país durante el 2018-2019.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de las evaluaciones

Las evaluaciones se realizaron en fincas comerciales ubicadas en diferentes localidades del país (Cuadro 1). El rendimiento se evaluó en todas las localidades, mientras que la calidad y el costo de la elaboración del ensilaje se determinó únicamente en la localidad Aguas Zarcas del cantón de San Carlos, provincia Alajuela.

Cuadro 1. Ubicación de los sitios donde se realizaron las evaluaciones de campo.

Provincia	Cantón	Localidad	Altitud (m s.n.m.)	Zona de Vida*
Alajuela	San Carlos	Aguas Zarcas	515	bmh-P
	Upala	Aguas Claras	145	bmh-P
Puntarenas	Turubares	Carara	600	bmh-T
Cartago	Turrialba	Santa Cruz	1130	bmh-MB
	Turrialba	La Colonia	650	bmh-P
Heredia	Barva	Santa Lucía	1200	bmh-P

* Ministerio de Ambiente y Energía. (s.f.). Mapa de zonas de vida de Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. Recuperado el 22 de octubre, 2022, de <https://bit.ly/3Zrn65p>

bmh-P=Bosque Muy Húmedo Premontano; *bmh-T*= Bosque Muy Húmedo Tropical; *bmh-MB*= Bosque Muy Húmedo Montano Bajo.

Materiales evaluados

Se evaluaron las variedades de maíces costarricenses EJA2 (grano amarillo) y Diamantes 8843 (grano blanco), seleccionadas por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) para la producción de grano (Figura 1) y el híbrido comercial HR-960 de grano amarillo, utilizado como recurso forrajero en varias zonas ganaderas del país.



Figura 1. Variedades de maíz Los Diamantes 8843, A y EJA2, B al momento de la cosecha en Aguas Zarcas de San Carlos, Alajuela.

Establecimiento y manejo

Para realizar las evaluaciones, en todas las localidades se establecieron parcelas de 2000 m² de cada material. En la mayoría de los casos, la preparación del terreno fue de mínima labranza, aplicando Gifosato 22 días antes del establecimiento. La siembra fue manual a espeque, en hileras distanciadas a 0,75 y 0,20 m entre surcos y plantas (Tadeo *et al.*, 2012; Fuentes *et al.*, 2001; Soto *et al.*, 2002), distribuyendo dos semillas por golpe de siembra (Elizondo & Boschini, 2001; Elizondo & Boschini, 2002; Amador & Boschini, 2000).

El plan de fertilización fue de 150, 50, 20 y 20 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, Mg y S, respectivamente. El fósforo, magnesio, azufre, potasio y un tercio del nitrógeno se aplicaron a la siembra, mientras que resto del nitrógeno se distribuyó entre la tercera y cuarta semana después, antes de la floración masculina (Bonilla, 2009).

Cosecha

Para determinar el rendimiento, la cosecha de los forrajes fue manual, cuando el grano se encontraba en estado lechoso-pastoso, es decir, en “grano ½ línea leche” (Figura 2.A), lo que significa que la línea que separa la porción líquida y sólida se encuentra en la parte central del grano (Paniagua & Pérez, 1994; Martínez, 2003, Romero, 2004). Este momento de cosecha se recomienda en caso de utilizar un equipo convencional (picadora) para procesar el forraje.

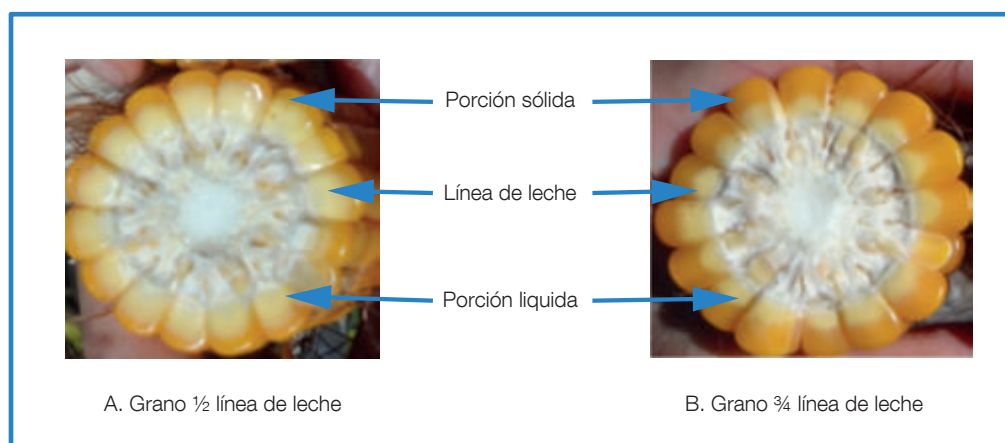


Figura 2. Momento óptimo de cosecha y picado del maíz para forraje

Para elaborar el ensilaje, la cosecha fue mecanizada cuando el grano se encontraba en estado maso-so-pastoso (semiduro) en “grano $\frac{3}{4}$ línea de leche” (Figura 2.B), utilizando un tractor y una cosechadora (Tipo Chopper) especializada para cortar y picar el forraje, y a la vez, triturar o quebrar el grano (Figura 3). El triturar o quebrar el grano, permite que los azúcares solubles que contiene, queden disponibles a las bacterias durante la fermentación del ensilaje, y posteriormente, a los microorganismos del rumen cuando el ensilaje es consumido por el ganado (Jiménez-Leyva *et al.*, 2016; Paniagua & Martínez, 2003; Romero, 2004).



Figura 3. Cosecha mecanizada (A) y elaboración de silo de montón (B) de variedades de maíces costarricenses en Aguas Zarcas y Upala de Alajuela

Variables analizadas

Se analizó la altura de la planta, el rendimiento de materia seca, la calidad y el costo de ensilaje. Para determinar la altura de la planta y la producción de materia seca (MS), se utilizó la metodología propuesta por la Red Internacional de Evaluación de Forrajes Tropicales propuesta por Toledo & Schultze-Kraft (1982). Se tomaron 10 muestras al azar de cada material en el centro de la parcela para evitar el efecto de borde (Roig, 1089).

La altura de la planta se midió en centímetros (cm) desde el nivel del suelo hasta el inicio de la flor masculina, mientras que la producción se determinó en kilogramos (kg) de forraje verde cosechado en dos metros lineales de cada muestra. Posteriormente, el rendimiento se expresó en kg MS ha⁻¹, a partir del contenido de MS del forraje.

La calidad del ensilaje se realizó únicamente con los materiales establecidos en la localidad de Aguas Zarcas. Se enviaron tres muestras de cada forraje, antes de ensilar al Laboratorio Nutrición Animal del INTA para determinar el contenido de MS, carbohidratos solubles (CS) y capacidad buffer (CB). Posteriormente, 60 días después de elaborar el ensilaje, se tomaron seis muestras representativas de cada silo; tres para determinar las características organolépticas (olor, color, textura y humedad) según metodología propuesta por Chavaría & Bernal (2001) y las restantes, se enviaron al laboratorio del INTA para analizar el contenido de MS, pH y N-amoniaco.

El costo por kilogramo de ensilaje se determinó únicamente en la localidad de Aguas Zarcas, con la variedad EJN2 utilizando un silo de montón. Para lo cual, se registró y analizó el rendimiento de forraje, el costo de la mano de obra (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, 2020), del equipo e insumos requeridos en la elaboración del ensilaje.

Los datos se analizaron a partir de medidas de tendencia central utilizando el programa InfoStat (2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de materia seca

En el Cuadro 2 se muestra la altura de planta y el rendimiento de MS de dos variedades de maíces costarricenses y un híbrido comercial, validados en seis diferentes localidades del país.

Cuadro 2. Altura de planta y producción de materia seca de dos variedades de maíces costarricenses (EJN2 y Los Diamantes 8843) y el híbrido comercial HR-960 evaluados en seis localidades de Costa Rica. 2018-2019 (n= 84).

Localidad	Variedad/Híbrido	Altura de planta		Producción de MS	
		(cm)	D.S.	Kg ha ⁻¹	D.S.
Carara Turrubares	EJN2	240,8	7,93	10489,6	1934,24
Guayabo, Turrialba	EJN2	256,8	17,57	14874,1	2423,45
Aguas Claras, Upala	EJN2	219,6	19,79	11074,3	1468,27
	Híbrido (RH 960)	110,0	26,46	12117,0	374,27
Barva de Heredia	Los Diamantes 8843	235,0	28,29	9370,3	2495,0
	EJN2	250,0	24,00	9658,2	3046,6
Aguas Zarcas, San Carlos	Los Diamantes 8843	220,5	16,85	16267,1	2151,50
	EJN2	226,7	11,19	13734,0	2138,13
	Híbrido (RH 960)	243,3	10,41	15500,0	655,74
Santa Cruz, Turrialba	Los Diamantes 8843	279,6	21,1	14445,3	1935,43
	EJN2	284,8	12,91	12510,5	580,80
	Híbrido (RH-960)	202,8	15,92	13000,5	3471,89
Promedios	Los Diamantes 8843	235,3	30,68	15505,0	2566,62
	EJN2	240,2	23,70	12520,4	2537,59
	Híbrido (HR-960)	193,4	71,0	13485,3	2495,24

cm= centímetros; D.S. = Desviación estándar; kg ha⁻¹= kilogramos por hectárea

El promedio de la planta obtenido con las variedades costarricenses (245 cm) concuerda con los 250 cm recomendados por Tadeo-Robledo *et al.*, (2012) en variedades e híbridos de maíz para forraje, excepto en la localidad de Santa Cruz de Turrialba, donde el crecimiento fue superior (282 cm), probablemente debido a la mayor presencia de nubes y menos horas luz que predomina en esta localidad a causa de la mayor altitud, en comparación a los otros sitios, lo que incita a la planta de maíz a crecer más en busca de luz (Blanco *et al.*, 2015).

El hecho de que las variedades de maíces costarricenses alcanzaron alturas intermedias, favorecen su manejo, ya que los materiales con mayor altura son susceptibles al volcamiento a consecuencia de la altura de planta y a la alta inserción de la mazorca (Cabrales *et al.*, 2007). Además, según este autor, las plantas con mayor altura, afecta la relación hoja-talla-mazorca, lo que repercute en la calidad nutritiva de la biomasa total, ya que el grano representa el

85 % de digestibilidad en comparación con el resto de la planta.

Con respecto a los rendimientos de MS, se determinó que los valores alcanzados con las variedades costarricenses se encuentran entre el rango de 10,9 y 17 t MS ha⁻¹ reportado en varias investigaciones realizadas en Costa Rica (Amador & Boschini, 2000; Elizondo, 2011; Boschini & Elizondo, 2004; Jiménez, *et al.*, 2005; Castillo *et al.*, 2009; Sánchez, 2015; Méndez, 2017; Sánchez & Hidalgo, 2018; Gurdíán, 2018; Dittel, 2019), siendo el promedio de las variedades costarricenses (12, 8 t ha⁻¹), ligeramente inferior al alcanzado con el híbrido forrajero HR-960 (13,5 t ha⁻¹).

Lo anterior significa que las variedades costarricenses seleccionadas para la producción de grano, también tienen potencial para rendir como forraje, lo que resulta una ventaja para el productor, ya que puede producir forraje para su ganado y semilla para la próxima siembra, reduciendo los costos y la dependencia de semilla.

Calidad del ensilado

El ensilaje de las variedades costarricenses EJA2, Los Diamantes 4388 y del híbrido RH-960 resultó excelente. En el Cuadro 3 se muestran las características organolépticas de los ensilados de maíz realizados.

Cuadro 3. Características organolépticas de ensilajes de dos variedades maíces costarricenses y un híbrido evaluados en Aguas Zarcas de San Carlos, 2018-2019.

Variedad e híbrido	Color	Olor	Textura	Humedad
EJA2 Los Diamantes 8843 Híbrido HR-960	Verde Oscuro.	Agradable, con olor a fruta madura.	Conserva el corte original de picado.	Escasa, no humedece la mano al comprimir.

Las características organolépticas fueron excelentes, según los parámetros indicados por Chavarría & Bernal (2001), debido en gran parte a las buenas cualidades del cultivo de maíz para ensilar; como son el contenido de MS, azúcares solubles y baja capacidad buffer, características que, a la vez, permitieron obtener ensilados con excelentes valores de pH y adecuados contenidos de N-amoniaco (Cuadro 4).

Cuadro 4. Características y parámetros de fermentación de forrajes de maíz antes y después de ensilar, Aguas Zarcas de San Carlos. 2018-2019.

Variedad e híbrido	Antes de ensilar			Después de ensilar		
	MS (%)	AS (%)	CB (NaOH/100 g MS)	MS (%)	pH	N-amoniaco (% N total)
EJN2	32,1±1,6	19,9±0,8	39,7±7,8	26,9±1,4	3,52±0,04	5,3±0,4
Los Diamantes 8843	31,1±1,8	17,1±2,3	24,8±1,1	28,5±1,6	3,67±0,06	5,5±0,9
Híbrido HR-960	29,8±0,9	18,7±1,2	37,8±6,6	26,7±1,2	3,78±0,07	5,1±0,8

MS (%)= Porcentaje de materia seca; AS= Azúcares solubles, CB = capacidad buffer; N-amoniaco = Porcentaje de nitrógeno amoniaco.

Es importante mencionar que, los contenidos apropiados de MS reducen la producción de efluentes y las pérdidas de nutrientes, mientras que los azúcares solubles favorecen la fermentación, debido a que sirven de sustratos para los microorganismos que participan en el proceso. Por otra parte, el bajo valor de capacidad buffer permite una rápida reducción del pH en la biomasa total, lo que favorece la presencia de bacterias benéficas y como consecuencia, la fermentación láctica (Martínez, 2003; De la Rosa, 2005). Lo anterior, se comprueba al obtener valores de pH inferiores a 4, lo que indica que la fermentación fue exitosa (Araiza-Rosales *et al.*, 2015).

El bajo contenido de N-amoniaco, es sinónimo de que los aminoácidos y del nitrógeno total (proteína) presente en el forraje original, fue escasamente degradado por las bacterias (Ojeda *et al.*, 1991; Martínez *et al.*, 1999; Martínez, 2003; De la Roza, 2005).

Costos de la elaboración de ensilaje

En el Cuadro 5 se detallan los costos incurridos desde la preparación del terreno hasta la elaboración y obtención de ensilaje en un silo de monto en la localidad de Aguas Zarcas, San Carlos de Alajuela.

Cuadro 5. Costos de elaboración de ensilaje de una hectárea de maíz forrajero. Aguas Zarcas de San Carlos, Alajuela, ajustado a octubre 2020 (\$ USA= ₡ 568,37).

ACTIVIDAD	Unidades	Costo/unidad (₡)	Subtotal (₡)	Contribución al costo (%)
Establecimiento			310 584	43,1
Herbicida Gifosato (litros)	2	2 200	4 400	0,6
Preparación del terreno (hm)	3	20 000	60 000	8,3
Semilla (kg)	25	1 800	45 000	6,2
Siembra (jornales)	12	7 625	91 500	12,7
Fertilizante 10-30-10 (sacos)	5	12 335	61 675	8,6
Fertilizante K-MAG (sacos)	2	18 667	37 334	5,2
Aplicación de fertilizante (jornales)	1	7 625	7 625	1,1
Aplicación de herbicida (jornales)	0,4	7 625	3 050	0,4
Mantenimiento			121 125	16,8
Fertilizante nutran (sacos)	5	11 650	58 250	8,1
Insecticida Proclán (g)	200	200	40 000	5,6
Aplicación de fertilizante (jornales)	1	7 625	7 625	1,1
Aplicación de insecticida (jornales)	2	7 625	15 250	2,1
Elaboración del ensilaje			288 750	40,1
Cosecha, picado, transporte y compactado (Hm)	14	20 000	280 000	38,9
Plástico de polietileno negro (kg)	14	625	8 750	1,2
TOTAL (₡)			720 459	100,0

hm = horas maquinaria

En promedio se produjeron 44,8 t ha⁻¹ de forraje verde (12,5 t ha⁻¹ MS), para un costo total de ₡720 459 ha⁻¹, lo que es equivalente a ₡16,1 y ₡57,6 kg⁻¹ de ensilado fresco y de MS, respectivamente.

Se determinó que el establecimiento del cultivo y la elaboración del ensilaje, son los rubros que más contribuyen al costo total (43,1 y 40,1 %, respectivamente). En el caso del establecimiento, debido al costo de los agroquímicos (14,4 %), mientras que en la elaboración del ensilaje, a causa del deficiente uso de la maquinaria y equipo (tractor-chopper) al momento de la cosecha, ya que los surcos eran relativamente cortos, lo que obligó al operario del tractor a

cambiar de director constantemente, aumentando las horas de labor.

Los fertilizantes químicos son responsables de 21,8 % de los costos totales, los cuales se podrían reducir sustancialmente si los remanentes (estiércol) que se producen en las fincas ganaderas, se aprovechan como abono orgánico en el cultivo de maíz.

Otro rubro importante es el uso de la mano de obra, el cual aporta el 17,4 % al costo total. Del total de mano de obra, el 73,2 % se utiliza solo para la siembra del cultivo, debido a la lenta labor que implica espequear y distribuir la semilla manualmente.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Según las condiciones mediante las cuales se llevaron a cabo el estudio, es posible realizar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Las variedades de maíces costarricenses EJN2 de grano amarillo y Diamantes 8843 de grano blanco, tiene potencial para producir forraje y ser conservado mediante la técnica de ensilaje, debido a que alcanzaron buenos rendimientos y excelentes características organolépticas (color, olor, textura y humedad) y adecuados valores de pH y N-amoniaco al ensilar.
2. Según los resultados obtenidos, no es necesario el uso de aditivos para la elaboración de ensilaje de maíz, ya que la concentración de azúcares solubles y las bacterias específicas presentes, son suficientes para que el proceso de fermentación se realice satisfactoriamente.
3. Según el rendimiento promedio de MS obtenido con las variedades costarricenses (12,5 t ha⁻¹) y los costos totales por hectárea (₡720.459), el costo por kilogramo de ensilado fresco y MS fue de ₡16,1 y ₡57,6.
4. Según el rendimiento promedio de MS obtenido con las variedades costarricenses (12,5 t ha⁻¹), equivalente a 45 t ha⁻¹ de ensilaje fresco, con una hectárea de maíz es posible suplementar 50 animales (450 kg PV) durante 90 días, suministrando 10 kg de ensilaje por animal/día.
5. Con el fin de incrementar el contenido de materia seca de la biomasa total de las variedades de maíz evaluadas, se recomienda cosechar el forraje a edad fenológica de grano masoso-pastoso (línea media de leche), y en caso necesario, realizar un pre secado no mayor a 24 horas, con el fin de mejorar el contenido de MS y aumentar el potencial de ensilabilidad del forraje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de FITTACORI y el apoyo de los colegas Nevio Bonilla Morales, Edwin Orozco Barrantes, José Luis Rivera Ramírez del INTA, Annie López Céspedes,

Katherine Alvarado Marchena y Fernando Martínez Portugués del MAG, Saúl Brenes Gamboa de la UCR y a los productores que facilitaron sus fincas para realizar las evaluaciones.

LITERATURA CITADA

Amador, L., & Boschini, C. (2000). Fenología productiva y nutricional de maíz para la producción de forraje. *Agronomía Mesoamericana* 11 (1): 171-177.

Araiza-Rosales, E., Delgado-Licón, E., Carrete-Carreón, O. F., Medrano-Roldán, H., Solís-Soto, A., Rosales-Serna, R., Haubi-Segura, C. (2015). Calidad fermentativa y nutricional de ensilados de maíz complementados con manzana y melaza. *Calidad nutricional de ensilados maíz-manzana. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. Mx. 2(6):255-267.

Argamenteoría, A., De la Roza, B., Martínez, A., Sánchez, L., & Martínez, A. (1997). El ensilado en Asturias. Ed. Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias. ISBN: 84-7847-462-5. Principado de Asturias. 127 pp. (España).

Blanco Y., Afifi M., Swanton C. J. (2015). Efecto de la calidad de la luz en el cultivo del maíz: una herramienta para el manejo de plantas arvenses. *Cultivos Tropicales*. 36 (2): 62-71.

Bonilla, N. (2009). Manual de recomendaciones técnicas, cultivo de maíz. San José, Costa Rica. INTA. 72 p.

Boschini C., Elizondo J. (2004). Desarrollo productivo y cualitativo de maíz híbrido para ensilar. *Agronomía Mesoamericana*. 15 (1): 31-37.

Cabralles R., Montoya R., Rivera J. (2007). Evaluación agronómica de 25 genotipos de maíz (*Zea mays*) con fines forrajeros en el Valle del Sinú Medio. *Rev. MVZ*, 12 (2): 105-1060.

Castillo, M., Rojas, A., WingChing, R. (2009). Valor nutricional del ensilaje de maíz cultivado en asocio con vigna (*Vigna radiata*) *Agronomía Costarricense*, 33: 133-146

Chaverra, H., & Bernal, J. (2001). El ensilaje en la alimentación del ganado vacuno. Tercer mundo Editores. IICA. Bogotá, Colombia. p 65-123.

De la Roza, B. (2005). El ensilado en zonas húmedas y sus indicadores de calidad. IV Jornadas de alimentación animal. Laboratorio de Mouriscade. Lalín, Pontevedra. 1-20 pp.

Dettil, F. (2019). Evaluación del potencial forrajero y de ensilabilidad de seis variedades de maíces costarricenses en Santa Cruz de Turrialba. Tesis de licenciatura. Turrialba, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 77 pp.

Elizondo, J., & Boschini, C. (2001). Efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento y calidad del forraje de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 12(2): 181-187. 2001.

Elizondo, J., & Boschini, C. (2002). Producción de forraje con maíz criollo y maíz híbrido. *Agronomía Mesoamericana*, 13(1): 13-17.

Elizondo, J. (2011). Influencia de la variedad y alturas de cosecha sobre el rendimiento y valor nutritivo de maíz para ensilaje. *Agronomía Mesoamericana*. 32 (2): 105-111.

Fuentes, J., Cruz, A., Castro, L., Gloria, G., Rodríguez, S., Ortíz, B. (2001). Evaluación de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para ensilar. *Agronomía Mesoamericana*, 12: 193-197.

Gurdián, M. (2018). Evaluación del potencial de ensilabilidad y valor nutricional del ensilado de cuatro variedades costarricenses de maíz en Santa Lucía de Barva, Heredia. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. P. 80.

InfoStat 2008. InfoStat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Jiménez-Leyva, D., Romo-Rubio J., Flores-Aguirre L., Ortiz-López B., Barajas-Cruz R. (2016). Edad de corte en la composición química del ensilado de maíz blanco asgrow-7573. 6(3):13-23. *Abanico Veterinario*. ISSN 2448-6132.

- Jiménez, P., Cortés, H., Ortiz, S. (2005). Rendimiento forrajero y calidad del ensilaje de canavalia en monocultivo y asociada con maíz. *Acta Agron.* 54(2):31-36.
- Martínez, A., De la Roza, B., Fernández, O. (1999). Nuevas técnicas para determinar la calidad de los ensilados. *Tecnología Agroalimentaria. Pastos y Forrajes. Edición especial. CIATA.* 48 p.
- Martínez, A. (2003). Ensilabilidad de especies pratenses en Asturias y su interacción con el uso de aditivos. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, España. 450 pp.
- McDonald, P., Henderson, A. R., & Heron, S. J. (1991). *The biochemistry of silage.* Ed.: Chalcombe Publications. UK. 340 pp.
- Méndez, M. (2000). Aprendamos sobre ensilajes. Núcleo de formación y servicios tecnológicos agropecuarios Subsector Zootecnia. Instituto Nacional de Aprendizaje (INA). Editorial INA. San José, Costa Rica. p. 1-10.
- Méndez, I. (2017). Potencial forrajero de cuatro variedades costarricenses de maíz (*Zea mays*) evaluadas a diferentes densidades de siembra en Santa Lucía, Barva de Heredia. Tesis de licenciatura. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 64 pp.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (s.f.). Mapa de zonas de vida de Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. Recuperado el 22 de octubre, 2022, de <https://bit.ly/3Zrn65p>
- Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (2020). Salario mínimo. Consultado: 20 julio/2020. En línea: <http://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>
- Ojeda, F., Cáceres, O., Esperance, M. (1991). *Conservación de Forrajes.* Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba. 80 pp.
- Pigurina G., & Pérez, E. (1994). Momento de cosecha de maíz para ensilar. INIA, Uruguay. Boletín 43. ISBN: 9974-556-88-0. P. 12.
- Roig, C. A. (1989). Evaluación preliminar de 200 accesiones de leguminosas forrajeras tropicales en el ecosistema de Bosque Tropical Lluvioso en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 179 p.
- Romero, L. (2004). Silaje de maíz: calidad de forrajes conservados. EEA Rafaela, INTA Argentina. 31-33.
- Sánchez, W. (2015). Evaluación de pastos y forrajes para la mejora de la alimentación de las vacas lecheras en la zona alta de Costa Rica. Tesis Doctorado. Zaragoza, España. p. 245.
- Sánchez, W. & Hidalgo, C. (2018). Potencial forrajero de nueve híbridos de maíz en la zona alta lechera de Costa Rica. *Revista Mesoamericana.* 29(1):153-164.
- Soto, P., Jahn, E., Arredando, S. (2002). Población y fertilización nitrogenada en un híbrido de maíz para ensilar el Valle Central Regado. *Agrícola Técnica,* 62 (2): 255-265.
- Somaribas, M. (2007). Efecto de diferentes densidades de maíz y diferentes agotamientos del agua disponible en el suelo sobre la producción de forraje de maíz asociado con mucuna. Tesis de maestría. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 90 p.
- Toledo, J. M., & Schultze-Kraft, R. (1982). Metodología para la evaluación agronómica de pastos tropicales. In: *Manual para la Evaluación Agronómica.* Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales, Cali, Colombia. CIAT. p. 91-109.
- Tadeo-Robledo, M., Espinosa-Calderón, A., Zaragoza-Esperanza, J., Turrent-Fernández A., Sierra-Macías, M., Gómez-Montiel, N. (2012). Forraje y grano amarillo para el Valle alto de México. *Agronomía Mesoamericana,* 23(2): 281-288. ISSN: 1021-7444.