



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
IZTACALA

Aspectos ecológicos y fisiológicos para la
conservación de *Ferocactus flavovirens* del Valle de
Tehuacán-Cuicatlán.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

P R E S E N T A

SELENE CAMPOS VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. César Alejandro Ordoñez Salanueva



Los Reyes Iztacala, Tlanepantla, Edo. De Mex.
Enero 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A los habitantes y autoridades de los poblados Zapotitlán Salinas, San Antonio Texcala, Los Reyes Mezontla y San Juan Raya por su hospitalidad y por permitirnos realizar el trabajo de campo en sus ejidos. Particularmente agradezco a nuestros guías de campo: Hipólito Casiano Montes González, Ramiro Méndez Romero, Joventino Pablo Reyes Hernández y Maurino Reyes Castillo por todo su apoyo durante los recorridos realizados en el VTC.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica Proyecto No. IA210020 Ecofisiología y Conservación de Germoplasma Vegetal

Al Dr. César Ordoñez Salanueva, por su calidad humana, no solo es de los mejores docentes en la Facultad, es un excelente amigo y consejero. Muchas gracias por todo su apoyo, comprensión, y confianza, sé que muchas veces le sacaba canas verdes, pero siempre fue muy paciente conmigo. Con mucho cariño le doy las gracias.

Mtro. Luis Barbo Hernández Portilla y Mtro. Fernando Abiram García García por los consejos, asesoría y ayuda que me proporcionaron durante todo el proceso para realizar adecuadamente la cuantificación de los ácidos grasos y la realización del modelo quimiométrico.

Dr. Héctor Octavio Godínez Álvarez, agradezco su disponibilidad para aclarar mis dudas en ecología y su apoyo para resolver los problemas que se presentaron durante la elaboración de los análisis estadísticos.

Edgar Yafhed Martínez Hernández, laboratorio de sistemas de información geográfica, IB, UNAM, gracias por resolver mis dudas durante la realización y análisis del MNE.

Dr. Salvador Sampayo Maldonado por compartirme material esencial para llevar a cabo el MNE.

Dr. Cesar Flores Mateo, agradezco mucho las aportaciones que realizó para el desarrollo de este documento, así como la confianza que depositó en mi al incluirme en su laboratorio.

Dr. Cristian Jonatan Malavert Pineda, Cátedra de Cultivos Industriales, FAUBA, Luis E. Guerrero López y Alejandra Figueroa Maya, mil gracias por el material bibliográfico proporcionado, los libros que me compartieron fueron muy útiles.

A mis sinodales, Mta. Mayra Hernández Moreno, Dr. Manuel Mandujano Piña, Dr. Cesar Flores Mateo y Dr. Héctor Octavio Godínez Álvarez, por sus oportunas observaciones.

Muchachas, ustedes hicieron de la universidad una etapa fenomenal en mi vida, gracias por todos los consejos, las risas y las experiencias. Las adoro.

Dedicatoria

A mis padres

Esta tesis logró realizarse por su paciencia, amor, comprensión y apoyo.

Gracias por todo Chayito.

Siempre te recordaré con mucho cariño.

Mis niños

Espero poder motivarlos y enseñarles que no hay nada más importante que luchar por lo que desean en la vida.

Yo, por más multinacional que sea, daría toda la Montedison por una luciérnaga.

Pier Paolo Passolini

Resumen

En la actualidad, se calcula que el 42% de las cactáceas mexicanas se encuentra bajo alguna categoría de protección para su conservación. *Ferocactus flavovirens*, conocida como el barril de Zapotitlán, es una especie endémica del Valle de Tehuacán-Cuicatlán catalogada en peligro de extinción en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN, debido a que su extensión de ocurrencia es estrecha (2.000 km²), fragmentada y poco abundante. El objetivo planteado en este trabajo fue contribuir a la preservación de *Ferocactus flavovirens in situ* y *ex situ* mediante la determinación de su estado de conservación a través del Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de Plantas en México de la NOM-059-SEMARNAT-2010; y a través de la determinación de los parámetros de longevidad potencial de las semillas de dicha especie (P_{50} , K_i y σ) bajo un gradiente de humedad relativa y con diferente grado de envejecimiento natural. Se determinó el comportamiento de almacenamiento de las semillas y se sometieron a un gradiente de envejecimiento acelerado (30 % - 60% HR) a 45°C, así mismo se comparó la germinación y concentración de ácidos grasos de dos lotes de semillas con diferente grado de envejecimiento natural, expuestas a envejecimiento acelerado (60% HR/45°C). Los ácidos grasos fueron determinados e identificados mediante CG-EM y se tomaron los espectros de infrarrojo cercano (NIRS) de las semillas. Para crear un modelo Quimiométrico se realizó una correlación PSL con los datos de la viabilidad, la concentración de ácidos grasos y los espectros infrarrojos. Para determinar el estado de conservación de *F. flavovirens* en la República Mexicana, se empleó la evaluación de los 4 criterios del MER: amplitud de la distribución del taxón en México (Criterio A), estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón (Criterio B), vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón (Criterio C) e impacto de la actividad humana sobre el taxón (Criterio D). Para ello se realizó la distribución potencial geográfica en MaxEnt a partir de los registros de las ocurrencias obtenidos de diversas bases de datos y los ejemplares encontrados en campo, además se usaron 19 variables climáticas y dos variables topográficas; se eliminaron las áreas no conservada del modelo obtenido y se determinó la extensión de la distribución de *F. flavovirens* empleando ArcMap. Para el criterio B se contempló la contribución de las variables climáticas al modelo y las características bióticas y abióticas de las localidades del VTC visitadas, tales como la altitud, porcentaje de inclinación, perfil de la pendiente, frecuencia, tamaño y tipo de pedregosidad superficial, cobertura vegetal, especies vegetales dominantes, y el tipo de vegetación; mientras que para evaluar el criterio C se consideró la densidad, estructura de tamaños, la proporción de individuos bajo protección vegetal, la fenología y germinación, para esto se censaron los individuos de *F. flavovirens* presentes en transectos de 5 x 50 m.; se registró la posición geográfica, tamaño y si se encontraron en espacios abiertos (EA) o debajo de arbustos (DA). Se identificaron los meses de floración y fructificación mediante la revisión bibliográfica y las observaciones en campo y se contó el número de semillas por fruto. El criterio D fue determinado mediante el método de evaluación de disturbio propuesto por Martorell & Peters (2004) considerando solo 10 de los 15 indicadores de disturbio. Los resultados obtenidos mostraron que el comportamiento de almacenamiento fue de tipo ortodoxo, además la germinación y el T_{50} son afectados negativamente conforme incrementa la humedad relativa, el envejecimiento acelerado y la edad

de las semillas. Por otra parte, el tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) se reduce al incrementar la humedad relativa dentro del mismo lote de semillas, no obstante, es posible señalar que las semillas de *F. flavovirens* son potencialmente muy longevas. Las variaciones en la longevidad de las semillas de *F. flavovirens* se observó a través de los valores de K_i , σ , P_{50} . Así mismo, los cromatogramas realizados permitieron encontrar que la concentración de ácidos grasos de las semillas, como ácido oleico, ácido linoleico, y ácido palmítico, tienden a disminuir conforme se incrementa el envejecimiento acelerado y el envejecimiento natural, exceptuando el ácido esteárico, cuyo comportamiento de concentración fue más inconsistente. El modelo quimiométrico generado en QUANT+ a partir de la concentración de ácidos grasos, el porcentaje de germinación y los espectros infrarrojo es un método no invasivo, adecuado y confiable para la determinación de la viabilidad de las semillas de *F. flavovirens*. A pesar de que la distribución potencial geográfica de *F. flavovirens* podría estar sobreestimada, su extensión fue de casi 7257 km², siendo menor al 1% de la extensión continental del territorio nacional por lo que su distribución es muy restringida (4 puntos). Por otro lado, las condiciones del hábitat de *F. flavovirens* indican que este puede ser limitante para su desarrollo natural (3 puntos), mientras que las características de la germinación, fenología, estructura y densidad poblacional, entre otras, indican que la vulnerabilidad biológica intrínseca de *F. flavovirens* es alta (3 puntos); además se encontró que agente de disturbio mayoritariamente presente en el hábitat de *F. flavovirens* fue la actividad ganadera, así mismo no se encontró que evidencia de que las perturbaciones afecten de manera negativa su densidad poblacional por lo que se le asignó una categoría de disturbio medio al criterio D del MER. La puntuación final fue de 13 puntos, y, conforme a lo indicado en el MER, se determinó que *Ferocactus flavovirens* debe ser categorizada como especie en peligro de extinción dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010.

Índice

Introducción	14
Conservación ex situ: Bancos de semillas	15
Conservación <i>in situ</i> : Determinación del estado de Conservación	17
Antecedentes	19
Hipótesis	22
Objetivo General	22
Objetivos Particulares	22
Área de Estudio	24
Descripción de la especie	30
Materiales y métodos	31
Aspectos fisiológicos	31
<i>Obtención de las semillas</i>	31
<i>Germinación</i>	31
<i>Comportamiento en almacenamiento</i>	32
<i>Longevidad potencial</i>	32
<i>Extracción y transesterificación de ácidos grasos de semillas</i>	33
<i>Análisis de ácidos grasos por CG-EM</i>	34
<i>Registro del espectro infrarrojo cercano (NIRS) en las semillas y modelo Quimiométrico QUANT+</i> ...	34
Aspectos Ecológicos	35
Método de Evaluación de Riesgos de Extinción (plantas)	35
<i>Criterio A. Amplitud de la distribución del taxón en México (Características de la distribución geográfica)</i>	35
<i>Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón (Características del hábitat.)</i>	38
<i>Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón.</i>	38
<i>Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre el taxón.</i>	39
Resultados	42
Aspectos fisiológicos	42
<i>Comportamiento en almacenamiento</i>	42
<i>Longevidad potencial</i>	43
<i>Análisis de ácidos grasos por CG-EM</i>	48
<i>Registro del espectro infrarrojo cercano (NIRS) en las semillas y modelo Quimiométrico QUANT+</i> ...	51

Aspectos Ecológicos	54
Método de Evaluación de Riesgos de Extinción (plantas)	54
<i>Criterio A Amplitud de la distribución del taxón en México</i>	54
<i>Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón (Características del hábitat).</i>	56
<i>Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón.</i>	57
<i>Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre el taxón.</i>	59
Discusión	62
Aspectos fisiológicos	62
Aspectos Ecológicos	69
Conclusiones	75
Literatura Citada	76
Apéndices	88
I. Curvas de germinación del gradiente de Humedad Relativa	88
II. Análisis de Varianza de la germinación y la T ₅₀ del gradiente de Humedad Relativa a 45°C.....	89
III. Curvas de germinación de los lotes colectados en 2010 y en 2018 a 60% HR/45 °C.	91
IV. Análisis de Varianza de la germinación y la T ₅₀ de los lotes colectados en 2010 y 2018 a 60% de Humedad Relativa/45 °C.....	92
V. Comparación de la pendiente de las rectas obtenidas en el análisis PROBIT.....	93
VI. Concentración de ácidos grasos en semillas de <i>F. flavovirens</i> a 60% HR/45°C.....	94
VII. Análisis Varianza de Dos Factores de la concentración de los lotes colectados en 2010 y 2018 a 60% HR/45 °C.....	95
VIII. Análisis de contribuciones variables al Modelo de Nicho Ecológico y prueba Jackknife	96
IX. Densidad poblacional y estructura de tamaño de <i>F. flavovirens</i>	98
X. Análisis de Componentes Principales y Modelo Lineal Generalizado con distribución de Poisson	98

Índice de figuras

Figura 1. Región Terrestre Prioritaria del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.....	24
Figura 2. Provincias y subprovincias fisiográficas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.	25
Figura 3. Cuencas y subcuencas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.....	26
Figura 4. Tipo de climas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.	27
Figura 5. Uso de suelo y vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.	27
Figura 6. Suelos del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.....	28
Figura 7. Fotografía de una colonia de <i>F. flavovirens</i>	30
Figura 8. Fotografía satelital de las localidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán muestreadas. 36	
Figura 9. Promedios de la germinación inicial acumulada en semillas de <i>F. flavovirens</i> de lotes colectados en 2010 y 2018, la germinación acumulada de las semillas deshidratadas a 5% de CH de ambos lotes y la germinación de las semillas del lote colectado en 2018 almacenadas a -10°C durante 90 días posterior a su deshidratación a 5% CH.	42
Figura 10. Medias de la germinación y la velocidad de germinación (T_{50}) de las semillas de <i>F.</i> <i>flavovirens</i> colectadas en el 2010 sometidas a un gradiente de humedad relativa (60-30 %) a 45 °C durante diferentes periodos de envejecimiento acelerado.....	44
Figura 11. Análisis PROBIT de la viabilidad de las semillas de <i>F. flavovirens</i> en un gradiente de humedad relativa (60-30 %) a 45 °C durante diferentes periodos de envejecimiento acelerado.	45
Figura 12. Medias de la germinación y la velocidad de germinación (T_{50}) de las semillas de <i>F.</i> <i>flavovirens</i> con diferente grado de envejecimiento natural durante diferentes periodos de envejecimiento acelerado a 60% HR y 45°C..	46
Figura 13. Análisis PROBIT de la viabilidad de las semillas de <i>F. flavovirens</i> colectadas en años distintos sometidas a envejecimiento acelerado.	47
Figura 14. Cromatograma de ácidos grasos presentes en semillas de <i>F. flavovirens</i> . El tiempo de retención para cada compuesto se indica en azul.....	48
Figura 15. Medias de las concentraciones de ácidos grasos y la germinación acumulada de las semillas de <i>F. flavovirens</i> el 2010 y colectadas en el 2018 sometidas a diferentes periodos de envejecimiento acelerado.	50
Figura 16. Media del porcentaje de germinación y la concentración de ácido palmítico , ácido linoleico , ácido oleico y ácido esteárico en las semillas de <i>F. flavovirens</i> con diferente grado de envejecimiento natural durante diferentes periodos de envejecimiento controlado.....	51
Figura 17. Correlación del porcentaje de germinación real con respecto al estimado mediante el modelo quimiométrico en las semillas de <i>F. flavovirens</i> sometidas a condiciones de envejecimiento acelerado (60% HR/45°C).....	53
Figura 18. Contenido de ácido palmítico, ácido linoleico, ácido oleico y ácido esteárico real contra el estimado mediante el modelo quimiométrico en las semillas de <i>F. flavovirens</i> sometidas a condiciones de envejecimiento acelerado (60% HR/45°C)	53
Figura 19. Extensión de la distribución geográfica potencial, registro de ocurrencias de <i>F.</i> <i>flavovirens</i> y su representatividad en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán.	54
Figura 20. Estructura poblacional por categoría de tamaño y por localidades de <i>F. flavovirens</i> ...59	
Figura 21. Relación entre densidad de <i>F. flavovirens</i> y el índice de disturbio reescalado (IDr) estimado.	61

Índice de cuadros

Cuadro 1. Tipos de climas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.	28
Cuadro 2. Riqueza florística en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán.....	29
Cuadro 3. Coberturas digitales que se usaron en el modelo de distribución geográfica potencial de la especie <i>Ferocactus flavovirens</i>	37
Cuadro 4. Agentes e indicadores de disturbio evaluados en cuatro localidades del VTC.....	40
Cuadro 5. Características físicas y fisiológicas de las semillas de <i>F. flavovirens</i>	42
Cuadro 6. Parámetros de la ecuación de viabilidad: viabilidad inicial (K_i), tiempo en que tarda en perderse la viabilidad del 50% de las semillas (P_{50}) y el tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) a 45°C, donde Viabilidad= $K_i - (p / \sigma)$	48
Cuadro 7. Porcentaje de varianza, error estimado y error de predicción obtenidos del análisis quimiométrico QUANT+ para los ácidos grasos saturados e insaturados y la germinación acumulada en las semillas de <i>F. flavovirens</i> colectadas en el 2010 y 2018 a 60% HR/45°C	52
Cuadro 8, Extensión de la distribución geográfica potencial de <i>F. flavovirens</i>	55
Cuadro 9. Contribución de las variables bioclimáticas al MNE de <i>F. flavovirens</i>	55
Cuadro 10. Características del hábitat de <i>F. flavovirens</i> en cuatro localidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.	56
Cuadro 11. Periodo de fructificación y floración de <i>F. flavovirens</i>	57
Cuadro 12. Frecuencia relativa de individuos por categoría de tamaño de <i>F. flavovirens</i> del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.....	58
Cuadro 13. Densidad poblacional y porcentaje de los individuos ubicados bajo dosel vegetal y sin dosel.....	59
Cuadro 14. Puntajes obtenidos a partir del ACP para los agentes e indicadores del índice de disturbio (ID) y el índice de disturbio reescalado (IDr) para 4 poblaciones de <i>F. flavovirens</i> del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.....	60

Abreviaturas

A	Especie amenazada
A	Variables abióticas (variables scenopoéticas)
ACP	Análisis de Componentes Principales
AUC	Área bajo la curva
ANOVA	Análisis de Varianza
ANP	Área Natural Protegida
B	Variables bióticas
CAT	Catalasa
CG-EM	Cromatografía de gases acoplada a un espectrofotómetro de masas
CH	Contenido de Humedad
CITES	Convención sobre el Tráfico Internacional de Especies Silvestres de Flora y Fauna Amenazadas
CLAN	Caminos ganaderos
COMP	Compactación del suelo
ERO	Especie Reactiva de Oxígeno
GBIF	Global Biodiversity Information Facility
Go	Área ocupada
GSH	Glutación
HR	Humedad Relativa
HSD	Prueba de diferencia honestamente significativa de Tukey (por sus siglas en inglés).
ID	Índice de disturbio
IDr	Índice de disturbio reescalado
KBr	Bromuro de Potasio
Ki	Viabilidad inicial
M	Área accesible
MaxEnt	Maximum entropy modeling
MCP	Muerte Celular Programada
MER	Método de Evaluación de Riesgo de Extinción
MNE	Modelo de Nicho Ecológico
MEXU	Herbario Nacional de México
NIRS	Espectro Infrarrojo Cercano (por sus siglas en inglés)
P ₅₀	Tiempo en que tarda en perderse la viabilidad del 50% de las semillas
P	Especie en peligro de extinción
Pr	Especie sujeta a protección especial
POBL	Cercanía a las poblaciones
RBTC	Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán
REMIB	Red Mundial de Información sobre Biodiversidad
ROC	Característica Operativa del Receptor
SOD	Superóxido dismutasa
T ₅₀	Tiempo en que tarda en germinar el 50% de las semillas
VTC	Valle de Tehuacán Cuicatlán
σ	Tiempo en que disminuye una unidad probit

Introducción

La familia Cactaceae es uno de los grupos más diversos entre las Magnoliophyta al tener una gran variedad de hábitos y formas de crecimiento; además sus particulares características anatómicas y fisiológicas les han permitido establecerse en los ambientes áridos y semiáridos (Jiménez, 2011; Márquez *et al.*, 2013). Esta familia comprende alrededor de 100 géneros y 1478 especies; México es el centro más importante del mundo en concentración de cactáceas, albergando 913 taxones, 63 géneros y 669 especies, con un alto índice de endemismo a nivel genérico (73%) y específico (78%) (Goettsch *et al.*, 2015; Hernández & Godínez, 1994). La mayoría de las especies están distribuidas en las tres principales regiones desérticas del país: el Desierto de Chihuahua, el Desierto de Sonora y el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, siendo este último la región geográfica más diversa (Jiménez, 2011; Yang *et al.*, 2003).

Desafortunadamente, las actividades humanas como el cambio en el uso de suelo para la agricultura, la cría de ganado, la construcción de carreteras, la minería, la extracción directa de plantas de su ambiente para su venta como plantas de ornato en mercados nacionales e internacionales, la sobreexplotación de frutos y la alimentación del ganado a nivel local son las principales causas que impactan adversamente a las cactáceas, por lo menos desde hace tres décadas, lo cual ha generado que el 31% de las especies de cactáceas se encuentren bajo alguna categoría de riesgo (Jiménez, 2011; Álvarez *et al.*, 2004; Royo-Márquez *et al.*, 2014).

Muestra de ello es que la familia completa está incluida en el Apéndice II de la Convención sobre el Tráfico Internacional de Especies Silvestres de Flora y Fauna Amenazadas (CITES), 40 especies están comprendidas en el Apéndice I, 60 (aproximadamente) en el listado de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (IUCN) y 324 se encuentran registradas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Álvarez *et al.*, 2004; Royo-Márquez *et al.*, 2014).

Así mismo, los procesos biológicos propios de los cactus como: la baja tasa de crecimiento, la baja supervivencia de las semillas y plántulas, las áreas de distribución restringidas, la especialización a condiciones edáficas y ciclos de vida muy largos son otros aspectos que condicionan el mantenimiento de las poblaciones (Hernández & Godínez, 1994; Arias *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2003; Ballesteros-Barrera *et al.*, 2017; Goettsch *et al.*, 2015).

Por lo anteriormente descrito, es crucial obtener información sobre diferentes aspectos biológicos y ecológicos, como sus patrones de distribución geográfica, niveles de endemismo y peligro, que podrían contribuir a una gestión y conservación adecuadas a nivel regional de los cactus (Godínez-Álvarez & Ortega-Baes, 2007)

Ferocactus flavovirens conocida como el barril de Zapotitlán es una especie endémica del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (VTC) catalogada en peligro de extinción en la Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN debido a que su extensión de ocurrencia es estrecha (2.000 km²), fragmentada y poco abundante. Varias subpoblaciones conocidas han desaparecido como

consecuencia del cambio del uso del suelo, lo cual sigue siendo una amenaza porque las subpoblaciones están muy cerca de tierras agrícolas, incluso dentro de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán; además se conoce muy poco acerca de sus características ecológicas y fisiológicas (Arias *et al.*, 2013).

La conservación tanto de la flora como de la fauna se desarrolla en dos formas básicas: dentro del hábitat natural o conservación *in situ* y fuera del mismo, es decir, conservación *ex situ*. Las medidas de conservación *in situ* como la protección y restauración de hábitats naturales, son de los mejores métodos para preservar la diversidad de las plantas; mientras que la conservación *ex situ*, en cautiverio o en colecciones, es la aplicación de una amplia variedad de recursos, técnicas e infraestructuras especializadas que contribuyen a la recuperación y sobrevivencia de individuos o poblaciones fuera de su hábitat, esta actúa como un respaldo para ciertos segmentos de diversidad que de otro modo podrían perderse en la naturaleza y en ecosistemas dominados por el hombre, generalmente mediante el mantenimiento de cultivos clonales en bancos de genes en campo y bancos *in vitro* (jardines botánicos y / o en bancos de semillas convencionales o criogénicos) (Rodríguez-Arévalo *et al.*, 2017; CONABIO, 2009).

Empero, los enfoques de conservación *in situ* y *ex situ* deben considerarse complementarios en lugar de alternativos. Sin embargo, existen factores socioeconómicos que dificultan la conservación *in situ*, mientras que los costos para la conservación *ex situ* se estiman en apenas el 1% de los necesarios para la conservación *in situ*, aunque la conservación *ex situ* todavía debe abordar algunos desafíos técnicos (CONABIO, 2009; Rodríguez-Arévalo *et al.*, 2017).

Conservación *ex situ*: Bancos de semillas

Una de las formas más efectivas de conservar la diversidad de plantas *ex situ* es a través del almacenamiento de germoplasma en bancos de semillas; estos permiten la preservación de grandes cantidades de material genético en un espacio pequeño y con un riesgo mínimo de daño genético (Rodríguez-Arévalo *et al.*, 2017).

Los bancos de semillas se sustentan en una buena comprensión del potencial de almacenamiento de las semillas para el manejo adecuado del germoplasma destinado a la conservación a largo plazo (Obunyali *et al.*, 2008). Para establecer si es factible el almacenamiento a largo plazo de las semillas de una especie bajo condiciones controladas sin pérdida de su calidad (longevidad potencial), es necesario recurrir a los modelos de viabilidad de semillas, los cuales se pueden aplicar solo a semillas con ciertas propiedades fisiológicas. Existen tres clases principales según la respuesta de las semillas a la deshidratación, si es tolerante a la desecación (contenido de humedad $\leq 5\%$), y de larga longevidad se denomina como ortodoxa; si son tolerantes a la desecación (contenido de humedad de 10-12%) pero disminuye su viabilidad si la humedad desciende en una unidad o más se considera que la semilla es intermedia y se categoriza como recalcitrante cuando son sensibles a la desecación y son de corta longevidad (Pritchard & Dickie, 2003; Hong & Ellis, 1996; Berjak & Pammenter, 2004).

Por ello es vital realizar estudios de longevidad de semillas, ya que estos aportan información importante para la conservación *ex situ* de especies de semillas ortodoxas (Obunyali *et al.*, 2008). La longevidad potencial de las semillas se puede predecir mediante las ecuaciones de viabilidad propuestas por Robert y Ellis (1980), en donde se calcula la viabilidad (v) mediante la viabilidad inicial del lote de semillas (K_i), el periodo de almacenamiento (p) y el tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) (Ec. 1); y para poder comparar la longevidad entre especies (Ec. 2) se utiliza el tiempo en que tarda en perderse la viabilidad al 50% (P_{50}). Los parámetros mencionados pueden ser obtenidos a partir de protocolos de envejecimiento acelerado o deterioro controlado (Newton *et al.*, 2009).

$$v = K_i - p / \sigma \quad (1)$$

$$P_{50} = K_i \times \sigma \quad (2)$$

Los factores más importantes que determinan la longevidad potencial son: la humedad y la temperatura de almacenamiento, ya que, la longevidad potencial aumenta logarítmicamente, dentro de ciertos límites, conforme disminuye o aumenta el contenido de agua de acuerdo con la regla de Harrington, donde el incremento de una unidad porcentual en el contenido de humedad implica que la vida de la semilla se reduzca a la mitad. Con respecto a la temperatura se sabe que, por cada aumento de 5°C en la temperatura de la semilla, la vida de la semilla se reduce a la mitad. (Pritchard & Dickie, 2003; Harrington, 1972;). Cabe resaltar que este modelo es solo una guía para estimar la longevidad aproximada, debido a que hay otros factores que pueden influir en la longevidad potencial y que son difíciles de contemplar dentro de los modelos de viabilidad, tales como las diferencias genotípicas y el efecto del tratamiento previo en la calidad inicial de las semillas ortodoxas al ser almacenadas. Evidencia de ello es que, cuanto menor sea la calidad inicial, más rápido expirará el lote de semillas bajo las mismas condiciones de almacenamiento (Pritchard & Dickie, 2003).

No obstante, las semillas se deterioran durante los períodos de almacenamiento prolongado. El estrés oxidativo (que es un desequilibrio en la producción de radicales libres y en los mecanismos antioxidantes) es considerado como un factor muy importante del envejecimiento de las semillas (Stewart *et al.*, 1980; Bailly, 2004; Mc Donald, 2004). Los radicales que se pueden formar por el estrés oxidativo son el peróxido de hidrogeno (H_2O_2), radical superóxido (O_2^-) y radical hidroxilo (

OH), mientras que algunas enzimas de protección son glutatión reductasa (GR), glutatión (GSH), catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), entre otras; igualmente los polifenoles, flavonoides, peroxiredoxinas, vitamina E (tocoferol) y la vitamina C (ácido ascórbico) son otros compuestos antioxidantes (Bailly, 2004; Mc Donald, 2004).

Entre los cambios bioquímicos iniciados por un radical hidroxilo encontramos la peroxidación lipídica que a su vez genera la pérdida de la integridad membranal, dando como resultado un incremento de la permeabilidad de la membrana y la fuga celular que se asocia con el

envejecimiento de la semilla (Bewley *et al.*, 2013). Se considera que las membranas celulares son algunos de los principales sitios de lesión durante la desecación y el almacenamiento de semillas; este daño se relaciona con el proceso de peroxidación lipídica que resulta en la disminución de la concentración de ácidos grasos insaturados e incremento en la concentración de hidroperóxidos (Pukacka & Ratajczak, 2007; Aguirre-Bolaños *et al.*, 2017).

Otra consecuencia de la peroxidación lipídica es la liberación de subproductos como los aldehídos reactivos que provocan daños adicionales a las proteínas y ácidos nucleicos; teniendo como consecuencia la alteración del contenido de azúcares, la oxidación enzimática, disminución de la síntesis de proteínas, deterioro de los mecanismos de reparación y síntesis de ADN, aumento de anomalías cromosómicas y disminución en la actividad metabólica; dando como resultado el deterioro fisiológico de las semillas (Abdul-Aki *et al.*, 2012; McDonald, 1999; Bewley *et al.*, 2013).

Este envejecimiento se manifiesta como una reducción en el porcentaje de germinación (pérdida de viabilidad), mientras que las semillas que germinan producen plántulas débiles (pérdida de vigor). Debido a que la viabilidad disminuye con el período de almacenamiento, incluso bajo condiciones de almacenamiento óptimas, las pruebas de vigor (potencial de germinación) son una práctica importante en los programas de producción de semillas y bancos de semillas. Algunos de los métodos convencionales utilizados para estimar la viabilidad y el vigor de las semillas son: la prueba de tetrazolio (TZ), la prueba de germinación, la prueba de conductividad eléctrica y la prueba de rayos X (Kandpal *et al.*, 2016; Rao *et al.*, 2006).

Sin embargo, algunos de estos ensayos se basan en productos químicos y destruyen la semilla. Para superar estas deficiencias, recientemente se han comenzado a utilizar diversas técnicas espectroscópicas no destructivas, tales como el infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo medio (IR medio), (Ferreira *et al.*, 2014; Kandpal *et al.*, 2016). Estas técnicas son rápidas y proporcionan una gran cantidad de información química en la muestra escaneada como el contenido de: humedad, proteínas, lípidos y cenizas (Ferreira *et al.*, 2014; Kandpal *et al.*, 2016)

Conservación *in situ*: Determinación del estado de Conservación

México es un país megadiverso que alberga cerca del 10-12 % de las especies del mundo; en lo que se refiere a plantas vasculares se han registrado 25 mil especies y casi la mitad de las especies son endémicas del país (Jiménez-Sierra *et al.*, 2014). Sin embargo, el estado actual de la biodiversidad y los ecosistemas nacionales manifiestan un profundo impacto antropogénico, acumulado a lo largo de milenios y en mayor grado durante los últimos 50 a 100 años. Hacia 1976 la cobertura original total de México se había reducido en 38% y entre 1993 y 2002 alrededor de 2.8 millones de ha². de bosques, selvas, matorrales y pastizales pasaron a formar parte de los sistemas agropecuarios (Jiménez-Sierra *et al.*, 2014; CONABIO, 2009). Mucha de la vegetación remanente está fragmentada y en diferentes estados de conservación, en los que predomina la vegetación secundaria (CONABIO, 2009).

Para contrarrestar los impactos antropogénicos negativos sobre los ecosistemas, el gobierno mexicano implementó programas de reforestación, conservación y restauración de suelos, plantaciones forestales con especies nativas y fomento de sistemas agroforestales en zonas abiertas al cultivo. Adicionalmente, se desarrollaron programas enfocados al uso más sustentable de los ecosistemas forestales como la conservación y el aprovechamiento de la vida silvestre, se estableció el Sistema de Áreas Naturales Protegidas (ANP), las Unidades de Manejo Sustentable, el ecoturismo y programas de pago por servicios ambientales (CONABIO, 2009).

Sin embargo, estas medidas no son suficientes; tal es el caso de las ANP, las cuales a pesar de ser consideradas como la principal herramienta de conservación de la diversidad biológica y ofrecer una excelente alternativa para la conservación de los servicios ecosistémicos y la diversidad cultural de nuestro territorio; muchas de éstas no son aplicadas y / o administradas de manera efectiva, y se ven afectadas por la caza furtiva, la pérdida de hábitat y la fragmentación. Frecuentemente tienen un diseño y una cobertura inadecuados, carecen de una gestión suficiente para enfrentar una gran cantidad de amenazas y niveles crecientes de degradación ambiental y no coinciden con las prioridades altas, tales como áreas de hábitat de gran diversidad, riqueza de especies y / o endemismos (CONABIO, 2009; Hernández & Gómez-Hinostrosa, 2011; Ervin, 2003). Adicionalmente, la mayor parte de la explotación de recursos vegetales se lleva a cabo de manera ilegal, incluso dentro de áreas naturales protegidas, teniendo como consecuencia el decrecimiento de las poblaciones de algunas especies vegetales (CONABIO, 2009; CONANP, 2013; Godínez-Álvarez *et al.*, 2008).

Es por lo que, de manera complementaria, para preservar gran variedad de flora y fauna presente en las ANP, entre ellas el VTC, se requiere hacer uso del marco jurídico nacional e internacional para proteger las especies silvestres que presentan algún nivel de riesgo. La Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2010 es una disposición legal para la protección, aprovechamiento y comercio de la flora silvestre nativa, que tiene por objeto identificar las especies o poblaciones de flora y fauna silvestres en riesgo en la República Mexicana, así como establecer los criterios de inclusión, exclusión o cambio de categoría de riesgo para las especies o poblaciones (Arias *et al.*, 2005; SEMARNAT, 2010).

Esta norma determina el estado de conservación mediante el Método de Evaluación de Riesgo de Extinción (MER). El MER es una herramienta que se aplica exclusivamente en México y se encarga de la documentación de forma sencilla de los factores que afectan a un taxón en el país. Se constituye de cuatro criterios: A) Amplitud de la distribución del taxón en México, B) Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón, C) Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón y D) Impacto de la actividad humana sobre el taxón; los cuales consideran la biología e historia natural de una especie o subespecie y la interacción con el hombre. Para evaluar el riesgo de extinción de una especie es necesario considerar mínimamente la distribución, características del hábitat y características biológicas que puedan aumentar su

fragilidad ante eventos de disturbio e impacto del quehacer antrópico sobre las poblaciones silvestres (Arias *et al.*, 2005; Sánchez-Salas *et al.*, 2013).

Una vez concluido todo el procedimiento del MER, se integrarán todos los valores asignados a los criterios mediante su suma y con base en el puntaje obtenido o bajo ciertas condiciones (vías directas), se asignará alguna de las siguientes categorías contempladas en la NOM-059-ECOL-2010 (SEMARNAT, 2010):

- En peligro de extinción (P): mayor o igual que 2
- Amenazada (A): mayor que 1.7 y menor que 2
- Sujeta a protección especial (Pr): Mayor o igual que 1.5 y menor que 1.7
- Probablemente extinta en el medio silvestre (E): únicamente se deberá presentar la información del inciso a, b y h; así como documentar el esfuerzo de búsqueda de la especie.

Entre algunas de las ventajas de registrar una especie en la NOM-059-ECOL-2010 encontramos que la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la encargada de impulsar el desarrollo de proyectos de conservación y recuperación de las especies y poblaciones en riesgo, el establecimiento de medidas especiales de manejo, la coordinación de programas de muestreo y seguimiento permanente, así como de certificación del aprovechamiento sustentable; programas de prevención, de atención de emergencias y de restauración para la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales de la vida silvestre, de acuerdo con lo establecido en el artículo 60° y 70° de la Ley General De Vida Silvestre (SEMARNAT, 2010; DOF., 2018)

Antecedentes

Los estudios de longevidad potencial mediante el envejecimiento acelerado y los efectos bioquímicos que conllevan en las semillas se han realizado numerosas investigaciones de especies de interés comercial como: maíz (Durán-Hernández *et al.*, 2011), ajonjolí (Obunyalí *et al.*, 2008), girasol (Kibinza *et al.*, 2006), soja (Stewart *et al.*, 1980), garbanzo (Kapoor *et al.*, 2010), arroz (Kapoor *et al.*, 2011), y en menor medida para algunas especies silvestres. Por ejemplo, tres especies de *Banksia* (Crawford *et al.*, 2010), la orquídea *Encyclia adenocarpa* (Aguirre-Bolaños *et al.*, 2017) y algunas especies de cactáceas como: *Neobuxbaumia tetetzo* y *Neobuxbaumia mezcalaensis* (Lozada, 2005), *Polaskia chichiye* y *Polaskia chende*, (Rogel, 2008).

Específicamente en cactáceas, las semillas de *Polaskia chichiye* y *Polaskia chende* fueron expuestas a dos tratamientos de envejecimiento acelerado (45 °C/ 55% HR y 55 °C/ 60% HR) para evaluar los efectos del envejecimiento acelerado en la concentración de ácidos grasos, la actividad enzimática de catalasa y peroxidasa y sus registros en el espectro infrarrojo (NIRS). Se concluyó que hay una relación entre la pérdida de la actividad destoxicante de las enzimas,

la peroxidación lipídica, la germinación y los registros en el espectro infrarrojo (NIRS) con respecto al deterioro de las semillas durante el envejecimiento acelerado (Rogel, 2008).

De la misma manera, las semillas de *Neobuxbaumia tetetzo* y *Neobuxbaumia mezcalaensis* fueron sometidas a envejecimiento acelerado utilizando un gradiente de humedad relativa (15-95% HR) a 45°C. Los resultados obtenidos mostraron que la germinación se reducía cuando la humedad relativa era mayor y una correlación de la viabilidad con respecto a la concentración ácidos grasos y los registros del NIRS (Lozada, 2005).

Como se mencionó anteriormente, no se han registrado documentos en el que se determine el estado de conservación de *Ferocactus flavovirens* conforme al MER. No obstante, se han realizado estudios acerca de la distribución potencial para otras cactáceas amenazadas y endémicas del VTC como *Mammillaria pectinifera*. Se determinaron algunos aspectos ecológicos de *M. pectinifera* como la distribución geográfica, el tamaño poblacional y la estructura de edades; así mismo se evaluó cualitativamente el grado de disturbio de las poblaciones muestreadas y se describió su hábitat de acuerdo con el MER. Los resultados obtenidos mostraron que la especie se encuentra distribuida al menos en 31 localidades y su tamaño poblacional es más grande de lo registrado. Sin embargo, a pesar del incremento sustancial de localidades e individuos, la especie presenta un alto grado de presión antrópica, lo que sugiere que es vulnerable a desaparecer en algunas localidades (Peters *et al.*, 2014).

De manera similar se reevaluó el estado de conservación de cinco especies de cactáceas endémicas del VTC, incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010: *Mammillaria bernandezii*, *Mammillaria huitzilopochtli*, *Mammillaria kraehenbuehli*, *Mammillaria napina* y *Ferocactus haematacanthus*, mediante el MER. Se determinó: la extensión del área de la posible presencia de las especies, el área de ocupación real y potencial de las especies, las "relaciones" geográfico-ambientales entre sus subpoblaciones, identificación de las características del hábitat, la calidad del hábitat con relación a las actividades humanas, el tamaño poblacional, la estructura de tamaños, la eficiencia reproductiva (flores, frutos, tasa de germinación), la tasa de sobrevivencia de plántulas en condiciones controladas, y finalmente, la diversidad y la estructura genética de las especies de *Mammillaria*. Los resultados de los análisis ubicaron a *M. bernandezii* dentro de la categoría En Peligro de Extinción (P), además se sugirió que a *M. napina* se ubicara en la categoría de Amenazada (A). Para las tres especies restantes se puede concluir que es fundamental mantener sus tamaños poblacionales para que eviten efectos de endogamia y de deriva génica, así como cuidar que no se incremente el aislamiento geográfico que impida el flujo de genes por las vías de semilla o el estado actual de las poblaciones de acuerdo con el MER (Téllez-Valdés *et al.*, s.f.).

Cabe mencionar que, si bien no se han realizado estudios como el MER para *F. flavovirens*, si se han estudiado algunos aspectos ecológicos de importancia tal es el caso del efecto del cambio climático en su patrón de distribución junto con el de otras 19 especies de cactáceas de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán. Para obtener la distribución potencial actual de

cada especie se utilizó una base de datos florística y un modelo bioclimático con el que se examinaron 19 parámetros climáticos, también se seleccionaron tres escenarios climáticos basados en las predicciones relacionadas con cambios climáticos futuros: (1) incremento de 1°C y 10% menos lluvia, (2) incremento de 2°C y 10% menos lluvia y (3) incremento de 2°C y 15% menos lluvia. Los resultados indican que la distribución de *F. flavovirens* se ve reducida en todos los escenarios propuestos, siendo más notable esta disminución en el escenario tres donde el área de ocurrencias disminuye cerca del 90% (Téllez-Valdés *et al.*, 2003)

Otro aspecto que se ha estudiado de *F. flavovirens* es su germinación bajo siete temperaturas constantes diferentes (10°C, 15°C, 20°C, 25 °C, 30 °C, 35 °C y 40 °C) y cinco rangos de temperaturas alternas (0/10 °C, 5/20 °C, 10/25° C, 15/30 °C y 20/35 °C). Los resultados mostraron que *F. flavovirens* germina en un amplio rango de temperatura (15-35°C), además las fluctuaciones de temperatura no produjeron efectos significativos en la germinación en comparación con los resultados obtenidos a temperaturas constantes (Rojas-Aréchiga *et al.*, 1998).

Hipótesis

El envejecimiento acelerado de las semillas provoca la pérdida o reducción de la viabilidad como consecuencia de la peroxidación lipídica generando disminución en las concentraciones de ácidos grasos insaturados que a su vez permiten determinar la viabilidad de las semillas mediante el modelo quimiométrico QUANT+.

Por otra parte, debido a la extensión fragmentada, de ocurrencia estrecha y poco abundante de *Ferocactus flavovirens* se espera que el estado de conservación se encuentre deteriorado, conforme a los criterios de la NOM-059-SEMARNAT-2010.

Objetivo General

Determinar la longevidad potencial y el comportamiento en almacenamiento de las semillas de *Ferocactus flavovirens*, y evaluar el método quimiométrico QUANT+ como una alternativa no invasiva que estima la viabilidad de las semillas para contribuir a la conservación *ex situ* de la especie.

Determinar el estado de conservación de *Ferocactus flavovirens* mediante el Método de Evaluación de Riesgos para contribuir a su conservación *in situ*.

Objetivos Particulares

Determinar el comportamiento de almacenamiento de las semillas de *F. flavovirens*.

Determinar los parámetros de la ecuación de viabilidad: viabilidad inicial (K_i), tiempo en que tarda en perderse la viabilidad del 50% de las semillas (P_{50}) y el tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) para determinar la longevidad potencial.

Realizar el análisis quimiométrico QUANT+ de la viabilidad de las semillas y los perfiles de ácidos grasos insaturados.

Determinar la distribución potencial de *F. flavovirens* en México empleando Maxent y sistemas de información geográfica.

Estimar el estado hábitat de *F. flavovirens* en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Estimar la vulnerabilidad intrínseca de *F. flavovirens*.

Determinar el grado de disturbio en cuatro localidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Establecer la categoría de riesgo de *F. flavovirens* de acuerdo con el Método de Evaluación del Riesgo de Extinción de Plantas de la NOM-059-SEMARNAT-2010.

Área de Estudio

El Valle de Tehuacán-Cuicatlán (VTC) se encuentra mayoritariamente en la parte sureste del estado de Puebla, así mismo en áreas colindantes con Oaxaca (figura 1) y de manera reducida dentro del estado de Veracruz; dentro de lo que Rzedowski determinó como la Región Xerofítica Mexicana del Reino Neotropical, en la Provincia Florística Tehuacán-Cuicatlán; entre las coordenadas 17° 31' 39" a 18° 52' 38" L N y los 96° 41' 5" a 97° 55' 03" L O (Rzedowski, 2006; Arriaga *et al.*, 2000). Con una extensión de 10,000 km², el VTC es la región de clima seco más sureña del país y presenta un complejo mosaico fisiográfico con valles internos, separados por numerosas cadenas de montañas, por lo cual se encuentra un poco aislada de la faja continua de las zonas áridas del Altiplano Central (Rzedowski, 2006; Dávila *et al.*, 2002).

Con respecto a la fisiografía (figura 2), el área de estudio forma parte de las subprovincias de Lagos y Volcanes de Anáhuac y la Sierra Sur de Puebla (Eje Neovolcánico). La Mixteca Alta, la Sierras Centrales de Oaxaca y la Sierra Oriental forman parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur, abarcando varios valles como Cuicatlán, Huajuapán, Tehuacán, Tepelmeme y Zapotitlán. Sus límites orográficos principales son al este y noreste la Sierra Madre Oriental, en la parte denominada como Sierra de Zongolica y la Sierra de Juárez al sur. La altura del VTC va desde los 400 a los 3200 m, aunque la media altitudinal es de 1500 msnm. (INEGI, 2001; Villaseñor, 1990; Miguel-Talonia *et al.*, 2014).

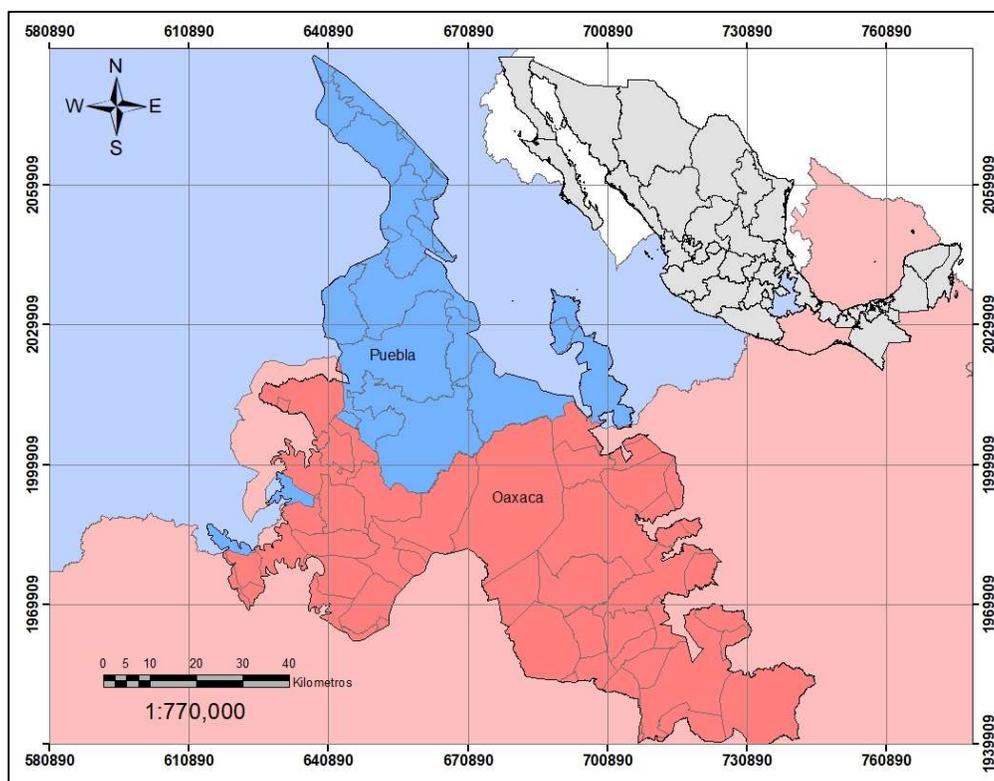


Figura 1. Región Terrestre Prioritaria del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fuente: Elaboración propia.

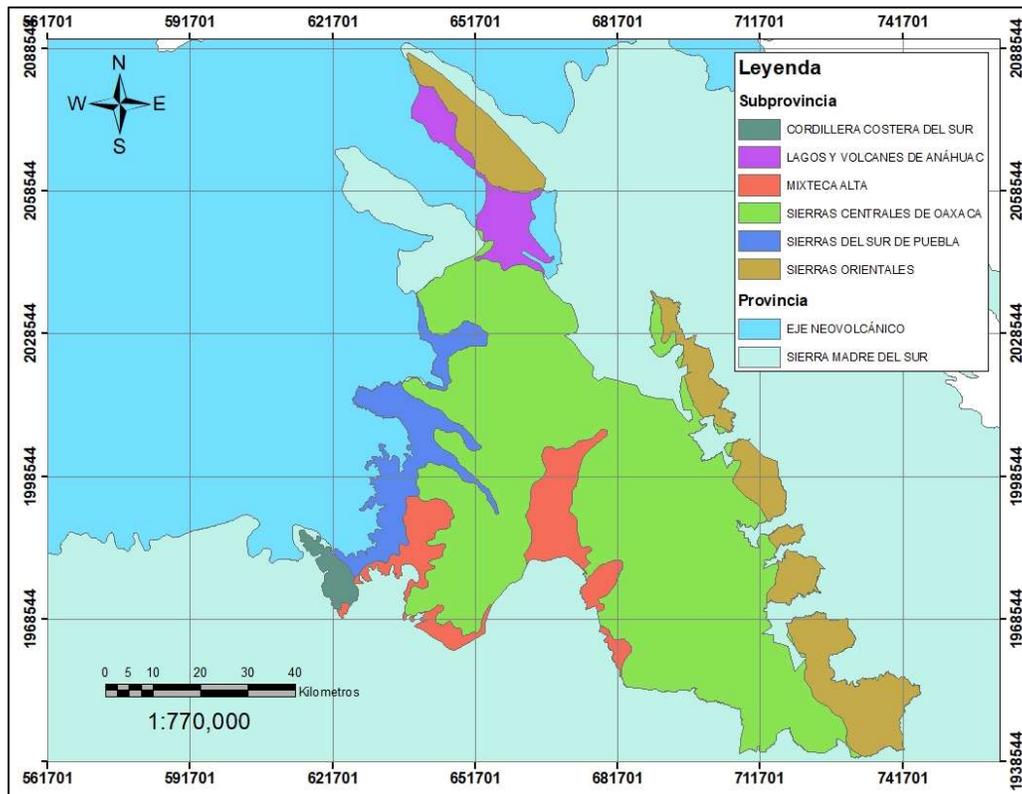


Figura 2. Provincias y subprovincias fisiográficas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fuente: Elaboración propia.

El VTC se ubica principalmente dentro de la subcuenca Papaloapan (cuenca del Río Papaloapan) y en menor medida en las subcuencas de Acatitlán-Acatepec, Huajuapán, Puebla, Río del Oro, San Sebastián Frontera, Santiago Teotongo, Totoyac, Xatan y Mixteco-Petlalingo de la cuenca del Río Balsas (Figura 3); (INEGI, 2007; CONABIO, 1998).

Por otra parte, el clima (Figura 4) presente en el VTC es árido, semiárido y templado según la clasificación de Köppen (Cuadro 1). La sombra orográfica generada por la Sierra Zongolica que forma parte de la Sierra Madre del Sur determina la aridez del VTC. La precipitación promedio anual varían entre 400-500 mm, aunque hay áreas donde se registran precipitaciones de hasta 900 mm al año; la temperatura media es de 18-22°C (CONANP, 2013; Miguel-Talonia *et al.*, 2014; Godínez-Álvarez *et al.*, 2008).

El VTC está constituido por un mosaico de comunidades vegetales cuya presencia está íntimamente ligada a las diferencias tanto en clima como en afloramientos litológicos, así como la distribución de geformas asociadas a la evolución del paisaje (Valiente-Banuet *et al.*, 2000).

Las condiciones climáticas y las transformaciones geomórficas ocurridas en el Cuaternario tardío provocaron una gran heterogeneidad ambiental característica del VTC. En lo que respecta a la vegetación, al norte del Valle predomina el bosque tropical caducifolio después del matorral xerófilo, mientras que en las partes elevadas del sur existe bosque de pino-encino

y pequeñas porciones de bosque mesófilo de montaña (Figura 5). Las diferencias de litología, suelos, altitud, etc. son parte de las condiciones ambientales donde se asientan cuando menos 29 asociaciones vegetales; siendo las más significativas: el bosques de cactáceas columnares dominados por especies como (*Cephalocereus columna-trajani*, *Escontria chiotilla*, *Neobuxbaumia tetetzo*, *Pachycereus weberiy* *Stenocereus stellatus*); los mezquiales dominados por *Prosopis laevigata* y la selva baja caducifolia dominada por *Ceiba parvifolia*, *Fouquieria formosa* y varias especies de *Bursera* y *Mimosa* (Valiente-Banuet *et al.*, 2000; Miguel-Talonia *et al.*, 2014; Godínez-Álvarez *et al.*, 2008)

Los suelos que se presentan en la región (figura 6) pertenecen a una mezcla de luvisol vértico, litosol y regosol eútrico en la región de Cuicatlán. Mientras que en la región de Quiotepec se encuentra el faozem háplico y hacia Tehuacán se presenta una combinación de litosol, rendzinas y faozem háplico. Los suelos son rocosos y se originaron a partir de rocas sedimentarias y metamórficas; están representados por las siguientes categorías: calcáreos, salinocalcáreos, yesosos y calcáreo-yesíferos, los cuales son el producto del intemperismo *in situ* (Jaramillo-Luque *et al.*, 1987; Álvarez- Aguirre *et al.*, 1997).

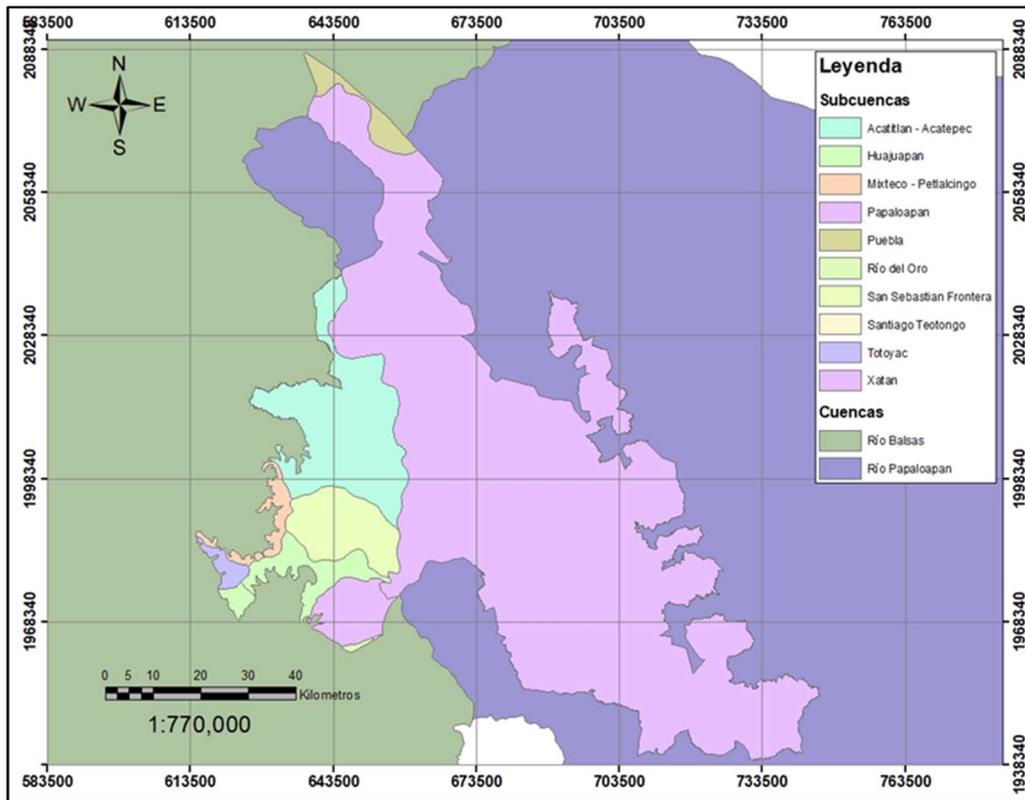


Figura 3. Cuencas y subcuencas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fuente: Elaboración propia.

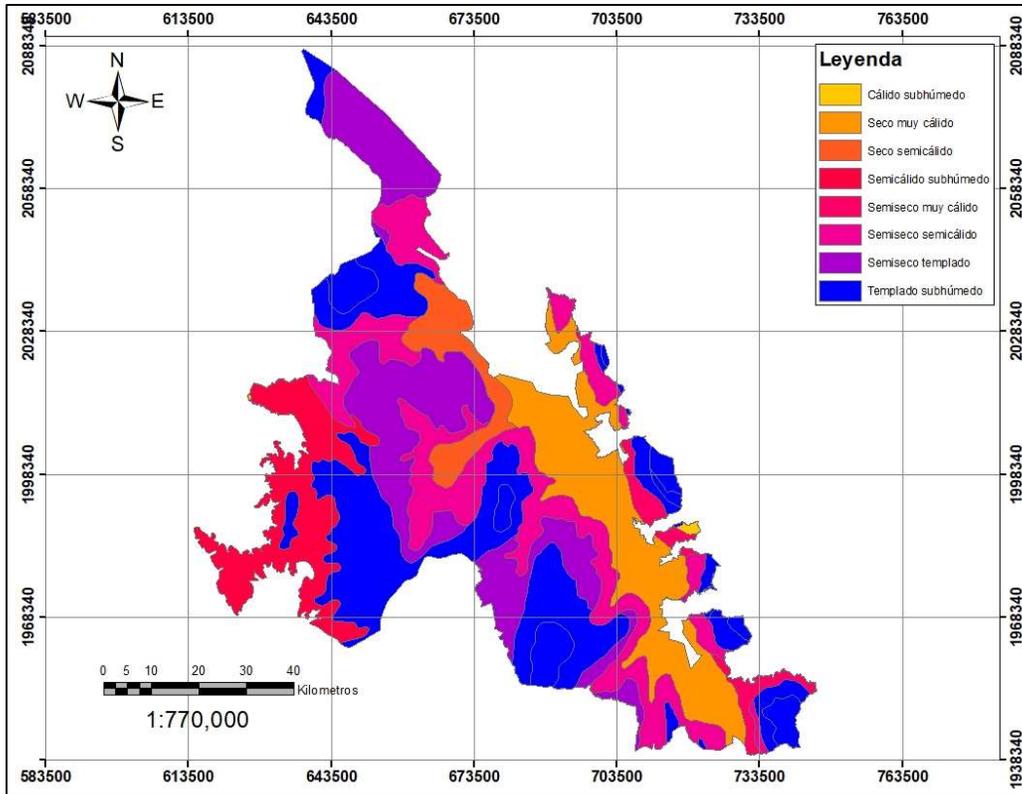


Figura 4. Tipo de climas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fuente: elaboración propia.

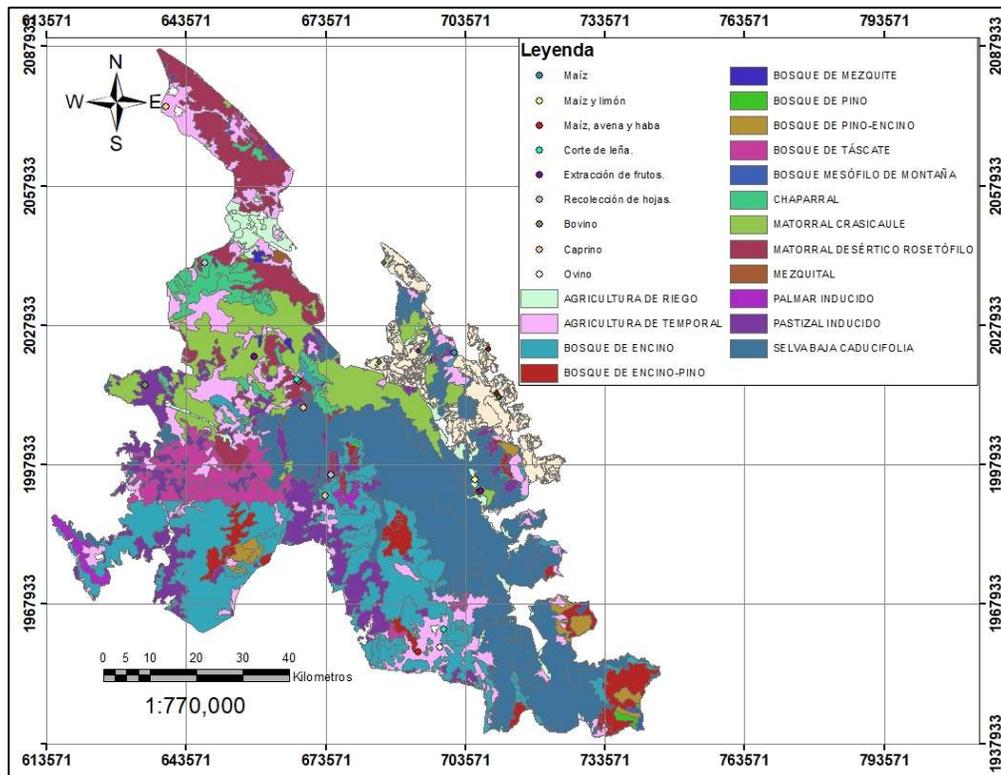


Figura 5. Uso de suelo y vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fuente: Elaboración propia.

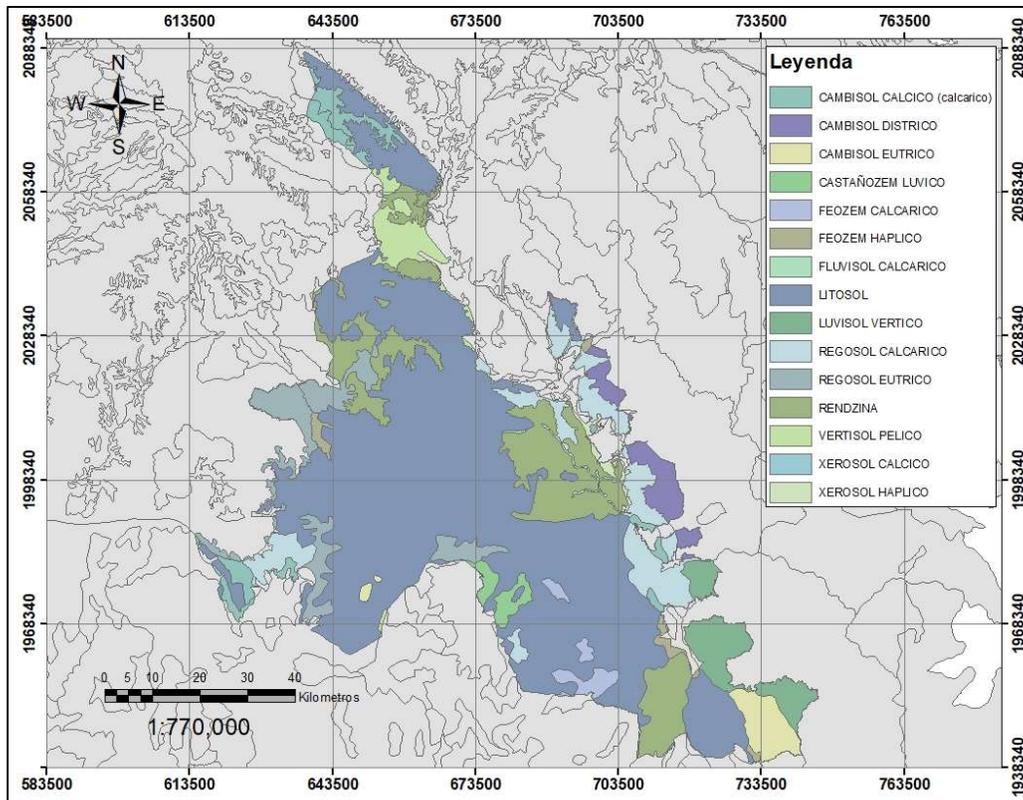


Figura 6. Suelos del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fuente: Elaboración propia

Cuadro 1. Tipos de climas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Subgrupo y tipo	Características
C(w) Templado	Temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual
BS1kw Semiárido, templado	Temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18° C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
BSohw Árido, semicálido	Temperatura entre 18°C y 22°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual
BSo(h') w Árido, cálido	Temperatura media anual mayor de 22° C, temperatura del mes más frío mayor de 18 °C; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
BS1hw Semiárido, templado	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C; con lluvias en verano del 5% al 10.2% anual.
C(w2) x' Templado	Temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano mayores al 10.2% anual.
(A)C(w)	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor

Semicálido, templado subhúmedo	de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, con precipitación anual entre 500 y 2,500 mm y precipitación del mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
BS1(h') w	Temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del 5% mes más frío mayor de 18°C; lluvias de verano del 5% al 10.2% anual.
Semiárido, cálido	

Se calcula que hay cerca de 2703 especies de plantas vasculares, de las cuales por lo menos 365 especies son endémicas representando el 13.9% de su flora (Cuadro 2). El Valle es conocido como una de las áreas áridas con una alta diversidad florística en Norte América al albergar entre el 10 y el 11.4% de la flora mexicana. El grupo con mayor diversidad del VTC es el de las dicotiledóneas al registrar 2012 especies aproximadamente, de las cuales 318 son endémicas, siendo asteraceae (345 especies), fabaceae (290), Poaceae (215), Orchidaceae (60), Cactaceae (81) y Labiatae (95) las familias más representativas del grupo (Blancas *et al.*, 2010; Dávila *et al.*, 2002).

Actualmente, dentro del valle encontramos varias comunidades indígenas nahuas, popolocas, mixtecas, ixtacatecas, mazatecas, chinatecas y cuicatecas, que con su inherente cultura han sido una fuente crucial para la documentación de proceso de usos y manejo de recursos locales. Sin embargo, la riqueza biológica del VTC se ha visto afectada de manera negativa en su composición y funcionalidad principalmente por actividades humanas, como la deforestación, la agricultura, el pastoreo de ganado y la extracción ilegal de especies endémicas; las cuales no están controladas en absoluto y algunas áreas que aún se encuentran en buen estado desde un punto de vista ecológico, hoy se encuentran amenazadas por la accesibilidad derivada de la carretera que cruza el valle de norte a sur (CONANP,2013; Dávila *et al.*, 2002)

Cuadro 2. Riqueza florística en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Dávila *et al.*, 2002).

Taxa	Familia	Género	Especie	Especies Endémicas
Angiospermas	161	862	2,521	361
- Dicotiledóneas	128	679	2,012	318
- Monocotiledóneas	33	183	509	43
Gimnospermas	4	5	9	3
Helechos y grupos afines	15	47	156	
Musgos	-	28	57	

Descripción de la especie

Familia: Cactaceae

Subfamilia: Cactoide

Tribu: Cacteeae

Nombre científico *Ferocactus flavovirens* (Scheidw.) Britton & Rose

Sinonimia *Echinocactus flavovirens* (Scheidw.); *Bisnaga flavovirens* (Scheidw.).



Figura 7. Fotografía de una colonia de *F. flavovirens*.

Ferocactus flavovirens (fig. 7), también conocida como el barril de Zapotitlán es una cactácea de color verde pálido con tallos ramificados (20-40 cm. de alto y 10-50 de ancho) con forma globosa a elíptica. Presenta 13 costillas u 11-12, raramente (1-3 cm de alto); las aréolas (1.5 cm de largo, 0.8 cm ancho) son distantes entre sí y puede tener de 12-20 espinas radiales (1.9-3.5 cm.) y 4-6 centrales (2.8 -6.5 cm.) que van de tonos rojizos (superiores) a pardo-grisáceo (inferiores). La floración ocurre entre octubre y diciembre, incluso hasta marzo; las flores tienen una apariencia roja a púrpura (2 a 4 cm. de largo); el pericarpelo y tubo receptacular con brácteas lineares a lanceoladas de margen fimbriado; las flores polinizadas comienzan a fructificar entre marzo y mayo, los frutos (1.9-2.6 cm largo y 1.1-1.3 cm ancho) son de forma elipsoide a claviforme, con pulpa jugosa de coloración púrpura y semillas (1.0-1.3 mm largo, 0.8-1.0 mm ancho) sin micro relieve. Habita en los estados de Puebla y Oaxaca en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán en el matorral xerófilo a elevaciones de 1500-1900 m (Arias *et al.*, 2012; Britton & Rose, 1963).

Materiales y métodos

Aspectos fisiológicos

Obtención de las semillas

Para las pruebas de envejecimiento acelerado y determinación del comportamiento de almacenamiento se utilizó dos lotes de semillas colectados en el mismo sitio en diferentes años. El lote colectado en marzo de 2010 en el Jardín Botánico Helia Bravo Hollis fue proporcionado por el Dr. César Alejandro Ordoñez Salanueva del laboratorio de Fisiología Vegetal, UBIPRO; almacenado en condiciones de laboratorio ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) en un frasco vial cerrado herméticamente. Por otra parte, el lote más reciente de semillas fue obtenido a partir de frutos maduros colectados directamente de las plantas madre en marzo del 2018 en la localidad de Zapotitlán Salinas y el Jardín Botánico Helia Bravo Hollis. Las semillas fueron extraídas de la pulpa y lavadas con agua corriente, se dejaron secar a temperatura ambiente y se almacenaron bajo las mismas condiciones que el lote de 2010. Así mismo, para registrar la masa de ambos lotes se pesaron 10 semillas ($n=9$) en una balanza analítica (OHAUS, PR 124) y se compararon mediante *t* de Student.

Germinación

Para las pruebas de germinación se colocaron 25 semillas ($n=4$), colectadas en el 2018, en cajas Petri con Agar (1%), posteriormente fueron selladas con parafilm y se colocaron en una cámara de crecimiento equipada con lámparas de luz fluorescente (Silvanya, Octron de 32W) a temperatura constante de $25^\circ \pm 2^\circ\text{C}$ con un fotoperiodo de 12 h luz-oscuridad. Las cajas fueron revisadas periódicamente (1-3 días), durante 30 días para registrar el número de semillas germinadas tomando como criterio la emergencia de la radícula al menos 1.5 mm. para considerar germinada una semilla (Godínez-Álvarez *et al.*, 2008).

Una vez concluido el periodo de observación, se obtuvo el porcentaje de germinación y la desviación estándar, después los valores porcentuales fueron transformados a arcoseno y ajustados a una curva exponencial sigmoide (Ec. 3). La tasa máxima de germinación (TMG) fue calculada a partir de la pendiente en el punto de inflexión (la primera derivada máxima) de las curvas sigmoidales exponenciales; posteriormente la primera derivada de la curva exponencial sigmoide se adecuó a un modelo Gausiano (Ec. 4), para obtener el tiempo medio de germinación (T_{50}); donde *b* es la tasa de germinación (derivada máxima), *c* es el tiempo promedio de germinación (tiempo en el que ocurre la derivada máxima) y *d* es la sincronía de germinación (desviación estándar de la curva gausiana) (Zar, 1974; Boas, 1983; Finkelstein *et al.*, 1986 citados por González-Zertuche *et al.*, 2002).

$$Y = \frac{a}{1 + b^{-cx}} \dots\dots\dots 3$$

$$Y = a + b^{-0.5\left(\frac{x-c}{d}\right)^2} \dots\dots\dots 4$$

El arcoseno del porcentaje de germinación final y el tiempo medio de germinación (cuya normalidad y homocedasticidad se verificaron mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Brown-Forsythe) se compararon mediante la prueba de Análisis de Varianza ANOVA ($P < 0.05$) de un factor, empleando el programa GraphPad Prism 8 versión 8.0.0 para Windows, GraphPad Software, San Diego, California USA.

Comportamiento en almacenamiento

El tipo de comportamiento en almacenamiento de las semillas se determinó mediante el protocolo establecido por Hong y Ellis (1996), con algunas modificaciones. Se obtuvo el contenido de humedad (CH), humedad relativa (HR) y la viabilidad inicial del lote de semillas colectadas en 2018 y en 2010, posteriormente se realizó la deshidratación de 100 semillas al 5% CH y se realizó la prueba de germinación para determinar si las semillas son tolerantes a la desecación, el contenido de humedad se comparó mediante la prueba de Mann Whitney ($P < 0.05$). Posteriormente, las semillas del lote colectado en 2018 fueron almacenadas a una temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 90 días y después se germinaron. Para clasificarlas como semillas: recalcitrantes, intermedias u ortodoxas, se procedió a comparar la viabilidad mediante una ANOVA de un factor ($P < 0.05$) realizada con el programa GraphPad Prism 8.

Longevidad potencial

Para predecir la longevidad potencial de las semillas se llevó a cabo el protocolo propuesto por el Millenium Seed Bank Project Kew (Newton *et al.*, 2009), es decir las semillas fueron sometidas a deterioro controlado, también llamado como envejecimiento acelerado. Se rehidrataron las semillas colectadas en 2010 y 2018 a 47% de HR a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ para evitar cambios bruscos en el contenido de humedad de las semillas. Posteriormente, el lote de semillas acondicionadas fue transferido a las cámaras de envejecimiento. Para producir las condiciones de envejecimiento acelerado se utilizaron recipientes de plástico con tapa hermética (cámaras de envejecimiento), con una solución saturada de cloruro de litio que permitió controlar las condiciones de humedad relativa, en las cuales, se introdujeron 100 semillas por día de envejecimiento dentro de frascos viales y se monitoreó la humedad con un DataLogger HOBO U12-012 Onset.Inc

En la primera etapa las semillas del lote de 2010 se sometieron a un gradiente de 30-60 % HR (a intervalos de 10%) en cuatro cámaras de envejecimiento colocadas dentro de una incubadora (Thermo Scientific Heratherm) a 45°C bajo condiciones de oscuridad y se retiraron en diferentes periodos de tiempo para cada humedad relativa para generar curvas de sobrevivencia: los periodos de envejecimiento a 30% fueron 1, 5, 10, 15, 30, 50, 60, 80, 120 y 250 días; mientras que para 40% fueron 1, 5, 15, 20, 40, 50, 60, 80, 120, y 250 días, a 50% HR fueron 1, 5, 15, 20, 30, 40, 60 y 80 días y finalmente, para 60% HR el periodo de envejecimiento acelerado fue de 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 y 80 días . Una vez concluido el periodo de tratamiento, se realizaron las pruebas de germinación y el análisis estadístico para la germinación y T_{50} señalados en la sección de *Germinación*. Para probar la existencia de

diferencias significativas en la germinación a 30-60% HR, se realizaron cuatro pruebas ANOVA de un factor (una para cada tratamiento de HR empleada), y la comparación se realizó mediante la prueba de Diferencia Honestamente Significativa de Tukey (HSD, por sus siglas en inglés) ($P < 0.05$). Asimismo, para mostrar las diferencias significativas de la T_{50} de las semillas envejecidas a 30-60% HR, se usó la prueba de Kruskal-Wallis y como posthoc se empleó la prueba de comparación múltiple de Dunn ($P < 0.05$). Todas las pruebas estadísticas fueron realizadas con el software GraphPad Prism 8.

Para la segunda etapa, se adecuaron 8 frascos de cada lote con 0.1g de semillas a 47% HR a 22°C, posteriormente 7 de los 8 frascos se colocaron en la cámara de envejecimiento a 60% HR y se retiraron una vez cumplidos 5, 10, 15, 20, 40, 60 y 80 días para posteriormente realizar las pruebas de viabilidad y la extracción de ácidos grasos. El frasco sobrante de cada lote fue tomado como grupo testigo y se mantuvo en condiciones de laboratorio. Posteriormente se realizaron las pruebas de germinación, se ejecutó el análisis estadístico de manera similar a la primera etapa y se comparó el porcentaje de germinación mediante ANOVA de dos factores considerando el año de colecta y el envejecimiento acelerado. Como pruebas posthoc se ejecutaron la prueba de Tukey ($P < 0.05$) para encontrar las diferencias significativas dentro de los lotes y la prueba de comparación múltiple de Šidák para comparar los valores entre los lotes de acuerdo con el periodo de almacenamiento con el programa GraphPad Prism 8. Los valores de la T_{50} fueron comparados mediante ANOVA de un factor y se empleó la prueba de Tukey para hallar las diferencias significativas con el programa GraphPad Prism 8.

Las curvas de sobrevivencia generadas se ajustaron a una curva exponencial sigmoide para obtener el P_{50} que es el tiempo requerido para que la germinación disminuya al 50%, este valor se utiliza para comparar la longevidad de diferentes lotes de semilla, igualmente las curvas de sobrevivencia se linealizaron transformando los porcentajes de germinación a unidades probit, posteriormente se realizó una regresión lineal con GraphPad Prism 8 para obtener la pendiente de la recta que representa el tiempo requerido para que la viabilidad del lote de semillas disminuya una unidad probit (σ) y la viabilidad inicial (K_i) (Newton *et al.*, 2009). Además, las pendientes de las rectas obtenidas fueron comparadas mediante la prueba de F de Fisher ($P < 0.05$) y la prueba t de student ($P < 0.05$) con el programa STATGRAPHICS Centurion XV (v. 15. 1. 02. StatPoint Technologies, Inc. U.S.A.).

Extracción y transesterificación de ácidos grasos de semillas.

Para la extracción de los ácidos grasos solo se emplearon las semillas sometidas a deterioro controlado en la segunda etapa. Se pesó 20 mg de semillas de cada muestra por triplicado, se maceraron en un mortero en una habitación con una temperatura a $13^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ en donde se llevó a cabo todo el proceso de extracción para evitar la oxidación. Una vez maceradas las semillas se les adicionó 1 mL de cloroformo-metanol (2:1v/v), posteriormente la mezcla fue agitada con un vortex durante 5 min., se agregó 0.2 mL cloruro de sodio al 0.9% y se centrifugó la mezcla por 5 min. a 18,000 g (14,000 rpm.) para poder separar las dos fases. Seguidamente se tomaron 100 μL de la fase orgánica y se le adicionaron 100 μL del estándar

interno de ácido heptadecanoico (1µg/mL) disuelto en metanol. Respecto a la transesterificación de los ácidos grasos extraídos, se evaporó el extracto con aire comprimido, después se agregó 0.5 mL de trifloruro de boro al 12% en metanol y se colocó en ebullición a baño maría (80°±2°C) durante 20 min. Una vez pasados los 20 minutos se retiraron las muestras del baño maría y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Consecutivamente se añadió 1 mL de hexano y 0.5 mL de agua destilada dando como resultado dos fases, de las cuales solo se recuperó la fase del hexano en un frasco vial. Finalmente, se tomó una alícuota de 2 µL y se inyectó en el cromatógrafo de gases acoplado a un espectrofotómetro de masas (CG-EM) del laboratorio de Biogeoquímica de la UBIPRO. De cada muestra inyectada se obtuvo un cromatograma y se identificaron los esteres metílicos de los ácidos grasos a través de la comparación de los tiempos de retención estándar interno y los patrones de fragmentación obtenidos de bibliotecas de referencia (Priestley *et al.*, 1985).

Análisis de ácidos grasos por CG-EM

El análisis de detección de ácidos grasos se llevó a cabo en un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 6850N) acoplado a un espectrofotómetro de masas (Agilent Technologies 5975 C), con una columna DB-5ms 30 m de largo por 0.25 mm de diámetro interno y 0.25 µm de película, el modo fue flujo constante y el flujo inicial de 1 mL/min. Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: inyección del modo *Splitless*; a una temperatura del inyector de 250°C, se usaron dos rampas de temperatura del horno programadas desde 150°C hasta 200°C con un aumento de 5°C/min y la segunda con un incremento de 3°C hasta los 240°C, la duración total por cada corrida fue de 25.33 min; la retención del solvente fue de 4 min, la temperatura de la fuente de ionización fue 230°C y la temperatura del cuádruplo de 150°C, la energía de ionización fue de 70 eV y el rango de masas fue 35-400 m/z. Se empleó helio (He) como gas acarreador a una velocidad de 38 cm/s y presión de 13 psi. La determinación de los componentes se realizó con base a datos de la biblioteca NIST 8.0. (Rogel, 2008). Una vez que se identificaron los ácidos grasos y se calcularon sus concentraciones, estos fueron comparados empleando ANOVA de dos factores ($P < 0.05$) y como pruebas posthoc, se realizó la prueba HSD de Tukey y la prueba de comparación múltiple de Šidák.

Registro del espectro infrarrojo cercano (NIRS) en las semillas y modelo Quimiométrico QUANT+

Se realizaron los registros de los espectros de infrarrojo utilizando un espectrofotómetro Frontier (Marca Perkin Elmer). El rango de longitud de onda que se empleó es de 4000-10000 cm^{-1} , 32 scans, resolución de 4 cm^{-1} . Se usó bromuro de potasio (KBr) como blanco. Para la obtención de los espectros se colocó 0.1 g de semillas en la macrocopia portamuestra del accesorio de reflectancia difusa para cubrir toda la superficie y poder leer en el espectro infrarrojo. Posteriormente los resultados se integraron con el programa QUANT+ para el análisis quimiométrico para determinar el grado de correlación existente entre los espectros específicos de cada muestra y los datos obtenidos, asignándoles el valor de la concentración de los ácidos grasos y de la germinabilidad de cada tratamiento empleando mínimos cuadrados

parciales (PLS) realizando una previa calibración en la correlación de la línea base (Rogel, 2008). Para determinar si la correlación entre las imágenes espectrales y los datos experimentales de cada muestra son significativos, se realizó una prueba T de student para cada variable.

Aspectos Ecológicos

Método de Evaluación de Riesgos de Extinción (plantas)

La Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010) establece los criterios por los cuales es posible determinar el estado de conservación que puede presentar una especie, o bien estimar el riesgo de extinción de los grupos taxonómicos o especies, a través de la aplicación del Método de evaluación del riesgo de extinción de las especies silvestres en México (MER) (Sánchez-Salas *et al.*, 2012). Este método unifica cuatro criterios independientes de decisión sobre las categorías de riesgo.

Criterio A. Amplitud de la distribución del taxón en México (Características de la distribución geográfica)

El cual se refiere al tamaño relativo del ámbito de distribución natural actual en México y considera cuatro gradaciones:

- I)** Muy restringida = 4 Se aplica tanto para especies microendémicas como para especies principalmente extraliminales con escasa distribución en México (menor a 5% del Territorio Nacional).
- II)** Restringida = 3 Incluye especies cuyo ámbito de distribución en México se encuentra entre el 5 y el 15% del Territorio Nacional.
- III)** Medianamente restringida o amplia = 2 Incluye aquellas especies cuyo ámbito de distribución es mayor que el 15%, pero menor que el 40% del Territorio Nacional.
- IV)** Ampliamente distribuidas o muy amplias = 1 Incluye aquellas especies cuyo ámbito de distribución es igual o mayor que el 40% del Territorio Nacional.



Figura 8. Fotografía satelital de las localidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán muestreadas. Cada icono indica la ubicación de los transectos realizados.

Para establecer la puntuación del criterio A se determinó la distribución potencial actual, se realizó el modelado de nicho ecológico (MNE) de *F. flavovirens* con el objetivo de obtener los patrones de distribución potencial, para ello se utilizaron las ocurrencias georeferenciadas, en grados decimales, de las localidades de San Juan Raya, Zapotitlán Salinas, Los Reyes Mezontla y San Antonio Texcala (figura 8) del VTC determinadas durante las visitas a campo realizadas en abril del 2019, y los registros de *F. flavovirens* obtenidos a partir de las bases de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Naturalista, Enciclovida la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB) y el banco de datos del Herbario Nacional de México (MEXU).

Igualmente, se usaron coberturas digitales a una resolución de 1 km² de 19 variables ambientales generadas para México (Fick & Hijmans, 2017), el tipo de suelo y la altitud (INEGI, 2017a; INEGI, 2017b) (Cuadro 3) para alimentar el algoritmo Maximum entropy modeling mejor conocido como MaxEnt (Versión 3.4.1), el cual se configuró para realizar 25 repeticiones del modelo. Todas estas variables bioclimáticas fueron cargadas simultáneamente en conjunto con las coordenadas de los registros de ocurrencia. El programa proporciona el valor de la curva Característica Operativa del Receptor (ROC, por sus siglas en inglés) y el Área Bajo la Curva (AUC, por sus siglas en inglés), el cual muestra la bondad del ajuste de los modelos con valores que pueden estar entre 0 y 1, donde un valor de 0.5 significa que el modelo presenta una clasificación al azar, y un valor de 1 indica que el modelo ha separado presencias de ausencias con un ajuste perfecto (Phillips *et al.*, s.f.; Ballesteros-Barrera *et al.*, 2017). Así mismo, con la finalidad de estimar cuales son las variables más importantes en el modelo, se configuro MaxEnt para realizar una prueba de jackknife.

Una vez obtenido el MNE, con el programa ArcMap 10.5 (ESRI, 2011) se transformarán los mapas arrojados por MaxEnt a mapas digitales binarios (presencia/ausencia), donde:

- un valor igual a 1 refiere una posible presencia (hábitat idóneo)
- un valor de 0 es igual a ausencia (hábitat no idóneo).

Se consideró como umbral el 25% para maximizar la sensibilidad y minimizar la especificidad, lo que mostraría solo los píxeles que son iguales o mayores al valor establecido. Al mapa binario se le eliminaron las áreas que representan un hábitat perturbado teniendo como referencia el conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación (Escala 1:250 000 Serie VI) (INEGI, 2017a). Posteriormente se identificaron las áreas que actualmente presentan algún estado de conservación o hábitat apropiado para *F. flavovirens* y se calculó el porcentaje de área de presencia correspondiente al Valle de Tehuacán Cuicatlán y el área resguardada dentro de RBTC sobreponiendo los mapas de la extensión de Áreas Naturales Protegidas de México (ANP) (CONANP, 2017; Ballesteros-Barrera *et al.*, 2017).

Cuadro 3. Coberturas digitales que se usaron en el modelo de distribución geográfica potencial de la especie *Ferocactus flavovirens*

Clave	Variables ambientales
Bio 1	Temperatura media anual (°C).
Bio 2	Oscilación diurna de la temperatura (°C).
Bio 3	Isotermalidad (°C).
Bio 4	Temperatura estacional (coeficiente de variación) (%).
Bio 5	Temperatura máxima del mes más cálido (°C).
Bio 6	Temperatura mínima del mes más frío (°C).
Bio 7	Oscilación anual de la temperatura (°C) (cociente entre parámetros 5 y 6).
Bio 8	Temperatura media del trimestre más húmedo (°C).
Bio 9	Temperatura media del trimestre más seco (°C).
Bio 10	Temperatura media del trimestre más cálido (°C).
Bio 11	Temperatura media del trimestre más frío (°C).
Bio 12	Precipitación anual (mm).
Bio 13	Precipitación del mes más húmedo (mm).
Bio 14	Precipitación del mes más seco (mm).
Bio 15	Precipitación estacional (coeficiente de variación) (%).
Bio 16	Precipitación del trimestre más húmedo (mm).
Bio 17	Precipitación del trimestre más seco (mm).
Bio 18	Precipitación del trimestre más cálido (mm).
Bio 19	Precipitación del trimestre más frío (mm).
Variables topográficas	
	Tipo de Suelo
	Altitud (m)

Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón (Características del hábitat).

Definido como el conjunto actual estimado de efectos del hábitat particular, con respecto a los requerimientos conocidos para el desarrollo natural del taxón que se analiza, en términos de las condiciones físicas y biológicas. Se categoriza en tres valores:

- I) hostil o muy limitante = 3
- II) intermedio o limitante = 2
- III) propicio o poco limitante = 1

El estado del hábitat se caracterizó mediante las visitas realizadas en abril del 2019 a las localidades de Zapotitlán Salinas, San Juan Raya, Los Reyes Mezontla y San Antonio Texcala. En cada localidad se determinó la altitud, la inclinación (%) y perfil de la pendiente, las especies vegetales dominantes y el tipo de vegetación, la cual fue confirmada con la Guía de Vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Valiente-Banuet *et al.*, 2009). Igualmente se registró de manera cualitativa la frecuencia (ninguna, escasa, frecuente, abundante y dominante), tamaño (pequeño, mediano, grande, muy grande) y tipo (gravas, cantos rodados, fragmentos de alterita, otros) de pedregosidad superficial y la cobertura vegetal (%) (Valverde *et al.*, 2009).

Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón.

Referido como el conjunto de factores relacionados con la historia o forma de vida del taxón, que lo hacen vulnerable. Dependiendo de la disponibilidad de información específica, algunos ejemplos de tales factores pueden ser: estrategia reproductiva, parámetros demográficos más relevantes, historia de vida, fenología, intervalos de tolerancia, parámetros fisicoquímicos, aspectos alimentarios, variabilidad genética, grado de especialización, tasa de reclutamiento, efecto nodriza, entre otros. Este criterio considera tres gradaciones:

- I) vulnerabilidad alta = 3
- II) vulnerabilidad media = 2
- III) vulnerabilidad baja = 1

Los factores que hacen vulnerable a un taxón varían en función de la historia de vida de cada especie (Sánchez-Salas *et al.*, 2013), por lo que para evaluar el criterio C se consideró la densidad, estructura de tamaños, la proporción de individuos bajo protección vegetal, la fenología y germinación.

Densidad, estructura de tamaños y proporción de individuos bajo protección vegetal.

Se trazaron de 2 a 3 transectos de 5 x 50 m. en cada localidad; se registró la ubicación geográfica de cada individuo encontrado usando un GPS Garmin xTrex 10 (Datum WGS86). Se contabilizó el número de tallos y con un flexómetro se midió el diámetro mayor (DM), el diámetro menor (Dm) y la altura (h) de los individuos (Godínez-Álvarez *et al.*, 2008). El volumen (m³) de los individuos censados fue calculado con la siguiente ecuación (Ec. 5):

$$V = (2 \pi / 3) \times DM \times Dm \times h$$

5

La densidad fue estimada como el número total de plantas registradas en un transecto dividido por su área y multiplicada por 100. Los valores obtenidos para las cuatro localidades fueron comparados mediante la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($P < 0.05$), se realizó la comparación de rangos con una gráfica de cajas y bigotes.

Por otra parte, la estructura de la población se determinó clasificando a los individuos censados en categorías de tamaños con base a su número de tallos y a su volumen (m^3). Con los datos obtenidos se construyó una tabla de contingencia y se realizó una transformación angular. Posteriormente se realizó la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Bartlett para verificar la normalidad y homocedasticidad de los datos. Las frecuencias transformadas fueron comparadas de acuerdo con la localidad y a la categoría de tamaños de manera separada mediante ANOVA de un factor ($P < 0.05$) y para el post hoc se empleó la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher (LSD, por sus siglas en inglés) STATGRAPHICS Centurion XV (v. 15. 1. 02. StatPoint Technologies, Inc. U.S.A.).

Durante el censo de los individuos se registró cuáles fueron encontrados en espacios abiertos (EA) y debajo de arbustos (DA). Con estos datos se calculó la proporción porcentual de los individuos EA y DA existente en la población de las cuatro localidades visitadas (Valverde *et al.*, 2009).

Fenología y germinación

Para identificar los meses de floración y fructificación se realizó una revisión bibliográfica y se complementaron los datos con las observaciones realizadas en campo durante las visitas al Valle de Tehuacán-Cuicatlán en octubre del 2017, marzo del 2018 y abril del 2019. Por otra parte, se obtuvo el número de semillas por fruto a partir de 12 frutos colectados en marzo del 2018 (Valverde *et al.*, 2009). Los datos correspondientes a la germinación fueron tomados a partir de los resultados obtenidos en el apartado de *Germinación*.

Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre el taxón.

Es una estimación numérica de la magnitud del impacto y la tendencia que genera la influencia humana sobre el taxón que se analiza. Considera aspectos como la presión por asentamientos humanos, fragmentación del hábitat, contaminación, uso, comercio, tráfico, cambio del uso de suelo, introducción de especies exóticas, realización de obras de infraestructura, entre otros. Este criterio considera tres gradaciones:

- I) alto impacto = 4
- II) impacto medio = 3
- III) bajo impacto = 2

En este criterio se determinó el daño antrópico del hábitat de *F. flavovirens* mediante el método de evaluación de disturbio para *Mammillaria pectinifera* propuesto por Martorell & Peters (2004) con algunas modificaciones. En cada localidad se colocarán 4 a 6 transectos de 50 metros de largo, la mitad fueron colocados de manera paralela a la pendiente y los restantes se colocaron perpendicularmente, formando de 2 a 3 cruces. Posteriormente se evaluaron los agentes de disturbio (ganadería, actividades humanas y deterioro de hábitat) de acuerdo con los indicadores de señalados en el cuadro 4. Se evaluaron 10 de los 15 indicadores propuestos a causa de que varios de ellos no se encontraron presentes en todas las localidades visitadas.

Cuadro 4. Agentes e indicadores de disturbio evaluados en cuatro localidades del VTC.

Agente e indicador	Descripción del indicador
Ganadería	
Densidad de excretas de cabra u oveja (CABR)	Frecuencia de excremento de cabra en 10 m ² seleccionados de manera aleatoria.
Densidad de excretas de ganado mayor (GANO)	Frecuencia de excremento de ganado mayor en 10 m ² seleccionados de manera aleatoria.
Fracción de plantas ramoneadas (RAMO)	Frecuencia de arbustos con evidencia de ramoneo dividido por el número total de arbustos dentro del transecto.
Caminos ganaderos (CLAN)	Numero de caminos ganaderos que atraviesan al transecto.
Compactación del suelo por ganado (COMP)	Proporción entre el tiempo de infiltración de 250 mL en el suelo con signos de pisoteo con respecto al que no muestra evidencia de pisoteo.
Actividades humanas	
Fracción de plantas macheteadas (MACH)	Frecuencia de arbustos con evidencia de macheteo dividido por el número total de arbustos dentro del transecto.
Caminos humanos (CAHU)	Número de caminos ganaderos que atraviesan al transecto
Cobertura de caminos humanos (CCHU)	Porción de la extensión (m) de caminos humanos con respecto al largo del transecto.
Cercanía de poblaciones (POBL)	Inverso multiplicativo de la distancia en kilómetros a la población más cercana
Deterioro del hábitat	
Erosión (EROS)	El porcentaje de la superficie que estaba erosionada con respecto al total del transecto. Se considero la exposición de la roca y la presencia de cárcavas.

Una vez que se evaluaron los agentes de disturbio en campo, los datos se estandarizaron restando el promedio y dividiéndolos sobre su desviación estándar. Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales (ACP) mediante el programa (STATGRAPHICS Centurion XV (v. 15. 1. 02. StatPoint Technologies, Inc. U.S. A.), y los coeficientes obtenidos fueron sumados de acuerdo con el agente de disturbio correspondiente; la sumatoria de todos los agentes de disturbio correspondiente a cada localidad representa su índice de disturbio (ID). Una vez que el ID fue calculado, este se reescaló (ID_r) tomando como 0 al ID de menor valor y 100 al ID de mayor valor. Para determinar la susceptibilidad al disturbio de *F.*

flavovirens se analizó el efecto del nivel de disturbio (IDr) sobre la densidad de todas las localidades, mediante un modelo lineal generalizado con una distribución Poisson y una función de enlace logarítmica (Valverde et al., 2009) mediante el programa (STATGRAPHICS Centurion XV (v. 15. 1. 02. StatPoint Technologies, Inc. U.S.A.).

Posteriormente a la determinación del puntaje correspondiente a cada criterio del MER, estos deben ser sumados y según sea el resultado se asignará la categoría de riesgo:

1. Un taxón cuya suma total se sitúe entre 12 y 14 puntos será considerado como En peligro de extinción (P).
2. Aquél cuya suma total sea entre 10 y 11 puntos será considerado como Amenazado (A).
3. En caso de que los especialistas proponentes hayan determinado que una especie requiera de protección para su conservación, y al aplicar el MER no obtenga un puntaje mayor o igual a 10, se debe argumentar y documentar de manera formal su propuesta de inclusión a la categoría Sujeta a protección especial (Pr) de acuerdo con la información y con los criterios especificados en los numerales 5.7 y 6 de la norma.

Resultados

Aspectos fisiológicos

Comportamiento en almacenamiento

En el cuadro 5 se muestran las características físicas y fisiológicas de dos lotes de semillas de *F. flavovirens*, los datos obtenidos muestran que la masa registrada en el lote colectado en 2010 es mayor con respecto al obtenido en 2018 ($t_{(18)} = 3.791$, $P = 0.0013$), así mismo se observa que la humedad relativa y la germinación inicial tienden a ser ligeramente mayores para el lote colectado en el 2010 con respecto a los de 2018. Con respecto al contenido de humedad, se observa que el lote colectado en el 2018 tiene un contenido de humedad (8.86 ± 1.96 %) menor con respecto al de las semillas almacenadas desde el 2010 (9.39 ± 4.82 %); sin embargo, no representa una diferencia significativa ($U = 18.50$, $P = 0.6309$).

Cuadro 5. Características físicas y fisiológicas de las semillas de *F. flavovirens*.

Lote	Masa* (mg)		HR (%)	CH (%)		Gi (%)		Comportamiento de almacenamiento
	media	DE		media	DE	media	DE	
Colectado en 2010	3.5	0.1	45.8	9.39	4.82	79.7	9.0	Ortodoxo
Colectado en 2018	3.2	0.2	42.1	8.86	1.96	79	19.9	

HR=Humedad Relativa del lote de semillas a temperatura ambiente, CH=contenido de humedad de las semillas, Gi=Germinación Inicial, DE= desviación estándar. *Cada repetición de la Masa consta de 10 semillas.

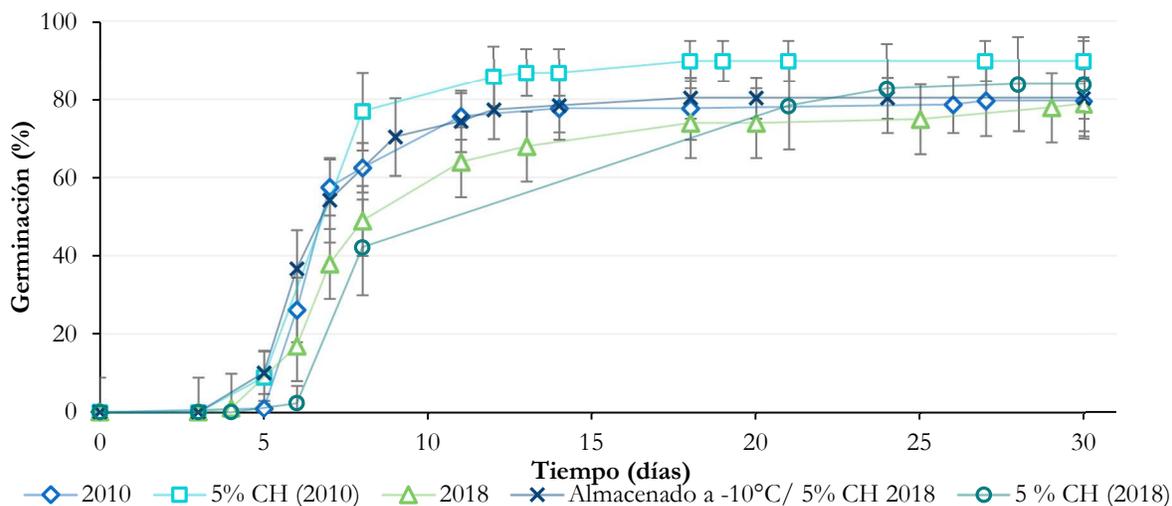


Figura 9. Promedios de la germinación inicial acumulada en semillas de *F. flavovirens* de lotes colectados en 2010 y 2018, la germinación acumulada de las semillas deshidratadas a 5% de CH de ambos lotes y la germinación de las semillas del lote colectado en 2018 almacenadas a -10°C durante 90 días posterior a su deshidratación a 5% CH. Las barras señalan la desviación estándar ($n=4$).

En la figura 9 se observa que los porcentajes de germinación inicial de ambos lotes son muy cercanos entre ellos 79 % (± 19.9) y 79.7% (± 9.01) para las semillas colectadas en 2018 y en el 2010, respectivamente. También se encontró que la germinación de las semillas deshidratadas a 5% CH del lote de 2010 fue del 90 % (± 5.16), mientras que las semillas colectadas en el 2018 a 5% CH germinaron en un 84.05 % (± 12.11) y 80.44% (± 5.30) cuando estas fueron almacenadas durante 90 días a -10°C . No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los porcentajes de germinación de los tratamientos ($F_{(4,15)} = 0.6255$, $P = 0.6516$), por lo que se determinó que las semillas de *F. flavovirens* presentan comportamiento en almacenamiento de tipo ortodoxo.

Longevidad potencial

La figura 10A. muestra la disminución en el porcentaje de germinación en todos los tratamientos conforme se incrementa el periodo de deterioro controlado (también mencionado como envejecimiento acelerado); la germinación disminuye significativamente en los tratamientos con humedad relativa de 60 % ($F_{(10, 33)} = 79.672$, $P < 0.0001$), 50% ($F_{(11, 36)} = 20.84$, $P < 0.0001$), 40% ($F_{(9, 30)} = 5.01$, $P = 0.0004$), no obstante, el decrecimiento en la germinación de las semillas expuestas a 30% HR no es estadísticamente significativo ($F_{(9, 30)} = 0.37$, $P = 0.9416$) durante el periodo estudiado. Con arreglo a la prueba HSD es posible ubicar dos grupos con diferencias significativas, los primeros 20 días de envejecimiento acelerado respecto al periodo comprendido entre los 30-80 días donde la germinación se redujo 78 unidades. La mayor germinación se presentó a los 15 días (91.12 % ± 3.7) y la menor en el día 60 (6.8 % ± 3.7) cuando las semillas son expuestas a 60% HR. En el caso de 50% HR, se observa mayor germinación entre los días 1-15, mostrando diferencias con la obtenida entre los 120-190 días de envejecimiento; así mismo, el decremento en la germinación registrada a los 250 días de deterioro controlado (7% ± 2) difiere estadísticamente con todos los periodos de deterioro controlado estudiados para el tratamiento de 50% HR. De manera similar, a 40% HR, la germinación entre los 1-15 días de deterioro controlado presenta diferencias a los valores obtenidos a los 120 y 250 días de envejecimiento, el porcentaje de germinación fue mayor en el día 15 (87.86 % ± 7.1) y el menor (50.95 % ± 15.18) se registró a los 250 días de envejecimiento acelerado.

Además, se encontró que la T_{50} en un gradiente de humedad relativa (figura 10B.) aumenta en todos los tratamientos al incrementar el periodo de envejecimiento acelerado. Durante el periodo de deterioro controlado a 60% HR la T_{50} correspondiente al día 1 de envejecimiento presentan diferencias significativas ($H = 23.86$, $P = 0.0012$) respecto a los 30 días en los cuales se observa que el periodo de tiempo necesario para que se alcance el 50% de germinación aumentó 5 días. En el tratamiento de 50% HR se determinó que la T_{50} paso de 6.80 (± 0.16) días a las 24 horas de envejecimiento alcanzando su mayor valor a los 160 días (20.897 ± 12.06); las diferencias significativas se encontraron en los valores correspondientes al primer día de envejecimiento con respecto a los 40 y 120 días ($H = 31.80$, $P = 0.0004$). El T_{50} de semillas deterioradas a 40% HR va de 7.3 (± 0.7) días en el primer día de envejecimiento y alcanza su valor máximo a los 250 días de envejecimiento (21.51 días ± 2.8); además, de acuerdo con la

prueba de Dunn, las diferencias son significativas al día 15 con respecto al 250 ($H = 26.95$; $P = 0.0014$). La T_{50} a 30% de HR va de 6.495 días (± 0.8837) a los 30 días bajo envejecimiento acelerado y alcanza su valor máximo de 10.63 días (± 2.744) a los 80 días bajo tratamiento, se encontró que los valores difieren significativamente a los 30 días con respecto a los 15 y 250 días de envejecimiento acelerado ($H = 30.39$, $P = 0.0004$).

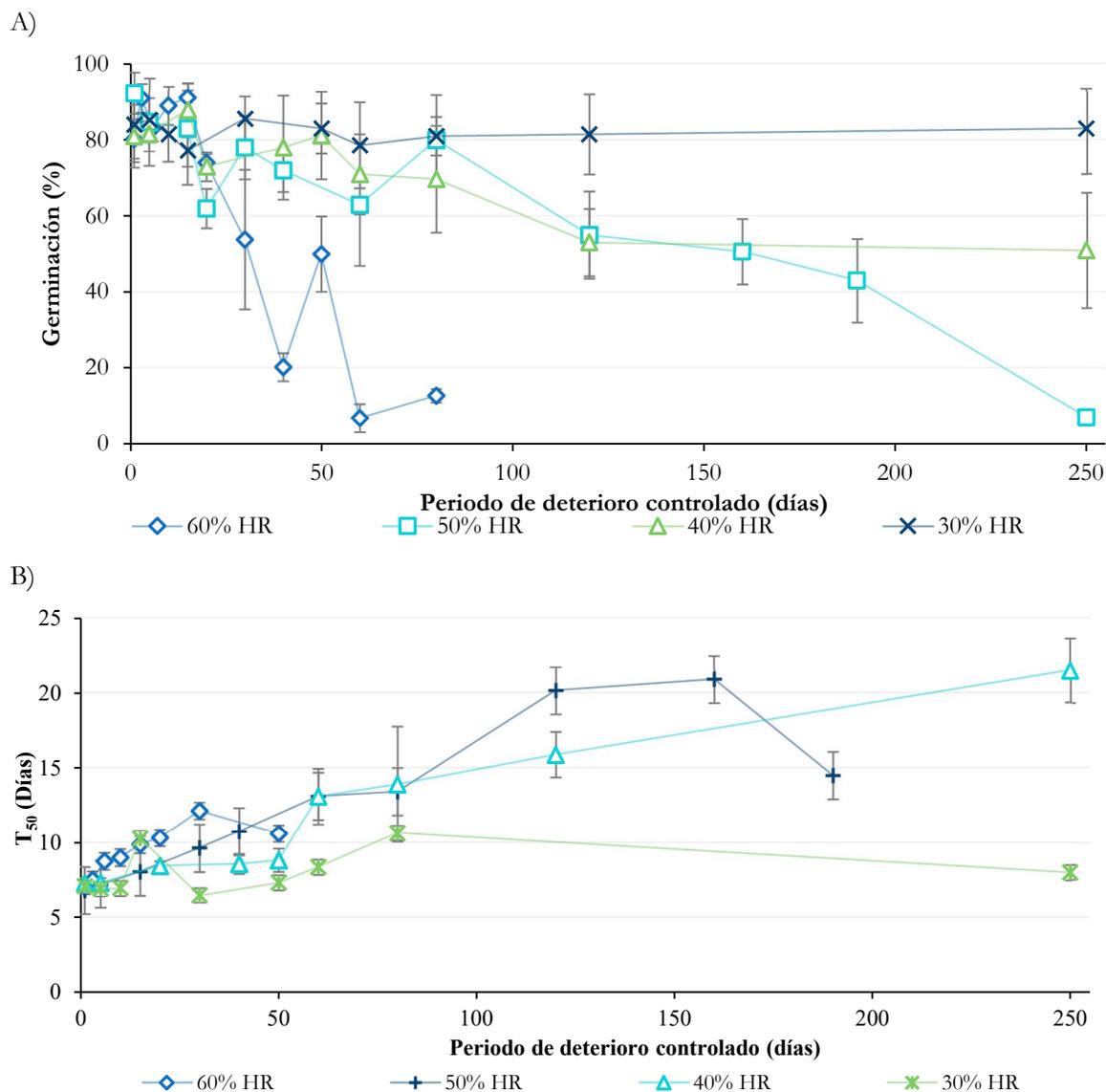


Figura 10. Medias de la germinación (A) y la velocidad de germinación (T_{50}) (B) de las semillas de *F. flavovirens* colectadas en el 2010 sometidas a un gradiente de humedad relativa (60-30 %) a 45 °C durante diferentes periodos de envejecimiento acelerado. Las barras señalan la desviación estándar ($n=4$).

El modelo de la longevidad potencial de las semillas usando la transformación probit (figura 11) de la germinación mostró que, no solo el periodo de envejecimiento afecta la viabilidad, el incremento de la humedad relativa abate la viabilidad de la semilla y por lo tanto su germinación, siendo a 60% HR el tratamiento con la mayor pendiente (-0.0354 ± 0.0055),

mientras que las semillas expuestas a 30% HR no muestran pérdida de viabilidad (0.0002 ± 0.0005).

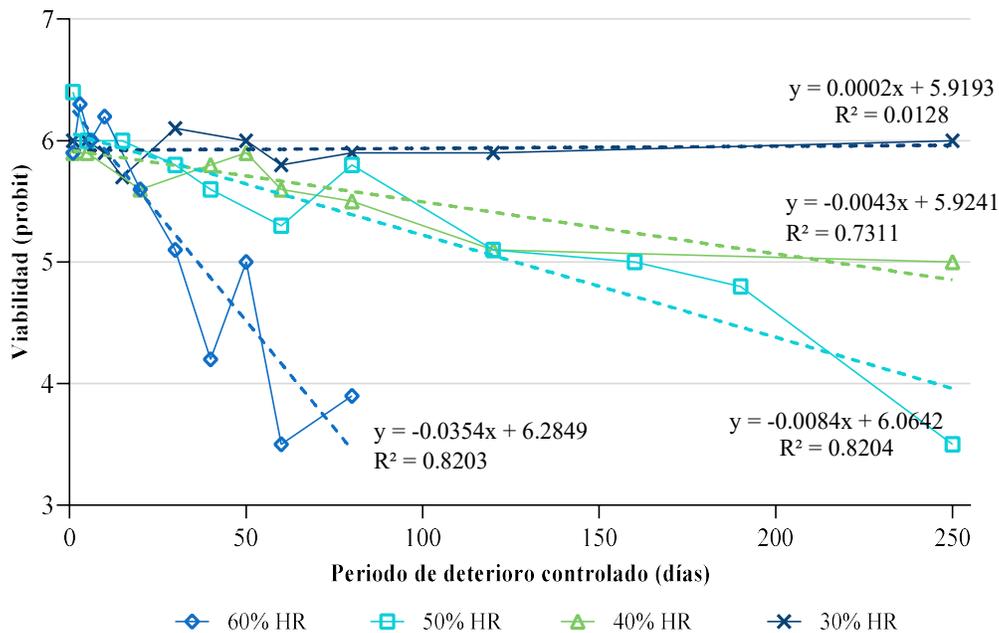


Figura 11. Análisis PROBIT de la viabilidad de las semillas de *F. flavovirens* en un gradiente de humedad relativa (60-30 %) a 45 °C durante diferentes periodos de envejecimiento acelerado.

La transformación de la media de la germinación a unidades probit y su posterior análisis mediante regresión lineal mostró un comportamiento lineal de la pérdida de viabilidad de las semillas (figura 11 y figura 13). La linealización de los datos a través del análisis probit permitió obtener los parámetros de las ecuaciones de viabilidad y dio pauta para que el efecto de los tratamientos de envejecimiento acelerado se comparará entre los mismos mediante sus pendientes.

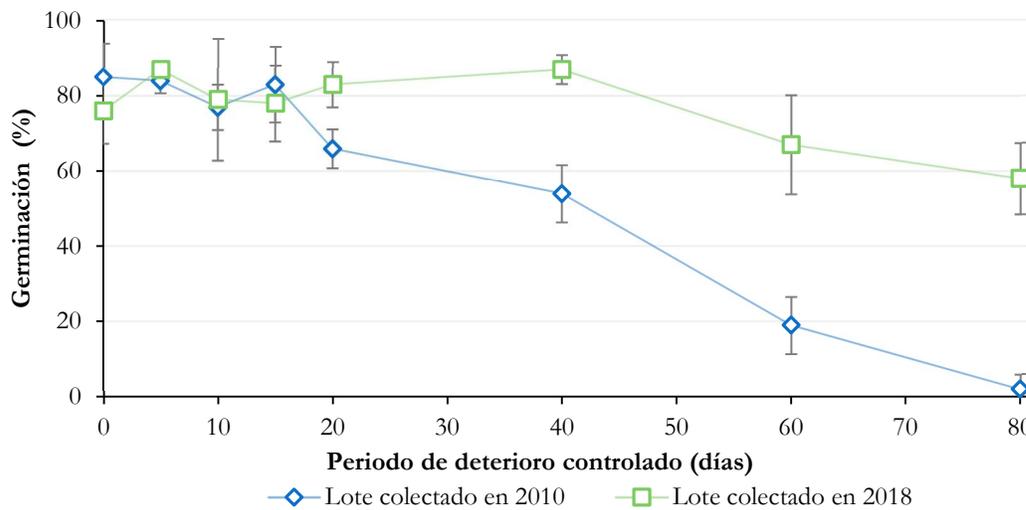
Se encontraron diferencias significativas en la comparación de pendientes entre todos los tratamientos. La pendiente obtenida a 60% HR difiere con respecto a las pendientes obtenidas a 50 % HR ($F_{(9, 10)} = 19.62$; $t = 4.764$), 40% HR ($F_{(9,8)} = 36.17$; $t = 5.58$) y 30 % de HR ($F_{(9,8)} = 106.11$, $t = 6.411$), mientras que la pendiente de la recta obtenida a 50%HR es diferente con respecto al valor correspondiente a 40% HE ($F_{(10,8)} = 1.843$, $t_{(20)} = 2.676$) y a 30% ($F_{(10,8)} = 5.408$, $t_{(20)} = 6.336$). Igualmente, la pendiente de la recta a 40% HR y 30% HR difieren entre ellas de manera significativa ($F_{(8,8)} = 2.93$, $t_{(18)} = 4.19$).

La germinación de las semillas de *F. flavovirens* colectadas en diferentes años (figura 12A.) se vio influenciada no solo por el periodo de envejecimiento acelerado, sino que el año de colecta y su interacción con el periodo de envejecimiento acelerado generaron diferencias estadísticamente significativas en los porcentajes de germinación ($F_{(1, 48)} = 67.81$ $P < 0.0001$; $F_{(7,48)} = 17.06$, $P < 0.0001$).

Las semillas del grupo control de los lotes colectados en 2010 y 2018 de las semillas de *F. flavovirens* manifestaron una germinación inicial del 85 % (± 8.87) y 76 % (8.64)

respectivamente, mientras que a los 80 días de envejecimiento el lote del 2010 germinó 2 % (± 4), y las semillas colectadas en el 2018 germinaron 58% (± 9.52). De acuerdo con a la prueba HSD, se identificó que la germinación del lote del 2010 de 0 a 15 días de deterioro controlado disminuye con respecto a los valores obtenidos a los 40 días de envejecimiento, además el porcentaje de germinación registrado a los 60 y 80 días decrece significativamente en comparación con los demás tratamientos del 2010. Para el lote colectado el 2018 se encontró que la germinación a los 80 días disminuyó en comparación con la obtenida a los 5-40 días de deterioro. Por otro lado, la prueba de comparación múltiple de Sidak arroja que el porcentaje de germinación del lote de 2018 a los 40-80 días de tratamiento es significativamente mayor que la registrada para el lote de 2010 al mismo periodo de envejecimiento acelerado (figura 12 A).

A)



B)

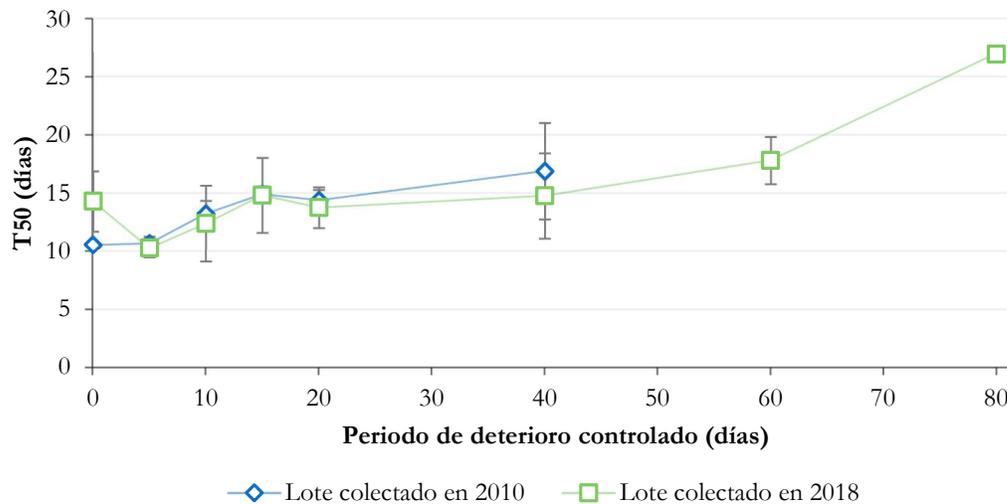


Figura 12. Medias de la germinación (A) y la velocidad de germinación (T_{50}) (B) de las semillas de *F. flavovirens* con diferente grado de envejecimiento natural durante diferentes periodos de envejecimiento acelerado a 60% HR y 45°C. Las barras señalan la desviación estándar ($n=4$).

Respecto a la velocidad de germinación de las semillas con diferente edad a 60% HR/ 45°C (figura 12B.), esta se reduce tanto en el lote de 2010 ($F_{(5,16)} = 12.03, P < 0.0001$) como en el colectado en el 2018 ($F_{(7,22)} = 12.71, P < 0.0001$) conforme el periodo de deterioro controlado es mayor. Se encontró que la T_{50} de los primeros 5 días contrasta significativamente con los valores obtenidos entre los 15-40 días de envejecimiento de las semillas colectadas en el 2010, pasando de 10.56 días (± 0.26 ; 0 días de deterioro) a 16.91 días (± 4.13 , 40 días de deterioro). Igualmente, la velocidad de germinación correspondiente a los 80 días de envejecimiento de las semillas colectadas en 2018 varía significativamente con el resto de las muestras para ese lote, la T_{50} fue de 14.31 días (± 2.58) a los 0 días de tratamiento y 27 días (± 0.43) a los 80 días de deterioro controlado.

El análisis probit de la viabilidad (figura 13) mostró que la pérdida de viabilidad de las semillas colectadas en el 2010 (-0.0379 ± 0.0036) es mayor que las que fueron colectadas en el 2018 (-0.008 ± 0.0033), además se encontró que las pendientes difieren significativamente ($F_{(6,6)} = 1.22; t = 6.1$). Una vez obtenidas las ecuaciones de los análisis probit realizados, se calculó la viabilidad inicial (K_i), el tiempo en que tarda en perderse la viabilidad del 50% de las semillas (P_{50}) y el tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) (cuadro 6). Los valores de la viabilidad inicial fueron altos en todos los tratamientos, empero se determinó que el valor de σ es mayor conforme la humedad relativa es menor, tal es en el caso de 40% HR ($\sigma = 233.8$ días); así mismo se observó que la σ (125.07 días) de las semillas colectadas en 2018 es mayor en comparación de los valores correspondientes al lote almacenado desde 2010 ($\sigma = 26.38$). Respecto a la P_{50} , no se obtuvo su valor a 30% HR, 40% HR y en el lote colectado en el 2018 debido a que la viabilidad no más del 50% de las semillas continuaron viables. De acuerdo con los resultados, se identificó que el tiempo en alcanzar la P_{50} es menor a 60% HR (31.84) y en el lote colectado en 2010 (40.08).

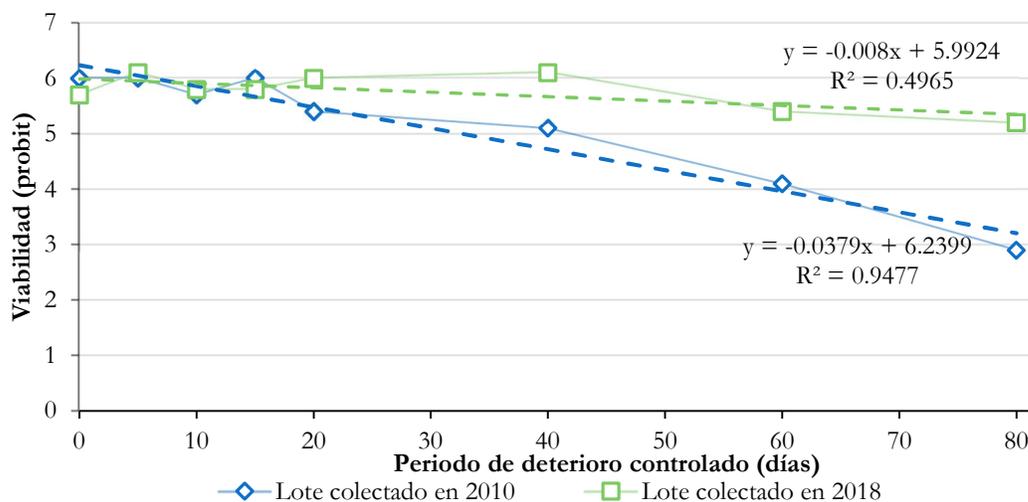


Figura 13. Análisis PROBIT de la viabilidad de las semillas de *F. flavovirens* colectadas en años distintos sometidas a envejecimiento acelerado.

Cuadro 6. Parámetros de la ecuación de viabilidad: viabilidad inicial (K_i), tiempo en que tarda en perderse la viabilidad del 50% de las semillas (P_{50}) y el tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) a 45°C, donde $Viabilidad = K_i - (p/\sigma)$.

Lote	HR (%)	Pendiente ($-\sigma^{-1}$)		K _i (probit)		σ (días)		P ₅₀ (días)	
			EE		EE		EE		EE
Colectado en el 2010	60	-0.0354	0.006	6.285	0.21	28.29	4.41	31.838	5.448
	50	-0.0084	0.001	6.064	0.14	118.84	17.58	150.97	35.001
	40	-0.0043	0.001	5.924	0.09	233.81	50.13		
	30	0.0002	0.001	5.919	0.05	-5807	2083.27		
Colectado en 2018	60	-0.008	0.003	5.99	0.13	125.07	51.42		
Colectado en 2010	60	-0.038	0.004	6.24	0.14	26.38	2.53	40.084	3.2142

EE= error estándar, HR= humedad relativa.

Análisis de ácidos grasos por CG-EM

Los ácidos grasos extraídos, transesterificados, separados e identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectroscopía de masas (figura 14), permitieron detectar al ácido palmítico, ácido linoleico, ácido esteárico y ácido oleico como los principales componentes lipídicos de las semillas de *F. flavovirens*. En ambos lotes se observan cambios en las concentraciones de todos los ácidos grasos estudiados con una ligera tendencia hacia la disminución, exceptuando el ácido esteárico, el cual incrementa levemente conforme se incrementa el periodo de envejecimiento acelerado.

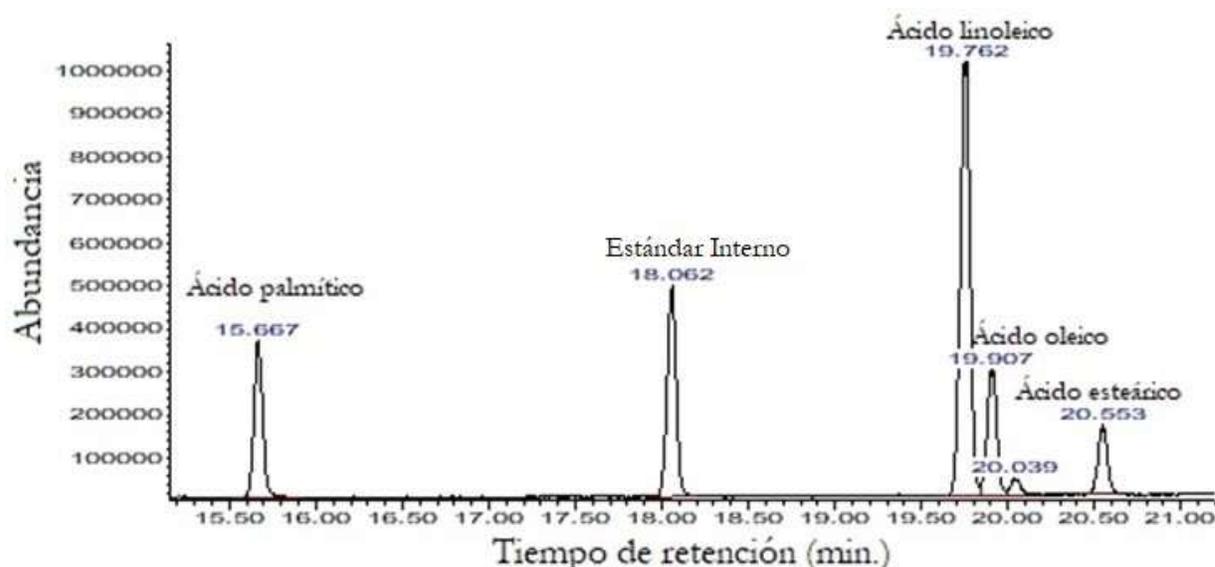


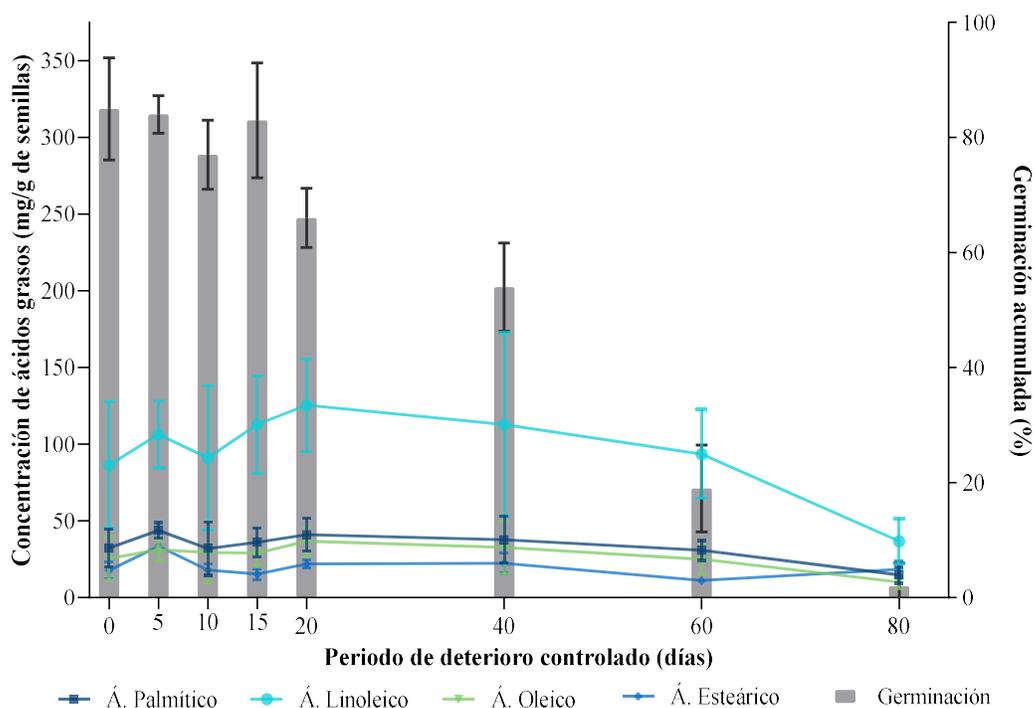
Figura 14. Cromatograma de ácidos grasos presentes en semillas de *F. flavovirens*. El tiempo de retención para cada compuesto se indica en azul.

El ANOVA de dos factores realizado para comparar la concentración de los ácidos grasos en función de su edad y del periodo de envejecimiento acelerado (figura 16A-D.) mostró que el periodo de deterioro controlado y la interacción entre este y la edad del lote es significativo para el ácido palmítico ($F_{(7, 32)} = 6.653, P < 0.0001$; $F_{(7, 32)} = 3.266, P = 0.0099$, respectivamente), ácido linoleico ($F_{(7, 32)} = 5.535, P = 0.0003$; $F_{(7, 32)} = 2.982, P = 0.0159$), ácido oleico ($F_{(7, 32)} = 5.92, P = 0.0002$; $F_{(7, 32)} = 4.238, P = 0.0021$) y ácido esteárico ($F_{(7, 32)} = 15.56, P < 0.0001$; $F_{(7, 32)} = 4.707, P = 0.0010$). La prueba de Sidak de comparaciones múltiples reveló que el ácido palmítico y el ácido linoleico no presentan variaciones significativas para las medias de ambos lotes correspondientes a cada periodo de envejecimiento acelerado, mientras que la concentración del ácido oleico a los 60 días es considerablemente mayor en el lote colectado en el 2018 (56.38 ± 27.07 mg/g de semillas) que en el lote de 2010 (25.12 ± 9.34 mg/g de semillas). De manera similar, la concentración del ácido esteárico es menor en las semillas colectadas en el 2010 a los días 5 (33.44 ± 7.46 mg/g de semillas) y 60 (11.1747 ± 5.31 mg/g de semillas) en comparación con las concentraciones obtenidas para el lote del 2018 en los mismos días de envejecimiento (47.22 ± 8.94 mg/g y 25.89 ± 4.79 mg/g respectivamente).

No obstante, a pesar de que los resultados mostraron que la interacción de los factores presenta cambios significativos y que, de acuerdo a la figura 15A, el aumento y disminución en las concentraciones de los ácidos grasos aparentemente concuerda con el porcentaje de germinación obtenido; de manera individual, la concentración de ácidos grasos del lote de 2010 no mostró variaciones significativas para el ácido palmítico ($F_{(7, 16)} = 2.066, P = 0.1087$), ácido linoleico ($F_{(7, 16)} = 1.176, P = 0.3689$) y el ácido oleico ($F_{(7, 16)} = 1.375, P = 0.28$), mientras que la concentración del ácido esteárico ($F_{(7, 16)} = 6.381, P = 0.001$) registrada en el día 5 cambia significativamente respecto a la concentración obtenida en el testigo (día 0), 10, 15, 60 y 80 días.

La alteración de las concentraciones de ácidos grasos de las semillas del 2018 durante el tratamiento fue significativa para todos los ácidos grasos. La prueba de Tukey señala que las variaciones para el ácido palmítico ($F_{(7, 16)} = 7.318; P = 0.001$) se encuentran principalmente entre el día 5 de deterioro controlado en contraste con los valores registrados durante el día 0, 20, 60, 80 y entre los 15, 60 días con respecto a los 80 días bajo condiciones de envejecimiento acelerado; de manera similar, el ácido linoleico ($F_{(7, 16)} = 6.483, P = 0.001$) presenta diferencias significativas a los 5 y 60 días en contraste con 0, 20, 80 días; los cambios principales correspondientes al ácido oleico ($F_{(7, 16)} = 8.970, P = 0.0002$) ocurrieron durante los 0, 20, 40 y 80 días en comparación con 5, 15 y 60 días. Por último, las concentraciones de ácido esteárico del día 5 presenta diferencias significativas ($F_{(7, 16)} = 11.93; P < 0.0001$) con todos los tratamientos realizados para este lote (figura 15B).

A)



B)

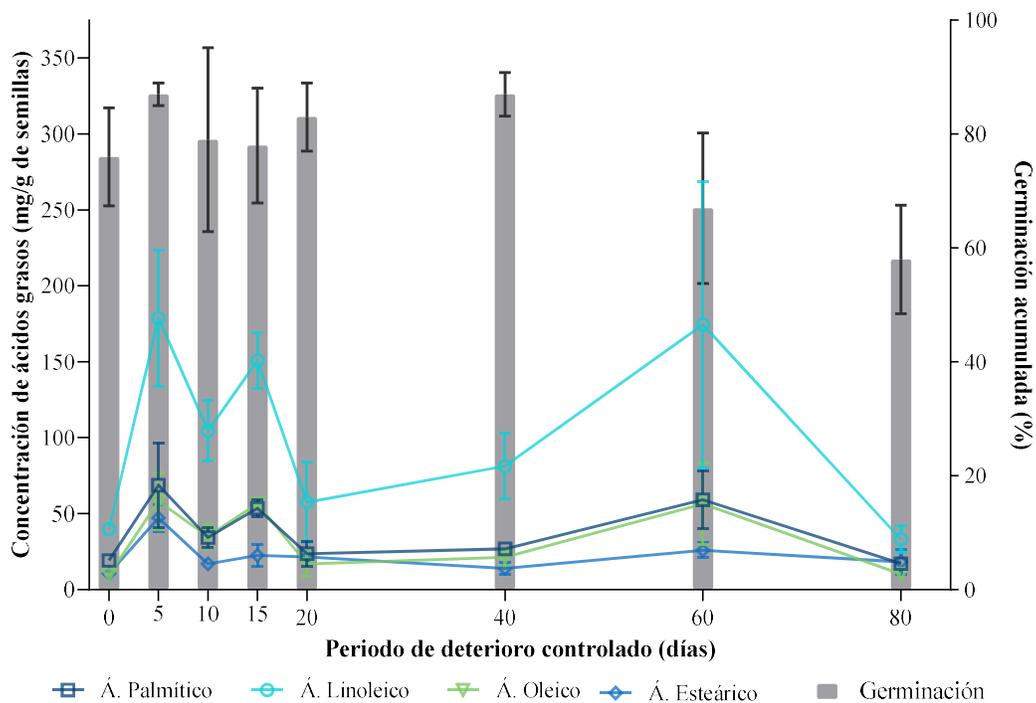


Figura 15. Medias de las concentraciones de ácidos grasos y la germinación acumulada de las semillas de *F. flavovirens* el 2010 (A) y colectadas en el 2018 (B) sometidas a diferentes periodos de envejecimiento acelerado. Las barras indican la desviación estándar (germinación n= 4, concentración Ac. grasos n=3).

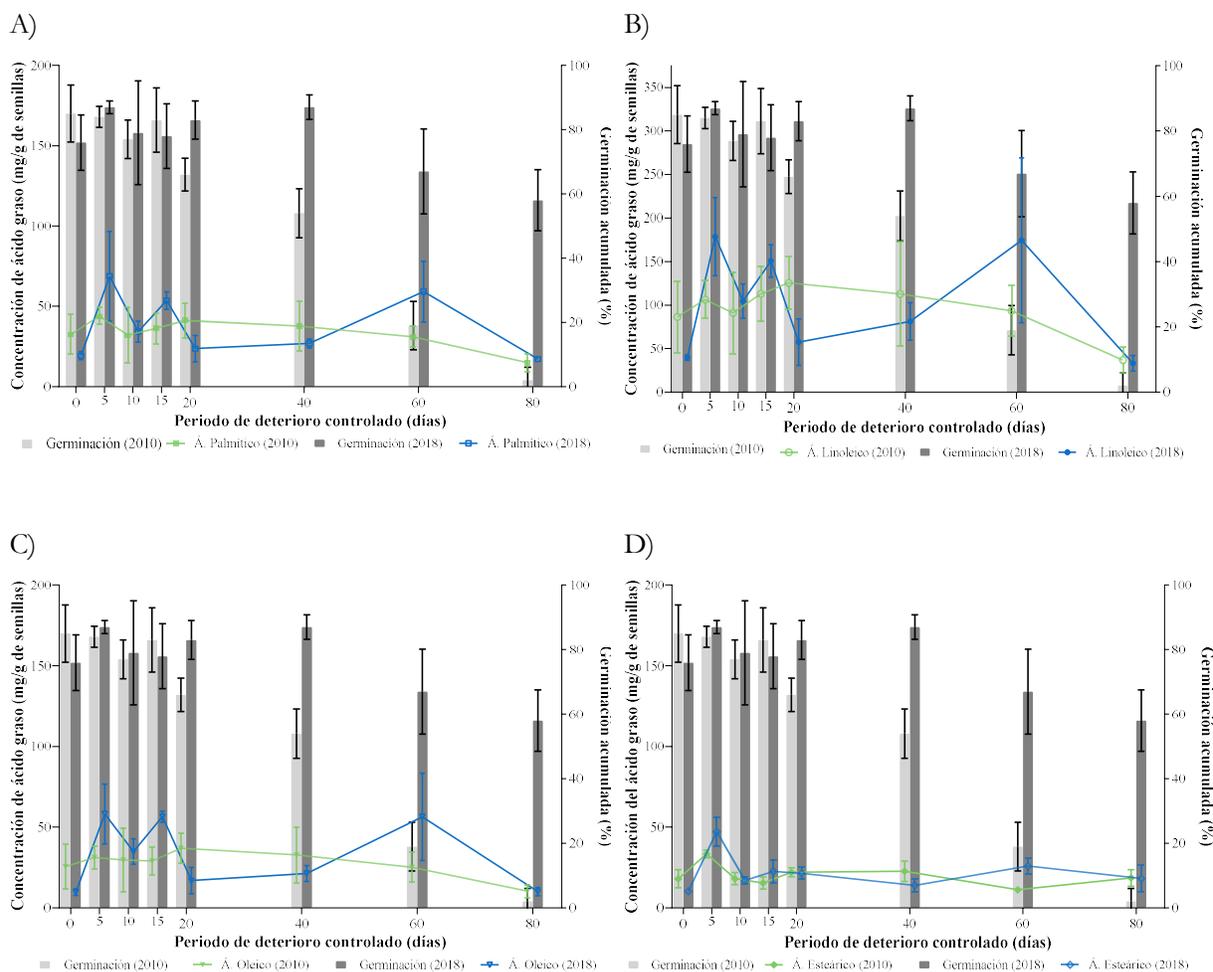


Figura 16. Medias del porcentaje de germinación y la concentración de ácido palmítico (A), ácido linoleico (B), ácido oleico (C) y ácido esteárico (D) en las semillas de *F. flavovirens* con diferente grado de envejecimiento natural durante diferentes periodos de envejecimiento controlado. Las barras indican la desviación estándar (Germinación n= 4, Concentración Ac, grasos n=3).

Registro del espectro infrarrojo cercano (NIRS) en las semillas y modelo Quimiométrico QUANT+

Los espectros de reflectancia de infrarrojo cercano tomados de las semillas del lote de 2010 y 2018, en conjunto con los datos de germinación y contenido de ácidos grasos correspondientes fueron vaciados en el programa QUANT+ para poder llevar a cabo el análisis quimiométrico; dando como resultado el modelo de predicción para las semillas utilizadas de *F. flavovirens*, cabe mencionar que se eliminaron del programa los valores atípicos que se encontraron.

Conforme al cuadro 7, los valores de calibración generados por el programa superan el 96% de varianza para la germinación y el 78% de varianza para los ácidos grasos, siendo la calibración del ácido oleico (87.36% de varianza) la mejor de las cuatro moléculas lipídicas estudiadas. A pesar de que la calibración para el ácido esteárico (78.48% de varianza) no alcanza el 80% de

varianza para ser aceptable en los modelos quimiométricos, este es bastante cercano, por lo que se considera que los valores generados por el análisis son admisibles para describir la relación que existe entre los factores y sus espectros de luz infrarroja cercana, es decir que el modelo de predicción de la viabilidad es aceptable.

Cuadro 7. Porcentaje de varianza, error estimado y error de predicción obtenidos del análisis quimiométrico QUANT+ para los ácidos grasos saturados e insaturados y la germinación acumulada en las semillas de *F. flavovirens* colectadas en el 2010 y 2018 a 60% HR/45°C

Variable	% de varianza (R ² *100)	Coefficiente de correlación (r)	Error estándar estimado.	Error estándar de la predicción.
Germinación	96.10	0.961	5.28	5.65
Ácido palmítico	81.19	0.8713	6.53	6.65
Ácido linoleico	80.14	0.8614	22	22.43
Ácido oleico	87.36	0.8838	6.07	6.3
Acido esteárico	78.48	0.8921	4.16	4.28

La estimación del porcentaje de germinación (figura 17) calculada por el análisis quimiométrico QUANT+ es alta ($r= 0.96$) de acuerdo con la correlación entre los datos experimentales obtenidos y las imágenes espectrales. Igualmente, la estimación de la concentración de ácidos grasos saturados e insaturados (figura 18 A-D.) generada por el modelo quimiométrico es bastante aceptable en todos los casos conforme a la correlación existente con los datos experimentales y las imágenes espectrales, con un valor de $r= 0.87$ para el ácido palmítico, $r=0.86$ correspondiente al ácido linoleico, $r=0.88$ para el ácido oleico y finalmente $r= 0.89$ para el ácido esteárico; además, de acuerdo a la prueba de hipótesis de correlación mediante T de Student, las correlaciones obtenidas son significativas para todas las variables ($t=8.5119$ para la germinación, $t= 4.3489$ para el a. palmítico, $t=4.1541$ para el a. linoleico, $t=4.6271$ corresponde con el á. oleico y $t=4.8362$ para el á. esteárico). Cabe mencionar que se observa la linealización de los datos experimentales en todas de las variables estimadas.

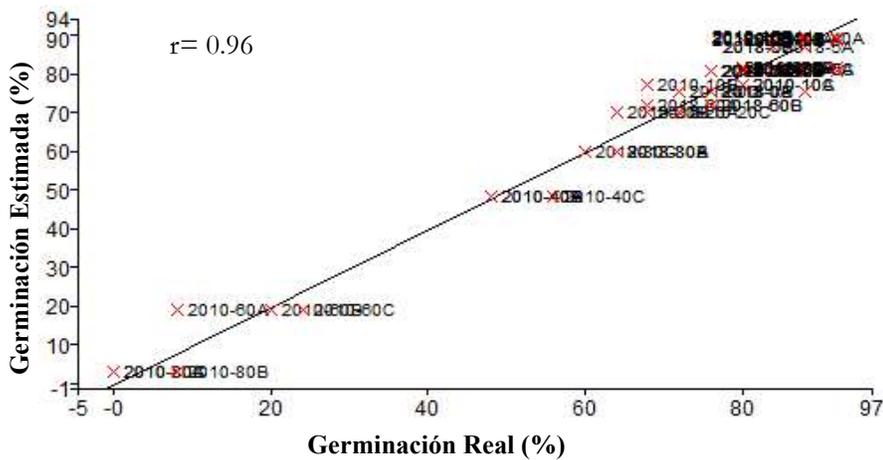


Figura 17. Correlación del porcentaje de germinación real con respecto al estimado mediante el modelo quimiométrico en las semillas de *F. flavivirens* sometidas a condiciones de envejecimiento acelerado (60% HR/45°C).

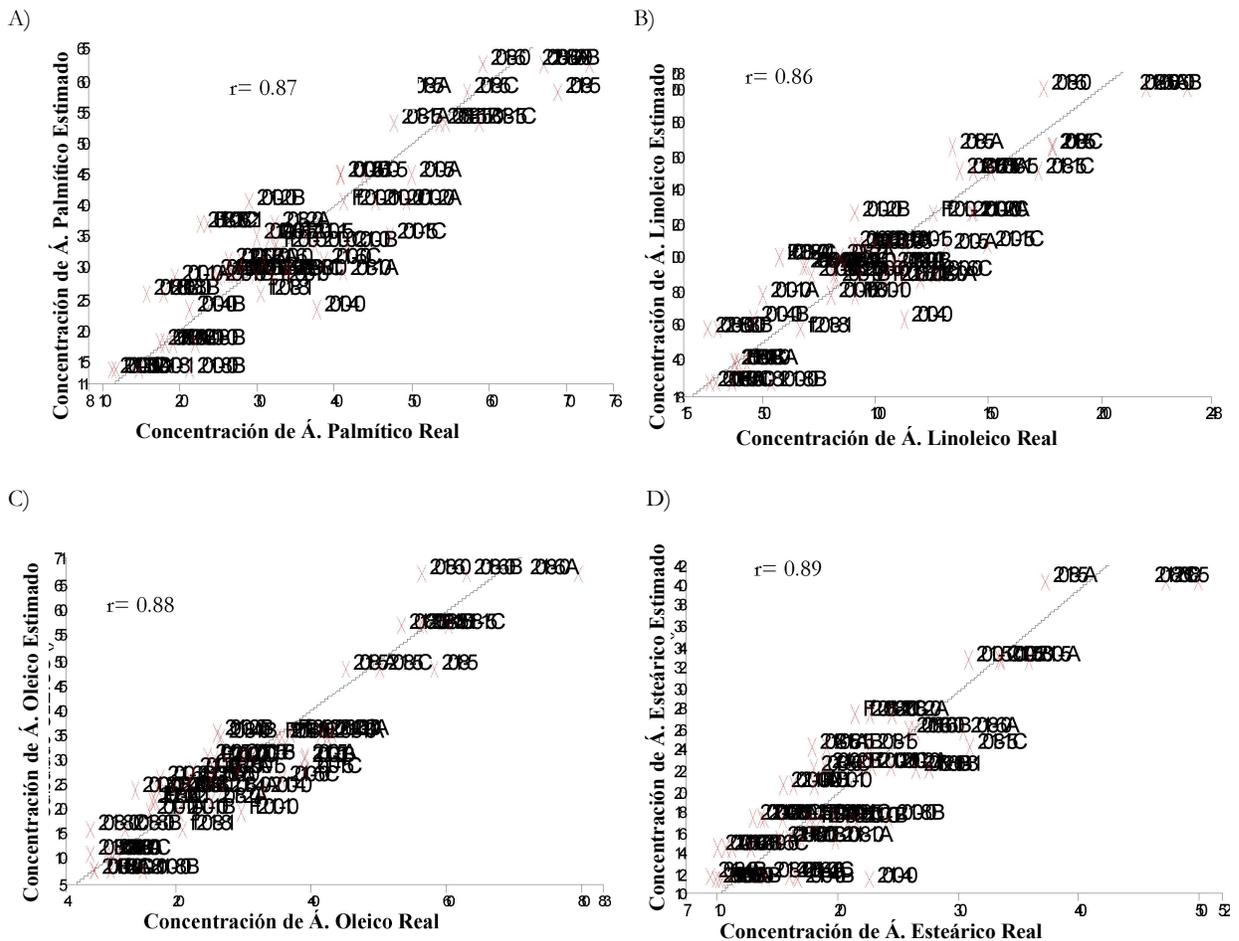


Figura 18. Correlación del contenido de A) ácido palmítico, B) ácido linoleico, C) ácido oleico y D) ácido esteárico real contra el estimado mediante el modelo quimiométrico en las semillas de *F. flavivirens* sometidas a condiciones de envejecimiento acelerado (60% HR/45°C).

Aspectos Ecológicos

Método de Evaluación de Riesgos de Extinción (plantas)

Criterio A Amplitud de la distribución del taxón en México

El trabajo realizado en campo junto con los datos obtenidos a partir de la revisión y depuración de las bases de datos, GBIF, Naturalista, Enciclovida, REMIB y MEXU, permitió obtener un total de 117 ocurrencias de *F. flavivirens*; con base en esos registros el modelo de nicho ecológico generado obtuvo un valor del área bajo la curva (AUC) mayor a 0.99 (± 0.002), indicando que la capacidad del modelo para predecir el nicho de la especie es alta. En la figura 19 se observa que la distribución geográfica potencial para esta especie, su extensión fue mayor a la esperada por los registros georeferenciados, abarcando principalmente los estados de Puebla y Oaxaca, y en menor medida los estados de Hidalgo, Querétaro y Guanajuato.

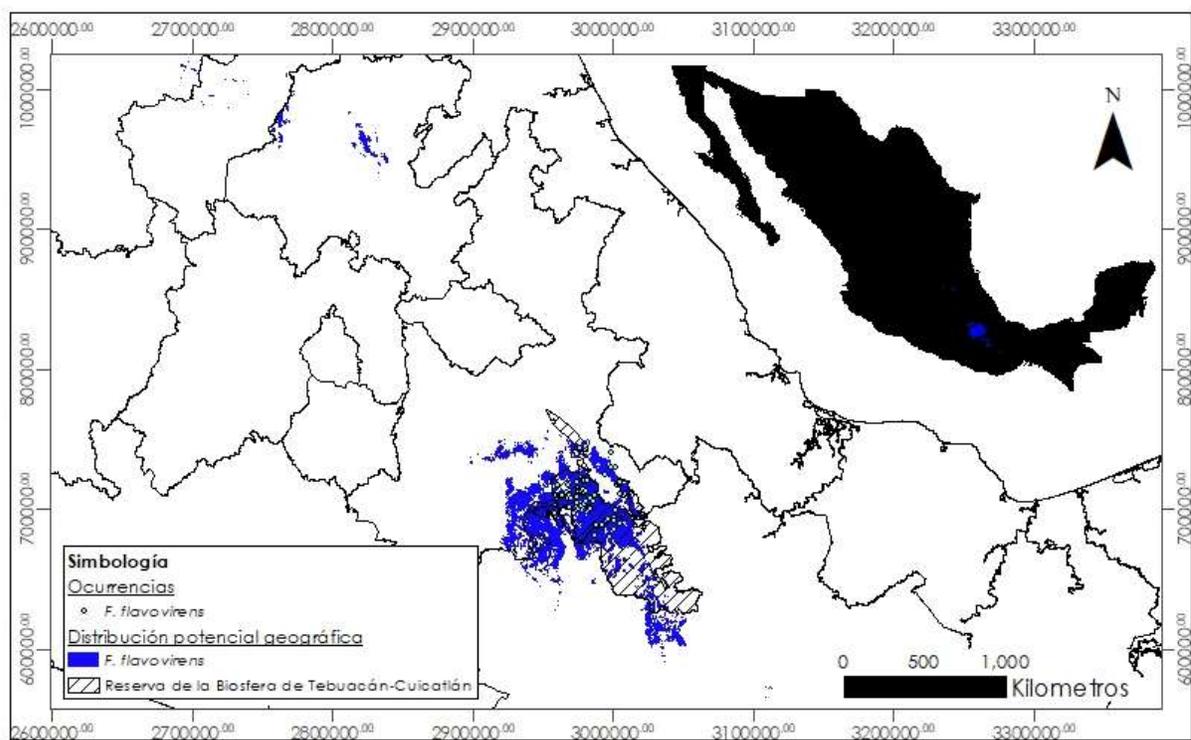


Figura 19. Extensión de la distribución geográfica potencial, registro de ocurrencias de *F. flavivirens* y su representatividad en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán.

En el cuadro 8 se muestra la extensión total del modelo de distribución potencial arrojado por MaxEnt; inicialmente el modelo tenía una extensión aproximada a 7257 km², sin embargo, al eliminar las áreas con cambio de uso de suelo de acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de uso de suelo (figura 19), la extensión del modelo se reduce en más de 1000 km² dejando 5906 km² con vegetación conservada. Por otra parte, considerando la extensión continental de México (1959248 km²), el 0.288% se encuentra en el VTC y solo el 0.128% está dentro de una ANP.

Cuadro 8. Extensión de la distribución geográfica potencial de *F. flavovirens*.

	Total	Área sin cambio de uso de suelo	Área dentro del VTC.	Área dentro de la RBTC.
Área (km ²)	7256.71	5906.06	5650.44	2498.35
Área respecto a territorio de México* (%)	0.370	0.301	0.288	0.128

*De acuerdo con el INEGI (2017) la superficie continental de México es de 1.959248 millones de km²

Conforme a los resultados arrojados por el programa MaxEnt, se determinó que las variables ambientales que contribuyen en mayor medida a la presencia o ausencia de la especie, (cuadro 9) son la temperatura estacional (17.6 %), la temperatura mínima del mes más frío del año (16.6%), la altitud (15.9%) y la precipitación del mes más frío del año (13.7%); en contraste, las variables que contribuyen en menor medida al modelo (< 1%) son la temperatura máxima del mes más cálido, la precipitación correspondiente a los meses más seco y más húmedo, así como las del trimestre más seco y el más cálido y finalmente la precipitación estacional. Solo 7 variables ambientales no contribuyeron al modelado de nicho ecológico.

Además, la prueba jackknife de importancia variable indicó que la variable climática que aporta más información útil cuando se usa aisladamente es la temperatura mínima del mes más frío, mientras que temperatura estacional es la variable que tiene la mayor cantidad de información que no está presente en las otras variables.

Cuadro 9. Contribución de las variables bioclimáticas (valores promedio de 25 corridas) al MNE de *F. flavovirens*.

Variable ambiental	Clave	Contribución (%)
Temperatura estacional (coeficiente de variación) (%).	bio4	17.6
Temperatura mínima del mes más frío (°C).	bio6	16.6
Altitud	Alt	15.9
Precipitación del trimestre más frío (mm).	bio19	13.7
Precipitación del trimestre más húmedo (mm).	bio16	10
Tipo de suelo	Suelo	8.3
Precipitación estacional (coeficiente de variación) (%).	bio15	7.6
Isotermalidad (°C).	bio3	7.2
Temperatura máxima del mes más cálido (°C).	bio5	1
Precipitación del mes más seco (mm).	bio14	0.9
Precipitación del mes más húmedo (mm).	bio13	0.6
Precipitación del trimestre más cálido (mm).	bio18	0.3
Oscilación diurna de la temperatura (°C).	bio2	0.2
Precipitación del trimestre más seco (mm).	bio17	0.1
Temperatura media anual (°C).	bio1	0
Oscilación anual de la temperatura (°C)	bio7	0
Temperatura media del trimestre más húmedo (°C).	bio8	0
Temperatura media del trimestre más seco (°C).	bio9	0
Temperatura media del trimestre más cálido (°C).	bio10	0
Temperatura media del trimestre más frío (°C).	bio11	0
Precipitación anual (mm).	bio12	0

Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón (Características del hábitat.).

Conforme a los datos obtenidos en campo se registraron ocurrencias desde 1657 m.s.n.m., en la localidad de Zapotitlán Salinas, hasta 2038 m.s.n.m. en Los Reyes Mezontla. La inclinación de las pendientes de las localidades donde se realizaron los muestreos fue de 3.4% hasta 28% con perfiles cóncavos y aterrazados en su mayoría y sin alguna orientación en particular. Además, la pedregosidad superficial fue abundante-dominante desde tamaño pequeño a muy grande. Las poblaciones estudiadas se encontraron dentro de la selva baja caducifolia en la localidad de Los Reyes Mezontla, mientras que para las otras localidades estas se ubicaron en áreas con matorral xerófilo/espinoso, pero con variaciones en la composición de las especies dominantes y por ende también en la fisonomía de cada sitio visitado. La cobertura vegetal fue mayor en Los Reyes Mezontla (80%), seguido por San Juan Raya (60%), en Zapotitlán Salinas el 50% del área muestreada se encontró cubierta por la vegetación y en San Antonio Texcala la cobertura vegetal fue del 40% (cuadro 10).

Cuadro 10. Características del hábitat de *F. flavovirens* en cuatro localidades del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Localidad	Pendiente	Pedregosidad	Vegetación	Especies dominantes
Los Reyes Mezontla.	Inclinación: 15 %.	Frecuencia: Abundante Tamaño: Pequeño, mediano y muy grande.	Tipo: Selva baja caducifolia, tetechera de <i>N. tetetzo</i> .	<i>Neobuxbaumia tetetzo</i> <i>Echinocactus platyacanthus</i> <i>Lippia graveolens</i> . <i>Beaucarnea gracilis</i> . <i>Dasyliirion serratifolium</i> . <i>Prosopis laevigata</i> . <i>Agave sp.</i>
	Perfil: Convexo, aterrazada	Tipo: Gravas	Cobertura vegetal: 80 %	<i>Beaucarnea gracilis</i> . <i>Neobuxbaumia macrocephala</i>
San Juan Raya	Inclinación: 3.4 %	Frecuencia: Abundante Tamaño: Pequeño, mediano.	Tipo: Matorral xerófilo/espinoso, matorral de <i>E. platyacanthus</i> .	<i>Agave marmorata</i> . <i>Ceiba parvifolia</i> . <i>Neobuxbaumia macrocephala</i> . <i>Echinocactus platyacanthus</i> . <i>Opuntia pilifera</i> . <i>Prosopis laevigata</i> . <i>Yucca periculosa</i> . <i>Bursera sp.</i>
	Perfil: Convexo y recto, aterrazada.	Tipo: Gravas	Cobertura vegetal: 60%	<i>Agave salmiana</i> . <i>Lippia graveolens</i> . <i>Ferocactus latispinus</i> . <i>Acacia sp.</i> <i>Ferocactus robustus</i> . <i>Opuntia sp.</i> <i>Cnidoscolus sp.</i>
San Antonio	Inclinación:	Frecuencia: Dominante	Tipo: Izotal de <i>Yucca</i>	<i>Castela tortuosa</i> . <i>Opuntia sp.</i>

Texcala.	28 %.	Tamaño: Pequeño, mediano, grande y muy grande	<i>periculosa</i>	<i>Mimosa luisiana.</i> <i>Acacia sp.</i> <i>Neobuxbaumia macrocephala.</i> <i>Prosopis laevigata.</i> <i>Myrtillocactus geometrizans.</i> <i>Echinocactus platyacanthus.</i> <i>Agave ghibsbreghtii.</i> <i>Ferocactus robustus.</i> <i>Yucca mixteca.</i> <i>Yucca periculosa.</i> <i>Agave sp.</i> <i>Opuntia pilifera.</i>
	Perfil: Compleja irregular, aterrazada	Tipo: Gravas	Cobertura vegetal: 40 %	
Zapotitlán Salinas	15 %.	Tamaño: Pequeño, mediano, muy grande.	Tipo: Cardonal de <i>C. columna-trajani</i> , Izotal de <i>Beaucarnea gracilis</i>	<i>Beaucarnea gracilis.</i> <i>Neobuxbaumia tetetzo.</i> <i>Cnidoscolus sp.</i> <i>Prosopis laevigata.</i> <i>Cephalocereus columna-trajani.</i> <i>Acacia sp.</i> <i>Yucca periculosa.</i> <i>Mimosa luisiana.</i> <i>Yucca mixteca.</i> <i>Euphorbia anthysiphilitica.</i> <i>Ephedra compacta.</i>
	Inclinación: 15 %.	Frecuencia: Abundante	Cobertura vegetal: 50 %	
	Perfil: Convexo y recto., aterrazada,	Tipo: Gravas		

Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón.

De acuerdo con los datos de Rojas-Aréchiga y colaboradores (1998), complementados con las observaciones realizadas en campo, se conoce que la floración de *F. flavovirens* ocurre a partir del mes de octubre a diciembre, y la fructificación se presenta a partir de diciembre hasta el mes de abril (cuadro 11). Además, se determinó que los frutos colectados en Zapotitlán Salinas y el Jardín Botánico Helia Bravo Holis contienen en promedio 288.3 semillas (± 150.2), con una masa de 3.4 mg. (± 0.3) por cada 10 semillas (véase cuadro 5).

Además de la fructificación Rojas-Aréchiga y colaboradores (1998) mostraron que las semillas de *F. flavovirens* pueden germinar a temperaturas desde 15 a 30°C. Bajo un fotoperiodo de 12 horas luz/oscuridad a 25°C, la germinación del germoplasma colectado en 2018 es del 79 % (± 19.96) (figura 9; cuadro 5).

Cuadro 11. Periodo de fructificación y floración de *F. flavovirens* (modificado de Rojas-Aréchiga *et al.*, 1998).

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
x	x	x	x						+	+	+X

Floración (+); fructificación (x).

Se determinó la estructura poblacional clasificando a los 47 individuos censados conforme a su volumen (m^3) y número de tallos dentro de 3 categorías: plántula, juvenil y adulto, a causa de la evidente diferencia de tamaños de los individuos reproductivos se hicieron 4 subcategorías:

adulto I, adulto II, adulto III y adulto IV, los criterios para establecer las categorías fueron el número de tallos y el volumen (cuadro 12). Se observó que la proporción de individuos categorizados como plántulas y juveniles es equivalente (6%), mientras que los individuos adultos representan al 87% de los individuos muestreados; los más frecuentes fueron los adultos I constituyendo el 30%, posteriormente los adultos II representan el 21 %, los adultos III también conforman el 21% y los adultos IV representan el 15% (cuadro 12).

Cuadro 12. Frecuencia relativa de individuos por categoría de tamaño de *F. flavovirens* del Valle de Tehuacán-Cuicatlán.

Categoría	Volumen (m³)	Tallos	Porción (%)
Plántula	0.001-0.004	1	6.4
Juvenil	0.014-0.071	2-4	6.4
Adulto I	0.072- 0.192	3-10	29.8
Adulto II	0.183- 0.354	8-22	21.3
Adulto III	0.357- 1.736	19-40	21.3
Adulto IV	0.900- 55.666	38->100	14.9

También, en la figura 20 se observa que solo en la localidad de San Antonio Texcala se encontraron 3 individuos de la categoría más joven (plántula); mientras que en los Reyes Mezontla y en Zapotitlán Salinas fueron las localidades donde se censaron ejemplares juveniles y se registró una mayor presencia de adultos I alcanzando un total de 6 avistamientos en Los Reyes Mezontla y 4 avistamientos en Zapotitlán Salinas. Además, en la localidad de San Juan Raya solo se hallaron adultos, mayoritariamente pertenecientes a la subcategoría adulto IV, superando en 3 unidades a las demás localidades. En lo que respecta a las demás subcategorías, Los Reyes Mezontla registró el mayor número de individuos adulto II y el menor número de individuos pertenecientes a adulto III registrando un solo individuo en comparación con las demás localidades donde se clasificó hasta 3 ejemplares en la misma subcategoría. El ANOVA que se llevó a cabo para las localidades mostró que no hay diferencias significativas ($F_{(3,23)} = 0.02, P = 0.9969$). Sin embargo, al evaluar la edad de los ejemplares se encontraron diferencias significativas ($F_{(5,23)} = 3.08, P = 0.0352$), donde conforme a la prueba LSD las categorías tanto Plántula como Juvenil difieren con respecto a la subcategoría Adulto I.

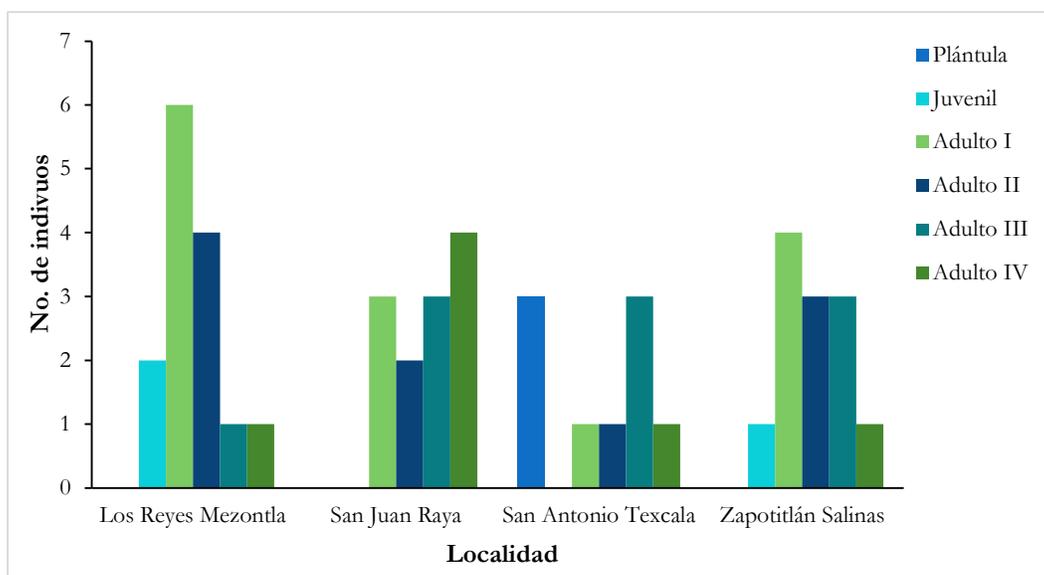


Figura 20. Estructura poblacional por categoría de tamaño y por localidades de *F. flavovirens*.

La densidad poblacional correspondiente a los sitios muestreados fue menor en San Antonio Texcala donde hay 1.2 individuos por cada 100 m², en San Juan Raya y Zapotitlán Salinas la densidad fue de 1.6 individuos/100 m² y en Los Reyes Mezontla se hallaron 2.8 individuos/100 m², la variación de la densidad no es estadísticamente significativa ($H = 2.893$, $P = 0.408$). Por otra parte, la mayor proporción de individuos que crecen bajo dosel vegetal fue mayor al 76.7% en San Antonio Texcala, 67.5 % en Los Reyes Mezontla y poco más del 50% en San Juan Raya y Zapotitlán Salinas (cuadro 13).

Cuadro 13. Densidad poblacional y porcentaje de los individuos ubicados bajo dosel vegetal y sin dosel.

Localidad	Densidad (Individuos/ 100 m ²)		Individuos bajo dosel vegetal (%)		Individuos sin dosel vegetal (%)	
	media	DE	media	DE	media	DE
Los Reyes Mezontla	2.8	1.7	67.5	10.6	32.5	10.6
San Juan Raya	1.6	1.1	50.8	45.0	49.2	45.0
San Antonio Texcala	1.2	0.8	76.7	25.2	23.3	25.2
Zapotitlán Salinas	1.6	0.8	55.6	50.9	44.4	50.9

DE= Desviación Estándar

Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre el taxón.

A pesar de que los resultados mostrados por el ACP no coinciden con los esperados de acuerdo a la evaluación visual que se realizó durante el muestreo en las localidades, el agente de ganadería se ve fuertemente influenciado por el número de caminos ganaderos (CLAN) y la compactación del suelo (COMP) en al menos 3 localidades; igualmente, el agente de actividades humanas puede ser influenciado por la cercanía a las poblaciones (POBL) en todas

las localidades y, finalmente, el deterioro del hábitat está condicionado por la erosión que presentaron cada localidad.

De acuerdo con el índice de disturbio reescalado (IDr), el sitio de menor perturbación fue San Juan Raya, seguido por San Antonio Texcala, Zapotitlán Salinas y por último el IDr más alto corresponde a Los Reyes Mezontla. En todas las localidades se observó que el agente que más aportó al ID fue la actividad ganadera (cuadro 14).

Cuadro 14. Puntajes obtenidos a partir del ACP para los agentes e indicadores del índice de disturbio (ID) y el índice de disturbio reescalado (IDr) para 4 poblaciones de *F. flavovirens* del Valle de Tehuacán-Cuicatlán

Agentes	Indicadores	Localidad			
		Los Reyes Mezontla	San Juan Raya	San Antonio Texcala	Zapotitlán Salinas
Ganadería	CABR	0.359	-0.316	0.101	0.311
	GANO	0.046	0.1	-0.278	-0.353
	RAMO	0.137	0.299	-0.129	0.13
	CLAN	0.375	0.441	0.397	-0.367
	COMP	0.375	0.441	0.312	-0.367
		1.292	0.965	0.403	-0.646
Actividades humanas	MACH	-0.19	0.259	0.211	-0.103
	CAHU	0.375	-0.324	-0.397	0.367
	CCHU	0.375	-0.324	-0.397	0.326
	POBL	0.375	0.117	0.397	0.34
		0.935	-0.272	-0.186	0.93
Deterioro del hábitat	EROS	-0.333	-0.346	0.352	0.354
	ID	1.894	0.347	0.569	0.638
	IDr (%)	100	0	14.35	18.811

Aunque la densidad no mostró diferencias significativas en ninguna de las localidades, se encontró que hay una relación (figura 21) estadísticamente significativa ($\chi^2 = 25.651$, $P = 0.0002$) entre la densidad poblacional con respecto al disturbio (IDr), donde la localidad con un mayor número de individuos/100 m² fue la misma localidad que presentó un mayor grado de disturbio.

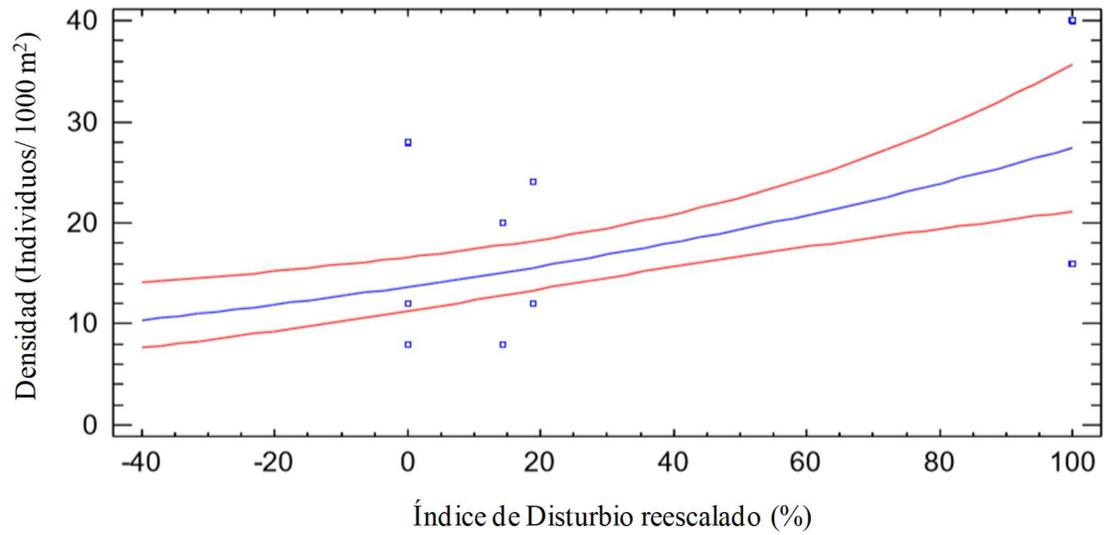


Figura 21. Relación entre densidad de *F. flavovirens* y el índice de disturbio reescalado (IDr) estimado. La línea continua indica el ajuste a un modelo lineal generalizado con distribución de Poisson y función de enlace logarítmica ($P < 0.00001$). Los cuadrados indican la densidad registrada en las 4 localidades estudiadas.

Discusión

Aspectos fisiológicos

De acuerdo con los resultados del cuadro 5, la masa de las semillas de *F. flavovirens* es similar a la masa del germoplasma de *F. latispinus*, *F. bistris* y *F. glaucescens* con un peso de 0.30 mg, 0.32 mg y 0.41 mg por semilla, respectivamente, por lo cual son catalogadas dentro de las especies de angiospermas con semillas más pequeñas, con excepción de aquellas cuyas semillas requieren una fuente externa de sustento, como las orquídeas (Del Castillo, 1986). Esto puede deberse a que, en ambientes áridos, el agua es un factor clave que limita la germinación, por lo que las plantas que habitan en este tipo de áreas muestran diversas estrategias adaptativas reflejadas en las características morfológicas, anatómicas y fisiológicas que determinan su comportamiento de germinación (Rojas-Aréchiga *et al.*, 2013).

Se sabe que en ambientes áridos las semillas pequeñas poseen capacidades germinativas vertiginosas o bien una mayor efectividad en la dispersión, viabilidad, emergencia y supervivencia (Sánchez *et al.*, 2010); por ejemplo, se ha encontrado una asociación positiva entre el tamaño de la semilla con respecto a su persistencia en el suelo, las semillas pequeñas son enterradas a mayor profundidad que las semillas de mayor tamaño, por consiguiente las pequeñas pueden persistir en los bancos de semillas por periodos de tiempo más prolongados; no obstante, este tipo de semillas de tamaño reducido dan origen a plántulas pequeñas que deben superar la barrera física impuesta por el suelo, además cuentan con menos recursos para sobrevivir y competir con las plantas establecidas, son más susceptibles a los patógenos y enfrentan un mayor riesgo de mortalidad por sus pequeñas reservas (Rojas-Aréchiga *et al.*, 2013).

Por otra lado, al no encontrarse diferencias significativas en el porcentaje de germinación (figura 9) en las semillas deshidratadas a 5% CH, así como en las que fueron almacenadas a baja temperatura (-10°C) durante 3 meses, se determinó que las semillas de esta especie son tolerantes a la desecación y que presentan un comportamiento de tipo ortodoxo, es decir, que las semillas pueden perder la mayor parte de su contenido de agua celular y alcanzar un estado de anhidrobiosis sin sufrir daño, así mismo pueden ser almacenadas a baja temperatura por lo que es posible mantenerlas en condiciones *ex situ* a largo plazo y su viabilidad puede prolongarse con el decrecimiento del contenido de humedad de las semillas y la temperatura de almacenamiento de manera predecible y cuantificable. Para un almacenamiento óptimo, el CH de la semilla debe reducirse a 0.1 g H₂O g⁻¹ de masa seca, donde el dominio acuoso de la semilla se vuelve vítreo y la longevidad se extiende (Hong & Ellis 1996; Zinsmeister *et al.*, 2020; Mc Donald, 2004; Nagel *et al.*, 2014). Además, la ausencia de variaciones en el porcentaje de germinación entre los lotes indica que la viabilidad se ha mantenido alta durante 8 años; de igual manera se ha observado un comportamiento similar en semillas de especies del mismo género como *F. herrerae* y *F. emoryi*, cuyas semillas de 10 años aun muestran una germinación del 80 y 90% respectivamente (Rojas-Aréchiga & Vázquez-Yanes, 2000).

El comportamiento de tipo ortodoxo es considerado como una estrategia adaptativa a los ambientes sujetos a la aridez y sequías ocasionales o estacionales, en los cuales la tolerancia a la desecación es indispensable para la sobrevivencia de las semillas y la regeneración continua de especies siendo la tolerancia a la desecación una de las respuestas adaptativas más significativas de las plantas superiores (Sánchez *et al.*, 2010; Hong & Ellis, 1996; Zinsmeister *et al.*, 2020). Este comportamiento también se ha presentado en otras especies del mismo género como *F. cylindraceus*, *F. latispinus*, *F. recurvus* y *F. wislizeni* (Royal Botanic Gardens Kew, 2020).

Por otra parte, los efectos negativos generados por el incremento de la HR y periodo de deterioro controlado sobre el porcentaje de germinación observado en la figura 10A, es a causa de la muerte eventual de las semillas y con frecuencia este fenómeno se atribuye a la acumulación de la degradación oxidativa de los componentes celulares (Walters *et al.*, 2010). Cuando se incrementa la humedad relativa el contenido de humedad de las semillas también incrementa a causa de las fuerzas mátricas presentes en la testa, si éste llega a alcanzar un valor igual o superior a 18%, el citosol de las células de las semillas se vuelve más fluido y hay una mayor disponibilidad de agua libre (Nagel *et al.*, 2014; Walters *et al.*, 2010; McDonald, 2004).

Este estado “fluido” permite que se realicen actividades metabólicas, tales como la respiración (proceso metabólico que convierte el oxígeno en superóxido ($\cdot\text{O}_2$) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2), la peroxidación de lípidos y la actividad enzimática realizada por los peroxisomas; siendo estos los principales procesos que generan especies reactivas de oxígeno (ERO) en semillas tolerantes a la desecación (Walters *et al.*, 2010; Bailly *et al.*, 2008; Bailly, 2004). Otro radical libre de importancia es el radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$), ya que posee la capacidad de dañar directamente tanto el ADN nuclear porque ataca la desoxirribosa, las purinas y las pirimidinas (Bailly, 2004; McDonald, 2004).

Los radicales libres acumulados durante el almacenamiento de la semilla acarrearán la degradación oxidativa acumulada de los componentes celulares conduciendo al daño celular irreversible, y eventualmente ocurre la muerte de la semilla (Bailly, 2004; Bailly *et al.*, 2008; Walters *et al.*, 2010; Zinsmeister *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2015; Kranner *et al.*, 2010). Por ello el envejecimiento de las semillas se encuentra asociado con la disminución de la viabilidad, retrasos en la emergencia de la radícula, crecimiento anormal de plántulas y establecimiento deficiente de la planta (Akbar *et al.*, 2020).

Sin embargo, es probable que cuando el germoplasma se encuentra a 30% HR a 45°C las células de las semillas se encuentren en un estado “gomoso amorfo” o “vitróico” a causa de la remoción de agua (disminución de la HR). Cuando se disminuye el agua de las células hidratadas, su volumen disminuye proporcionalmente, causando que las células se contraigan e incrementen su viscosidad reduciendo la movilidad molecular y la accesibilidad de las enzimas a ciertos sustratos (Nagel *et al.*, 2014; Walters *et al.*, 2010; Bailly, 2004; Pritchard *et al.*, 2003). Si las semillas se encuentran en un estado con bajo contenido de agua, los procesos celulares integrados, incluida la respiración, la generación de ATP, la transcripción, la traducción y la actividad enzimática, se evitan por completo o pueden operar a una fracción de su capacidad

usual en células hidratadas, por lo que las fuentes de producción de ERO se encuentran condicionadas a la movilidad molecular y a la viscosidad, permitiendo que los procesos de deterioro continúen a ritmos más lentos (Bewley *et al.*, 2013; Bailly *et al.*, 2008; Nagel *et al.*, 2014).

Por otra parte, cuando se sometió a envejecimiento acelerado (60% HR/45°C) a dos lotes de semillas de diferentes edades, se encontró que el porcentaje de germinación disminuye conforme es mayor el periodo de deterioro controlado y la edad del lote de semillas (figura 12A), siendo la germinación del lote con mayor grado de envejecimiento natural la más afectada. El CH del lote colectado en 2010 indicaba que la matriz celular se encontraba entre un estado vítreo (6% CH) o gomoso (13 % CH), de acuerdo con lo reportado por Nagel *et al.*, (2014), siendo una posibilidad que la disminución de la germinación del lote colectado en 2010 es consecuencia de la producción y acumulación de ERO durante el almacenamiento. La producción de ERO metabólicos en estado vítreo es poco probable, pero no se puede excluir con certeza que las reacciones metabólicas continúen muy lentamente en líquidos viscosos incluyendo los vítreos (Kranter *et al.*, 2010), éstos son resultado de mecanismos no enzimáticos como las reacciones de Amadori y Maillard y la peroxidación lipídica, proceso que continúa ocurriendo incluso *post mortem* (Bewley *et al.*, 2013; Kranter *et al.*, 2010). Además, las semillas con bajo CH no están exentas de la modificación oxidativa en presencia de oxígeno atmosférico (Kranter *et al.*, 2010).

Al pertenecer a un ambiente árido, las semillas de *F. flavovirens* responden positivamente en mayor o menor grado a los períodos intermitentes del recurso hídrico, por lo que la germinación ocurre más rápido que con otras especies del mismo ambiente con semillas de mayor tamaño, debido a que su menor cociente de superficie/volumen le permite acumular humedad y embeberse más rápido aumentando su velocidad germinativa (Sánchez *et al.*, 2010). Empero, al igual que en el porcentaje de germinación, la velocidad de germinación se redujo conforme incrementaba el periodo de envejecimiento acelerado (figura 12B) y la HR (figura 10B), generalmente las semillas exhiben un periodo inicial de deterioro, en el cual el porcentaje de germinación es relativamente constante pero la tasa de germinación disminuye (Bewley *et al.*, 2013), esto quiere decir que el tiempo para alcanzar la germinación del 50% de las semillas (T_{50}) incrementa.

La germinación requiere de una producción estable de H_2O_2 , mientras que la imbibición de semillas envejecidas se asocia con una acumulación descontrolada de H_2O_2 , lo que evita la germinación (emergencia de la radícula) o conduce a plántulas anormales (Bailly, 2004; Bailly *et al.*, 2008), por ello el retraso de la germinación de las semillas envejecidas aun viables es explicado con base a que las células requieren más tiempo para contrarrestar los daños celulares acumulados durante el periodo de deterioro controlado y para que se reinicie la maquinaria antioxidante evitando o atenuando el estrés oxidativo, de manera que la emergencia de la radícula requiere una mayor actividad de enzimas y moléculas antioxidantes para que las ERO se encuentren en un estado estable dentro de la *ventana oxidativa* (Bailly, 2004; Bailly *et al.*, 2008; Bewley *et al.*, 2013). Por ejemplo, en las semillas de girasol se observa que la emergencia

de la radícula se encuentra relacionada con un aumento en la actividad de enzimática del glutatión reductasa (GR) y catalasa (CAT) eliminando el H₂O₂ y limitando la peroxidación lipídica. (Bailly, 2004).

Es importante señalar que durante el periodo de envejecimiento acelerado se registraron ligeras recuperaciones en los porcentajes de germinación en todos los tratamientos, tanto en el germoplasma sometido a un gradiente de HR, como en los lotes con diferente grado de envejecimiento natural, en ese sentido es posible que la hidratación de las semillas sea el causante de dicha respuesta. En los bancos de semillas del suelo se ha registrado que la rehidratación contiene elementos de euestrés (un tipo de estrés que mejora una función), ya que permite activar ciertos procesos como la reparación de daños en ADN, proteínas, membranas y ARNm almacenados en las mitocondrias (Kranner *et al.*, 2010; McDonald, 2004). Durante la imbibición temprana de las semillas, se reactiva la síntesis de proteínas y se inicia la reparación de ADN; estos mecanismos de resarcimiento pueden ser la explicación de los efectos benéficos del priming, que consiste en una imbibición controlada que previene la emergencia de la radícula (Kranner *et al.*, 2010; Bailly, *et al.*, 2008)

La pérdida de viabilidad de las semillas registrada en la figura 11 podría deberse a una fuerte relación entre el deterioro de la semilla, la actividad mitocondrial, y el aumento de la concentración de ERO, que genera cambios en el potencial redox celular desencadenando la muerte celular programada (MCP) (Kranner *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015; El-Maarouf-Bouteau *et al.*, 2011).

La producción de ERO durante el deterioro controlado afecta la homeostasis redox mitocondrial, provocado que la actividad de enzimas caspasa incrementa, la degradación de los ácidos nucleicos en fragmentos y la liberación de factores apoptogénicos en el citoplasma llevando a la apoptosis (Kranner *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015, El-Maarouf-Bouteau *et al.*, 2011). Por otro lado, las condiciones de prealmacenamiento y almacenamiento, el genotipo, las condiciones abióticas (temperatura, luz, precipitación y nutrientes) experimentadas por la planta madre y durante el desarrollo y maduración de las semillas, tratamientos postcosecha como priming, así como el manejo adecuado son factores que influyen el envejecimiento y la longevidad del germoplasma (Nagel *et al.*, 2014; Zinsmeister *et al.*, 2020; Kochanek *et al.*, 2009; Kranner *et al.*, 2010).

Obunyali y colaboradores (2008), sometieron a envejecimiento artificial un lote de semillas almacenado y otro recién colectado de dos especies de sésamo (*Sesamum angustifolium* y *Sesamum angolense*); donde, a pesar de que las semillas almacenadas obtuvieron una mayor longevidad, concluyeron que las condiciones climáticas predominantes durante el desarrollo de las semillas influyen en la calidad de las semillas, lo que puede dar lugar a diferencias en la longevidad entre lotes de semillas de la misma especie. Las afirmaciones anteriores sugieren que las variaciones observadas en la longevidad de las semillas, expuesto con mayor claridad en los valores de Ki, σ y P₅₀ (cuadro 6) y las diferencias significativas entre las pendientes de las rectas obtenidas (figura 13) para el lote colectado en el 2018 y el correspondiente al 2010 podrían ser el

resultado de las condiciones de prealmacenamiento, factores abióticos durante el desarrollo de las semillas y variabilidad genética que influyen en la longevidad de las semillas.

Cabe mencionar que el análisis probit permitió describir que la pérdida de la capacidad para germinar presenta un patrón lineal cuando este es transformado a unidades probit y que ese pueda ser comparable con otros lotes, el modelo funciona bajo el supuesto de que el tiempo de pérdida de viabilidad en una población de semillas sigue una distribución normal en condiciones ambientales constantes y por lo tanto es posible transformar, de manera similar, las proporciones de semillas germinadas en valores probit (Hay et al., 2014).

La variación en el P_{50} puede ser inducida por las diferencias de K_i , y se espera que en mayor medida se deba a la tasa de pérdida de viabilidad σ , ya que es donde se presentan valores considerablemente desiguales conforme se reduce la humedad relativa y el envejecimiento natural. Llama la atención que σ para el tratamiento de deterioro controlado a 40% HR fuera mayor en más de 200 días en comparación con la obtenida a 60% HR con un valor de 28.39 días; también la σ del lote colectado en el 2018 fue mayor por casi 100 unidades con respecto al obtenido para el lote del 2010, a pesar de que su K_i fue mayor.

El valor del P_{50} es de gran importancia, ya que indica el punto en el que una célula sometida a MCP se compromete irreversiblemente a morir, conocido como “punto de no retorno”, frecuentemente se ha relacionado con la falta de función mitocondrial; para que se desencadenen los eventos primarios de la MCP se requiere que las ERO, en conjunto con los subproductos de la peroxidación lipídica, superen un nivel umbral para inducir la MCP a través de la alteración del ADN y disfunción mitocondrial (El-Maarouf-Bouteau *et al.*, 2011). Si bien, la MCP ocurre de manera individual a nivel celular, la combinación de la temperatura, HR y duración del tratamiento de envejecimiento acelerado indica que las células de las semillas entran a la MCP de manera sincrónica por lo que la eliminación de células no deseadas deja de ser selectiva y conduce a la muerte de la semilla (El-Maarouf-Bouteau *et al.*, 2011).

Por otro lado, se puede asumir que el germoplasma de *F. flavovirens* es longevo, ya que su P_{50} (40.084 ± 3.2142) es mayor que el obtenido en la asteraceae *Minuria integerrima* (28.6 ± 0.9) cuando sus semillas son envejecidas bajo las mismas condiciones (60% HR / 45°C); siendo ésta la especie más longeva de 8 plantas vasculares australianas evaluadas (Kochanek *et al.*, 2009); también, al igual que la P_{50} , la σ (26.38 ± 2.53) se encuentra entre los valores para dos especies de referencia siendo *Ranunculus sceleratus* ejemplo para las semillas de corta vida ($\sigma = 7.40$ y $P_{50} = 13.70$) y *Brassica napus*, referencia para las semillas longevas ($\sigma = 19.76$ y $P_{50} = 65.05$) (Daniel *et al.*, 2013; Newton *et al.*, 2009). Esto quiere decir que las semillas de esta especie están genética y químicamente equipadas para periodos de almacenamiento largo y es probable que se deba a que las semillas de especies de ambientes cálidos y secos tienden a tener una vida útil más larga (Copeland & McDonald, 2001; Zinsmeister *et al.*, 2020). Respecto a los tratamientos donde no se logró obtener el valor de P_{50} , se recomienda prolongar el tiempo bajo envejecimiento acelerado hasta que la viabilidad se reduzca en más de un 50% y así determinar exitosamente el tiempo en que tarda en perderse la viabilidad del 50% de las semillas (P_{50}).

Ahora bien, se ha señalado que las ERO y la peroxidación lipídica aumentan según la intensidad del envejecimiento, por lo que se ha indicado al estrés oxidativo y a la peroxidación lipídica como la principal causa de deterioro de las semillas oleaginosas durante el envejecimiento (El-Maarouf-Bouteau *et al.*, 2011). La producción de radicales libres, iniciada principalmente por el oxígeno, se ha relacionado con la peroxidación de lípidos y otros compuestos esenciales que se encuentran en las células (McDonald, 2004).

La peroxidación lipídica es un proceso de reacciones en cadena de radicales libres que conduce al deterioro de los ácidos grasos insaturados o poliinsaturados (Bailly, 2004; Bewley *et al.*, 2013; McDonald, 2004), tales como el ácido oleico y linoleico (presentes en las membranas de las semillas y los aceites de almacenamiento). Este proceso comienza con la generación de un radical libre (un átomo o una molécula con un electrón desapareado) ya sea por autooxidación o enzimáticamente por enzimas oxidativas como la lipoxigenasa presente en muchas semillas, la peroxidación lipídica inicia cuando, el hidrógeno del radical libre se combina con otras moléculas de los grupos carboxilo de los lípidos (ROOH), dando así a la propagación de otros radicales libres que finalmente se combinan (Bailly, 2004; McDonald, 2004), provocando la pérdida de la estructura de la membrana, la filtración, incapacidad para completar el metabolismo normal y cambios en la calidad del aceite a causa de la descomposición de los ácidos grasos de cadena larga (Bailly, 2004; Bewley *et al.*, 2013; McDonald, 2004).

Al igual que en *F. flavovirens*, el ácido palmítico, ácido linoleico, ácido esteárico y ácido oleico (figura 14) también han sido encontrados como principales componentes lipídicos en las semillas de otras especies como *Glycine max* (Priestley *et al.*, 1985), e incluso en otras cactáceas como *Stenocereus stellatus* (Vergara, 2002), mientras que para *N. tetetzo*, *N. mezcalaensis* (Lozada, 2005), *P. chichipe*, *P. chende* (Rogel, 2002) se identificaron los ácidos linoleico, esteárico y oleico. A pesar de que no se hallaron cambios en las concentraciones de los ácidos grasos en el lote del 2010 se observa una tendencia a la disminución del á. linoleico, á. oleico y á. palmítico conforme disminuye la germinación y aumenta el tiempo de deterioro controlado (figura 15 A). Mientras que, en el lote colectado en 2018 (figura 15 B), se registraron cambios en la concentración de ácidos grasos, pero no se observa un comportamiento claro de la concentración de lípidos con respecto al porcentaje de germinación como se observó en el lote colectado en 2010.

De tal manera que la concordancia en disminución de la concentración de ácido oleico y linoleico y la reducción en el porcentaje de germinación observada en el lote colectado en el 2010 se debe a que conforme aumenta el periodo de almacenamiento, la acumulación de ERO generen daño celular, y la peroxidación de ácidos grasos aumenta. Aunque se encontraron diferencias significativas en la concentración del ácido esteárico, no se observa una tendencia a la disminución a largo plazo, de manera similar, Zavaleta (2005) reportó un comportamiento fluctuante en los ácidos grasos insaturados en semillas envejecidas de *Hechtia podantha*; probablemente a causa de la activación de enzimas del tipo desaturasa, las cuales pueden alterar la concentración de ácidos grasos, incluso los insaturados; las desaturasas pueden actuar como mecanismo de protección de las semillas al envejecimiento.

Como se mencionó previamente, las concentraciones de ácidos grasos de las semillas colectadas en 2018 no muestran un comportamiento estable con respecto a la germinación en comparación con lo observado en las semillas correspondientes a 2010 (figura 16 a, b, c y d), pero si es posible identificar patrones de recuperación en la concentración de los ácidos grasos insaturados a los 5, 15 y 60 días bajo tratamiento de deterioro controlado. Dichas recuperaciones pueden deberse a los mecanismos de reparación activados durante la hidratación de las semillas y el incremento de oxígeno (hidro y osmo-priming) revirtiendo la pérdida de enzimas desintoxicantes de la peroxidación lipídica, como SOD, CAT y GR, además el priming puede reducir la peroxidación de lípidos incluso durante el posterior almacenamiento de las semillas (Kranter *et al.*, 2013; McDonald, 2004; Bailly *et al.*, 2008, Bailly, 2004). Cabe mencionar que conforme avanza la imbibición la cascada de daño celular causada por la autooxidación se ve favorecida por el daño de los radicales libres, inducida menos por la autooxidación y más por las enzimas hidrolíticas que generan radicales libres como la lipoxigenasa. La presencia de antioxidantes reactivados por el priming puede contrarrestar este daño (McDonald, 2004).

En resumen, en las semillas colectadas en 2010 hay un proceso previo de envejecimiento natural donde es probable que la autooxidación de lípidos y la acumulación de ácidos grasos se encontrara presente antes de comenzar con el tratamiento de deterioro controlado, mientras que en el lote colectado en 2018 puede que estos procesos estuvieran presentes en menor medida.

También es importante señalar que el deterioro de las semillas no ocurre de manera uniforme, ya que éstas están formadas por tejidos que difieren en su química y proximidad al ambiente externo (Mc Donald, 2004). Es posible que para provocar la pérdida de viabilidad solo es necesario dañar a un número limitado de células por la peroxidación lipídica (Zinsmeister *et al.*, 2020). Por ejemplo, se ha encontrado que los hidroperóxidos lipídicos, indicadores de la peroxidación de ácidos grasos, tienen un efecto negativo en la función de la membrana y se producen en mayor cantidad conforme aumenta el periodo de envejecimiento natural en los ejes embrionarios que en los cotiledones de las semillas de *Fagus sylvatica* (Pukacka & Ratajczak, 2007). La disparidad entre el comportamiento de los ácidos grasos con respecto a la germinación en las semillas colectadas en 2018 podría ser consecuencia del deterioro desigual en los tejidos de las semillas.

Por otro lado, la espectroscopia infrarroja cercana (NIR) mide la variación en la absorción de radiación (energía) en función de la composición química y el nivel de humedad de los materiales biológicos. Los enlaces químicos entre átomos ligeros (como C-H, O-H y N-H) generalmente tienen altas frecuencias vibratorias, lo que da como resultado armónicos y bandas de combinación que son detectables en la región NIR, 780-2,500 nm (Lohumi *et al.*, 2013), además, las longitudes de onda cercanas a la región infrarroja son mejor absorbidas y su capacidad de penetrar superficies es menor en comparación con las longitudes más cercanas a la región visible (Agelet & Hurburgh, 2014); por lo que esta técnica permite detectar los cambios en la consistencia de los componentes de las semillas a causa de la pérdida de viabilidad de manera no destructiva (Kusumaningrum *et al.*, 2017; Lohumi *et al.*, 2013).

El análisis quimiométrico realizado en QUANT+ con la concentración de ácidos grasos, la germinación y los espectros infrarrojo arrojó altos valores de porcentaje de varianza (cuadro 7, figura 17 y 18) para la germinación, el ácido palmítico, el ácido linoleico y el ácido oleico; mientras que para el ácido esteárico la varianza fue bastante cercana a 80; por lo que se puede asumir que la calibración del modelo es buena y que el modelo generado para la determinación de la viabilidad de las semillas de *F. flavovirens* es adecuado y confiable. Sumado a ello, los altos valores en los coeficientes de correlación (r) para la germinación y los ácidos grasos (cuadro 7), así como sus valores de t obtenidos en la prueba de hipótesis, indican que las variables se encuentran correlacionadas significativamente; concluyendo que el modelo generado para la determinación de la viabilidad de las semillas de *F. flavovirens* es adecuado y confiable. De la misma manera, se han obtenido resultados satisfactorios para las predicciones mediante NIRS-QUANT+ para las semillas de otras especies de cactáceas tales como *S. stellatus* (Vergara, 2002), *N. tetetzo*, *N. mezcalaensis* (Lozada, 2005), *Pachycereus hollianus* (Manuell, 2006), y *P. chichipe* (Rogel, 2008).

Aspectos Ecológicos

Acorde al modelado de distribución potencial geográfica (figura 19) se espera que el área de distribución ubicada dentro del VTC, en especial los sitios que se encuentran dentro de la RBTC, sean espacios donde habite la especie, mientras que las áreas situadas en los estados de Hidalgo, Querétaro y Guanajuato podrían ser sobre representaciones que indican zonas donde existen las condiciones ambientales adecuadas para el establecimiento de poblaciones de *F. flavovirens*, ya que la mayoría de los modelos predicen la presencia probable de una especie en un sitio no explorado al extrapolar las asociaciones de los sitios donde se sabe que la especie prospera con respecto a un conjunto de factores ambientales (especialmente climáticos), para identificar áreas de presencia prevista en el mapa, por lo tanto, la distribución potencial debe abordarse como un escenario ideal donde la distribución de la especie está completamente en equilibrio con el espacio ambiental definido por las variables ambientales (Romero-Méndez & García-De la Peña, 2014; Ballesteros-Barrera *et al.*, 2017; Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004; Soberón & Peterson, 2005; Jiménez-Valverde *et al.*, 2008).

El área de distribución de una especie (Go) es el resultado de su ecología e historia evolutiva, determinada esencialmente por condiciones abióticas (A) que imponen límites fisiológicos para su desarrollo, incluidos aspectos del clima, entorno físico, condiciones edáficas, etc. Otra condicionante es el factor biótico (B) que limita o mejora los procesos e interacciones de la población, es decir, las interacciones con otros organismos que modifican la capacidad de la especie para mantener sus poblaciones. Igualmente se contempla el conjunto de sitios donde la especie ha podido dispersarse desde una zona original, y por último, la capacidad evolutiva de las poblaciones de la especie para adaptarse a nuevas condiciones tiene un papel dentro de la delimitación de posibilidades de distribución de las especies (M, área accesible). Es posible que en las áreas sobreestimadas existan condiciones ambientales favorables para la especie, pero se encuentran inaccesibles a causa de barreras geográficas, por falta de tiempo para que la especie

se disperse, y/o ausencia de interacciones biológicas que permitan la presencia de la especie en el sitio (Soberón & Peterson, 2005; Romero-Méndez & García-De la Peña, 2014; Ballesteros-Barrera *et al.*, 2017).

Previamente se registró que el área de distribución de *F. flavovirens* contaba con una extensión de 434 km² en el VTC (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003); empero, tal modelo de distribución potencial geográfica pudo verse limitado debido a que solo se emplearon 8 registros para su elaboración, mientras que para el presente modelo se utilizaron 117 registros dando como resultado un área de 5906.06 km² dentro de la república mexicana.

Conforme es más pequeña la distribución geográfica de una especie, mayor es el riesgo de extinción (Purvis *et al.*, 2000; Runge *et al.*, 2014); en este caso, la extensión de la distribución geográfica potencial de la especie (cuadro 8) es menor al 1% de la extensión continental del territorio nacional, y consecuentemente se considera que la distribución de *F. flavovirens* es muy restringida adquiriendo 4 puntos en el *Criterio A Amplitud de la distribución del taxón en México* del MER.

Respecto a la contribución de las variables bioclimáticas asociadas a la precipitación (cuadro 9) al modelo, se identificó que las variables de mayor relevancia para el modelo son la temperatura mínima del mes más frío y la temperatura estacional. La importancia de este factor para las plantas radica en que la temperatura influye en todos los procesos de las plantas, desde la fotosíntesis y respiración hasta el crecimiento y la supervivencia. Para las cactáceas, las bajas temperaturas son más críticas con respecto a la distribución de especies nativas de la familia; las bajas temperaturas provocan la contracción de los protoplastos y la desecación de las células, afectando las membranas celulares y enzimas, provocando la interrupción de los procesos metabólicos y la muerte celular eventualmente (Nobel & Bobich, 2002).

Por otra parte, como se mencionó previamente, al encontrarse el hábitat de *F. flavovirens* en zonas áridas el agua es un recurso clave (Rojas-Aréchiga *et al.*, 2013), por lo que se explicaría la presencia de una mayor cantidad de variables climáticas asociadas a la precipitación relevantes para el modelo; aunque la variable de precipitación del trimestre más frío se puede encontrar relacionada con la tolerancia de los cactus a la desecación celular durante las heladas y la capacidad de los cactus para resistir la deshidratación causada por la sequía (Nobel & Bobich, 2002).

El porcentaje de contribución del tipo de suelo puede deberse a que en áreas áridas los suelos derivados de diferentes litologías tienen diferentes capacidades de retención de agua provocando que la distribución de especies varíe en función de su germinación y sobrevivencia (Osorio-Beristain *et al.*, 1996). Se ha encontrado que hay una relación entre varias especies de cactus del género *Coryphantha*, *Opuntia*, *Echinocereus*, *Epithelantha*, *Glandulicactus*, *Ferocactus*, *Lophophora*, *Mammillaria* y *Thelocactus* con respecto a los tipos de suelo y a su composición mineral (Lebgue-Keleng *et al.*, 2014).

Por otra parte, las variaciones en los perfiles e inclinación, así como en el tamaño de la pedregosidad de la pendiente de las cuatro localidades visitadas (cuadro 10) son producto de

grandes transformaciones ocurridas a finales del Cuaternario, dadas por eventos de intensa erosión que formaron cerros de cimas planas con rocas calizas como roca madre, zonas de ladera con lutitas, zonas de deposición aluvial a lo largo del río Salado y áreas de material ígneo en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán (Osorio-Beristain *et al.*, 1996). A la par, la diversidad de especies dominantes en cada localidad es producto de las diferencias de litología, suelos, altitud, entre otras condiciones que pueden llegar a determinar las asociaciones vegetales presentes en el VTC (Valiente-Banuet *et al.*, 2000).

Otro carácter por considerar dentro de las condiciones del hábitat para *F. flavovirens* es que tiende a crecer con mayor frecuencia bajo el dosel vegetal que en espacios abiertos (cuadro 13), aunque no se tienen datos para determinar si el hábitat de la especie es altamente específico, solo en una localidad de las 4 visitadas se encontró una cobertura vegetal mayor al 80%, mientras que las demás tienen valores más bajos (60%-40%). Considerando todo lo mencionado respecto al hábitat, el *Criterio B. Estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón* fue categorizado como intermedio o limitante (3 puntos).

De acuerdo con Rojas-Aréchiga y colaboradores (1998), el periodo de floración coincide con la disminución de la temperatura y un fuerte descenso de la precipitación en el VTC a partir del mes de octubre, mientras que la fructificación concuerda con un aumento en la temperatura, pero bajas precipitaciones (cuadro 11), también se sabe que la maduración del fruto de especies del género *Ferocactus* ocurre al final de primavera (Pimienta-Barríos & Del Castillo, 2002). Es probable que sea una estrategia para evitar la depredación de las semillas que germinan inmediatamente después de la dispersión durante las lluvias de verano y otoño, ya que estas no presentan latencia (Rojas-Aréchiga *et al.* 1998). De manera similar, *M. pectinifera*, una cactácea endémica del VTC, concentra su floración y fructificación entre los meses de diciembre a mayo (Valverde *et al.*, 2009).

Por otro lado, es usual encontrar que dentro las cactáceas existen grandes variaciones en la producción de semillas por cada fruto incluso entre individuos de la misma especie (Rojas-Aréchiga & Vázquez-Yanes, 2000), comportamiento que se identificó en los frutos de la especie (288.3 ± 150.2 semillas) y se reportó en otras especies de cactáceas como *Epiphyllum anguliger*, *F. histrix*, *P. pringlei*, *P. weberi*, *Pilosocereus chrysacanthus*, *Echinopsis atacamensis* subsp. *Pasacana* y *Gymnocalycium monvillei* con rangos de producción entre 1000 y 8000 semillas (Barríos *et al.*, 2020).

Los resultados muestran que la estructura poblacional está conformada en su mayoría por individuos adultos y muy pocos de los ejemplares censados fueron jóvenes o plántulas (cuadro 12 y figura 20); indicando una alta mortalidad para las semillas y plántulas y una alta supervivencia para individuos más viejos. Similarmente, *F. acanthodes* y *F. cylindraceus*, entre otras cactáceas, presentan el mismo patrón de supervivencia (Tipo III) (Valiente-Banuet & Godínez-Álvarez, 2002).

Dicho lo anterior, se sugiere que la incorporación de nuevos individuos a la población es escasa y podría depender de factores como la temperatura y la precipitación, la reproducción y

las interacciones con otros organismos (Álvarez *et al.*, 2004). Las primeras etapas del ciclo de vida son las más importantes para mantener poblaciones viables en el campo, por lo que *F. flavovirens* presenta un carácter ecológico que la hace vulnerable a factores de disturbio como en el caso de *S. disciformis* y *T. pseudomacrolebe* (Valiente-Banuet & Godínez-Álvarez, 2002; Álvarez *et al.*, 2004).

Aunque no se encontraron diferencias significativas en la densidad poblacional en ninguna de las localidades visitadas más de la mitad de los ejemplares se encontraron bajo el dosel de la vegetación circundante (cuadro 13), debido a que proporciona condiciones microambientales que incrementan la probabilidad de supervivencia para las semillas y las plántulas porque el dosel de las plantas disminuye la radiación solar, incrementa la humedad disponible en el suelo y reduce el riesgo de depredación pero también incrementa la competencia inter e intraespecífica (Valiente-Banuet & Godínez-Álvarez, 2002; Álvarez *et al.*, 2004; Rojas-Aréchiga & Vázquez-Yanes, 2000). *F. flavovirens* germina adecuadamente a 15-20 °C, siendo 15°C la temperatura mínima 15°C y la máxima 40°C, la presencia de la vegetación adquiere importancia en la germinación porque la temperatura de superficies desprovistas de vegetación puede ser de hasta 65°C, mientras que bajo la sombra de la vegetación la temperatura es 10-20°C menor (Rojas-Aréchiga *et al.*, 1998, Valiente-Banuet & Godínez-Álvarez, 2002)

Se encontró que el porcentaje de germinación es alto bajo condiciones de laboratorio (cuadro 5) y la T_{50} se alcanza entre los 10-15 días (figura 12B). El tiempo de germinación es una característica importante de la historia de la vida vegetal que determina la capacidad de germinación en condiciones secas y el tiempo de reclutamiento (Barrios *et al.*, 2020), para el caso de las cactáceas carentes de latencia, es usual encontrar que las semillas están listas para germinar inmediatamente después de eliminar la limitación ambiental (Rojas-Aréchiga & Vázquez-Yanes, 2000). En otras especies del género como *F. haematacanthus*, el 50% de germinación se alcanza a los 16 días, mientras que las semillas sin escarificar de *F. histrix* requieren 13 días para alcanzar los mismos valores de germinación (Vázquez, 2013; Loustalot *et al.*, 2014).

Por otra parte, su forma de crecimiento globosa a elíptica y ramificación basítona permiten la propagación vegetativa, es decir, la presencia de nuevas plantas a partir del enraizamiento de fragmentos de plantas o ramas separadas de una planta madre; sin embargo, este tipo de reproducción asexual tiene una baja dispersión (Britton & Rose, 1963; Vázquez-Sánchez *et al.*, 2012; Valiente-Banuet & Godínez-Álvarez, 2002).

La producción exitosa de semillas, su dispersión y germinación, así como el establecimiento de plántulas y su supervivencia son esenciales para el mantenimiento de las poblaciones de cactus bajo condiciones naturales (Valiente-Banuet & Godínez-Álvarez, 2002), por lo que acorde a los caracteres ecológicos y fisiológicos de *F. flavovirens* se categorizó como altamente vulnerable (3 puntos) en el *Criterio C. Vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón*.

Por otro lado, el IDr mostró que el grado de disturbio en la localidad de San Juan Raya, Antonio Texcala y Zapotitlán Salinas fue moderado (cuadro 14), coincidiendo con los valores

encontrados por Martorell y Peters (2005) y Valverde y colaboradores (2009). No obstante, los bajos niveles de disturbio pueden afectar la biodiversidad ya que a largo plazo se convierten en perturbaciones crónicas (Ortega-Baes *et al.*, 2009).

El pastoreo de ganado se ha desplazado hacia zonas más áridas debido a la expansión agrícola, esta es una de las actividades productivas más importantes en las regiones áridas de América (Ortega-Baes *et al.*, 2009). Entre los agentes de mayor disturbio presentes en la mayoría de los sitios visitados esta la actividad ganadera, se identificó que en las áreas donde no había presencia de ganado de mayor tamaño estas eran empleadas como áreas de pastoreo para cabras revelando que en todas las áreas visitadas hay introducción de especies exóticas al hábitat; coincidiendo con lo reportado para otras localidades del VTC e indicando procesos de desertificación, en los que se distinguen 4 fases: agricultura, ganadería, cría de cabras y ovejas y erosión (Martorell & Peters, 2009).

Si bien algunas especies pueden ser amenazadas por la pérdida de hábitat, otras especies pueden resultar beneficios por el disturbio hasta un cierto umbral (especies ruderales)(Ortega-Baes *et al.*, 2009, Martorell & Petters, 2005); para el caso de *F. flavovirens*, a pesar de que el modelo lineal generalizado con distribución de Poisson mostró que hay una relación entre el disturbio y la densidad poblacional (figura 21), y se observó que en las localidades con disturbio hay individuos jóvenes, no es posible determinar si esta resulta beneficiada o afectada debido a que no se encontraron diferencias significativas en la densidad poblacional, por lo que se recomienda extender el muestreo en más localidades del VTC, así como establecer la relación entre el grado de disturbio con respecto a la estructura de la poblacional. Igualmente, *M. buizilopochtli* mostró una respuesta similar frente al disturbio; ya que su densidad poblacional fue relativamente afectada por las perturbaciones de su hábitat (Martorell & Petters, 2009).

A causa de la introducción de especies exóticas, así como de las actividades antropogénicas observadas en las zonas visitadas y los valores de IDr obtenidos se determinó que la gradación adecuada para el *Criterio D. Impacto de la actividad humana sobre el taxón* es de impacto medio (3 puntos).

Considerando los datos obtenidos, la *amplitud de la distribución del taxón en México* fue determinada como muy restringida (4 puntos) , mientras que el *estado del hábitat con respecto al desarrollo natural del taxón* fue intermedio o limitante (3 puntos), así mismo se consideró que la *vulnerabilidad biológica intrínseca del taxón* como vulnerable (3 puntos) y el *impacto de la actividad humana sobre el taxón* se encuentra en un grado medio (3 puntos), dando así una puntuación total de 13 puntos, y, conforme a lo indicado en el MER, se determinó que *Ferocactus flavovirens* debe ser categorizada como especie en peligro de extinción dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010.

El MER incorpora información de distintas fuentes y aunque su confiabilidad depende de la calidad de los datos obtenidos y la objetividad con la que sea la asignación de las puntuaciones considerando los resultados obtenidos, el método facilita la toma de decisiones y la formulación de hipótesis a probar en futuros estudio (Valverde *et al.*, 2009; Hernández-Nicolás

et al., 2015). Si bien, las puntuaciones fueron determinadas de la manera más cuidadosa en la medida de lo posible, éstas pueden ser modificadas en el futuro mediante las aportaciones de más estudios para la especie.

La información reportada en este trabajo contribuye a la conservación *in situ* y *ex situ* de *F. flavovirens*; ya que al determinar el comportamiento de tipo ortodoxo de las semillas y, que estas son potencialmente longevas, es posible emplear el almacenamiento de las semillas para preservar por varios años el acervo genético de la especie; asimismo, la evaluación del método QUANT+ nos permite concluir que es una técnica óptima para determinar la viabilidad de las semillas sin tener que germinar o emplear otro tipo de técnicas que implican la pérdida de las semillas.

Además, establecer el estado de conservación de *F. flavovirens* para su registro en la NOM059-SEMARNAT-2010 permite que la especie pueda ser contemplada dentro de las acciones de protección, conservación y aprovechamiento sustentable dentro de la LGVS bajo la vigilancia de las autoridades mexicanas.

Conclusiones

- El comportamiento de almacenamiento de las semillas de *F. flavovirens* es de tipo ortodoxo.
- Las estimaciones del tiempo en que disminuye una unidad probit (σ) obtenidas indican que las semillas de *F. flavovirens* están preparadas genética y químicamente para periodos de almacenamiento largo por lo que son potencialmente longevas y son aptas para ser almacenadas en un banco de semillas
- La viabilidad y la velocidad de germinación de las semillas de *F. flavovirens* son afectadas de manera negativa conforme se incrementa la humedad relativa, el envejecimiento acelerado y la edad de las semillas. Las variaciones en la longevidad de las semillas de *F. flavovirens* observadas a través de los valores de K_i , σ , P_{50} podrían ser a causa de la edad de las semillas.
- La concentración de ácidos grasos de las semillas de *F. flavovirens* tienden a disminuir conforme se incrementa el envejecimiento acelerado y el envejecimiento natural.
- El modelo quimiométrico generado en QUANT+ a partir de la concentración de ácidos grasos, el porcentaje de germinación y los espectros infrarrojo es un método no invasivo, adecuado y confiable para la determinación de la viabilidad de las semillas de *F. flavovirens*.
- La extensión continental de *F. flavovirens* es menor al 1% del territorio nacional por lo que su distribución es muy restringida.
- Las condiciones del hábitat de *F. flavovirens* indican que este puede ser limitante para su desarrollo natural en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán.
- Las características de la germinación, fenología, estructura y densidad poblacional, entre otras, indican que la vulnerabilidad biológica intrínseca de *F. flavovirens* es alta.
- El agente de disturbio mayoritariamente presente en el hábitat de *F. flavovirens* fue la actividad ganadera, así mismo no se encontró evidencia de que las perturbaciones afecten de manera negativa su densidad poblacional.
- El estado de conservación de *F. flavovirens* indica que es una especie en peligro de extinción de acuerdo con los criterios del MER, por lo que se recomienda incorporarla a la NOM.059-SEMARNAT-2010 lo antes posible.

Literatura Citada

- Abdul-Aki A. A. & Anderson D. J. 2012. Physiological and bioquimical deterioration in seed. En: Kozlowski, T. T. (Ed.). *Seed Biology, Volume II: Germination Control, Metabolism, and Pathology* is a part of a three-volume treatise, which aims to bring together a large body of important information on seed biology. Academic Press. New York, 283-309 p.
- Agelet L. E., & Hurburgh Jr C. R. 2014. Limitations and current applications of Near Infrared Spectroscopy for single seed analysis. *Talanta*, 121, 288-299.
- Aguirre-Bolaños M., Benítez-Flores J., González-Valle M., Hernández-Portilla L., Quintanar-Zúñiga R. & Flores-Ortiz C. 2017. Efecto del almacenamiento prolongado sobre la viabilidad y perfil de ácidos grasos en semillas de *Encyclia adenocarpa* (Lex.) Schltr. *Rev. Fitotec. Mex.* 40 (2): 151-160.
- Akbari M., Baradaran M., Amerian M., & Farrokhi N. 2020. Seed Pretreatment with Cinnamic Acid Positively Affects Germination, Metabolite Leakage, Malondialdehyde Content and Heterotrophic Growth of Aging Cowpea (*Vigna unguiculata*) Seeds. *Iran. J. Seed Res.*, 6(2), 163-176.
- Álvarez- Aguirre M., & Montaña C. 1997. Germinación y supervivencia de cinco especies de cactáceas del Valle de Tehuacán: implicaciones para su conservación. *Act. Bot. Mex.* 40: 43 - 58
- Álvarez R., Godínez-Álvarez H., Guzmán U. & Dávila P. 2004. Aspectos ecológicos de dos cactáceas mexicanas amenazadas: implicaciones para su conservación. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 75:7-16
- Arias M.S., Gama S. & Guzmán U. 2012. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Fasiculo 45. Cactaceae A.L. Juss. Instituto de Biología, UNAM, México.
- Arias S., Guzmán U., Mandujano M. C., Soto-Galván M. & Golubov J. 2005. Las especies mexicanas de cactáceas en riesgo de extinción. I Una comparación entre los listados NOM-059-ECOL-2001 (México), La Lista Roja (UICN) y CITES. *Cact. Suc. Mex.* 50(4): 100–125.
- Arias S., Hernández C., Valverde T. & Zavala-Hurtado A. 2013. *Ferocactus flavovirens*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T151720A553855. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T151720A553855.en>. Recuperado el 31 Julio 2020.

- Arriaga L., Espinoza-Rodríguez J. M., Aguilar-Zúñiga C, Martínez-Romero E., Gómez-Mendoza L., Loa-Loza E. & Larson J. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 609 p.
- Bailly C. 2004. Active Oxygen Species and Antioxidants in Seed Biology. *Seeds Sci. Res.* 14: 93-107
- Bailly C., El-Maarouf-Bouteau H., & Corbineau F. 2008. From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. *CR Biol.*, 331(10), 806-814.
- Ballesteros-Barrera C., Aguilar-Romero O., Zarate-Hernández R. & Ballesteros-Tapi L. 2017. Distribución geográfica y conservación de nueve especies del género *Ferocactus* (cactaceae) en México. *Rev. Fitotec. Mex.* 40(2); 131-140.
- Barrios D., Sánchez J. A., Flores J., & Jurado E. 2020. Seed traits and germination in the Cactaceae family: A review across Americas. *Bot. Sci.*, 98(3), 417-440.
- Berjak P. & Pammenter N. W. 2004. Recalcitrant Seeds. En: Benech-Arnold R., & Rodolfo, S. (eds). Handbook of seed physiology: Applications to agriculture. CRC Press, United States of America, 305-317 p.
- Bewley J. D., Bradford K., & Hilhorst H. 2013. Seeds: physiology of development, germination and dormancy. Springer Science & Business Media, 392 p.
- Blancas J. J., Casas A., Rangel-Landa S., Moreno-Calles A. I., Torres I. Z., Pérez-Negrón E., Solís L., Delgado-Lemus A., Parra F., Arellanes Y., Caballero J., Córtes L. H., Lira R., & Dávila P. 2010. Plant Management in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Econ. Bot.* 64: 287-302.
- Britton N. L., & Rose J. N. 1963. The Cactaceae: descriptions and illustrations of plants of the cactus family. Volumen III y IV. Courier Corporation, 236 p.
- Boas M.L. 1983. Mathematical methods in the physical sciences. John Wiley & Sons, New York, 793 p.
- CONABIO. 1998. Subcuencas hidrológicas. Extraído de Boletín hidrológico. (1970). Subcuencas hidrológicas en Mapas de regiones hidrológicas. Escala más común 1:1000000. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Jefatura de Irrigación y control de Ríos, Dirección de Hidrología. México.

- CONABIO. 2009. Capital natural de México, Volumen II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 806 p.
- CONANP. 2013. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México.
- CONANP. 2017. Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas Recuperado el 13 de diciembre de 2018 en http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/info_shape.htm
- Copeland L. O. & McDonald M. B. 2001. Principles of seed science and technology. Lower Academic Publishers, Dordrecht
- Crawford A. D., Plummer J. A., Probert R. J. & Steadman, K. J. 2010. The influence of cone age on the relative longevity of *Banksia* seeds. *Ann. Bot.* 107(2), 303-309.
- Daniel I. O., Kruse M., & Börner A. 2013. Controlled Deterioration and Predicting Viability of Okra Seed in Storage. *Int. J. Veg. Sci.*, 19(4), 324–333.
- Dávila P., Arizmendi M. C., Valiente-Banuet A., Villaseñor J. L., Casas A. & Lira R. 2002. Biological diversity in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Biodivers Conserv* 11:421-442.
- Del Castillo, R. F. 1986. Semillas, germinación y establecimiento de *Ferocactus histrix*. *Cact. Suc. Mex.*, 31: 5–11.
- Díaz C. O. 2014. *Ariocarpus kotschoubeyanus* (cactaceae) en Querétaro: una evaluación de aspectos básicos de demografía y conservación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México.
- DOF.1998. Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de reserva de la biosfera, la región denominada Tehuacán-Cuicatlán, ubicada en los estados de Puebla y Oaxaca, Estados Unidos Mexicanos, Presidencia de la República. México, D. F. Viernes 18 de septiembre de 1998. 8-20. p.
- DOF. 2018. Ley General de Vida Silvestre. Nueva Ley Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 3 de julio del 2000 y reformada el día 19 de enero del 2018 por el H. Congreso de la Unión. Presidencia de la República de los Estados Unidos Mexicanos.
- Durán-Hernández D., Gutiérrez-Hernández G. F., Arellano-Vázquez J. L., García-Ramírez E., & Virgen-Vargas J. 2011. Molecular characterization and seed germination of blue corn landraces with accelerated aging. *Agron. Mesoam.* 22(1): 11-20.

- Enciclovida. s/f. *Ferocactus flavovirens*. Recuperado el 03 de agosto del 2019 en: <http://enciclopedia.mx/especies/144060-ferocactus-flavovirens>
- Ellis R.H. and Roberts E.H. 1980. Improved equations for the prediction of seed longevity. *Annals of Botany*, 45: 13-30.
- El-Maarouf-Bouteau, H., Mazuy, C., Corbineau, F., & Bailly, C. 2011. DNA alteration and programmed cell death during ageing of sunflower seed. *J. Exp. Bot.*, 62(14), 5003-5011.
- Ervin J. 2003. Protected area assessments in perspective. *BioSci.* 53: 819–822
- ESRI. 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Ferreira D. S., Galão O. F., Pallone J. A. L. & Poppi, R. J. 2014. Comparison and application of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy for determination of quality parameters in soybean samples. *Food Control*, 35(1): 227-232.
- Fick S. E. & Hijmans R.J. 2017. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*
- Finkelstein L. & Carson E.R. 1986. *Mathematical modeling of dynamic biological systems*. Research Studies Press, LTD, New York. 355 p.
- GBIF, Global Biodiversity Information Facility (2019) Biodiversity data. GBIF.org (15 August 2019). GBIF Occurrence Download <https://doi.org/10.15468/dl.qwuvf7>
- Godínez-Álvarez H., Jiménez M., Mendoza M., Pérez F., Roldán P., Ríos-Casanova L. & Lira R. 2008. Densidad, estructura poblacional, reproducción y supervivencia de cuatro especies de plantas útiles en el Valle de Tehuacán, México. *Rev. Mex. Biodiv.* 79 (2): 393-403.
- Godínez-Álvarez H., & Ortega-Baes P. 2007. Diversidad de cactáceas mexicanas: correlaciones ambientales y prioridades de conservación. *Bot. Sci.* 81: 81-87
- Godínez-Álvarez H., Jiménez M., Mendoza M., Pérez F., Roldán P., Ríos-Casanova L. & Lira R. 2008. Densidad, estructura poblacional, reproducción y supervivencia de cuatro especies de plantas útiles en el Valle de Tehuacán, México. *Rev. Mex. Biodiv.* 79 (2): 393-403.
- Goettsch B., Hilton-Taylor C., Cruz-Piñón G., Duffy J. P., Frances A., Hernández H. M., & Taylor, N. P. 2015. High proportion of cactus species threatened with extinction. *Nature plants*, 1(10): 15142.

- González-Zertuche L., Orozco-Segovia A., Baskin C., & Baskin J. M. 2002. Effects of Priming on Germination of *Buddleja Cordata* Ssp. *Cordata* (Loganiaceae) Seeds and Possible Ecological Significance. *Seed Sci. Tech.* 30(3): 535–48
- Harrington, J.F. 1972. Seed storage and longevity. En: T.T. Kozlowski (ed.). *Seed biology*, vol. III. Academic. New York, 145-245 p
- Hay, F. R., Mead, A., & Bloomberg, M. 2014. Modelling seed germination in response to continuous variables: use and limitations of probit analysis and alternative approaches. *Seed Science Research*, 24(3), 165.
- Hernández M. H. & Godínez A. H. 1994. Contribución al conocimiento de las cactáceas mexicanas amenazadas. *Acta Bot. Mex.* 26: 33 - 52
- Hernández H., & Gómez-Hinostrosa C. 2011. Areas of endemism of Cactaceae and the effectiveness of the protected area network in the Chihuahuan Desert. *Oryx* 45(2), 191-200.
- Hernández-Nicolás N., Córdova-Téllez L., Romero-Manzanares A., Jiménez-Ramírez J., Lobato-Ortiz R. & Cuevas-Sánchez J. 2015. Diagnóstico ecológico para la conservación de *Jatropha* spp. (Euphorbiaceae) y sus hábitats, en la Reserva Tehuacán-Cuicatlán, México. *Rev. Biol. Trop.*, 63(1), 23-33.
- Hong T.D. & Ellis R.H. 1996. A protocol to determine seed storage behaviour. IPGRI Technical Bulletin No. 1. (J.M.M. Engels and J. Toll, vol. eds.) International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. Recuperado el 29 de agosto de 2017 en: https://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/images/file/learning_space/technicalbulletin1.pdf
- IBUNAM. (s/f, *Ferocactus flavovirens* (Scheidw.) Britton & Rose. En Portal de Datos Abiertos UNAM (en línea), México, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 10 de agosto del 2019 en: <http://datosabiertos.unam.mx/IBUNAM:MEXU>
- INEGI, 2007. Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2017 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México: Recuperado 16 de mayo del 2020 en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGEUM_2017/702825097912.pdf
- INEGI. 2017a. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. 2da. Edición. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, México. Recuperado el 1 de febrero de 2019 en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. 2017b. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). México.

- INEGI, INE, CONAGUA. 2007. Mapa de Cuencas Hidrográficas de México, 2007. Escala 1:250000, elaborada por Priego A.G., Isunza E., Luna N. y Pérez J.L. México, D.F.
- INEGI 2001. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1'000,000. Serie I. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Jaramillo-Luque V., & González-Medrano, F. 1987. Análisis de la vegetación arbórea en la provincia florística de Tehuacán-Cuicatlán. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 45: 49-64.
- Jiménez S. C. 2011. Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Rev. Dig. Univ.* 1(12):1-22.
- Jiménez-Sierra C. L.; Sosa Ramírez J.; Cortés-Calva P.; Solís Cámara A. B.; Íñiguez Dávalos L. I. & Ortega-Rubio A. 2014. México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Inv. Cien. Univ. Autón.* Ags.60, 16-22.
- Jiménez-Valverde, A., J. M. Lobo and J. Hortal. 2008. Not as good as they seem: the importance of concept in species distribution modelling. *Divers. Distrib.* 14:885-890.
- Kandpal L. M., Lohumi S., Kim M. S., Kang J. S., & Cho B. K. 2016. Near-infrared hyperspectral imaging system coupled with multivariate methods to predict viability and vigor in muskmelon seeds. *Sens. Actuators. B: Chem.* 229: 534-544.
- Kapoor N., Arya A., Siddiqui M.A., Amir A. & Kumar H. 2010. Seed deterioration in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under accelerated ageing. *Asian J. Plant Sci.* 9 (3): 158-162.
- Kapoor N., Arya A., Siddiqui M. A., Kumar H., & Amir A. 2011. Physiological and biochemical changes during seed deterioration in aged seeds of rice (*Oryza sativa* L.). *Am. J. Plant Physiol.* 6(1): 28-35.
- Kibinza S., Vinel D., Côme D., Bailly C., & Corbineau F. 2006. Sunflower seed deterioration as related to moisture content during ageing, energy metabolism and active oxygen species scavenging. *Physiol. Plantarum* 128(3): 496-506.
- Kochanek J., Steadman K. J., Probert R. J., & Adkins S. W. 2009. Variation in seed longevity among different populations, species and genera found in collections from wild Australian plants. *Aust. J. Bot.*, 57(2), 123-131.
- Kranner I., Minibayeva F. V., Beckett R. P., & Seal C. E. 2010. What is stress? Concepts, definitions and applications in seed science. *New Phytol.*, 188(3), 655-673.

- Krebs J. 1985. Ecología: Estudio de la distribución y abundancia. Harla. 2a ed. México. D.F., México, 753 p.
- Kusumaningrum D., Lee H., Lohumi S., Mo C., Kim M. S., & Cho B. K. 2018. Non-destructive technique for determining the viability of soybean (*Glycine max*) seeds using FT-NIR spectroscopy. *J Sci Food Agric.*, 98(5), 1734-1742.
- Lebgue-Keleng T., Aviña-Domínguez Y. E., Soto-Cruz R. A., Quiñonez-Martínez M., Cortés-Palacios L., Melgoza-Castillos A., Morales-Nieto C., Sanchez-Verin, C. V., & Balderrama-Castañeda, S. 2014. Mineralogía del suelo y su relación con las especies de cactáceas en el sureste de Chihuahua, México. *Ecol. Apl.*, 13(2), 205-209.
- Lohumi S., Mo C., Kang J. S., Hong S. J., & Cho B. K. 2013. Nondestructive evaluation for the viability of watermelon (*citrullus lanatus*) seeds using fourier transform near infrared spectroscopy. *J. Biosyst. Eng.*, 38(4), 312-317.
- Loustalot L. E., Malda B. G. X., Suzán A. H., Hernández S. L. G. & Guevara Escobar, A. 2014. Estudio de germinación y crecimiento en semillas de *Ferocactus histrix* (De Candolle). *Cact. Suc. Mex.*, 59(3).
- Lozada V. Y. 2005. Peroxidación de ácidos grasos de semillas de *Neobuxbaumia tetetzo* y *Neobuxbaumia mezcalaensis* en condiciones de almacenamiento a largo plazo. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Manuell C. I. E. B. 2006. Efecto del envejecimiento acelerado sobre los niveles de ácidos grasos insaturados de semillas de *Pachycereus hollianus*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Márquez G. J., Collazo O. M., Martínez G. M., Orozco S. A. & Vázquez S. S. 2013. La familia Cactaceae. Biología de las angiospermas. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 492
- Martorell, C. & Peters E. 2005. The measurement of chronic disturbance and its effects on the threatened cactus *Mammillaria pectinifera*. *Biol. Cons.* 124:199-207.
- Martorell, C. & Peters E. 2009. Disturbance-Response Analysis: A Method for Rapid Assessment of the Threat to Species in Disturbed Areas. *Conserv. Biol.*, 23(2), 377-387.
- Mc Donald M. B. 1999. Seed Deterioration: Physiology, Repair and Assesment. *Seed Sci. Tech.* 27:177-237

- Mc Donald M. B. 2004. Orthodox Seed Deterioration and Its Repair. En: Benech-Arnold R., & Rodolfo, S. (eds). Handbook of seed physiology: Applications to agriculture. CRC Press, United States of America, 305-317 p.
- Miguel-Talonia C., Téllez-Valdés O., & Murguía-Romero M. 2014. The cacti of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico: estimation of the quality of sampling. *Rev. Mex. Biodiv.* 85 (2): 436-444.
- Nagel M., Kranner I., Neumann K., Rolletschek H., Seal, C. E., Colville L., Fernández-Marín B. & Börner A. 2014. Genome-wide association mapping and biochemical markers reveal that seed ageing and longevity are intricately affected by genetic background and developmental and environmental conditions in barley. *Plant Cell Environ.* 38(6), 1011-1022
- Naturalista. s/f. *Ferocactus flavovirens*. Consultado el 25 de agosto del 2019 en: <https://www.naturalista.mx/taxa/274272-Ferocactus-flavovirens>
- Newton F., Hay F. & Probert R. 2009. Protocol for comparative seed longevity testing. Technical Information Sheet_01. Royal Botanic Gardens, Kew, UK. Recuperado el 20 de febrero de 2018 en: https://www.kew.org/sites/default/files/01-comparative%20longevity%20web_0.pdf
- Nobel P. S. & Bobich G. E. 2002. Environmental biology. En: Nobel P. S. (Ed.). Cacti: Biology and Uses, University of California Press, Berkeley, 57-74p.
- Obunyali C. O., Muasya R. M., Nyamongo D. O. & Van Rheenen H. 2008. A study on comparative longevity of banked and freshly collected seeds of two wild sesame species. *S. Afr. J. Bot.* 74: 764–767
- Osorio-Beristain O., Valiente-Banuet A., Dávila P., & Medina R. 1996. Tipos de vegetación y diversidad β en el valle de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, México. *Bot. Sci.*, (59), 35-58.
- Ortega-Baes P., Sühring S., Sajama J., Sotola E., Alonso-Pedano M., Bravo S., & Godínez-Álvarez H. 2009. Diversity and Conservation in the Cactus Family. En: Ramawat K. G. (Ed.). Desert Plants, Biology and Biotechnology. Springer, Berlin, Heidelberg. 157–173p.
- Peters E. M., Arizaga S., Martorell C., Zaragoza R., & Ezcurra E. 2014. Distribución geográfica y estado de conservación de las poblaciones de *Mammillaria pectinifera*. *Rev. Mex. Biodiv.* 85(3): 942-952.
- Pimienta-Barrios & Del Castillo. 2002. Reproductive biology. En: Nobel P. S. Ed. Cacti: Biology and Uses, University of California Press, Berkeley, 75-90 p.

- Phillips S. J., Dudík M. & Schapire R. E. sin fecha. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Recuperado el 10 de diciembre de 2018 en http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2018-12-13.
- Priestley D. A., Werner B. G., Leopold A. C. & McBride M. B. 1985. Organic Free Radical Levels in Seeds and Pollen: The Effects of Hydration and Aging. *Physiol. Plantarum* 64(1): 88–94.
- Pritchard H. W. & Dickie J. B. 2003. Predicting seed longevity: the use and abuse of seed viability equations. En: R.D Smith., J.D Dickie., S.H. Linington, H.W Pritchard & R.J Probert (eds) Seed conservation: turning science into practise. Royal Botanic Gardens. Kew, UK. 653–721 p.
- Pukacka S., & Ratajczak E. 2007. Age-related biochemical changes during storage of beech (*Fagus sylvatica* L.) seeds. *Seed Sci. Res.* 17(1): 45-53.
- Rao N. K., Hanson J, Dulloo ME, Ghosh K, Nowell D & Larinde M. 2006. Manual of seed handling in genebanks. Handbooks for Genebanks No. 8. Bioversity International, Rome, Italy.
- REMIB, Red Mundial de Información sobre Biodiversidad. 2015. En: http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html. (agosto 2019)
- Rodríguez-Arévalo I, Mattana E., García L., Liu U., Lira R., Dávila P., Hudson A., Pritchard W. H. & Ulian T. 2017. Conserving seeds of useful wild plants in Mexico: main issues and recommendations. *Genet Resour Crop Evol* 64: 1141-1190
- Rogel R. L. 2008. Efecto del envejecimiento acelerado en semillas de *Polaskia chende* y *Polaskia chichipe* de la región de San Luis Atolotitlán, Pue. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. 36-37, 70.
- Rojas-Aréchiga M., Vázquez-Yanes C., & Orozco-Segovia A. 1998. Seed response to temperature of Mexican cacti species from two life forms: an ecophysiological interpretation. *Plant Ecol.* 135(2): 207-214.
- Rojas-Aréchiga M., & Vázquez-Yanes C. 2000. Cactus seed germination: a review. *J. Arid Environ.*, 44(1), 85-104.
- Rojas-Aréchiga, M., Mandujano, M. C., & Golubov, J. K. 2013. Seed size and photoblastism in species belonging to tribe Cactaeae (Cactaceae). *J Plant. Res.* 126:373–386.

- Rosales-Torres S., Ramírez-Arriaga E., Martínez-Bernal A., Zarate-Hernández M. de R., Valiente-Banuet A., & Márquez-García A. Z. 2017. Palinoflora del Plioceno-Pleistoceno recuperada de los travertinos Villa Alegría y Cerro Prieto en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 34(2): 114-137.
- Royal Botanic Gardens Kew. 2020. Seed Information Database (SID). Version 7.1. Available from: <http://data.kew.org/sid/> (July 2020)
- Royo-Márquez M. H., Melgoza-Castillo A. & Quintana-Martínez G. 2014. Especies vegetales en peligro, su distribución y estatus de conservación de los ecosistemas donde se presentan. *Rev. Mex. Cienc. For.* 5(22): 86-103.
- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 504 p.
- Sánchez-Salas J., Muro G., Estrada-Castillón E., & Alba-Ávila J. A. 2013. El MER: Un instrumento para evaluar el riesgo de extinción de especies en México. *Rev. Chapingo ser. zonas áridas*, 12(1):30-43
- Sánchez, S. J.; Jurado, Y. E.; Pando, M. M.; Flores, R. J.; Muro, P. G. 2010. Estrategias germinativas de las semillas en ambientes áridos. *Rev. Chapingo ser. zonas áridas*, 9 (1): 35-38
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059- SEMARNAT-2001 Protección ambiental–especies nativas de México de flora y fauna silvestres – categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio – lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. México, 78 p.
- SIMEC. Sin fecha. Ficha Técnica Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, México. CONANP. Recuperado el 12 de enero de 2019 en: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=123>
- Stewart R., & Bewley J. D. 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. *Plant physiol.* 65(2): 245-248.
- Soberón J. & Peterson A. T. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10.
- Téllez-Valdés O. & Dávila-Aranda P. 2003. Protected Areas and Climate Change: A Case Study of the Cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Cons. Biol.* 17(3): 846-853.
- Téllez-Valdés O., Dávila P. & Álvarez R. X. s. f. Evaluación de conservación de especies de Cactaceae en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Universidad Nacional

Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. HK040. México D.F

- Valiente-Banuet A., Casas A., Alcántara A., Dávila P., Flores N., Arizmendi M. C., Villaseñor J. L., & Ortega J. 2000. La vegetación del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 67:24–74.
- Valiente-Banuet A. & Godínez-Álvarez H. 2002. Population and community ecology. En: Nobel P. S. Ed. *Cacti: Biology and Uses*, University of California Press, Berkeley, 91–108p
- Valverde P. L., Zavala-Hurtado J. J., Jiménez-Sierra C., Rendón-Aguilar B., Cornejo-Romero A., Rivas-Arancibia S., López-Ortega G. y Pérez-Hernández M. A. 2009. Evaluación Del Riesgo de Extinción de *Mammillaria Pectinifera*, Cactácea Endémica de La Región de Tehuacán-Cuicatlán. *Rev. Mex. Biodiv.* 80: 219–30.
- Vergara M. L. F. L. 2002. inducción de envejecimiento artificial en semillas de *Stenocereus stellatus* y *Brassica napus* L. y su posible relación con la peroxidación de ácidos grasos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vázquez Q. B. F. 2013. Estudio demográfico de dos poblaciones de *Ferocactus haematacanthus* (Cactaceae) en el Valle de Tehuacán, Pue., México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villaseñor J. L., Dávila P. & Chiang F. 1990. Fitogeografía del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 50: 135–149
- Walters, C., Ballesteros, D., & Vertucci, V. A. 2010. Structural mechanics of seed deterioration: standing the test of time. *Plant Sci.*, 179(6), 565-573.
- Wang Y., Li Y., Xue H., Pritchard H. W. & Wang X. 2015. Reactive oxygen species-provoked mitochondria-dependent cell death during ageing of elm (*Ulmus pumila* L.) seeds. *Plant J.*, 81(3), 438-452.
- Yang X., Pritchard H.W. & Nolasco H. 2003. Effects of temperature on seed germination in six species of Mexican Cactaceae. En: Smith, R.D., Dickie, J.B., Linington, S.H., Pritchard, H.W. and Probert, R.J. (eds.). *Seed Conservation*. The Royal Botanic Gardens, Kew, The Cromwell Press Ltd., Great Britain, 576–586 p.
- Zar J.H. 1974. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, London, 718 p.
- Zavaleta P. M. 2005. Relación entre los niveles de ácidos grasos insaturados y la viabilidad en semillas de *Hechtia podantha* y *Beaucarnea gracilis* durante el envejecimiento acelerado. Tesis

de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México.

Zepeda V. 2017. Distribución espacial, estructura de tamaños y reproducción de *Astrophytum ornatum* (cactaceae). *Acta Bot. Mex.* 19: 1–13.

Zinsmeister J., Leprince O., & Buitink J. 2020. Molecular and environmental factors regulating seed longevity. *Biochem. J.* 477(2), 305-323.

Apéndices

I. Curvas de germinación del gradiente de Humedad Relativa.

En las gráficas se observa las curvas de germinación de *F. flavovirens* generadas conforme se incrementaba el periodo de almacenamiento. Los tratamientos se encuentran agrupados por los valores de humedad relativa.

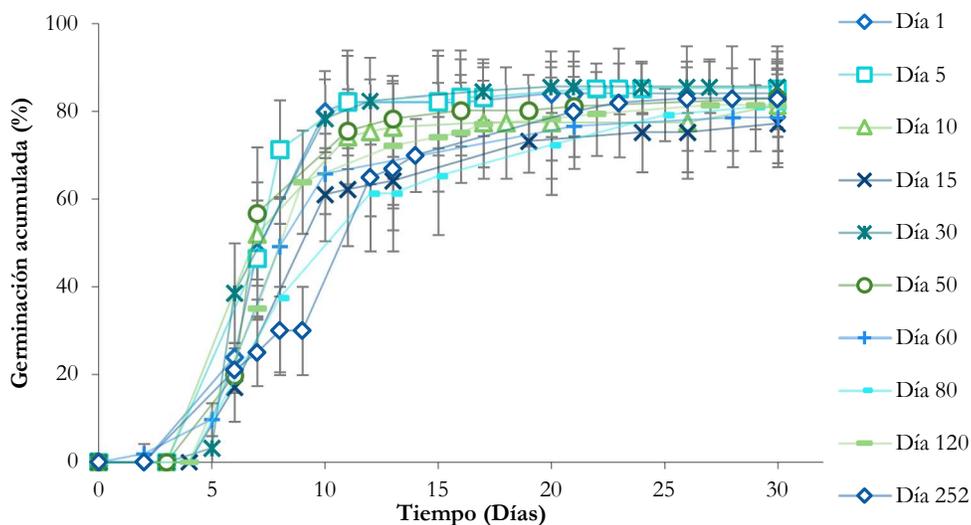


Figura 22. Curvas de las medias (\pm desviación estándar) de la germinación bajo envejecimiento acelerado a 30% HR/ 45°C

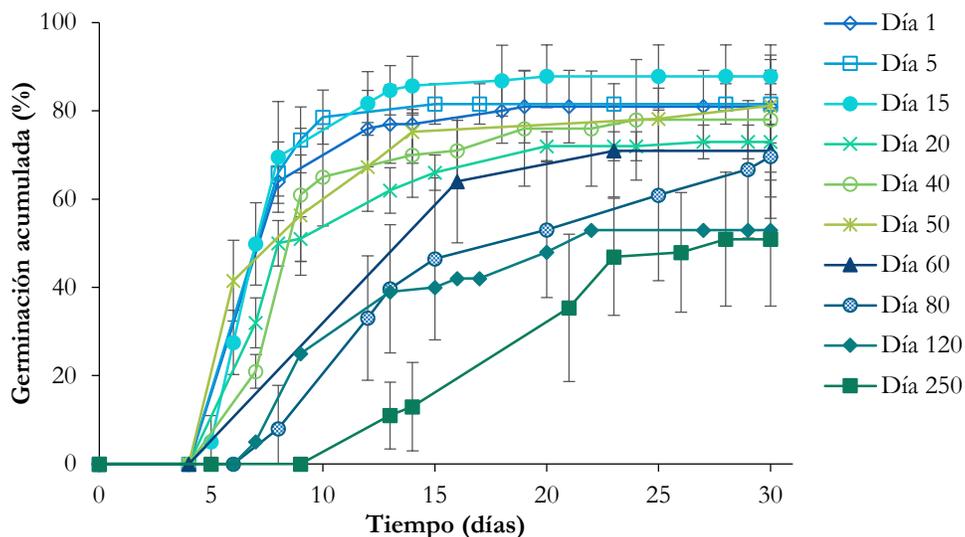


Figura 23. Curvas de las medias (\pm desviación estándar) de la germinación bajo envejecimiento acelerado a 40% HR/ 45°C.

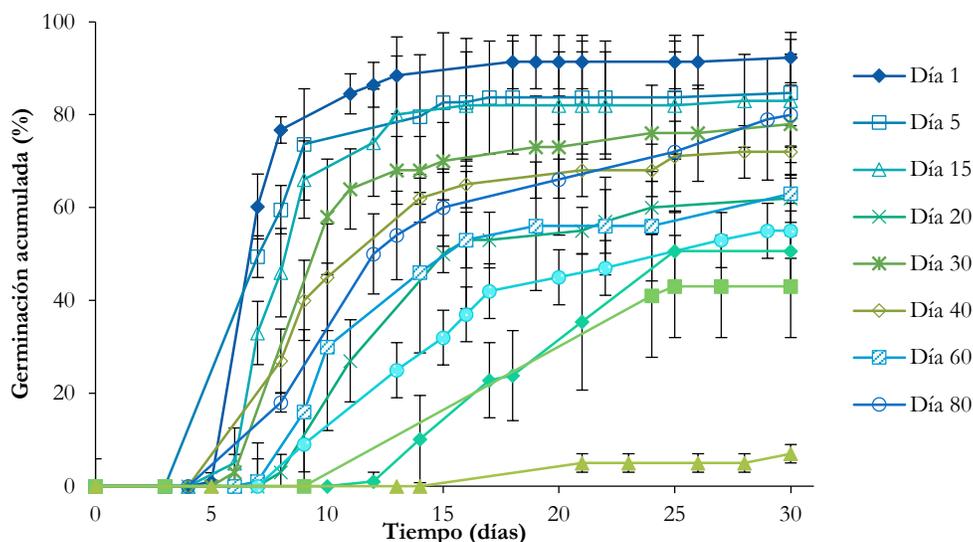


Figura 24. Curvas de las medias (\pm desviación estándar) de la germinación bajo envejecimiento acelerado a 50% HR/ 45°C.

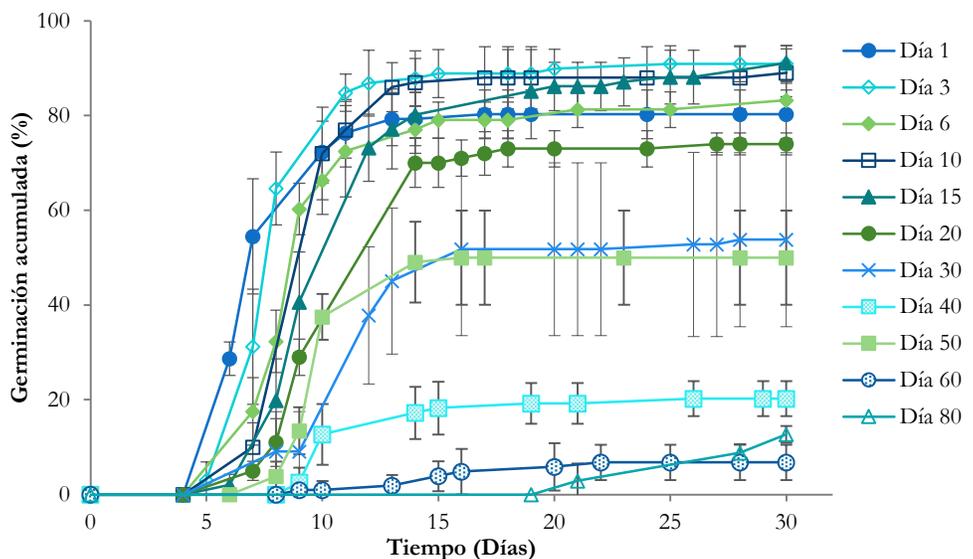


Figura 25. Curvas de las medias (\pm desviación estándar) de la germinación bajo envejecimiento acelerado a 60% HR/ 45°C.

II. Análisis de Varianza de la germinación y la T_{50} del gradiente de Humedad Relativa a 45°C.

Las tablas ANOVA de un factor corresponden al porcentaje de germinación transformado a arcoseno y ajustados a una curva exponencial sigmoide ($Y=a/\{1+b \exp[-cx]\}$); posteriormente se adecuó a un modelo Gausiano ($Y=a+b \exp (-0.5 [(x-c) /d]^2)$) para obtener la T_{50} y los valores obtenidos fueron comparados con ANOVA de un factor ($P < 0.05$).

$$H_0: X_1=X_2=X_3 \quad H_a: X_1 \neq X_2 \neq X_3$$

Cuadro 15. Tabla ANOVA de la germinación del tratamiento 30% HR/ 45°C.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Tratamiento	152.8	9	16.98	F = 0.3676	P=0.9416
Dentro del grupo	1386	30	46.2		
Total	1539	39			

Cuadro 16. Tabla ANOVA de la germinación del tratamiento a 40% HR/ 45°C.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Tratamiento	2324	9	258.3	F = 5.009	P=0.0004
Dentro del grupo	1547	30	51.55		
Total	3871	39			

Cuadro 17. Tabla ANOVA la germinación del tratamiento 50% HR/ 45°C.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Tratamiento	11316	11	1029	F = 20.84	P<0.0001
Dentro del grupo	1777	36	49.36		
Total	13093	47			

Cuadro 18. Tabla ANOVA la germinación del tratamiento 60% HR/ 45°C.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Tratamiento	18725	10	1873	F = 79.67	P<0.0001
Dentro del grupo	775.6	33	23.5		
Total	19501	43			

Para la T_{50} se realizó el Test Kruskal-Wallis de un factor debido a que la prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk) indicó que los datos no obedecen una distribución normal ($P < 0.050$). Para la prueba de Kruskal-Wallis se tomó la siguiente regla de decisión:

$$H_0: H < H_c \quad H_a: H > H_c$$

Cuadro 19. Test Kruskal-Wallis de un factor. Análisis de la varianza de la T_{50} del tratamiento 30% HR/ 45°C.

Prueba Kruskal-Wallis	
P valor	0.0004
Número de grupos	10
Estadístico Kruskal-Wallis	30.39

Cuadro 20. Test Kruskal-Wallis de un factor. Análisis de la varianza de la T_{50} del tratamiento 40% HR/ 45°C.

Prueba Kruskal-Wallis	
P valor	0.0014
Número de grupos	10
Estadístico Kruskal-Wallis	26.95

Cuadro 21. Test Kruskal-Wallis de un factor. Análisis de la varianza de la T_{50} del tratamiento 50% HR/ 45°C.

Prueba Kruskal-Wallis	
P valor	0.0004
Número de grupos	11
Estadístico Kruskal-Wallis	31.80

Cuadro 22. Test Kruskal-Wallis de un factor. Análisis de la varianza de la T_{50} del tratamiento 60% HR/ 45°C.

Prueba Kruskal-Wallis	
P valor	0.0012
Número de grupos	8
Estadístico Kruskal-Wallis	23.86

III. Curvas de germinación de los lotes colectados en 2010 y en 2018 a 60% HR/45 °C.

Las figuras muestran las curvas de germinación generadas conforme se incrementaba el periodo de almacenamiento de las semillas de *F. flavovirens* de dos lotes con diferente grado de envejecimiento natural.

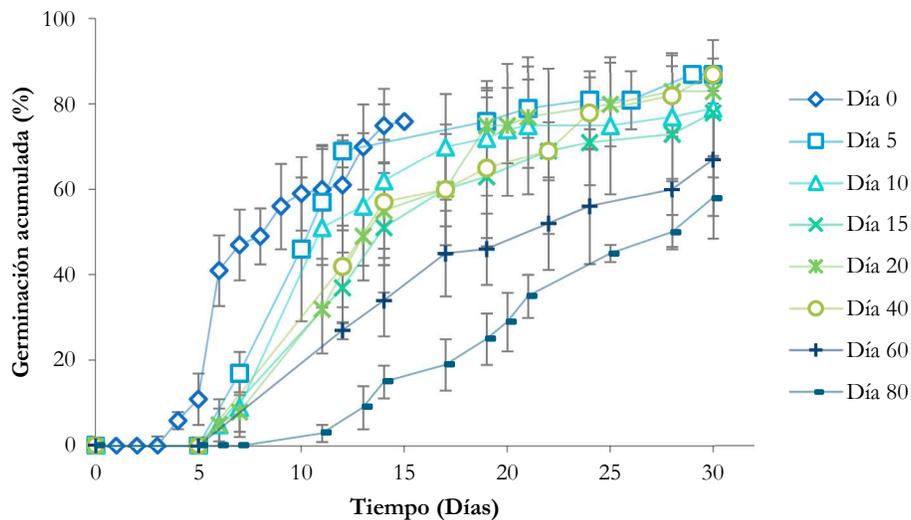


Figura 26. Curva de las medias (\pm desviación estándar) de la germinación del lote colectado en 2018 a 60% de Humedad Relativa/45 °C.

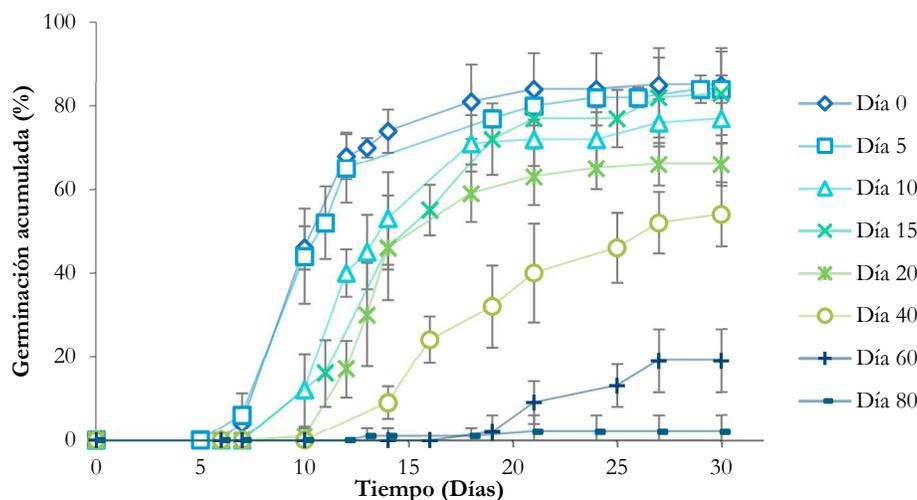


Figura 27. Curva de las medias (\pm desviación estándar) de la germinación del lote colectado en 2010 a 60% de Humedad Relativa/45 °C.

IV. Análisis de Varianza de la germinación y la T_{50} de los lotes colectados en 2010 y 2018 a 60% de Humedad Relativa/45 °C.

Las tablas ANOVA de uno y dos factores corresponden al porcentaje de germinación transformado a arcoseno y ajustados a una curva exponencial sigmoide ($Y=a/\{1+b \exp[-cx]\}$); posteriormente se adecuó a un modelo Gausiano ($Y=a+b \exp (-0.5 [\{x-c\} /d]^2)$) para obtener la T_{50} y los valores obtenidos fueron comparados con ANOVA de un factor ($P < 0.05$).

$$H_0: X_1=X_2=X_3,\dots \quad H_a: X_1 \neq X_2 \neq X_3$$

Cuadro 23. Tabla ANOVA de Dos Factores de la germinación de dos lotes de *F. flavovirens*.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Interacción	4643	7	663.3	F = 17.06	P<0.0001
Periodo de envejecimiento acelerado	11519	7	1646	F = 42.32	P<0.0001
Año de colecta	2637	1	2637	F = 67.81	P<0.0001
Residual	1867	48	38.89		

Cuadro 24. Tabla ANOVA de la T_{50} del lote colectado en 2018.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Tratamiento	578.4	7	82.64	F = 12.71	P<0.0001
Dentro del grupo	143	22	6.502		
Total	721.5	29			

Cuadro 25. Tabla ANOVA de la T₅₀ del lote colectado en 2010.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Tratamiento	97.75	5	19.55	F = 12.03	P<0.0001
Dentro del grupo	26.01	16	1.626		
Total	123.8	21			

V. Comparación de la pendiente de las rectas obtenidas en el análisis PROBIT

Para la comparación de las pendientes de las rectas obtenidas a partir del análisis probit se realizó la prueba de F de Fisher y la prueba t de student bajo la siguiente regla de decisión:

$$H_0: F_c < F_t \quad H_a: F_c > F_t$$

$$H_0: t_c < t_t \quad H_a: t_c > t_t$$

Cuadro 26. Comparación de la pendiente de la recta del análisis PROBIT 60% HR vs 50% HR, 40% HR y 30% HR.

Comparación pendiente 60% vs	50%*	40%*	30%*
Prueba F			
F calculado	19.6193	36.1679	106.1061
Ft 95%	F _(9,10) = 3.02	F _(9,8) = 3.39	F _(9,8) = 3.39
Prueba t			
t calculado	4.7645	5.5584	6.4114
t1	2.262	2.262	2.262
t2	2.228	2.306	2.306
t' calculado	2.26035	2.26318	2.2624

*Varianzas no homogéneas entre los tratamientos.

Cuadro 27. Comparación de la pendiente de la recta del análisis PROBIT 50% HR vs 40% HR y 30% HR.

Comparación pendiente 50% vs	40%	30%*
Prueba F		
F calculado	1.8435	5.4082
Ft _(10,8) 95%	3.35	3.35
Prueba t		
t calculado	2.6762	6.3364
t tablas ₍₂₀₎ 95%	2.086	
t1		2.228
t2		2.306
t' calculado		2.9360

*Varianzas no homogéneas entre los tratamientos.

Cuadro 28. Comparación de la pendiente de la recta del análisis PROBIT 40% HR vs 30% HR.

Comparación pendiente 40% vs		30%
Prueba F		
	F calculado	2.9337
	F $t_{(8,8)}$ 95%	3.44
Prueba t		
	t calculado	-4.1903
	t $t_{(18)}$ 95%	2.101

Cuadro 29. Comparación de la pendiente de la recta del análisis PROBIT 2010 vs 2018

Comparación pendiente 2010 vs		2018
Prueba F		
	F calculado	1.2231
	F $t_{(6,6)}$ 95%	4.28
Prueba t		
	t calculado	6.1049
	t $t_{(14)}$ 95%	2.145

VI. Concentración de ácidos grasos en semillas de *F. flavovirens* a 60% HR/45°C.

Los cálculos para determinar la concentración de ácidos grasos tomando como el área de cada ácido graso con respecto al área del estándar interno de ácido heptadecanoico encontrado en casa cromatograma.

Cuadro 30. Concentración de ácidos grasos (mg/g) del lote colectado en el 2018.

Días	0	5	10	15	20	40	60	80	
Á. palmítico	1	17.48	48.52	41.10	47.72	32.33	29.92	72.89	17.48
	2	22.05	100.67	27.98	54.32	15.77	26.32	67.02	17.97
	3	18.14	57.15	33.77	58.71	22.75	24.40	37.54	15.80
Á. Linoleico	1	43.41	134.11	119.78	143.19	84.17	106.35	237.80	43.41
	2	37.56	223.89	82.23	137.33	30.94	68.32	219.68	30.30
	3	38.15	178.08	111.64	172.16	57.77	69.34	65.69	25.95
Á. Oleico	1	10.38	45.08	42.39	53.28	25.20	26.87	79.54	10.38
	2	7.30	79.45	26.66	56.06	8.88	19.64	62.97	12.47
	3	11.45	50.16	35.62	60.32	16.43	17.22	26.62	7.34
Á. Esteárico	1	10.16	37.24	19.81	17.84	24.51	15.99	30.41	10.16
	2	11.02	54.49	16.03	19.02	17.15	9.41	26.39	26.50
	3	9.87	49.93	15.16	30.95	22.66	16.56	20.87	18.00

Cuadro 31. Concentración de ácidos grasos (mg/g) del lote colectado en el 2010.

Días		0	5	10	15	20	40	60	80
Á. palmítico	1	18.27	49.94	19.39	31.68	49.28	51.72	28.05	11.77
	2	41.63	40.82	24.99	29.95	28.96	21.31	26.36	21.33
	3	37.48	40.78	51.66	47.15	45.29	40.26	38.60	11.34
Á. Linoleico	1	38.85	131.43	50.50	99.49	143.38	161.93	82.04	26.89
	2	111.60	95.40	80.38	90.21	90.83	46.32	72.02	54.03
	3	108.92	92.55	142.83	149.45	142.66	130.03	126.58	29.50
Á. Oleico	1	10.76	39.03	16.08	25.61	43.07	47.63	22.10	7.83
	2	38.93	29.96	20.43	22.48	26.10	13.93	17.65	15.07
	3	27.22	24.66	52.31	39.02	41.45	36.94	35.59	7.95
Á. Esteárico	1	11.46	35.86	15.47	13.64	24.42	29.34	10.00	17.66
	2	21.53	33.59	16.33	12.94	18.90	16.65	10.73	24.20
	3	20.85	30.88	22.45	19.68	22.79	21.80	12.80	13.86

VII. Análisis Varianza de Dos Factores de la concentración de los lotes colectados en 2010 y 2018 a 60% HR/45 °C.

Las tablas ANOVA dos factores corresponden a la concentración de cada uno de los ácidos grasos presentes en las semillas de los lotes colectados en 2010 y 2018. ($P < 0.05$).

$$H_0: X_1=X_2=X_3,\dots\dots H_a: X_1\neq X_2\neq X_3$$

Cuadro 32. Tabla ANOVA de Dos Factores de la concentración de ácido palmítico.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Interacción	3282	7	468.8	3.266	P=0.0099
Periodo de envejecimiento acelerado	6684	7	954.8	6.653	P<0.0001
Año de colecta	207.6	1	207.6	1.446	P=0.2379
Residual	4593	32	143.5		

Cuadro 33. Tabla ANOVA de Dos Factores de la concentración de ácido linoleico.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Interacción	31203	7	4458	2.982	P=0.0159
Periodo de envejecimiento acelerado	57916	7	8274	5.535	P=0.0003
Año de colecta	556.4	1	556.4	0.3722	P=0.5461
Residual	47832	32	1495		

Cuadro 34. Tabla ANOVA de Dos Factores de la concentración de ácido oleico.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Interacción	4571	7	653	4.238	P=0.0021
Periodo de envejecimiento acelerado	6385	7	912.1	5.920	P=0.0002
Año de colecta	351.5	1	351.5	2.282	P=0.1407
Residual	4930	32	154.1		

Cuadro 35. Tabla ANOVA de Dos Factores de la concentración de ácido esteárico.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Interacción	830	7	118.6	4.707	P=0.0010
Periodo de envejecimiento acelerado	2743	7	391.9	15.56	P<0.0001
Año de colecta	57.06	1	57.06	2.265	P=0.1422
Residual	806.2	32	25.19		

VIII. Análisis de contribuciones variables al Modelo de Nicho Ecológico y prueba Jackknife

La siguiente tabla proporciona estimaciones de las contribuciones de las variables del entorno al modelo Maxent. Para determinar la primera estimación, en cada iteración del algoritmo de entrenamiento, el aumento de la ganancia regularizada se agrega a la contribución de la variable correspondiente, o se resta de ella si el cambio al valor absoluto de lambda es negativo. Para la segunda estimación, para cada variable ambiental, los valores de esa variable sobre la presencia de entrenamiento y los datos de fondo se permutan aleatoriamente. El modelo se vuelve a evaluar en los datos permutados y la caída resultante en el AUC de entrenamiento normalizada a porcentajes se muestra en la tabla. Al igual que con la variable jackknife, las contribuciones variables deben interpretarse con precaución cuando las variables predictoras están correlacionadas. Los valores mostrados son promedios sobre ejecuciones de réplica.

Cuadro 36. Contribuciones de las variables del entorno al modelo Maxent

Variable	Porcentaje de contribución	Importancia de la permutación
bio4_a	17.6	71.9
bio6_a	16.6	4.2
alt_a	15.9	0.2
bio19_a	13.7	0
bio16_a	10	19.4
suelo_a	8.3	0
bio15_a	7.6	3.3
bio3_a	7.2	0.6
bio5_a	1	0.2
bio14_a	0.9	0.1
bio13_a	0.6	0
bio18_a	0.3	0.1

bio2_a	0.2	0
bio17_a	0.1	0.1
bio12_a	0	0
bio7_a	0	0
bio9_a	0	0
bio8_a	0	0
bio11_a	0	0
bio10_a	0	0
bio1_a	0	0

Para el estadístico Jackknife, en cada oportunidad se excluye una variable y se crea un modelo con las remanentes. Entonces se crea un modelo usando cada variable de manera aislada. Adicionalmente, se crea un modelo usando todas las variables, tal y como se hizo anteriormente.

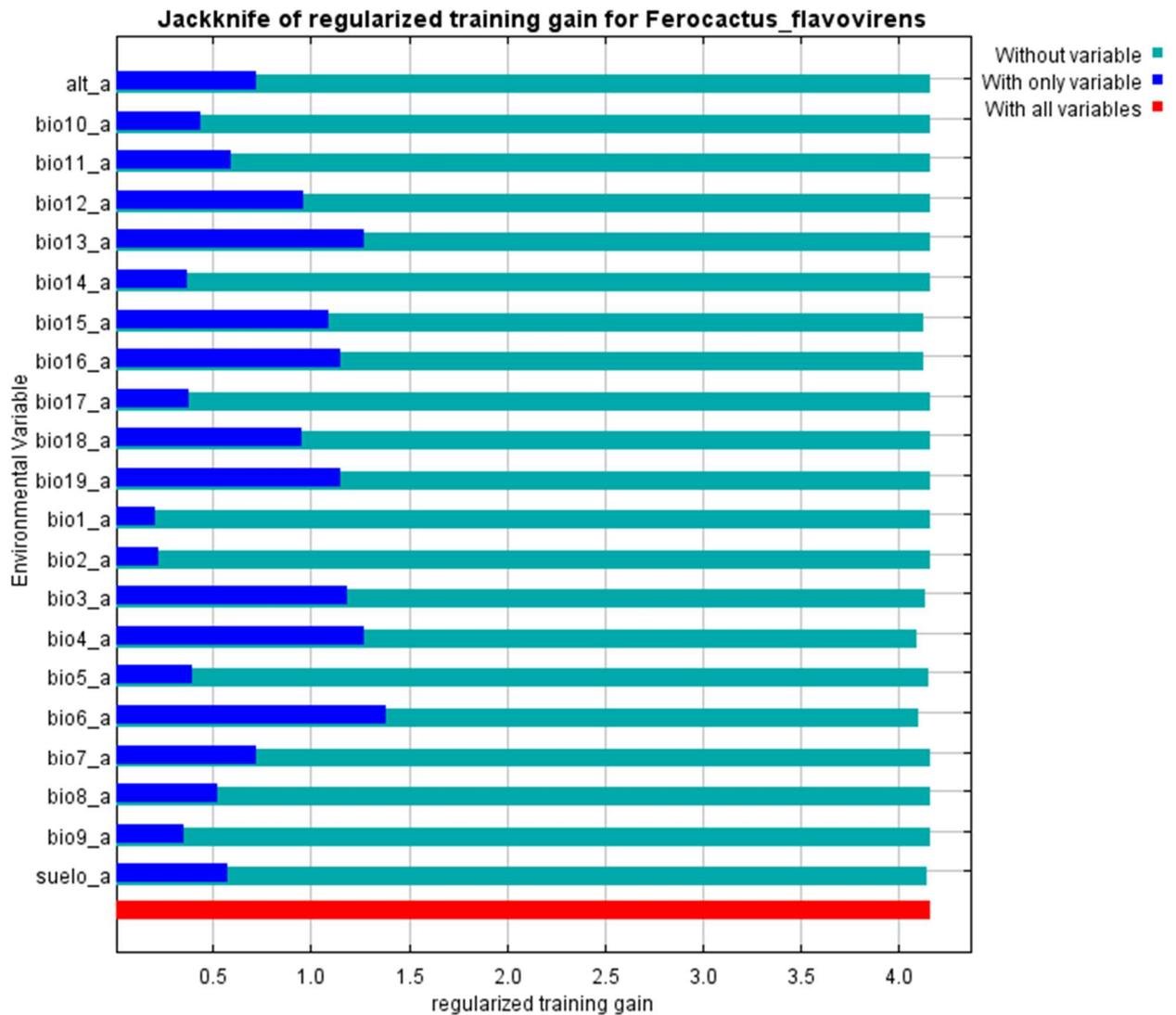


Figura 28. Gráfica de la prueba Jackknife de importancia variable.

IX. Densidad poblacional y estructura de tamaño de *F. flavovirens*

Las diferencias en los valores medios entre los grupos de tratamiento no son lo suficientemente grandes como para excluir la posibilidad de que la diferencia se deba a la variabilidad del muestreo aleatorio; no hay una diferencia estadísticamente significativa ($P = 0,408$), asimismo la prueba de Normalidad (Shapiro-Wilk) indicó que los datos no obedecen una distribución normal ($P < 0.050$).

Cuadro 37. Test Kruskal-Wallis de un factor. Análisis de la varianza en rangos de la densidad poblacional.

Localidad	N	Missing	Media	25%	75%
Los Reyes Mezontla	2	0	0.028	0.016	0.04
San Juan Raya	3	0	0.012	0.008	0.028
San Antonio Texcala	3	0	0.008	0.008	0.02
Zapotitlán Salinas	3	0	0.012	0.012	0.024

$H = 2.893$ con 3 grados de libertad. ($P = 0.408$)

Cuadro 38. Tabla ANOVA de un factor de la densidad poblacional.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Localidad	10.1398	3	3.37995	0.02	0.9969
Dentro del grupo	3970.6	20	198.53		
Total	3980.74	23			

Cuadro 39. Tabla ANOVA de un factor de la estructura de la población de *F. flavovirens*.

ANOVA	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Edad	1834.61	5	366.923	3.08	0.0352
Dentro del grupo	2146.12	18	119.229		
Total	3980.74	23			

X. Análisis de Componentes Principales y Modelo Lineal Generalizado con distribución de Poisson

El Análisis de Componentes Principales se construyeron matrices con los indicadores de disturbio, los valores fueron estandarizados restando el promedio y dividiéndolos sobre su desviación estándar.

Cuadro 40. Componentes Principales de los indicadores de disturbio.

Localidad	Los Reyes Mezontla			San Juan Raya			San Antonio Texcala			Zapotitlán Salinas			
	Componente			Componente			Componente			Componente			
Indicador	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
CABR	0.3590	-0.1930	0.1394	-0.3163	-0.3694	-0.1353	-0.3163	-0.3694	-0.1353	0.3110	-0.2127	-0.3726	
GANO	0.0463	-0.6347	0.2623	0.1000	-0.5266	-0.2930	0.1000	-0.5266	-0.2930	-	-0.0960	-0.1132	
RAMO	0.1369	0.6111	-0.0004	0.2992	0.3037	0.3233	0.2992	0.3037	0.3233	0.3535	0.1302	0.6668	0.5167

CLAN	0.3750	0.0858	0.0304	0.4414	-0.1500	0.1080	0.4414	-0.1500	0.1080	-	0.0743	-0.0849
COMP	0.3750	0.0858	0.0304	0.4414	-0.1500	0.1080	0.4414	-0.1500	0.1080	0.3666	-	-0.0849
MACH	-0.1900	0.2487	0.9360	0.2591	-0.4934	-0.1867	0.2591	-0.4934	-0.1867	0.3666	-	0.7210
CAHU	0.3750	0.0858	0.0304	-0.3243	-0.2006	0.4433	-0.3243	-0.2006	0.4433	0.1033	-0.0743	0.0849
CCHU	0.3750	0.0858	0.0304	-0.3243	-0.2006	0.4433	-0.3243	-0.2006	0.4433	0.3262	0.2611	0.0579
POBL	0.3750	0.0858	0.0304	0.1171	-0.3506	0.5513	0.1171	-0.3506	0.5513	0.3403	-0.2751	0.0899
EROS	-0.3330	0.2963	-0.1763	-0.3458	-0.0467	-0.1903	-0.3458	-0.0467	-0.1903	0.3540	-0.0687	-0.1688

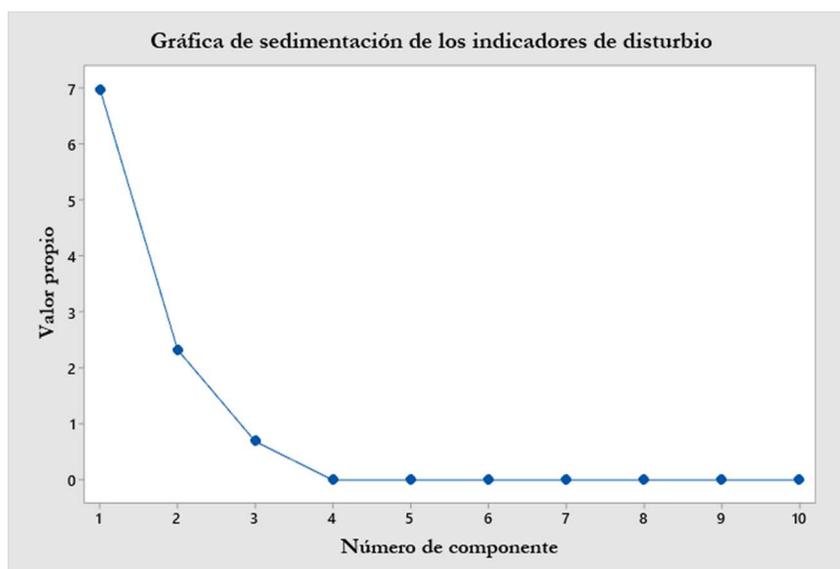


Figura 29. Sedimentación de los indicadores de disturbio en Los Reyes Mezontla

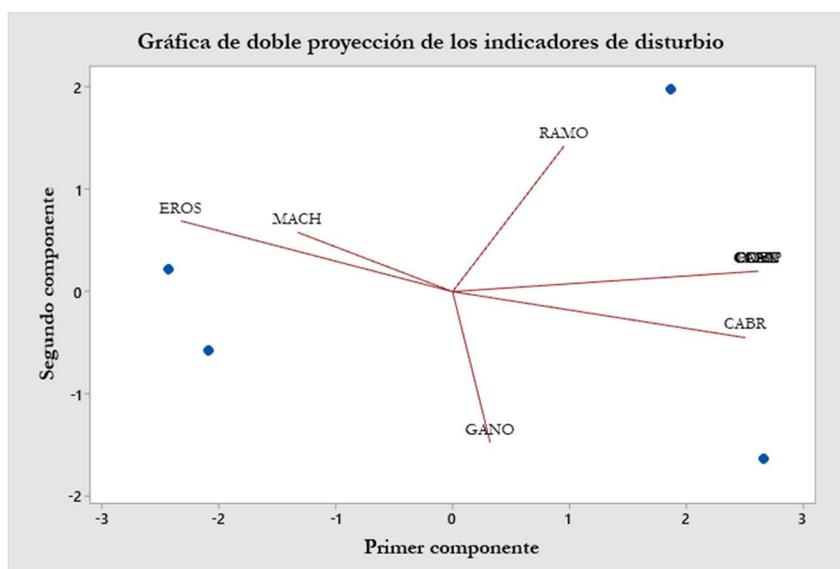


Figura 30. Puntuaciones e influencias de los indicadores de disturbio en Los Reyes Mezontla

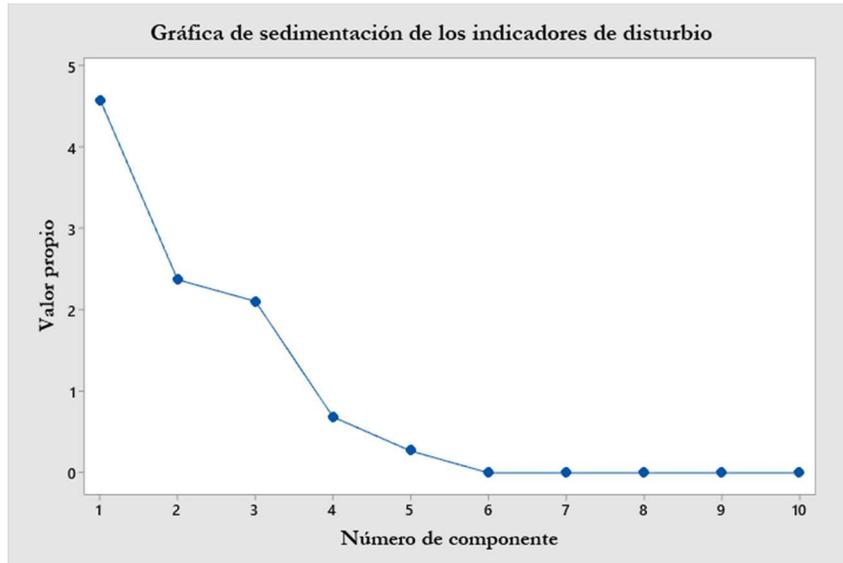


Figura 31. Sedimentación de los indicadores de disturbio en San Antonio Texcala

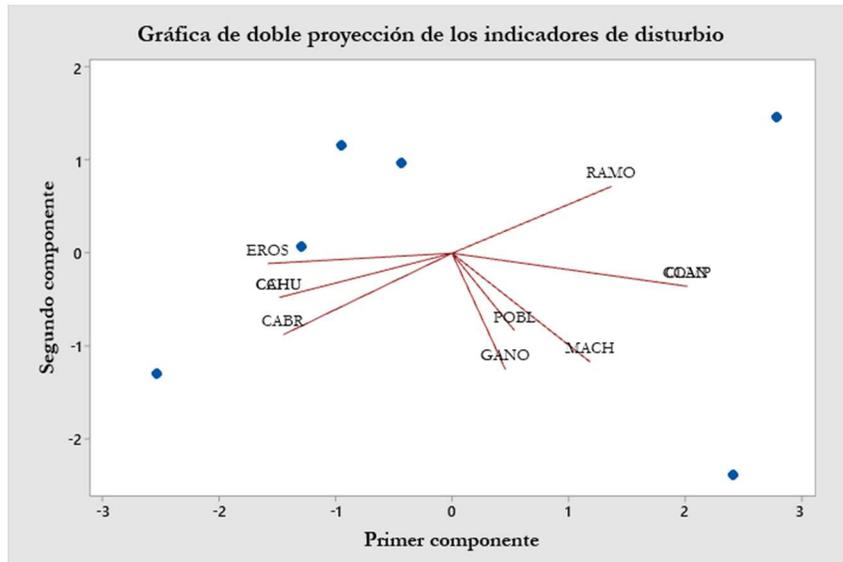


Figura 32. Puntuaciones e influencias de los indicadores de disturbio en San Antonio Texcala

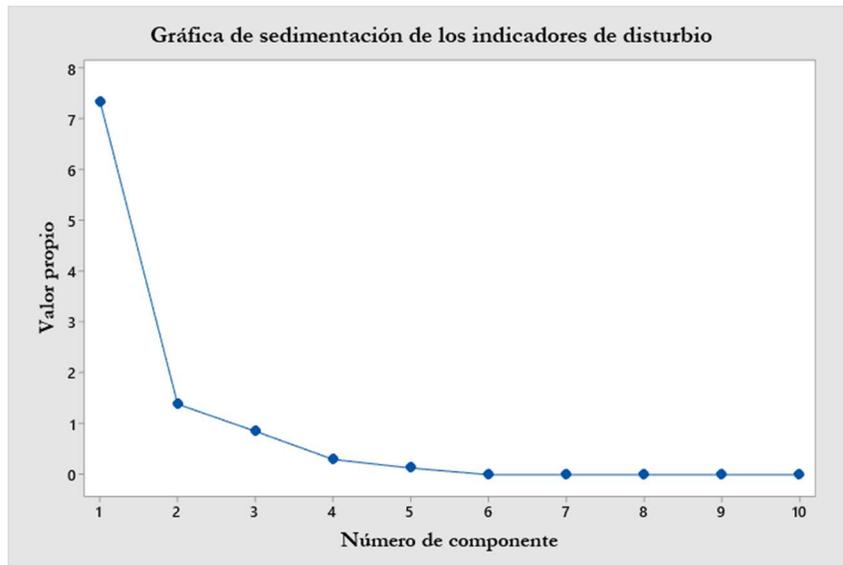


Figura 33. Sedimentación de los indicadores de disturbio en Zapotitlán Salinas

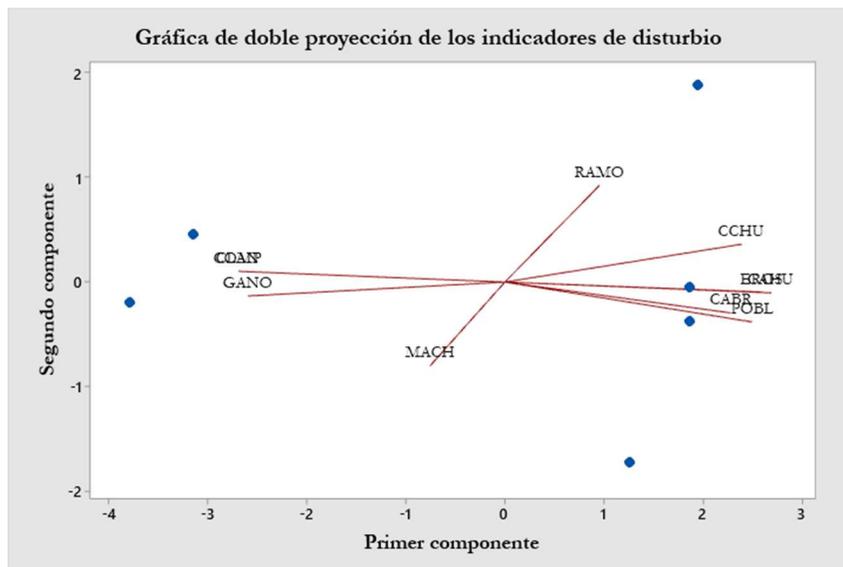


Figura 34. Puntuaciones e influencias de los indicadores de disturbio en Zapotitlán Salinas

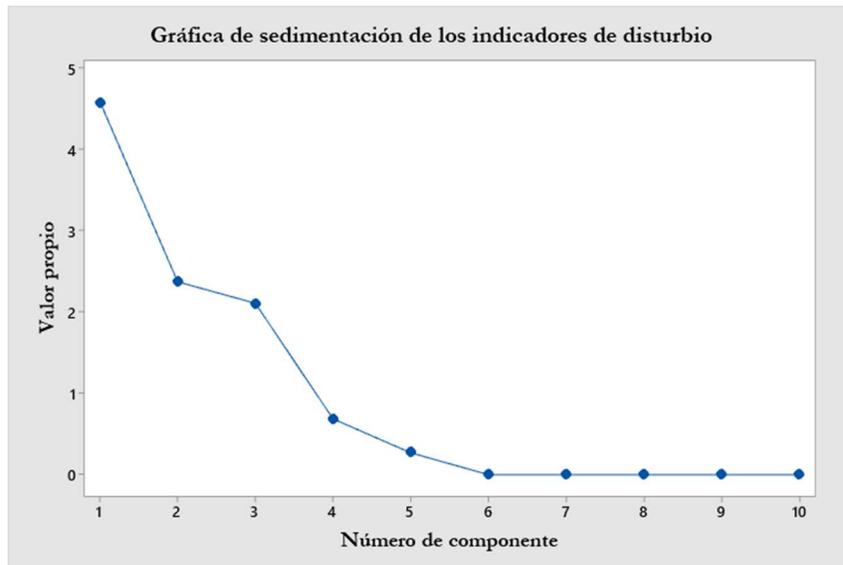


Figura 35. Sedimentación de los indicadores de disturbio en San Juan Raya

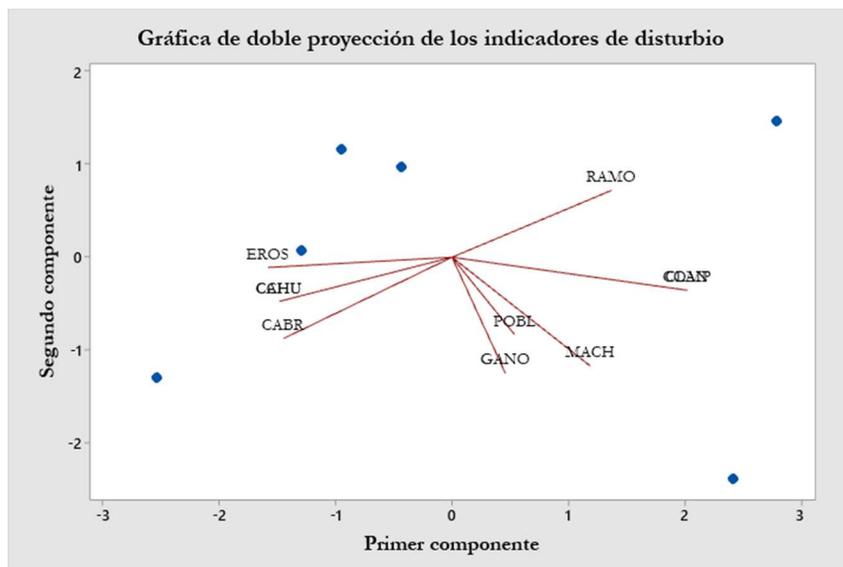


Figura 36. Puntuaciones e influencias de los indicadores de disturbio en San Juan Raya

Para la realización del modelo lineal generalizado con distribución de Poisson de transformaron los valores de la densidad poblacional de todas las localidades.

Cuadro 41. Modelo de regresión estimado (Máxima probabilidad) y bondad de ajuste.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Tasa de relación estimada	Chi-Cuadrada	Grados de libertad	P- Valor
Constante	2.6153	0.0989				
Disturbio _%_	0.0070	0.0019	1.007	13.9145	1	0.0002

Cuadro 38. Análisis de Desviación

Análisis de Desviación	Desviación	Grados de libertad	P-Valor
Modelo	13.9145	1	0.0002
Residual	40.331	9	0.0000
Total (corr.)	54.2454	10	

Porcentaje de desviación explicada por el modelo = 25.651

Porcentaje ajustado = 18.2771

La ecuación del modelo ajustado es = $\exp(2.61534 + 0.00696925 * \% \text{Disturbio})$