Cristhian Elizabeth Fuentes Rodríguez Carlos Albert...

Tópicos selectos para diseñar y aplicar tecnología agropecuaria

Comunicacion Cientifica Ediciones

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:587672895

Fecha de entrega
7 may 2026, 11:30 a.m. GMT-6

Fecha de descarga
7 may 2026, 1:19 p.m. GMT-6

Nombre del archivo
299-PDF-Topicos-selectos.pdf

Tamaño del archivo
4.0 MB

334 páginas

99.500 palabras

515.193 caracteres

30% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 16 palabras)

Fuentes principales

30% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

Caracteres reemplazados
124 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

30% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
ri.uaemex.mx		20%
2	Internet	
hdl.handle.net		6%
3	Internet	
comunicacion-cientifica.com		<1%
4	Internet	
dialnet.unirioja.es		<1%
5	Internet	
www.researchgate.net		<1%
6	Internet	
historiayespacio.univalle.edu.co		<1%
7	Internet	
cienciasagricolas.inifap.gob.mx		<1%
8	Publicación	
Tong, Xiaorui. "A Unified Poisson-Cahn Methodology for Defect Segregation Near ...		<1%
9	Internet	
www.somexaa.com		<1%
10	Internet	
sci-platform.org		<1%
11	Internet	
faz.ujed.mx		<1%

12	Publicación	
Anastacio M. Pech-May, Guillermo Castañón-Nájera, José M. Tun-Suárez, Mariano ...		<1%
13	Publicación	
Faiza Aman, Abdul Basit, Neelam Ara, Syed Mehar Ali Shah, Waleed Khan, Ayesha ...		<1%
14	Publicación	
Karina Yazmine Mora-García, Margarita Tadeo-Robledo, J. Jesús García-Zavala, En...		<1%
15	Publicación	
Itzel Arriaga Hurtado, Felipe González Ortíz. "Percepción sistémica de la segurida...		<1%
16	Publicación	
Roberto Tierno, Jose Ignacio Ruiz de Galarreta. " Genetic analyses for bioactive po...		<1%
17	Publicación	
M., Santhosh. "Genetic Analysis, Linkage Map Construction and Mapping Quantit...		<1%
18	Internet	
www.voaxaca.tecnm.mx		<1%
19	Internet	
sired.udenar.edu.co		<1%
20	Internet	
creativecommons.org		<1%
21	Internet	
repositorio.chapingo.edu.mx		<1%
22	Internet	
ria.inta.gob.ar		<1%

Tópicos para diseñar y aplicar tecnología agropecuaria

Martín Rubí Arriaga
Andrés González Huerta
Gaspar Estrada Campuzano
Néstor Ponce García
(coordinadores)

RENIECYT
Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológica
2000922

COMUNICACIÓN CIENTÍFICA

Índice

Introducción 11

Sección I
PRODUCCIÓN Y MANEJO DE CULTIVOS

1. Estructura, propiedad física del suelo: estado del arte
Rodolfo Serrato Cuevas, José Ramón Pascual Franco Martínez, Francisco Gutiérrez Rodríguez. Andrés González Huerta, José Francisco Ramírez Dávila 19

2. Crecimiento de cebada modificado por urea estabilizada y dosis de nitrógeno
Gaspar Estrada Campuzano, Carlos Gustavo Martínez Rueda, Martín Rubí Arriaga, Francisco Gutiérrez Rodríguez 37

3. Influencia de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre la concentración de compuestos polifenólicos totales y la capacidad antioxidante en grano de triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack)
Adriana Villanueva Carvajal, José Arturo Rodríguez-Álvarez, Gaspar Estrada Campuzano, Martín Rubí Arriaga, Delfina de Jesús Pérez López. 55

iThenticate Página 6 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 7 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

4. Efecto de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre el contenido de compuestos prebióticos del Tricale (*x Triticosecale* sp. Wittmack)
Gaspar Estrada Campuzano, Celia Cruz-Vázquez, Adriana Villanueva Carvajal, José Ramón Pascual Franco Martínez, Delfina de Jesús Pérez López, Carlos Gustavo Martínez Rueda . . 71

5. Efecto de la fertilización y densidades de siembra sobre el rendimiento de chía
Andrés Xingú-López, Andrés González Huerta, Eulogio de la Cruz Torres, Dora María Sangerman-Jarquín, Gaspar Estrada Campuzano, Martín Rubí Arriaga 87

6. Kiwi y espárrago para las zonas serranas tropicales
Juan Guillermo Cruz Castillo 103

7. Contenido de almidón y degradación de la materia seca en ensilado de maíz tratado con xilanasa, celulasa y miel de maguey
José Ramón Pascual Franco Martínez, Andrés González Huerta, Gaspar Estrada Campuzano, Rodolfo Serrato Cuevas, Manuel González Ronquillo, Dora María Sangerman Jarquín. 113

8. Aflatoxinas: contaminantes incidentes de alimentos en el mundo
Anayansi Escalante Aburto, Adriana Villanueva Carvajal, Néstor Ponce García 131

9. Situación actual de la mecanización agrícola en cuatro municipios del valle de Toluca
Francisco Gutiérrez Rodríguez, Jesús Hernández Ávila, Gaspar Estrada Campuzano, Andrés González Huerta, Rodolfo Serrato Cuevas, Carlos Gustavo Martínez Rueda. 147

10. Relevancia de los abonos orgánicos en la agricultura convencional
Laura Stephanie Flores Carrera, Delfina de Jesús Pérez López,

iThenticate Página 7 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 8 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Andrés González Huerta, Martín Rubí Arriaga, Aurelio Domínguez López, Francisco Antonio Avila Granados 163

Sección II
GENÉTICA Y MEJORAMIENTO DE CULTIVOS

11. Diseño de una cruza dialélica parcial simétrica en maíz cacahuacintle
Gerardo Jasso Bobadilla, Andrés González Huerta, Delfina de Jesús Pérez López, José Ramón Pascual Franco Martínez, Jaime Mejía Carranza, Francisco Gutiérrez Rodríguez. 185

12. Análisis de la aptitud combinatoria y de la heterosis en chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.)
Imelda Martínez-Estrada, Jaime Mejía Carranza, Andrés González Huerta. 203

13. Un ejemplo para parcelas divididas en cuadro latino, sin y con submuestreo balanceado
José Antonio Rodríguez González, Delfina de Jesús Pérez López, Artemio Balbuena Melgarejo, Jesús Hernández Ávila, José Ramón Pascual Franco Martínez, Laura Stephanie Flores Carrera, Claudia Saavedra Guevara, Gerardo Jasso Bobadilla, María Teresa Oliveros González, Andrés González Huerta. 221

14. Importancia de los parámetros genéticos en papa
Claudia Saavedra Guevara, Delfina de Jesús Pérez López, Dora María Sangerman-Jarquín, Andrés González Huerta, José Ramón Pascual Franco Martínez, Laura Stephanie Flores Carrera 243

15. Mejoramiento y diversidad genética en haba
Delfina de Jesús Pérez López, Andrés González Huerta, José Francisco Ramírez Dávila, Martín Rubí Arriaga, Laura Stephanie Flores Carrera, María Teresa Oliveros González. 259

iThenticate Página 8 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 9 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

16. Aplicación de descriptores en *Vicia faba* L. en la caracterización de cultivares
María Teresa Oliveros González, Delfina de Jesús Pérez López, Andrés González Huerta, Dora María Sangerman-Jarquín, José Francisco Ramírez Dávila, Agustín Navarro-Bravo 279

Sección III
ESTADÍSTICA APLICADA A LA AGRICULTURA

17. Modelos estadísticos y cálculo de suma de cuadrados con dos metodologías en experimentos monofactoriales balanceados, sin y con submuestreo
Andrés González Huerta, Delfina de Jesús Pérez López, Jesús Hernández Ávila, José Ramón Pascual Franco Martínez, Martín Rubí Arriaga, Artemio Balbuena Melgarejo 299

18. Comportamiento espacial de las poblaciones de trips en el cultivo de aguacate en México utilizando el método del SADIE
Agustín David Acosta Guadarrama, José Francisco Ramírez Dávila, Dulce Karen Figueroa Figueroa, Martín Rubí Arriaga, Andrés González Huerta 319

Sobre los autores 339

iThenticate Página 9 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Introducción

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.00.01

La producción agrícola enfrenta actualmente grandes retos a nivel global y nacional con el propósito de incrementar su sostenibilidad en cuanto a los tres pilares fundamentales: el ambiental, el social y el productivo.

En el ámbito ambiental, se requiere mitigar la contribución de la producción agrícola al cambio climático, enmarcado en actividades agrícolas que representen una oportunidad de vida digna en el campo donde la proporción de habitantes en pobreza es mayor en el medio rural que en el sector urbano.

En cuanto al ámbito productivo, por un lado existe un déficit de alimentos en muchos países y regiones del mundo, de tal manera que el segundo Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) es precisamente hambre cero.

En México, el gobierno ha marcado como prioridad alcanzar la soberanía alimentaria con el objetivo de contar con capacidades para garantizar la alimentación de toda la población no sólo para el presente, sino en el futuro; lo que implica aumentar la productividad de la producción agrícola para cumplir con este objetivo y cubrir la creciente demanda de alimentos y otros satisfactores agrícolas.

La investigación, la innovación y el desarrollo tecnológico en el ámbito de la agricultura son plenamente identificados en México como necesidades apremiantes para generar mejores resultados en la productividad del campo.

iThenticate Página 11 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

La Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México tiene precisamente una amplia trayectoria —desde su fundación— en los ámbitos de la agricultura, la agroindustria y la floricultura enfocada al desarrollo de conocimiento básico y aplicado orientado a la generación de tecnologías que permitan aumentar la productividad del campo teniendo como premisa el cuidado de ambiente.

En ese contexto se presenta el libro *Tópicos selectos para diseñar y aplicar tecnología agropecuaria,* que a lo largo de 18 capítulos, contenidos en tres secciones, expone tanto revisiones bibliográficas como resultados de investigación que brindan al lector la gama de tópicos desarrollados por los autores de estos trabajos, quienes son integrantes de los Cuerpos Académicos UAEM-CA-127 Cultivos básicos y hortícolas y UAEM CA-8 Mejoramiento genético y sanidad vegetal de la Facultad de Ciencias Agrícolas.

La primera sección, sobre producción y manejo de cultivos, inicia con un primer capítulo del sustento no sólo de la agricultura, sino de la vida misma: el suelo; presentando una revisión del estado del arte sobre la estructura y sus propiedades físicas.

Le siguen tres capítulos sobre cereales de grano pequeño en los que se estudia la respuesta de la cebada a la fertilización con urea estabilizada de lenta liberación que permite reducir los costos de aplicación de fertilizantes sin afectar la producción, así como el efecto de la fertilización en el contenido de metabolitos secundarios (fenoles) y prebióticos; compuestos de gran interés hoy en día por sus efectos benéficos para la salud a través de la acción antioxidante de los fenoles, o como propiciadores de un bioma gastrointestinal saludable.

En el ámbito de la investigación sobre cultivos con componentes químicos favorables para la salud, el capítulo 5 aborda los efectos de la fertilización sobre el cultivo de chía. Conocida desde hace milenios como alimento de las culturas mesoamericanas, la chía es originaria de México; es rica en ácidos grasos benéficos para la salud, los ácidos grasos mono y polinsaturados —como el Omega-3— que intervienen en varios procesos metabólicos favoreciendo la disminución de riesgos de enfermedades cardiovasculares, el control de la glucosa sanguínea y otros beneficios, por lo que a nivel mundial genera interés en la búsqueda de una alimentación sana.

iThenticate Página 11 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 12 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

El capítulo 6 presenta resultados sobre el potencial de dos cultivos de clima templado, el kiwi y el espárrago, como opción para zonas tropicales de altura con resultados favorables tanto productivos como de apreciación sensorial, convirtiéndose en una alternativa productiva para estas zonas.

El capítulo 7 presenta los resultados de la aplicación de innovaciones biotecnológicas, como enzimas exógenas adicionadas con miel de maguey como proveedor de carbohidratos rápidamente fermentables en el valor nutricional de ensilado de maíz, el cultivo forrajero más importante en la producción especializada de ganado; que reporta resultados que apuntan al incremento del valor nutricional del ensilado.

El capítulo 8 presenta una revisión sobre el contenido de aflatoxinas, producto del metabolismo secundario de hongos y mohos del género Aspergillus, algunas de las cuales son altamente tóxicas y productoras de cáncer; por lo que se hace necesario documentar el tipo de alimentos más susceptibles a la contaminación y, por lo tanto, al desarrollo de aflatoxinas dañinas para la salud humana.

Finalmente, el capítulo 9, último de esta sección, presenta una investigación sobre el estado del parque de maquinaria agrícola en el valle de Toluca, en virtud de que la mecanización del agro permite reducir los tiempos de las labores agrícolas, puede reducir costos de producción, y aumentar la productividad. Los autores concluyen que hay una baja relación en cuanto al número de hectáreas y horas de trabajo agrícola por tractor, además de que la mayoría de la maquinaria es obsoleta porque tiene en promedio 20 años de haber sido adquirida, razón por la que se encuentra rezagada de los avances científicos, técnicos y tecnológicos en el campo de la mecanización agrícola.

La segunda sección del libro reporta en cinco capítulos resultados de investigación sobre genética y mejoramiento de cultivos. En los capítulos 10, 11 y 12 se presentan resultados sobre tres cultivos de importancia económica en el Estado de México: el maíz cacahuazintle, el chile manzano y la papa.

El capítulo 10 versa sobre el potencial del diseño con un muestreo para un subconjunto de cruzamientos que permitiría un menor número de estos que las cruzas dialélicas tradicionales, incrementando la eficiencia y reduciendo los costos de estos experimentos.

iThenticate Página 12 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 13 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

El capítulo 11 presenta, igualmente, la evaluación de poblaciones de chile manzano a través de cruzas dialélicas y sus resultados para identificar genotipos como progenitores a utilizarse en el mejoramiento genético por selección para el desarrollo de poblaciones sobresalientes.

El capítulo 12 presenta la propuesta de un diseño experimental de parcelas divididas en cuadro latino, con y sin submuestreo balanceado, dada la poca evidencia en la literatura especializada y que representa un diseño útil para la investigación agronómica y genética en las ciencias agrícolas.

El capítulo 13 aborda la importancia de los parámetros genéticos en el mejoramiento de la papa a través de la hibridación, tanto en la evaluación de los progenitores como en la respuesta a la selección mediante la estimación de los parámetros genéticos más importantes presentando ejemplos de su utilización en programas de mejoramiento genético de la papa.

El capítulo 14, con el que se cierra esta sección, trata sobre la relevancia de abonos orgánicos vista tanto desde la perspectiva de los altos costos de la fertilización, con fertilizantes de síntesis, como desde una visión agroecológica para disminuir la huella ambiental de la producción agrícola; ya que la aplicación de abonos orgánicos es una práctica apropiada para los productores en pequeña escala, además de los beneficios que generan en el suelo y sus propiedades al mejorar y mantener el contenido de materia orgánica, y con ello su fertilidad y su productividad.

La tercera sección, denominada “Estadística aplicada a la agricultura”, se compone de cuatro capítulos. El capítulo 15 presenta un modelo que permite homologar el análisis estadístico de diseños experimentales balanceados completamente al azar, de bloques completos al azar y de cuadro latino, empleando dos metodologías para calcular sumas de cuadrados, con y sin submuestreo dentro de las unidades experimentales, que permite abreviar y simplificar los procedimientos de análisis tanto de experimentos univariados como para datos bivariados para modelos de correlación y regresión lineal simple y múltiple, y para análisis multivariados. Los autores ilustran estos procedimientos con datos de rendimiento de grano por planta de cuatro cultivares de maíz de un experimento previo.

El capítulo 16 reporta resultados del análisis del comportamiento espacial de poblaciones de trips, un insecto dañino para la agricultura, en cultivos de aguacate, un fruto de relevancia económica al ser el principal pro-

iThenticate Página 13 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 14 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ducto agrícola de exportación de México. La investigación tuvo por objetivo determinar la distribución espacial de las poblaciones de trips en el cultivo de aguacate utilizando el método de Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE, por sus siglas en inglés). Los resultados permitieron detectar estabilidad espacial y temporal en las poblaciones de la plaga, con implicaciones para un mejor manejo del cultivo de aguacate al determinar las zonas de influencia de los trips.

En la tercera y última sección el libro cierra con dos capítulos sobre aspectos genéticos del haba. El capítulo 17 revisa las técnicas utilizadas en el mejoramiento genético del haba, así como el grado de diversidad genética disponible en los bancos de germoplasma, presentando resultados de evaluación de la diversidad genética de 39 colectas de haba del Valle de Toluca, que son base para programas de mejoramiento genético.

El capítulo 18 aborda la evaluación de descriptores varietales que son utilizados para la identificación de características fenotípicas de los cultivos en los programas de mejoramiento genético, pero muchos de estos descriptores no se presentan gráficamente, lo que dificulta la caracterización de variedades, por lo que en este capítulo se presenta una guía gráfica de 12 descriptores de la Union for the Protection of New Varieties of Plants (UPOV) en el cultivo de haba, a fin de facilitar los registros agromorfológicos en campo.

Es así como esta colección de trabajos desarrollados por los profesores investigadores y estudiantes de los Cuerpos Académicos UAEM-CA-127 Cultivos básicos y hortícolas y UAEM CA-8 Mejoramiento genético y sanidad vegetal de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, constituye un excelente material bibliográfico para la consulta no sólo de especialistas, sino para los estudiantes de las diversas disciplinas de las ciencias agrícolas.

CARLOS MANUEL ARRIAGA JORDÁN
Investigador Nacional Nivel III
Investigador Emérito de la UAMéx
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR)

iThenticate Página 14 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Sección I

PRODUCCIÓN Y MANEJO DE CULTIVOS

1. Estructura, propiedad física del suelo: estado del arte

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.01

Rodolfo Serrato Cuevas*§
José Ramón Pascual Franco Martínez**
Francisco Gutiérrez Rodríguez***
Andrés González Huerta****
José Francisco Ramírez Dávila*****

Resumen

El aumento constante de la población y el crecimiento de las ciudades requiere la producción de más alimentos, esto se puede lograr al expandir los campos agrícolas o incrementar el rendimiento por unidad de superficie, lo que puede conducir a la degradación de la propiedad física del suelo, denominada estructura. La estructura del suelo tiene un papel fundamental en la producción sostenible de alimentos, por lo tanto, es importante conocerla. Por tal motivo se describe su génesis, en la que actúan las fuerzas de cohesión y de tensión. El resultado de lo anterior son los microagregados caracterizados por un tamaño <250 µm, y los macroagregados con tamaño >250 µm. La estructura del suelo afecta el crecimiento de las plantas al influir

§ Autor para correspondencia: rserratoc@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5639-4542
** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203
*** Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1464-0976
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
***** Doctor en Fisiología y Biología Animal. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8625-4655

iThenticate Página 19 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

en la distribución de las raíces y la capacidad de absorber agua. El manejo del suelo con labranza reducida puede mejorar el movimiento, disponibilidad y calidad del agua. La adición de mantillo mejora la estructura del suelo, contrarresta la erosión y evaporación del suelo, a la vez que aumenta la acumulación del Carbono Orgánico del Suelo (COS). La aplicación de fertilizantes generalmente mejoran la agregación del suelo, pero pueden disminuir el COS, reduce la agregación y actividad microbiana. Por lo tanto, la estructura del suelo tiene un papel vital en la producción sostenible de alimentos.

Palabras clave: *estructura del suelo, microagregados, macroagregados, estabilidad estructural.*

Introducción

El aumento constante de la población y el crecimiento de las ciudades ha llevado a la necesidad de contar con más tierras dedicadas a la agricultura para la producción de más alimentos. Para lograrlo, se requerirá de expandir las tierras de cultivo y solamente se lograría talando bosques y transformando las praderas en campos agrícolas. Esto llevaría a una consecuencia, la degradación de la estructura del suelo y la pérdida de su calidad. La estructura del suelo permite el transporte de agua, nutrimentos y contaminantes a través de la zona no saturada subyacente a los campos agrícolas (Abrishamkesh et al., 2011; Ali et al., 2016). La estructura del suelo tiene un papel vital, pero a menudo descuidado, en la producción sostenible de alimentos y en los logros hacia una sociedad bien desarrollada (Josa et al., 2010; Ali et al., 2016).

Por otro lado, la estructura del suelo es la disposición espacial de una amplia gama de tamaños y formas de poros (Peng, 2015). Así es como la forma, distribución y tamaño de los poros, afectan muchos a los procesos más importantes en el suelo que influyen en el desarrollo de la planta y facilidad de crecimiento de las raíces. Por esta razón, las mediciones del espacio poroso son cada vez más utilizadas para caracterizar la estructura del suelo (Bottinelli et al., 2015). La degradación mecánica de la estructura

iThenticate Página 19 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 20 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

del suelo a través de la compactación presenta un serio desafío para la agricultura, con los impactos en el aumento del peso de la maquinaria. Por lo tanto, un suelo bien estructurado tiene muchos espacios habitables y espacios de almacenamiento, un suelo mal estructurado está mucho menos dotado y es mucho menos productivo. Dado que la estructura del suelo proporciona vías para el transporte de agua, nutrientes y gases, y hábitats para los microorganismos y la fauna, es una propiedad fundamental de la fertilidad y la calidad del suelo. Finalmente, la estructura del suelo puede definirse como: la forma, tamaño y disposición espacial de las partículas individuales y grupos de partículas del suelo (agregados) o como la combinación de diferentes tipos de poros con partículas sólidas (agregados) (Chamen et al., 2015).

Génesis de la estructura

Fuerzas sobre las partículas del suelo e influencia en la génesis de la estructura del suelo.

La fuerza de cohesión entre partículas depende de una variedad de influencias físicas, químicas y biológicas del suelo, algunas de las más importantes son la tensión superficial aire-agua, las fuerzas de atracción intermoleculares entre el agua y los sólidos, la cementación por solutos precipitados, el entrelazamiento de raíces e hifas de hongos y diversos fenómenos químicos. Las fuerzas de cohesión del suelo dependen en gran medida del contenido de agua y otras condiciones. Fundamentalmente, las fuerzas importantes en la agregación son tensiones, es decir, la fuerza por unidad de área que actúa dentro del agregado. Estas se clasifican como esfuerzos de compresión, tracción y cortante. Las tensiones de compresión actúan para acercar las partículas del suelo (Yang et al., 2020). Las tensiones de tracción separan; por ejemplo, las fuerzas de la contracción del suelo. Los esfuerzos cortantes actúan a lo largo de un plano paralelo a la dirección de la fuerza como en un agregado en el borde de una zona de compactación. Los esfuerzos de tracción y cortante tienden a romper los agregados, los esfuerzos de compresión tienden a consolidar los agregados. El agua en el suelo retiene a las partículas del suelo a través de la tensión superficial que atrae molécu-

iThenticate Página 20 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 21 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

las de agua en los sólidos del suelo y entre sí. Las partículas del suelo tienen carga negativa, significa que el agua cercana a ellas es rica en iones positivos, lo que a su vez atrae a otras partículas en un proceso de floculación, un contenido mayor de arcilla de un suelo generalmente contribuye a una mayor agregación (Nimmo, 2005; Wang et al., 2015; Mundoagro, 2022).

Agregación de las partículas

Mecanismos de agregación

Existen varios mecanismos de agregación. Los agregados se forman en etapas, con diferentes mecanismos de unión que dominan en cada etapa (Tisdall y Oades, 1982). La teoría jerárquica de la agregación propone que los microagregados se unen para formar macroagregados (Edwards y Bremner, 1967). Los micoagregados (<250) se forman a partir de moléculas orgánicas (MO) unidas a arcilla (Cl) y cationes polivalentes (P) para formar partículas compuestas (Cl-P-MO), que se unen con otras partículas (Cl-P-OM) para formar macroagregados [(Cl-P-OM) (Edwards y Bremner, 1967; Tisdall, 1996). Alternativamente, se pueden formar macroagregados alrededor de la materia orgánica particulada (MOP). A medida que se descompone la MOP y se liberan los exudados microbianos, el macroagregado se vuelve más estable (Plante y McGill, 2002a; Beare et al., 1994). A medida que se utiliza el COS más lábil y disminuye la actividad microbiana, disminuye el suministro de exudados y el macroagregado pierde estabilidad, eventualmente se imposibilita y libera microagregados más estables (Jastrow et al., 1998; Six et al., 1999; Mundoagro, 2022).

La precipitación de hidróxidos, fosfatos y carbonatos mejora la agregación. Los cationes como Si4+, Fe3+, Al3+ y Ca2+ estimulan la precipitación de compuestos que actúan como agentes de unión para las partículas primarias. Los cationes también forman puentes entre las partículas de arcilla y MOS que resultan en la agregación (Garcia y Paterson, 2011; Schlüter y Koestel, 2022).

iThenticate Página 21 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 22 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Niveles jerárquicos de la estructura del suelo y mecanismos de unión

Se cree que los dominios y cuasi cristales son las unidades microestructurales fundamentales en muchos suelos. Los dominios consisten en cristales multicapa de ilita o vermiculita de hasta 5 nm de espesor, apilados en una alineación aproximadamente paralela para formar unidades de hasta 1 µm de espesor y hasta 5 µm en la dirección x-y. Del mismo modo, los cuasi cristales consisten en capas individuales de montmorillonita (1 nm de espesor) alineadas con mucha superposición para formar unidades de varios nanómetros de espesor y hasta 5 µm en la dirección x-y. El modelo generalmente aceptado de un microagregado consiste en arreglos de dominios y cuasi cristales, partículas de arena y limo, combinados de alguna manera con polímeros orgánicos. La arcilla floculada es un prerrequisito para la estabilidad de los microagregados y la capacidad de resistir la ruptura por humectación y perturbación mecánica. Las interacciones como arcilla-materia orgánica, compuestos inorgánicos que actúan como cementos inter-partículas son factores importantes que intervienen en la floculación (White, 2006; Morris, 2023).

Existe un consenso bastante amplio para clasificar los agregados del suelo en dos categorías jerárquicas principales: microagregados (<250 µm de diámetro) y macroagregados (>250 µm de diámetro).

Microagregados

Los microagregados suelen dividirse en subclases <2 µm, 2-20 µm y 20-250µm. Las propiedades sobresalientes de estas categorías de agregados se resumen a continuación.

iThenticate Página 22 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 23 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Microagregados de menos de <2 µm de diámetro

Los microagregados parecen estar formados inicialmente por la floculación de partículas de arcilla en dominios o cuasicristales. Particularmente en agregados muy pequeños (<0.2 µm), la mayor parte de la materia orgánica parece estar adsorbida solo en las superficies externas de los cuasicristales. Por lo tanto, la unión entre partículas en los cuasicristales del suelo se rige esencialmente por los mismos fenómenos de van der Waals y de la doble capa eléctrica que producen cuasicristales en sistemas simples de arcilla-agua. La exclusión de materia orgánica de las superficies internas del cuasi cristal parece bastante pronunciada en suelos montmorilloníticos donde las partículas de arcilla exhiben una estructura fuertemente orientada, mutuamente paralela, y en menor medida en suelos con mineralogía ilítica o caolinítica y, en consecuencia, dominios menos ordenados. Los microagregados muy pequeños son altamente resistentes a la interrupción mecánica, por lo general requieren varios minutos de dispersión ultrasónica, a menudo con la ayuda de un agente oxidante (Askari et al., 2015).

En un próximo nivel jerárquico, los cuasicristales y otras partículas minerales se unen alrededor de los núcleos de unión central de materiales orgánicos altamente procesados de naturaleza húmica y polisacárido. Los dominios de arcilla y otras partículas minerales en el exterior de estos microagregados protegen el núcleo orgánico interno contra el acceso de microorganismos. Dado que la carga eléctrica predominante de los polímeros orgánicos a valores de pH normales (cercanos a la neutralidad) del suelo suele ser negativa, la unión con coloides inorgánicos cargados negativamente se logra en gran medida a través del enlace por cationes multivalentes como Ca^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+} y sus óxidos hidratados, que pueden formar complejos con las superficies minerales y los grupos funcionales orgánicos. En suelos altamente degradados con abundantes minerales de carga variable, el intercambio de los ligandos entre las superficies minerales y los grupos funcionales orgánicos puede producir enlaces fuertes. Esto es particularmente notable en los oxisoles, caracterizados por microagregados y microporosos extremadamente fuertes que resultan en una distribución bimodal característica del tamaño de poro (Cui y Holden, 2015).

iThenticate Página 23 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 24 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Para que los microagregados se formen efectivamente en el suelo, los materiales aglutinantes orgánicos deben estar finamente distribuidos por todo el suelo, en lugar de depositarse en bolsas aisladas. Mecanismos particularmente efectivos parecen ser la biosíntesis *in situ* de materiales orgánicos por microorganismos asociados con extensas redes de raíces finas con altas tasas de rotación, como debajo de la vegetación de pastizales.

Los microagregados tienden a formarse lentamente en los suelos, pero una vez formados también se degradan lentamente incluso bajo sistemas de manejo desfavorable de los suelos. Se ha observado que las sustancias orgánicas en los microagregados se mantienen estables durante cientos y, en algunos casos, incluso miles de años. Entre los materiales orgánicos estabilizados se encuentran las enzimas que pueden contribuir a procesos como la mineralización de N y la degradación de herbicidas. La cantidad de carbono secuestrado en los microagregados del suelo constituye una fracción sustancial de la cantidad total del carbono orgánico en la Tierra. Esto ha despertado mucho interés en el impacto del manejo de la estructura del suelo en el CO_2 atmosférico (Synder y Vázquez, 2005; Yudina y Kuzyakov, 2023).

Microagregados de 2 a 20 µm de diámetro

Estos se forman a partir de dominios de arcilla orientados, microagregados de <2 µm de diámetro o arcilla gruesa y finas partículas de limo que se unen alrededor de un núcleo central de fragmentos de hifas y células o colonias bacterianas. La unión se efectúa mediante materiales microbianos como el polisacárido sintetizado por las bacterias y las hifas. La capa externa de los dominios de arcilla y microagregados protege a las bacterias de organismos como los nematodos y los protozoos, que son demasiado grandes para penetrar en la capa externa. Por lo tanto, se ha encontrado que hasta entre 40 a 60% de la biomasa microbiana en el suelo está asociada con microagregados de 2 a 20 µm de diámetro.

Al igual que los agregados de <2 m, los agregados de 2 a 20 µm son muy resistentes a la interrupción mecánica, a veces resisten hasta 5 minutos de dispersión ultrasónica (Synder y Vazquez, 2005; Yudina y Kuzyakov, 2023).

iThenticate Página 24 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 25 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Microagregados de 20 a 250 µm de diámetro

Estos están formados en gran parte por partículas o agregados de <20 µm de diámetro, unidos por un polisacárido alrededor de los núcleos centrales de raíces finas e hifas fúngicas. Generalmente la unión es lo suficientemente fuerte como para que los agregados sean estables al agitado por inmersión directa del suelo seco en agua (Synder y Vazquez, 2005).

Macroagregados

Debido a su efecto sobre el tamaño de los poros más grandes del suelo, estos agregados son muy influyentes para determinar las propiedades macroscópicas del suelo, como la resistencia mecánica, la conductividad hidráulica y el estado de la aireación. También son los agregados más susceptibles a la desintegración bajo tensiones debido a la labranza, la compactación, el impacto de las gotas de lluvia.

La formación de macroagregados (>250 µm) depende principalmente de la estabilización de los microagregados en unidades estructurales más grandes (White, 2006). A pesar de esto, la macroagregación parece ser causada principalmente por la reorientación y unión de partículas de arcilla y microagregados por raíces finas e hifas, y una mayor cementación por polisacáridos extracelulares. Asociaciones entre extensos sistemas de raíces finas y hongos micorrícicos arbusculares (MA), que producen grandes cantidades de polisacáridos, parecen particularmente efectivos en la formación de los macroagregados. Los hongos saprofíticos también estabilizan los agregados, particularmente cuando se agregan sustratos al suelo como combinaciones de paja y estiércol (Synder y Vazquez, 2005).

La unión por los polisacáridos aparentemente no ocurre uniformemente en los macroagregados, sino principalmente en las grietas o poros más grandes (15 a 50 µm de diámetro), precisamente donde los agregados tienen más probabilidades de romperse. Debido a esta colocación eficiente de los enlaces, incluso pequeños aumentos o eliminaciones de polisacáridos pueden causar grandes aumentos o disminuciones en la estabilidad de los macroagregados. Debido a que los polisacáridos lábiles constituyen solo una

iThenticate Página 25 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 26 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

pequeña fracción de la cantidad total de la materia orgánica del suelo, no es sorprendente que el contenido total de materia orgánica del suelo no siempre se correlacione bien con la estabilidad de los macro agregados. Esto es particularmente poco cierto después de cambios repentinos en el manejo, donde los cambios en la materia orgánica total pueden ser mínimos, pero pueden haber ocurrido cambios significativos en la red de raíces finas, hifas fúngicas y polisacáridos asociados, con cambios rápidos asociados en la estabilidad del agregado (Thangavel et al., 2019; Yudina y Kuzyakov, 2023).

En los casos en que el contenido total de materia orgánica del suelo se correlaciona positivamente con la estabilidad de los macroagregados, el manejo a menudo ha sido estable durante largos períodos de tiempo, por ejemplo, bosque continuo, pasto o labranza. La alta correlación probablemente refleja no sólo la estabilización de los agregados por materia orgánica, sino también la estabilización de la materia orgánica por los agregados. Para un tipo dado de manejo del suelo, la correlación entre la materia orgánica y la estabilidad estructural puede ser altamente dependiente del suelo, y la textura juega un papel importante. En muchos casos, es necesario un cierto nivel umbral de materia orgánica antes de que los macroagregados comiencen a estabilizarse.

El valor umbral tiende a ser mayor al aumentar el contenido de arcilla del suelo, lo que sugiere que se debe exceder una cantidad crítica de materia orgánica por unidad de superficie mineral para que ocurra una agregación efectiva. Se puede dibujar un modelo idealizado a escala que muestre que un agregado de suelo está formado por unidades estructurales de varios tamaños, mantenidas juntas por varios agentes aglutinantes (Tisdall y Oade, 1982; Synder y Vazquez, 2005; Ali et al., 2016). Así es, como todos estos efectos dependen de mantener un alto nivel de actividad biótica (raíces de las plantas, animales principalmente lombrices de tierra y microorganismos) en el suelo, dichos efectos son más importantes en suelos con pH de 5.5 a 7. Por lo tanto, los aportes sustanciales de materia orgánica y la alteración mínima del suelo favorecen la estabilización de la macro agregación (Wang et al., 2015; Yudina y Kuzyakov, 2023).

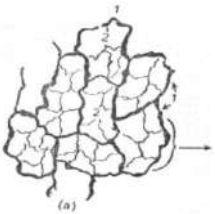
iThenticate Página 26 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 27 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Formas de la estructura

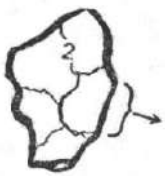
En un mismo suelo, pueden existir varias clases de agregados de tamaño diferente, pudiendo tener todos sensiblemente la misma forma o bien una forma particular. Éstas diferentes clases de agregados pueden ser reconocidas en la superficie del suelo, pero se observan mucho mejor en el perfil. Los pedólogos difieren en la forma de describir la morfología de la estructura, unos siguen la fragmentación cada vez más apretada de los agregados, como se muestra en seguida.

Sobreestructura



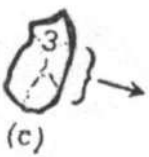
Resulta de la yuxtaposición, en conjunto poco coherentes de los agregados precedentes. Estos conjuntos son delimitados, sobre la totalidad del perfil o en un horizonte, por las grietas más sobresalientes.

Estructura propiamente dicha o elemental



Corresponde a los agregados que se encuentran muy independientes unos de los otros y de hecho pueden aislarse fácilmente y dejar intacta la ordenación de los agregados vecinos.

Subestructura



Se manifiesta por la división de la estructura en agregados más pequeños bajo el efecto de un sistema de hendiduras que generalmente uno se ve obligado a acentuar por medio de un instrumento o de la presión de la mano para soltar los agregados.

Microestructura

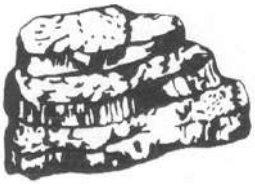
Que sólo es visible con una lupa o al microscopio. Corresponde al modo de unión de los agregados más pequeños, entre los cuales se encuentran los signos de la actividad biológica del suelo (Gaucher, 1971).

iThenticate Página 27 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 28 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Las formas de los agregados observables en el campo se pueden clasificar de la siguiente manera:

Laminar



Los peds son en forma de láminas, las dimensiones horizontales son mayores a las verticales, las caras normalmente se traslapan en forma horizontal. Heredada en materiales depositados bajo el agua, por ejemplo: en suelos de llanuras de inundación. Originadas por el impacto de las gotas de lluvia en costras superficiales. Impide la penetración vertical de las raíces, el agua y el aire.

Prismática

Los peds semejan prismas, las caras verticales son planas y ligeramente redondeadas y más largas que las horizontales, las caras son moldeadas por las de los peds circundantes, los verticales son angulares o subredondeados, las superficies horizontales son algo indistintas y normalmente planas. Típica de horizontes enriquecidos en arcilla, Bt, endopediones argílicos. Los planos de debilidad corresponden a grietas de retracción. Los prismas pueden presentar una gran dureza y las raíces no ser capaces de penetrar en ellos.

Columnar

Los peds son parecidos a los de la estructura prismática, con la diferencia de que en la estructura columnar las superficies superiores de los peds son redondeados. Prismas rematados en la parte superior por una cápsula. Típica de suelos alcalinos (endopediones nátricos).

Blocosa angular

Los peds están en forma de bloques o poliedros, las tres dimensiones son casi de la misma magnitud, las caras son planas o ligeramente redondeadas y se intersectan en ángulos relativamente abruptos, las caras son moldeadas por los peds circundantes. Frecuente en endopediones cámbicos.

iThenticate Página 28 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 29 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

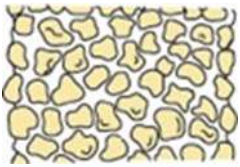
Blocosa subangular

Los peds son parecidos a los de la estructura blocosa angular con excepción de que las caras son planas y redondeadas y los vértices son redondeados. Típica de suelos de zonas semiáridas y áridas, pobres en materia orgánica. Frecuentes en epipediones ocricos y endopediones cámbico y cálcico.

Granular

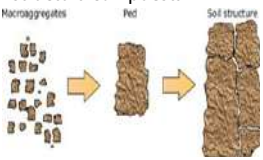
Los peds son esferoides o poliedros, las caras son muy irregulares y no son moldeadas por los peds circundantes. Es la estructura más favorable típica de medios biológicamente activos ricos en bases y con materia orgánica. Epipediones de praderas y frecuentes en mólicos.

Migajosa



Epipediones con materia orgánica bien evolucionada.
Como migajas de galletas y generalmente de menos de 5 mm de diámetro.

Estructura compuesta



Comúnmente varios peds pequeños, forman un ped más grande, situación que se denomina estructura compuesta. Cuando se trata de la descripción del suelo en un texto se expresa como: estructura prismática gruesa, moderadamente desarrollada que se disgrega en bloques medianos, moderadamente desarrollados (Gaucher, 1971; Olivares et al., 2023).

Estructura del suelo y crecimiento de las plantas

La estructura del suelo afecta el crecimiento de las plantas al influir en la distribución de las raíces y la capacidad de absorber agua y nutrientes (Rampazzo et al., 1998; Pardo et al., 2000). La estructura del suelo facilita la infiltración de oxígeno, agua que puede mejorar su almacenamiento. El aumento de la transferencia de agua a través del suelo puede reducir la retención de fertilizantes en la matriz del suelo y la eficiencia del uso de fertilizantes en las plantas. La alteración de la estructura del suelo a través de la compactación o la labranza puede resultar en el reciclaje rápido de

iThenticate Página 29 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 30 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

nutrientes, formación de costras, disponibilidad reducida de agua y aire para las raíces (Agriculture Victoria, 2019; Olivares et al., 2023).

Manejo para mejorar la estructura del suelo

El manejo del suelo para mejorar su estructura tiene el potencial de incrementar la producción de los cultivos, aumentar la cantidad de carbono depositado en el suelo y disminuir la tasa de pérdida de carbono por descomposición y erosión. En consecuencia, las prácticas de manejo del suelo que pueden contribuir a mejorar la estructura del suelo.

Labranza

La labranza perturba los agregados del suelo, compacta el suelo y perturba las comunidades de plantas y animales que contribuyen a la agregación. Reduce la MOS, los nutrientes, la actividad microbiana y las actividades de la fauna que contribuyen a la agregación. En comparación con el arado, los sistemas de manejo de labranza cero tienen agregados y COS más estables. La labranza reducida puede resultar en más poros y canales que influyen en el movimiento, la disponibilidad y la calidad del agua. A su vez, esto influye en la pérdida de nutrientes y el drenaje químico al agua subterránea (Johns, 2015; Olivares et al., 2023).

Manejo de mulching y residuos

Los mantillos mejoran la estructura del suelo de diversas formas. La adición de mantillo a la superficie del suelo disminuye la erosión, reduce la evaporación, protege contra el impacto de las gotas de lluvia y aumenta la estabilidad de los agregados. Los mantillos aumentan la acumulación de COS, modifican los regímenes de temperatura y humedad e impactan en la fauna del suelo (Tobiašová et al., 2023).

iThenticate Página 30 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 31 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Abono

El abono mejora la estructura y densidad del suelo, aumenta la agregación, pero puede disminuir la estabilidad de los agregados del suelo frente a las acciones de disolución y dispersión. El aumento de COS da como resultado una mayor actividad biológica, aumenta la porosidad y la consiguiente disminución de la densidad aparente. El incremento de la actividad microbiana debido a los aumentos en el carbono del suelo de las aplicaciones de estiércol da como resultado un acrecentamiento en la estabilidad de los agregados. Los suelos abonados también tienen una alta población de lombrices. Los suelos no abonados suelen contener menos COS y microbios, y son más densos que los suelos abonados (Johns, 2015).

Compost

La aplicación de compost al suelo mejora la estructura y reduce la densidad aparente. Los materiales de compostaje pueden aumentar la agregación y la estabilidad de los agregados. Las condiciones ambientales como la sequía pueden limitar la efectividad del abono. Los efectos de las adiciones de compost sobre la estructura del suelo pueden ser de corta duración, aunque los resultados son generalmente positivos (Tobiašová et al., 2023).

Fertilizantes y nutrientes

Las complejidades de las influencias químicas y físicas de los fertilizantes dan como resultado efectos variables sobre la agregación. Las aplicaciones de fertilizantes generalmente mejoran la agregación del suelo; sin embargo, en algunas condiciones, los fertilizantes también pueden disminuir la concentración de COS, reducir la agregación y reducir las comunidades microbianas en comparación con los suelos abonados. Cuando se aplica correctamente, el fertilizante mejorará el manejo de los nutrientes, aumentará la productividad de las plantas, aumentará el COS y promoverá la actividad

iThenticate Página 31 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 32 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

biológica. Estos efectos, internos, aumentan la agregación y mejoran la densidad (Johns, 2015; Huan Fang et al., 2023).

Conclusiones

La estructura del suelo tiene un papel vital, pero a menudo pasado por alto, en la producción sostenible de alimentos y el bienestar del medio ambiente. Los cambios en la estructura del suelo pueden tener consecuencias manifiestas a nivel local y global. Puede afectar el vigor y el rendimiento de plantas individuales y también los ciclos biogeoquímicos del carbono, el nitrógeno y el agua. Mejorar la estructura del suelo puede incluso tener el potencial de ayudar a moderar los efectos del cambio climático mediante el secuestro de gases de efecto invernadero en el suelo. Por lo tanto, las investigaciones futuras que reconozcan la naturaleza interrelacionada de los tres componentes de la fertilidad del suelo: el químico, biológico y estructural, pueden proporcionar la base para una agricultura continua y sostenible y ayudar a abordar los desafíos de la degradación ambiental, lo que guarda una estrecha relación con la denominada agricultura regenerativa.

Referencias

Abrishamkesh, S., Gorji, M., y Asadi, H. (2011). Long-term effects of land use on soil aggregate stability. *International Agrophysics, 25,* 103-108.

Agriculture Victoria (2019). *Bonding and Aggregation.* Victorian Resources Online.

Zolfaghari, A. A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Asadzadeh, F., y Hajabbasi, M. A.(2016). Soil structure changes due to different land-use practices in the central Zagruos region, Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science, 62*(2), 163-175. https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1043898 https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1043898

Askari, M. S., Cui, J. F., O'Rourke, S. M., y Holden, N. M. (2015). Evaluation of soil structural quality using VIS–NIR spectra. *Soil Tillage Research, 146,* 108-117.

Beare, M. H., Hendrix, P. F., y Coleman, D. C. (1994). Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional- and no-tillage soils. *Soil Science Society of America Journal, 58,* 777-786.

Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., Peng, X. (2015).

iThenticate Página 32 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 33 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research, 146,* 118-124.

Cui, J. F., y Holden, N. M. (2015). The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. *Soil and Tillage Research, 146,* 32-38.

Chamen, T. W. C., Moxey, A. P., Towers, W., Balana, B., y Hallett, P. D. (2015). Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research, 146,* 10-25.

Christopher, J. (2015). *Soil Structure and the Physical Fertility of Soil. Research Manager, Northern Australia and Land Care.* Future Directions International Pty L.

Edwards, A. P., y Bremner, J. M. (1967). Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science, 18,* 64-73.

Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure re- lated to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research, 66,* 197-205.

Garcia-Pausas, J., y Paterson, E. (2011). Microbial community abundance and structure are determinants of soil organic matter mineralisation in the presence of labile carbon. *Soil Biology and Biochemistry, 43,* 1705-1713.

Gaucher, G. (1971). *Tratado de Pedología Agrícola. El Suelo y sus Características Agronómicas.* Ediciones Omega.

Huan Fang, Kailou Liu, Daming Li, Xinhua Peng, Weijian Zhang, Hu Zhou. (2021). Long-term effects of inorganic fertilizers and organic manures on the structure of a paddy soil. *Soil and Tillage Research, 213*.

Jastrow, J. D. (1996). Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry, 28,* 665-676.

Josa, R., Ginovart, M., y Solé, A. (2010). Effects of two tillage Techniques on soil macroporosity in subhumid environment. *International Agrophysics, 24,* 139-148.

Morris, J. (2023). *Estructura saludable del suelo - La Casa de la Vida. Agricultura Sustentable.* https://attra.ncat.org/es/estructura-saludable-del-suelo-la-casa-de-la-vida/

Nimmo, J. R. (2005). Aggregation: Physical Aspect. En *Encyclopedia of Soils in the Environmental.* US Geological Survey.

Olivares Barlin, O. et al. (2023). Relationships between the Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) and soil properties in agriculture: A meta analysis. *Scientia Agropecuaria, 14*(1), 67-78. http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.007

Ortega Blu, R., y Martínez, M. M. (2022). La estructura del suelo es un indicador que afecta directamente la producción. *Revista Mundoagro.* La estructura del suelo es un indicador que afecta directamente la producción. Mundoagro.

Pardo, A., Amato, M., y Chiaranda, F. Q. (2000). Relationships be- tween soil structure, root distribution and water uptake of chick- pea (Cicer arietinum L.). Plant growth and water distribution. *European Journal Agronomy, 13,* 39-45.

Peng, X., Horn, R., y Hallett, P. (2015). Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter y scale matter. *Soil and Tillage Research, 146,* 1-3. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.017

Plante, A. F., y McGill, W. B. (2002). Soil aggregate dynamics and the retention of orga-

iThenticate Página 33 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 34 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

nic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research, 66,* 79-92.

Rampazzo, N., Blum, W. E. H., y Wimmer, B. (1998). Assessment of soil structure parameters and functions in agricultural soils. *Bod- enkultur 49,* 69-84.

Schlüter, Steffen and Koestel Jhon (2022). Soil structure. *Encyclopedia of soil in the environmenta*l (Vol. 5, 2ª ed.). Elsevier.

Six, J., Elliott, E. T., y Paustian, K. (1999). Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of American Journal, 63,* 1350-1358.

Synder, V. A., y Vázquez, M. A. (2005). *Structure*.

Ramesh, T., Bolan, N. S., Kirkham, M. B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Rao, C. S., Sandeep, S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., & Choudhury, B. U. (2019). Soil Organic Carbon Dynamics: Impact of Land Use Changes and Management Practices: A Review. *Advances in Agronomy, 156,* 1-107. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.001

Tisdall, J. M. (1996). Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. En M. R. Carter y B. A. Stewart (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils* (pp. 57-96). CRC Press/Lewis Publishers.

Tisdall, J. M., y Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. Department of Soil Science, Waite Agricultural Research Institute, University of Adelaide, Glen Osmond, South Australia. *Journal of Soil Science, 33,* 141-163.

Tobiašová, E., Lemanowicz, J., Debska, B., Kunkelová, M., y Sakác, J. (2023). Suitability of Various Parameters for the Determination of the Condition of Soil Structure with Dependence to the Quantity and Quality of Soil Organic Matter. *Journals Sustainability, 15*(14). https://doi.org/10.3390/su151411047

White E., R. (2006). *Principles and Practices of Soil Science. The Soil as a Natural Resorce* (Parr. 59-154). Blackwell, Publishing.

Wang, E., Cruse, R. M., Zhao, Y., y Chen, X. (2015). Quantifying soil physical condition based on soil solid, liquid and gaseous phases. *Soil and Tillage Research, 146,* 4-9.

Yang, T., Siddique, K, K. H. M., y Liu, K. (2020). *Cropping systems in agriculture and their impact on soil health. A review.* Global Ecology and conservation. E01118. https://doi.org/10.1016/j.geico.2020.e1118

Yudina, A., y Kusyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma, 434.*

iThenticate Página 34 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

2. Crecimiento de cebada modificado por urea estabilizada y dosis de nitrógeno

Gaspar Estrada Campuzano*§
Carlos Gustavo Martínez Rueda**
Martín Rubí Arriaga***
Francisco Gutiérrez Rodríguez****

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.02

Resumen

Con el objetivo de medir y comparar el impacto de diferentes dosis de nitrógeno utilizando dos fuentes de urea (convencional y estabilizada) sobre el crecimiento y rendimiento de cebada, se establecieron dos experimentos uno en el ciclo agrícola invierno-primavera (IP) 2010-2011 y otro en verano-otoño (VO) del 2011, en los cuales cuatro dosis de nitrógeno (00, 50, 100 y 160 kg de N ha^{-1}) fueron consideradas ambientes específicos y dentro de cada dosis dos genotipos de cebada (Esmeralda y Josefa) fueron aleatorizados en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se determinó la biomasa en antesis (BIO_{Ant}) y madurez fisiológica (BIO_{MF}), el rendimiento de grano (REND), índice de cosecha (IC), la radiación interceptada acumulada en antesis (RIA_{Ant}) y en madurez fisiológica (RIA_{MF}), la eficiencia de uso de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez fisiológica

§ Autor para correspondencia: gestradac@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1189-0470
** Doctor en Ciencias. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9644-5757
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017
**** Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003−1464-0976

iThenticate Página 37 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(EUR_{MF}), el número de granos y el peso individual de grano. Los resultados revelaron diferencias significativas en ambos ciclos de cultivo para rendimiento de grano. Una mayor disponibilidad de nitrógeno afecto positivamente todos los caracteres estudiados, de manera similar al efecto observado por el uso de urea estabilizada. En términos de componentes numéricos del rendimiento; el número de granos fue el componente que mejor explico los cambios en el rendimiento debidos a las dosis de nitrógeno. La aplicación de urea estabilizada generó cambios en todos los caracteres de crecimiento estudiados en cebada y al aplicar todo el fertilizante al momento de la siembra se logra reducir la pérdida de nitrógeno e incrementa la eficiencia de uso de este elemento, contribuyendo a reducir el impacto al medio ambiente.

Palabras clave: *hordeum vulgare, nitrógeno, rendimiento.*

Introducción

En la actualidad, los cereales de grano pequeño tienen un lugar importante, ya que estos cultivos ocupan la mayor parte de superficie sembrada en el mundo. La importancia de los cereales no se limita a su participación en la dieta humana, también son valiosos por sus aplicaciones industriales y el papel que tienen en la producción ganadera. Su uso para alimento de animales se ha extendido en las últimas décadas bajo diferentes formas como pasto, heno, forraje y ensilaje. En este sentido, los cereales tienen muchas características que los hacen especialmente útiles, por su alto rendimiento, además de ser ricos en proteínas, vitaminas y carbohidratos digestibles. El cultivo de cebada es de importancia socioeconómica, representa una alternativa viable en zonas donde el clima y el suelo presentan restricciones para el establecimiento de otros cultivos. Esta especie tiene repercusión en los sectores agrícola, comercial, industrial y de servicios. A nivel mundial se siembran 47 900 millones de hectáreas, con una producción de 141 400 millones de toneladas de grano y un rendimiento promedio de 2.9 t ha^{-1}, mientras que, en México, se cultiva una superficie mayor a las 350 000 ha, de las cuales 25% corresponde a la siembra bajo riego en invierno-primavera y 75% restante corresponde a siembras de temporal en verano (Base de datos

iThenticate Página 37 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 38 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

3

estadísticos corporativos de la Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura [FAOSTAT, por sus siglas en inglés], 2020).

La producción de cebada en México no satisface las necesidades de la industria nacional, por lo que se ha tenido que importar cantidades crecientes de grano pasando de 21 000 t en 2002 a 147 000 t en 2016 (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [Sader], 2019). En México, 67% de la producción total de cebada corresponde a siembras de temporal (verano- otoño) y 33% restante corresponde a la modalidad de riego (invierno-primavera). Las principales zonas donde se cultiva la cebada maltera de temporal son los Valles Altos de los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México. Además, se siembra en otras regiones como son: norte de Guanajuato, sur de San Luis Potosí, noreste de Jalisco y Durango y norte de Zacatecas (Islas et al., 2008).

El nitrógeno (N) es el principal nutriente que limita la producción de cultivos no leguminosos y es aplicado en grandes cantidades (Malhi et al., 2001; Grant et al., 2012; Maheswari et al., 2017). El N forma parte estructural de las proteínas, protoplasma y clorofila, de tal forma que tiene influencia sobre el tamaño del área foliar y capacidad fotosintética (Alam y Haider, 2006). Un manejo eficiente de este nutriente está relacionado con el uso de dosis y fuentes de N adecuadas, momento y forma aplicación, logrando con esto una mejor sincronización con la demanda del cultivo y así reducir la pérdida del N del sistema. El el efecto del nitrógeno depende de la cantidad aplicada y de las condiciones climáticas prevalecientes durante la temporada de crecimiento (Popovic et al., 2011).

Los fertilizantes nitrogenados de uso convencional en la agricultura son: la urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, fosfato monoamónico (MAP) y fosfato di amónico (DAP), destacándose la urea cuyo consumo supera a todos los demás juntos (Boaretto et al., 2007). La urea convencional es la fuente de N más usada y económica de alta concentración (46%), variedad de usos y aplicaciones (Asociación Internacional de Fertilización [IFA, por sus siglas en inglés], 2018). Es un componente indispensable para producir formulas balanceadas de fertilización. Se puede aplicar al suelo directamente como mono producto, se puede incorporar a mezclas físicas balanceadas, y por su alta solubilidad en agua, puede funcionar como aporte de nitrógeno en formulas NPK (Boaretto et al., 2007). Sin embargo, su alta solubilidad

iThenticate Página 38 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 39 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

provoca que gran parte del nitrógeno que contiene se pierda por volatilización, escurrimientos o por lixiviación antes de que pueda ser absorbido por los cultivos (Mullen, 2011; Huang et al., 2017), lo cual contribuye a incrementar las emisiones de gases de invernadero y contaminación grave del ambiente (Serrano-Silva et al., 2011; Nascimento et al., 2013). Reducir el tiempo que el N inorgánico está en el suelo antes de la absorción del cultivo puede aminorar el riesgo de pérdidas de nitrógeno y aumentar el uso eficiente del mismo. La fertilización nitrogenada dosificada en diferentes momentos puede ser una alternativa para minimizar dichas perdidas (Malhi et al., 2001).

Otra alternativa para reducir perdidas de N es el uso de la aplicación de fertilizantes nitrogenados de liberación controlada, los cuales están diseñados para liberar nitrógeno en la solución del suelo a una velocidad lenta que es más compatible con la absorción de nutrientes por el cultivo, lo que reduce la acumulación de nitrógeno inorgánico en la solución del suelo y el riesgo de pérdidas (Shoji et al., 2001). La urea estabilizada o de lenta liberación se presenta en forma de gránulos envueltos en una membrana semipermeable que está constituida por una sustancia insoluble o de baja solubilidad en agua. La membrana se va rompiendo, debido al gradiente de presión osmótica, liberando los nutrientes de forma progresiva (Mikkelsen, 2007).

El uso de fertilizantes de liberación controlada se ha considerado para una amplia gama de sistemas de producción de cereales y oleaginosas (Chen, 2008; Grant y Wu, 2008; Nelson et al., 2008). Entre los beneficios de este tipo de fertilizantes están las mejoras en el rendimiento de grano y la acumulación de N en el grano cosechado. En los ensayos realizados en la región de pastos mixtos, el uso de la urea recubierta en trigo de invierno mejora la producción, pero no mostraron ventajas sobre la urea convencional (McKenzie et al., 2007).

De acuerdo con lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron: (a) estudiar los cambios en la producción de biomasa y sus determinantes fisiológicos en el cultivo de cebada, cuando se cambia la disponibilidad de nitrógeno y la fuente de urea y (b) definir si las condiciones ambientales (ciclo de crecimiento) se asocian con una mejora en la utilización del nitrógeno por el cultivo.

iThenticate Página 39 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 40 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Materiales y métodos

Ubicación de los experimentos

Los experimentos se establecieron durante los ciclos invierno-primavera (IP) de 2010 y verano-otoño (VO) de 2011, en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México ubicada en el Campus Universitario el Cerrillo Piedras Blancas, Toluca México, localizada a 18 km al norte de la ciudad de Toluca, con coordenadas geográficas de 19°42'30" de latitud norte y 99°41'30" de longitud oeste, y una altitud de 2 640 msnm. De acuerdo con la clasificación de Koppen, modificada por García (1988) el clima predominante es del tipo *C(w2)(w)b(i)* que corresponde a un clima templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y escasa precipitación pluvial en invierno (5%), poca oscilación térmica, temperatura media anual de 12.8°C y precipitación promedio anual de 900 mm.

Factores de estudio y diseño experimental

Se evaluaron dos fuentes de urea (convencional y estabilizada), dos genotipos de cebada (Esmeralda y Josefa) y cinco dosis de nitrógeno (00, 50, 100 y 160 kg de N ha^{-1}), en ambos ciclos agrícolas y en cada tipo de urea los tratamientos de nitrógeno (N) fueron distribuidos en franjas representando cada uno de ellos un ambiente y dentro de cada dosis de nitrógeno los dos cultivares fueron aleatorizados con base a un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Manejo de los experimentos

En los tratamientos con urea convencional el N fue fraccionado en tres momentos: siembra, máximo número de primordios (MNP) y hoja bandera expandida (HB); de tal forma que la dosis de 50 kg de N ha^{-1}, fue aplicada

iThenticate Página 40 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 41 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

en la siembra, mientras que, en la dosis de 100, la mitad fue aplicada a la siembra y la otra en MNP, finalmente la dosis de 160 kg de N ha^{-1}, una tercera parte fue aplicada a la siembra, la otra en MNP y la última en HB. Contrariamente las dosis de N con urea estabilizada fueron aplicadas en su totalidad al momento de la siembra. Cabe señalar, que en todas las dosis de N evaluadas se agregaron 60 y 30 kg ha^{-1}, de fósforo y potasio, respectivamente; usando como fuente de superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio. Los experimentos en ambos ciclos agrícolas fueron sembrados a una densidad de 333 semillas por m^2, en parcelas de 6 hileras de 3.0 m de largo y 0.20 m de separación. La parcela útil estuvo constituida por los cuatro surcos centrales. Para garantizar la densidad antes mencionada, la semilla fue colocada en cintas de papel biodegradable *(maskingtape)* a una distancia entre sí de 1.5 cm y de una longitud correspondiente a lo largo de las hileras. Los experimentos establecidos en el ciclo agrícola IP se desarrollaron bajo riego, el cual fue suministrado por medio de cintas de goteo con goteros separados cada 15 cm. El control de malezas en todos los experimentos se realizó mediante deshierbes manuales periódicamente y se aplicaron agroquímicos para controlar plagas y enfermedades cuando fue necesario. Los datos climáticos fueron registrados mediante una estación climática (Davis, Inn) colocada a 150 m de los experimentos.

Variables evaluadas

Variables fenológicas

Durante el desarrollo de los experimentos se registraron el número de días transcurridos desde la siembra hasta que se observen cada una de las siguientes etapas: (a) Emergencia (E): se registró el número de días transcurridos desde la siembra hasta que se observó el 50% de plantas emergidas. (b) Máximo número de primordios (MNP): esta se determinó cuando el cultivo presentaba entre 5 y 6 hojas, mediante la observación de ápices en un microscopio estereoscópico, para ello se disectaron dos plantas al azar de cada parcela dos veces por semana y se registró la fecha de ocurrencia de la etapa de acuerdo con la escala de Kirby y Appleyard (1984). (c) Hoja

iThenticate Página 41 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 42 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

bandera expandida (HB): esta variable se registró cuando el 50 % de las plantas mostraban hoja bandera totalmente expandida. (d) Antesis (AT): esta se registró cuando 50 % de las plantas presentaban anteras con polen visible y el estigma bífido, mediante disecciones en un microscopio estereoscópico de cinco espigas de vástagos principales. (e) Madurez fisiológica (MF): se marcaron 20 espigas al azar de cada parcela en la etapa de antesis y se registró el pesó seco de cinco granos centrales dos veces por semana hasta que se estabilizó el máximo peso. Posterior a esto la MF fue estimada mediante una regresión bilineal entre el peso seco del grano y el tiempo térmico desde antesis (Miralles y Slafer, 1995), utilizando la siguiente ecuación:

$$Y = a + bx\ (x \leq c) + bc\ (x \geq c)$$

Variables de crecimiento

La producción de biomasa aérea se determinó muestreando periódicamente en cuatro etapas fenológicas del cultivo (máximo número de primordios, hoja bandera, antesis dos surcos de 30 cm y en madurez fisiológica dos surcos de 100 cm. Las muestras se dividieron en vástagos principales y macollos. El peso seco de hojas (verdes o muertas), tallos y espigas (cuando estuvieron presentes) de cada muestra se registró después de secar las muestras en la estufa a 70°C durante 72 horas. El índice de área foliar (IAF), fue determinado en cada uno de los muestreos de biomasa antes mencionados, para ello se tomaron al azar 10 plantas y se les midió el área foliar mediante un integrador de área foliar marca Licor (LI-3000C) y el IAF fue obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$IAF = ((NT \times AF10\,t) / 10)\,(1 / 0.24)$$

La radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (RIA) se determinó midiendo la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo dos veces por semana durante el desarrollo del cultivo, utilizando un ceptómetro lineal. Las mediciones se realizaron en días totalmente despejados cuando el sol se encontraba en su zenit. El ceptometro fue colocado

iThenticate Página 42 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 43 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

en los surcos centrales de cada parcela, midiendo la radiación transmitida (IT) en tres diferentes posiciones (izquierda, centro y derecha) y siguiendo el nivel de hojas senescidas, el valor promedio de dichas mediciones fue usado como la IT por el dosel del cultivo (Slafer et al., 1990). La radiación incidente (IO) se medió colocando el sensor por arriba del dosel del cultivo y la proporción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (%RFAi) por el cultivo se calculó como (IO-IT) / IO. Con los datos de %RFAi determinado en diferentes momentos, se realizaron análisis de regresión con el número de días desde emergencia y los datos fueron ajustados mediante una función sigmoidea, descrita por la siguiente ecuación:

$$\%RFAi = \frac{a + b}{(1 - \exp(-\left(\frac{x - c}{d}\right))}$$

Dónde:
x = es el número de días desde de la emergencia del cultivo (a, b, c y d) = son constantes del modelo.

La eficiencia en el uso de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez fisiológica (EUR_{MF}) fueron determinadas como el cociente entre la RIA_{Ant} y la biomasa en antesis ($BIOM_{Ant}$) y el cociente entre la RIA_{MF} y la biomasa en madurez fisiológica ($BIOM_{MF}$), respectivamente.

Análisis estadístico

Las variables evaluadas fueron sometidas a análisis de varianza (ANDEVA) de acuerdo al modelo lineal utilizado. Cuando la prueba de F de los análisis ANDEVA resultó significativa, se procedió a realizar la prueba de medias utilizando la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) de la prueba de Tukey a un nivel de significancia de 5%. Las relaciones entre variables se analizaron mediante análisis de regresión y se ajustaran modelos lineales, bolinéales o sigmoideos.

iThenticate Página 43 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 44 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Resultados y discusión

Análisis de varianza

Se observaron efectos altamente significativos (P<0.01) para ciclos o estaciones de crecimiento en todos los caracteres estudiados, mientras que para tipo de urea no hubo significancia para el índice de área foliar en antesis. Las dosis de nitrógeno mostraron efectos altamente significativos en todas las variables evaluadas. De igual manera, el efecto genotípico resultó significativo para la mayoría de las variables consideradas con excepción del índice de área foliar en antesis, rendimiento de grano y eficiencia en el uso de la radiación en antesis. La interacción ciclo por tipo de urea utilizada resultó significativa para el índice de cosecha, radiación interceptada acumulada en antesis y en madurez fisiológica, y para la eficiencia en el uso de la radiación en antesis y en madurez, para el resto de las variables los efectos de esta interacción no fueron significativos (tabla 2.1). Por otro lado, la interacción ciclo × nitrógeno resultó significativa para todos los caracteres estudiados con excepción del IAF_{Ant} y RIA_{Ant}, mientras que la interacción tipo de urea × nitrógeno no fue significativa para el IAF_{Ant} y REND (tabla 2.1). Los efectos de la interacción ciclo × genotipo fueron significativos para la mayoría de las variables estudiadas con excepción del IAF_{Ant} y $BIOM_{MF}$ en las cuales no se observaron efectos significativos. Para el caso de la interacción tipo de urea × genotipo los análisis de varianza mostraron la existencia de interacción significativa para todos los caracteres estudiados con excepción del IAF_{Ant}, REND, RIA_{Ant} y RIA_{MF}. Por otro lado, la interacción nitrógeno × genotipo fue significativa para la mayoría de los caracteres estudiados con excepción del IAF_{Ant}, IC y RIA_{Ant}.

La interacción ciclo × tipo de urea × genotipo estuvo presente en forma significativa para $BIOM_{Ant}$, RIA_{MF}, EUR_{Ant} y EUR_{MF}, para el resto de las variables no se observó interacción significativa, mientras que la interacción ciclo × nitrógeno × genotipo sólo resultó significativa para $BIOM_{MF}$, REND, IC, RIA_{Ant}, y RIA_{MF}. Los coeficientes de variación oscilaron entre 4.5 y 20.8%, los cuales correspondieron a $BIOM_{MF}$ e IAF_{Ant}, respectivamente (tabla 2.1).

iThenticate Página 44 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 45 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 2.1. *Significancia de los valores de F para el índice de área folia en antesis*

F.V	*g.l*	*IAFAnt*	*BiomAnt*	*BiomMF*	*Rend*	*IC*	*RIAAnt*	*RIAMF*	*EURAnt*	*EURMF*
Ciclo (C)	1	0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Tipo Urea (TU)	1	0.236	0.001	0.003	0.001	0.011	0.006	0.044	0.001	0.001
C × TU	1	0.474	0.134	0.176	0.573	0.010	0.001	0.005	0.001	0.014
Rep (C × TU)	8	0.736	0.463	0.412	0.829	0.662			0.999	0.881
Nitrógeno (N)	3	0.001	0.001	0.001		0.001			0.005	0.001
C × N	3	0.288	0.050	0.001		0.045			0.001	0.001
TU × N	3	0.869	0.001	0.001		0.019			0.030	0.001
Genotipo (G)	1	0.419	0.012	0.001		0.001			0.088	0.001
C × G	1	0.196	0.002	0.525		0.001			0.020	0.004
TU × G	1	0.597	0.001	0.005		0.004			0.001	0.002
N × G	3	0.969	0.041	0.001		0.251			0.017	0.008
C × TU × G	1	0.597	0.002	0.508		0.138			0.002	0.001
C × N × G	3	0.388	0.547	0.001	865	0.001			0.367	0.112
C × TU × N × G	9	0.760	0.001	0.334	0.71	0.001			0.002	0.001
Error (CME)	56	0.083	1043	1386	8.7	0.0005			0.063	0.71
CV (%)		20.8	7.5	4.5	8.7	6.6	14.0	14.2	11.1	12.2

Significancia de los valores de F para el índice de área folia en antesis (IAF_{Ant}), biomasa en antesis ($Biom_{Ant}$), biomasa en madurez fisiológica($Biom_{MF}$), rendimiento de grano (Rend), índice de cosecha (IC), radiación solar interceptada acumulada en antesis (RIA_{Ant}) y en madurez fisiológica (RIA_{MF}), eficiencia de usos de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez (EUR_{MF}) para dos genotipos de cebada evaluados en cuatro dosis de nitrógeno con dos tipos de urea (convencional y estabilizada) en dos ciclos agrícolas (invierno-primavera) y verano-otoño) en Toluca, México.

Fuente: Experimentos 2010 y 2011.

Comparación de medias para los factores principales

La comparación de medias para ciclos o estaciones de crecimiento reveló que las siembras en el ciclo invierno-primavera (IP) incrementaron significativamente el IAF_{Ant}, la RIA_{Ant} y RIA_{MF}, respecto de los experimentos sembrados en el ciclo verano-otoño (VO), en mayor IAF logrado en antesis en IP favoreció la capacidad de intercepción por el cultivo logrando una mayor

iThenticate Página 45 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 46 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (Loss et al., 1997; O'Connell et al., 2004). En estos últimos existió incrementó significativo de la $BIOM_{Ant}$, $BIOM_{MF}$, REND, IC, EUR_{Ant} y EUR_{MF}, respecto del ciclo IP (tabla 2.2). Aplicaciones de urea estabilizada tuvieron un efecto positivo en todos los caracteres estudiados, con excepción del IAF_{Ant}.

Estos resultados concuerdan con aquellos obtenidos por Ye et al. (2013) quienes encontraron efectos positivos de la urea de lenta liberación sobre la producción de biomasa de arroz, mientras que Abalos et al. (2014) y Scheer et al. (2014) encontraron efectos positivos en rendimiento de grano y sus componentes en brócoli.

Si bien el uso de urea de lenta liberación mejoró significativamente todos los caracteres estudiados, sin duda la mayor ventaja representa la reducción de los costos de aplicación con otros tipos de urea y aquellos relacionados con la disminución de la contaminación del ambiente (Jat et al., 2012; Geng et al., 2016; Costa et al., 2019). La respuesta a las dosis de N depende fuertemente del genotipo utilizado (Alam y Haider, 2006). Nuestros resultados mostraron que la variedad de cebada Esmeralda superó a la variedad Josefa en $BIOM_{Ant}$, REND, IC, RIA_{Ant} y RIA_{MF}, mientras que Josefa fue superior en $BIOM_{MF}$ y EUR_{MF}, en IAF_{Ant} y EUR_{Ant} ambos genotipos se comportaron estadísticamente iguales. En índice de área foliar en antesis se incrementó de manera significativa al incrementar las dosis de nitrógeno. La $BIOM_{Ant}$ pasó de 303 g m^{-2} sin nitrógeno a 540 g m^{-2} con 160 kg de N ha^{-1}, un incremento de 44% respecto del cultivo no fertilizado, similar incremento (42%) fue observado en la $BIOM_{MF}$, mientras que, el rendimiento de grano se incrementó en 58% respecto del cultivo no fertilizado. El índice de cosecha solo se incrementó 19% al pasar de 0.30 sin nitrógeno a 0.37 con la máxima dosis de este elemento. Resultados similares fueron encontrados en cebada (Alam y Haider, 2006; Arisnabarreta y Miralles, 2006) y en otros granos como trigo, maíz y canola (Grant et al., 2012). Las diferencias entre las dosis de N observadas para el índice de cosecha en antesis estuvieron en línea con una mayor capacidad de intercepción de radiación en esa misma etapa (RIA_{Ant}) y aquella acumulada en madurez fisiológica (RIA_{MF}). La eficiencia en el uso de la radiación en antesis paso de 2.1 a 2.4 g MJ^{-1}, sin aplicación de N y con 100 kg de N ha^{-1}, respectiva-

iThenticate Página 46 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 47 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

mente, de igual manera en la EUR_{MF} se observó el mismo incremento (13%) con 100 kg de N ha^{-1} respecto a la dosis más baja (tabla 2.2).

Tabla 2.2. *Valores medios para el índice de área folia en antesis*

Ciclo	*IAF_{Ant}*	*$Biom_{Ant}$* ($g\ m^{-2}$)	*$Biom_{MF}$* ($g\ m^{-2}$)	*Rend* ($g\ m^{-2}$)	*IC*	*RIAAnt* ($MJ\ m^{-2}$)	*RIAMF* ($MJ\ m^{-2}$)	*EURAnt* ($g\ MJ^{-1}$)	*EURMF* ($g\ MJ^{-1}$)
Ciclo									
I-P	1.4a	362b	557b	255b	0.28b	243a	612a	1.5b	1.5b
V-O	1.3a	489a	1073a	418a	0.38a	166b	399b	2.9a	2.8a
Tipo Urea									
Convencional	1.3a	410b	799b	322b	0.33b	210a	517a	2.1b	2.0b
Estabilizada	1.4a	441a	831a	351a	0.34a	199a	493a	2.3a	2.2a
Genotipo									
Esmeralda	1.3a	434a	788b	340a	0.35a	218a	534a	2.3a	2.0b
Josefa	1.4a	417b	842a	334b	0.33b	191b	477b	2.2a	2.3a
Dosis N ($kg\ ha^{-1}$)									
00	1.0c	303d	601d	201d	0.30c	151d	382c	2.1b	2.0b
50	1.2c	360c	724c	299c	0.33b	177c	430c	2.2b	2.3a
100	1.4b	500b	901b	358b	0.33b	227b	542b	2.4a	2.3a
160	1.8a	540a	1035a	487a	0.37a	262a	669a	2.1b	2.0b

Valores medios para el índice de área folia en antesis (IAF_{Ant}), biomasa en antesis ($Biom_{Ant}$), biomasa en madurez fisiológica($Biom_{MF}$), rendimiento de grano (Rend), índice de cosecha (IC) radiación solar interceptada acumulada en antesis (RIA_{Ant}) y en madurez fisiológica (RIA_{MF}), eficiencia de usos de la radiación en antesis (EUR_{Ant}) y en madurez (EUR_{MF}) para dos ciclos agrícolas (invierno-primavera y verano-otoño) donde se evaluaron dos genotipos de cebada con urea convencional y estabilizada, en 4 dosis de nitrógeno en Toluca, México.

Nota. Letras unidas con la misma letra no difieren significativamente entre si al 0.05 de la prueba de Tukey.

Fuente: Datos experimentos 2010 y 2011.

La producción de biomasa en los cultivos de grano sin ningún tipo de estrés es explicada tanto por la radiación fotosintéticamente activa interceptada por las hojas y la eficiencia de uso de la radiación (Monteith, 1977; Lindquist et al., 2005). Nuestros resultados mostraron que la biomasa producida en antesis y en madurez fisiológica fue explicada principalmente por la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada en ambos periodos, mientras que la eficiencia de uso de la radiación no explicó los cambios en la biomasa (gráfica 2.1).

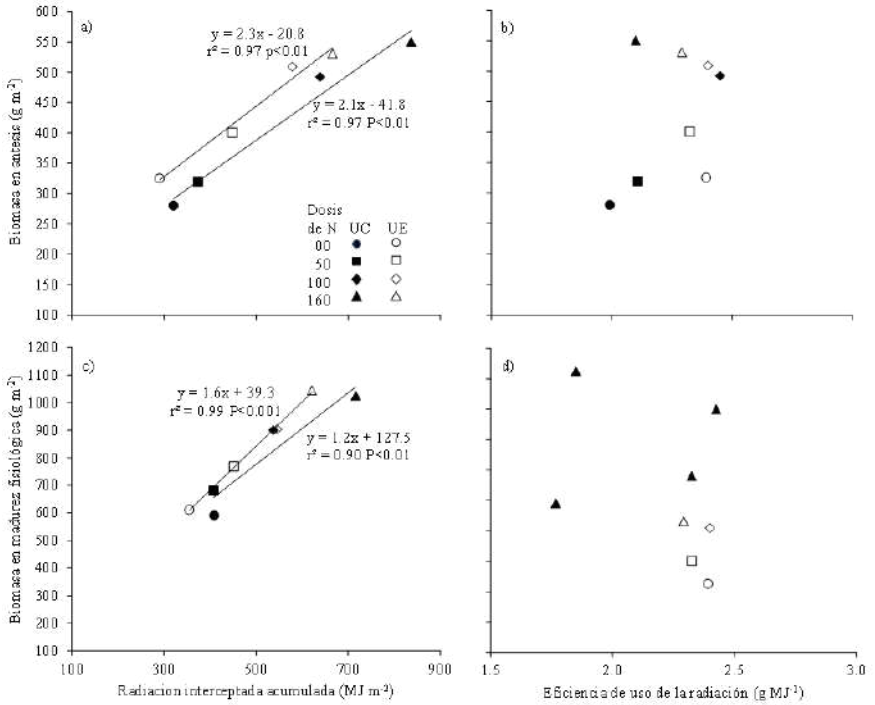
Observándose un efecto positivo de las dosis de nitrógeno sobre la radiación interceptada acumulada tanto en antesis como en madurez. La

iThenticate Página 47 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 48 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

eficiencia en el uso de la radiación (pendiente de la relación entre la producción de biomasa y la radiación interceptada acumulada) fue mayor cuando se usó urea estabilizada (2.3 g MJ^{-1} en antesis y 1.6 g MJ^{-1} en madurez) respecto de la urea convencional (1.6 g MJ^{-1} en antesis y 1.2 g MJ^{-1} en madurez) resultados similares fueron encontrados en maíz (Yuan et al., 2017).

Gráfica 2.1. *Relaciones entre biomasa a antesis y radiación interceptada acumulada en antesis*



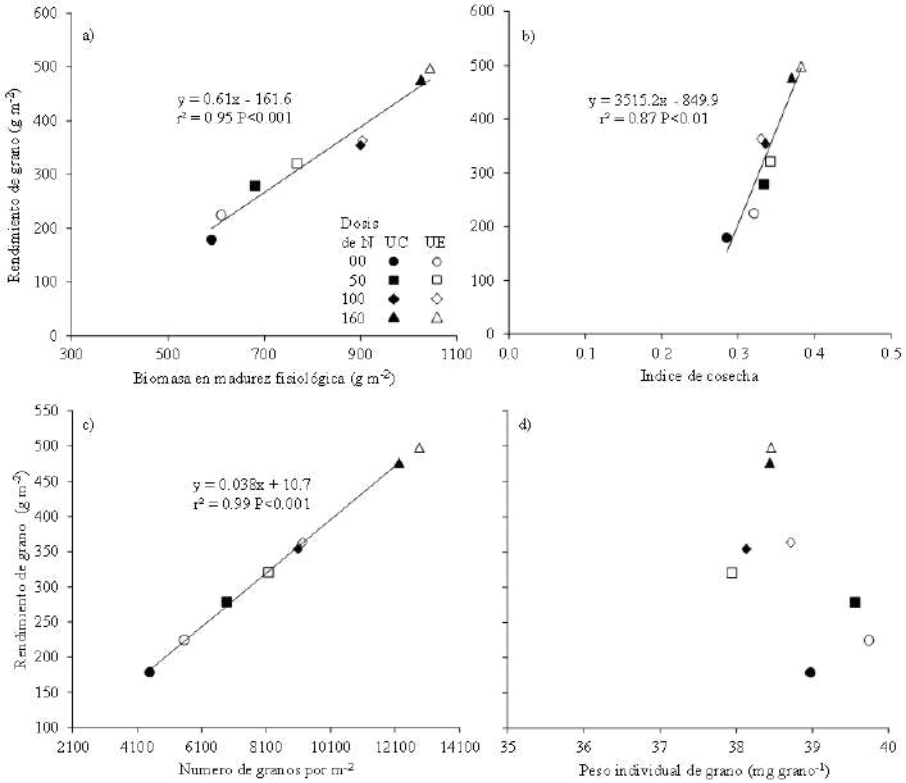
Nota: Relaciones entre biomasa a antesis y radiación interceptada acumulada en antesis (a) y la eficiencia en el uso de la radiación (b), biomasa a madurez y radiación interceptada acumulada en madurez (c) y la eficiencia en el uso de la radiación (d) en cebada, creciendo en 4 dosis de nitrógeno y dos tipos de urea (UC: urea convencional, UE: urea estabilizada) en Toluca, México. Datos promedio de dos ciclos agrícolas y dos genotipos.

Fuente: Datos experimentos 2010 y 2011.

iThenticate Página 48 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 49 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Figura 2.2. *Relaciones entre rendimiento de grano con la biomasa a madurez fisiológica*



Nota: Relaciones entre rendimiento de grano con la biomasa a madurez fisiológica (a) y con el índice de cosecha (b), rendimiento de grano con el número de granos por m² (c) y con el peso individual de grano (d) en cebada, creciendo en 4 dosis de nitrógeno y dos tipos de urea (UC: urea convencional, UE: urea estabilizada) en Toluca, México. Datos promedio de dos ciclos agrícolas y dos genotipos.

Fuente: Datos experimentos 2010 y 2011.

Es sabido que el rendimiento de grano en los cereales es fuertemente explicado por los cambios en la biomasa producida en madurez fisiológica y en el índice de cosecha (proporción de la biomasa producida que representa el rendimiento económico) (Carcova et al., 2015). Los resultados del presente trabajo reflejaron que los cambios en el rendimiento de grano debidos a dosis de nitrógeno estuvieron asociados principalmente a la producción de biomasa en madurez fisiológica ($r^2 = 0.95$ $P<0.001$) y al índice de cosecha ($r^2 = 0.87$ $P<0.01$) (gráfica 2.2a y 2.2b), lo anterior resalta la importancia que tiene el nitrógeno en promover el crecimiento (producción de biomasa) de los cultivos (Porto et al., 2014; Maheswari et al., 2017). Por otro lado, el nú-

iThenticate Página 49 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 50 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

mero de granos por unidad de superficie por si solo explicó los cambios observados en el rendimiento de grano a través de las dosis de nitrógeno evaluadas, existiendo en la mayoría de los casos un efecto positivo sobre el rendimiento de grano al aplicar urea estabilizada. La aplicación de la urea estabilizada en el presente trabajo se realizó en su totalidad al momento de la siembra y el efecto positivo observado sobre la producción de biomasa y el rendimiento de grano mismo, indica que el nitrógeno contenido en esta fuente estuvo presente durante todo el ciclo de crecimiento de cultivo evitando perdidas a través del perfil del suelo o hacia la atmosfera (Shoji et al., 2001; McKenzie et al., 2007).

Conclusiones

Los resultados revelaron diferencias significativas en ambos ciclos de cultivo para rendimiento de grano, asociado principalmente a una mayor producción de biomasa y eficiencia en el uso de la radiación en antesis y en madurez fisiológica. Una mayor disponibilidad de nitrógeno afecto positivamente todos los caracteres estudiados, de manera similar al efecto observado por el uso de urea estabilizada. Una mayor producción de biomasa por efecto de las dosis de nitrógeno estuvo asociada principalmente por una mayor capacidad de intercepción de radiación por el cultivo, mientras que los cambios en el rendimiento de grano estuvieron fuertemente asociados a la producción de biomasa y el índice de cosecha, mientras que en términos de los componentes numéricos del rendimiento, el número de granos fue el componente que mejor explico los cambios en el rendimiento debidos a las dosis de nitrógeno. La aplicación de urea estabilizada generó cambios en todos los caracteres de crecimiento estudiados en cebada.

Referencias

Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G., y Vallejo, A. (2014). Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agricultural Ecosystem Environment, 189,* 136-144.

iThenticate Página 50 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 51 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Alam, M. Z., y Haider, A. (2006). Growth attributes of barley (Hordeum vulgare L.) cultivars in relation to different doses of nitrogen fertilizer. *Journal of life and Earth Science, 1,* 77-82.

Arisnabarreta, S., y Miralles, D. J. (2006). Yield responsiveness in two- and six-rowed Barley grown in contrasting nitrogen environments. *Journal of Agronomy & Crop Science, 192,* 178-185.

Boaretto, A., Muraoka, T., y Trevelin, P. (2007). Uso eficiente del nitrógeno de los fertilizantes convencionales. *Informaciones Agronómicas, IPNI,* (68), 13-14.

Da Costa, T., Westphalen, P. G., Dalla Nora, F. B., Silva, B. de Z., y Da Rosa, G. S. (2019). Technical and environmental assessment of coated urea production with a natural polymeric suspension in spouted bed to reduce nitrogen losses. *Journal of Cleaner Production, 222,* 324-334.

Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020). *Estadísticas de producción mundial y nacional de cebada.* http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC (Consultado 24/04/2020)

Geng, J., Ma, Q., Chen, J., Zhang, M., Li, C., Yang, Y., Yang, X., Zhang, W., y Liu, Z. (2016). Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield,nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton. *Field Crops Research, 187,* 87-95.

Grant, C. A., Wub, R., Selles, F., Harkerc, K. N., Claytond, G. W., Bittmane, S., Zebarthf, B. J., y Lupwayi, N. Z. (2012). Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding. *Field Crops Research, 127,* 170-180.

Huang, J., Xu, C.-C., Ridoutt, B. G., Wang, X.-C., y Ren, P.-A. (2017). Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production, 159,* 171-179. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.008

International Fertilizer Association (2018). *Fertilizer Outlook 2018-2020.*

Islas, G. J., Zamora, D. M., Gámez, V. F. P., y Solano, H. S. (2008). Rentabilidad de la cebada de riego en El Bajío. En *III Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. Yucatán, México. Memoria.*

Jat, R. A., Wani, S. P., Sahrawat, K. L., Singh, P., Dhaka, S. R., y Dhaka, B. L. (2012). Recent approaches in nitrogen management for sustainable agricultural production and eco-safety. *Archives of Agronomy and Soil Science, 58,* 1033-1060.

Lindquist, J. L., Arkebauer, T. J., Walters, D. T., Cassman, K. G., y Dobermann, A. (2005). Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal, 97,* 72-78.

Loss, S. P., Siddique, K. H. M., y Martin, L. D. (1997). Adaptation of faba bean (Vicia faba L.) to dryland Mediterranean-type environments II. Phenology, canopy development, radiation absorption and biomass partitioning. *Field Crops Research, 52,* 29-41.

Maheswari, M., Murthy, A. N. G., y Shanker, A. K. (2017). Nitrogen nutrition in crops and its importance in crop quality. *Indian Nitrogen Assess, 12,* 175-182.

Malhi, S. S., Grant, C. A., Johnston, A. M., y Gill, K. (2001). Nitrogen fertilization manage-

iThenticate Página 51 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 52 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ment for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil Tillage Research, 60,* 101-122.

McKenzie, R. H., Bremer, E., Middleton, A. B., Pfiffner, P. G., y Dowbenko, R. E. (2007). Controlled release urea for winter wheat in southern Alberta. *Canadian Journal of Soil Science, 87,* 85-91.

Mikkelsen, R. L., Williams, H. M., y Behel, Jr. D. (1994). Nitrogen leaching and plant uptake from controlled-release fertilizers. *Fertilizer Research, 37,* 43-50.

Miralles, J. D., y Slafer G. A. (1995). Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. *Field Crops Research, 43,* 55-66.

Monteith, J. L. (1977). Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 281,* 277-294.

Mullen, R. W. (2011). Nutrient cycling in soils: nitrogen. En J. L. Hatfield y T. J. Sauer (Eds.), *Soil Management: Building a Stable Base for Agriculture* (pp. 67-78). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.

Nascimento, C. A. C., Vitti, G. C., Faria, L. de A., Luz, P. H. C., y Mendes, F. L. (2013). Ammonia volatilization from coated urea forms. *Revista Brasileña de Ciencia Do Solo, 37,* 1515-1525.

O'Connella, M. G., O'Learyb, G. J., Whitfield, D. M., y Connor, D. J. (2004). Interception of photosynthetically active radiation and radiation-use efficiency of wheat, field pea and mustard in a semi-arid environment. *Field Crops Research, 84,* 111-124.

Popovic, V., Glamoclija, D., Maleševic, M., Ikanovic, J., Dražic, G., Spasic, M., y Stankovic, S. (2011). Genotype specificity in nitrogen nutrition of malting barley. *GENETIKA, 43,* 197-204.

Porto, R. D. A., Koetz, M., Bonfim-Silva, E. M., Polizel, A. C., y Silva, T. J. A. D. (2014). Effects of water replacement levels and nitrogen fertilization on growth and production of gladiolus in a greenhouse. *Agricultural Water Manage, 131,* 50-56.

Sader (2019). *Reporte del mercado de cebada.* Gobierno de México.

Scheer, C., Rowlings, D. W., Firrel, M., Deuter, P., Morris, S., y Grace, P. R. (2014). Impact of nitrification inhibitor (DMPP) on soil nitrous oxide emissions from an intensive broccoli production system in sub-tropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry, 77,* 243-251.

Serrano-Silva, N., Luna-Guido, M., Fernandez-Luqueño, F., Marsch, R., y Dendooven, L. (2011). Emission of greenhouse gases from an agricultural soil amended with urea: a laboratory study. *Applied Soil Ecology, 47,* 92-97.

Shoji, S., Delgado, J., Mosier, A., y Miura, Y. (2001). Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. *Communications Soil Science and Plant Analysis, 32,* 1051-1070.

Slafer, G. A., Andradem, F. H., y Satorre, E. H. (1990). Genotypic improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Research, 23,* 255-263.

Ye, Y. S., Liang, X. Q., Chen, Y. X., Liu, J., Gu, J. T., Guo, R., y Li, L. (2013). Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice.

iThenticate Página 52 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 53 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crop Research, 144,* 212-224.

Yuan, M., Ruark, M. D., y Bland, W. L. (2017). Adaption of the AmaizeN model for nitrogen management in sweet corn (Zea mays L.). *Field Crops Research 209,* 27-38.

iThenticate Página 53 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 54 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

3. Influencia de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre la concentración de compuestos polifenólicos totales y la capacidad antioxidante en grano de triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack)

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.03

Adriana Villanueva Carvajal*§
José Arturo Rodríguez-Álvarez**
Gaspar Estrada Campuzano***
Martín Rubí Arriaga****
Delfina de Jesús Pérez López*****

Resumen

El consumo de cereales integrales contribuye a mejorar la salud humana por el aporte considerable de compuestos antioxidantes, como los polifenoles, y la fibra dietética. El propósito de este trabajo fue evaluar el efecto del genotipo y de la dosis de nitrógeno (N) aplicada durante el cultivo, sobre la concentración de los compuestos polifenólicos del triticale y su consecuente actividad antioxidante. Para tal efecto, se sembraron dos variedades comerciales: Bicentenario y Siglo xxi; dos líneas avanzadas de triticale, y los tratamientos de fertilización consistieron en 00, 120, 180 y 24 kg N ha^{-1}. Al grano cosechado se le cuantificaron los polifenoles totales, la fibra dietética, los arabinoxilanos (ax), además de la actividad antioxi-

El autor José Arturo C. Rodríguez Álvarez desea agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conahcyt) por la beca que le permitió realizar sus estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales en la Universidad Autónoma del Estado de México.

§ Autor para correspondencia: avillanuevac@uaemex.mx
* Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2429-4387
** Maestro en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México.
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1189-0470
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017
***** Doctora en Ciencias Agropecuarias. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690

iThenticate Página 54 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 55 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

dante del grano integral y del rendimiento. El aumento de la dosis de N produjo un incremento proporcional del rendimiento de grano a razón de 15.6 kg ha^{-1} por unidad de N aplicada ($R^2 > 0.99$). El contenido de AX se incrementa también, pero solamente a dosis de N iguales o superiores a 180 kg ha^{-1} y con respuestas diferentes según el genotipo. La concentración de polifenoles totales y la actividad antioxidante del grano siguen un comportamiento cercano al de los AX: se verificaron incrementos significativos de estas variables sólo a las dosis de N más elevadas. Se observó una asociación entre los AX y los polifenoles totales, así como entre la concentración de fibra dietética y la actividad antioxidante. El efecto de la dosis de N sobre los compuestos que le otorgan capacidad antioxidante al grano podría explicarse por el incremento en su contenido de polisacáridos y fibra dietética en general.

Palabras clave: *dosis de Nitrógeno, FRAP, equivalentes ácido gálico, capacidad antioxidante.*

Introducción

El triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack) es un cereal que en la actualidad se cultiva principalmente para la producción de forrajes y en menor medida para la obtención de grano. Es una planta que, cuando se desarrolla bajo condiciones ambientales no óptimas, produce una cantidad de biomasa y un rendimiento de grano que pueden ser económicamente rentables (Estrada-Campuzano et al., 2008). El empleo de este cereal en procesos agroindustriales convencionales, tales como la panificación, donde se coloca en competencia con el trigo, no han resultado conveniente (McGoverin et al., 2011). Sin embargo, en procesos alternativos, en los que se pueda aprovechar su composición y algunas de sus propiedades, puede representar una alternativa competitiva que coadyuve en la solución de problemas relacionados con la alimentación humana. Numerosos estudios han reportado que el consumo de cereales integrales contribuye a mejorar la salud por el aporte considerable de compuestos antioxidantes, tales

iThenticate Página 55 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 56 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

como los polifenoles, la fibra dietética y aun la asociación entre estos dos grupos de compuestos.

Los cereales integrales contribuyen a prevenir y atenuar problemas relacionados con la obesidad, las enfermedades coronarias, la diabetes, los desórdenes gastrointestinales y el cáncer de colon, entre otros (Tungland y Meyer, 2002; Saura-Calixto et al., 2009). Un factor que favorece la manifestación de muchos de estos desórdenes son los radicales libres, producidos por el cuerpo humano de manera natural o a causa de factores ambientales adversos, y los polifenoles de los cereales amortiguan su efecto porque presentan una capacidad antioxidante considerable (Saura-Calixto, 2011). En el grano de triticale el contenido de ácidos fenólicos, principalmente ácido ferúlico, oscila entre 65.2 y 252.5 mg 100 g^{-1} y generalmente se encuentran presentes ligados a la fibra dietética. Esta asociación les permite expresar una alta actividad antioxidante aun superior que los ácidos fenólicos libres; además, su pericarpio contiene cantidades apreciables de proantocianidinas (862.5 mg 100 g^{-1} de equivalentes catequina) y ligninas ligadas a otros compuestos fenólicos (0.27 mg 100 g^{-1}) (Hosseinian y Mazza, 2009). Según Agil y Hosseinian (2012), los extractos de polisacáridos obtenidos de esta fracción exhiben una fuerte actividad antiradicales libres (33.86 ± 2.30 µmol de equivalentes trolox g^{-1} de pericarpio), lo que sugiere que este cereal puede ser una fuente considerable de compuestos prebióticos, por su fibra dietética, y de antioxidantes y puede ser una justificación para implementar su cultivo con la finalidad de producir grano. Además, por su resistencia a un déficit hídrico, representa una alternativa agrícola en las zonas de temporal y baja precipitación pluvial.

La composición del grano de triticale, el rendimiento y sus componentes están influenciados por el ambiente, el genoma y la nutrición de la planta (Estrada-Campuzano et al., 2012). Es posible entonces, que la concentración de los compuestos antioxidantes en el grano también esté determinada genotípicamente y por los factores ligados al cultivo. Este aspecto ha sido poco estudiado y son escasos los reportes donde se haya evaluado el efecto de algunos de ellos. Stumpf et al. (2015), por ejemplo, estudiaron la influencia de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de compuestos fenólicos en el trigo, encontrando aumentos significativos a medida que se incrementaba la aportación de nitrógeno al

iThenticate Página 56 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 57 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

cultivo; además, observaron que la máxima concentración de estos compuestos se obtenía cuando el grano se encontraba en un estado lechoso. Por otro lado, Karamac et al. (2004) observaron variaciones en la concentración de polifenoles totales de los granos de triticale que estaban asociadas con el genotipo. Jonnala et al. (2010) por su parte, confirmaron este efecto genotípico en granos de trigo duro y de triticale de diversos cultivares. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue verificar la existencia de variabilidad genética para la concentración de los compuestos polifenólicos del triticale y su consecuente actividad antioxidante, y, al mismo tiempo, explicar estas variaciones en función de la fertilización nitrogenada y de la interacción genotipo-dosis de nitrógeno.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El experimento se estableció, bajo temporal, durante el ciclo verano-otoño de 2014, en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizada al norte de la ciudad de Toluca (19°15'33" de altitud norte, 99°39'38" de longitud oeste, a 2 640 msnm) en México. El clima de esta localidad es semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con un rango anual de precipitación de 800 a 1 300 mm y de temperatura de 8 a 14°C. Las parcelas se establecieron en un suelo de tipo vertisol pélico con textura franco-arcillosa. Análisis preliminares, llevados a cabo bajo normas oficiales, mostraron que el pH del suelo fue igual a 6.6, con 6.7% de materia orgánica, 35 kg ha^{-1} de nitrógeno, 123 ppm de fósforo y 564 ppm de potasio.

Actividades de campo y tratamientos

Las semillas se colocaron en cintas adheribles de papel biodegradable a una distancia de 1.5 cm entre semilla y semilla con el fin de garantizar el número de plantas requerido. La siembra se llevó a cabo manualmente colocando las

iThenticate Página 57 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 58 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

cintas en el fondo del surco y a una densidad de 336 semillas m^{-1}. La parcela experimental consistió de seis hileras de 4 m de largo separadas a 0.20 m (3.6 m^2). Se consideró como parcela útil para las mediciones un área de 0.4 m^2 formada por dos hileras centrales de 1 m de longitud. Las malezas se controlaron manualmente durante todo el ciclo del cultivo. No se presentaron plagas ni enfermedades en el cultivo durante el periodo de crecimiento. Se utilizaron dos variedades comerciales, Bicentenario y Siglo XXI, y dos líneas avanzadas de triticales hexaploides (línea 3 y 7). Los tratamientos de nitrógeno (N) consistieron de 00, 120, 180 y 240 kg de N por hectárea. Se utilizó urea (46% N), superfosfato de calcio triple (46% P_2O_5) y Cloruro de Potasio (60% K_2O). Las dosis de N se aplicaron en las etapas de siembra, amacollamiento y hoja bandera; la de 120 fue fraccionada en las dos primeras etapas y las de180 y 240 en las tres. En cada dosis de N, los cuatro cultivares fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Cosecha y análisis de grano

La cosecha se realizó de forma manual a los 164 días después de la emergencia. Se cosecharon las plantas en 1 m lineal de los dos surcos centrales en cada unidad experimental. Las espigas presentes fueron secadas en una estufa de aire forzado a 60°C por 72 horas. Con el grano obtenido en la muestra se determinó el rendimiento de grano (REND, g m^{-2}) a partir del número de granos por m^2 y del peso individual de grano (mg $grano^{-1}$).

A cada muestra de grano, previamente triturada en un molino ciclónico hasta un tamaño de partícula inferior a 0.42 mm, se le determinó, el contenido de fibra dietética total mediante el kit enzimático K-TDFR adquirido en Megazyme (Megazyme International Ireland Limited) (Hollmann et al., 2013), los arabinoxilanos (AX) a través del método colorimétrico de Kiszonas et al. (2012), la concentración de polifenoles totales, con el reactivo de Folin-Ciocalteu y mediante la propuesta de Spizzirri et al. (2009), y la actividad antioxidante, mediante el método de FRAP propuesto por Pulido et al. (2000). Con los datos obtenidos se practicó un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo al modelo lineal utilizado y se realizó la comparación de las medias de Tukey, con la ayuda del software Statistical Analysis System

iThenticate Página 58 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 59 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(V.6.12). Para evaluar la relación entre estas variables se utilizó un análisis de componentes principales.

Extracción de compuestos fenólicos totales del grano de triticale

Con el fin de optimizar la extracción de los compuestos fenólicos del grano, mediante solventes orgánicos y agua, se probaron diferentes combinaciones de etanol, metanol (J. T. Baker) y agua desionizada, bajo un diseño de mezclas formado por 10 unidades experimentales (UE), como se observa en la tabla 3.1 (Cornell, 1981). Para tal efecto, se pesó 1 g de semillas de la variedad Bicentenario y se agregó a 10 ml de mezcla de solventes. A continuación, se agitó esta suspensión durante 2 h en un agitador magnético a temperatura ambiente y se centrifugó a 3000 rpm durante 10 minutos (1610 RCF). En seguida, el sobrenadante fue filtrado mediante un filtro de membrana de celulosa de acetato (0.45 µm de poro) y se utilizó inmediatamente para realizar la cuantificación de compuestos fenólicos totales mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu. La concentración resultante en equivalentes de ácido gálico (miligrámosg de ácido gálico equivalente a 100 g de triticale) (EAG) se consideró como variable respuesta. Este procedimiento se repitió tres veces.

Resultados y discusión

Extracción de compuestos fenólicos totales del grano de triticale

El diseño experimental de mezclas ha sido propuesto, desde hace algunos años, por Cornell (1973 y 1981) y se ha empleado para resolver numerosos problemas donde los factores de estudio se pueden considerar como componentes proporcionales de una mezcla (Montgomery, 2009). La originalidad de este diseño es que estos factores no son independientes, porque la suma de las proporciones o fracciones de cada uno de ellos es siempre igual a 1 (o 100%). Una consecuencia de esta particularidad es que los

iThenticate Página 59 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 60 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

modelos matemáticos que los describen carecen de término constante (ordenada al origen).

Tabla 3.1. *Mezclas porcentuales de agua, etanol y metanol y cantidad extraída de compuestos fenólicos totales del grano de triticale*

Agua	*Etanol*	*Metanol*	*Polifenoles Totales (mg EAG/100 g)*	*Desviación estándar*
100	0	0	174.95	3.08
0	100	0	168.92	2.42
0	0	100	239.61	3.83
0	50	50	172.10	3.09
50	0	50	172.22	0.79
50	50	0	164.87	1.50
33.33	33.33	33.33	172.21	1.45
16.67	16.67	66.67	190.43	0.51
16.67	66.67	16.67	163.91	1.67
66.67	16.67	16.67	169.29	0.53

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Tabla 3.2. *Análisis de varianza del efecto de las mezclas de solventes orgánicos sobre los polifenoles totales del triticale*

Fuente de variación	*GL*	*SC*	*EE*	*R2*
Media	1	959634.0		
Bloques	2	14.3^{NS}		
Mezclas unitarias	2	9314.1**	13.4	67.37
Mezclas Binarias	3	4188.1**	3.9	97.62
Mezclas ternarias	1	230.1**	2.2	99.28
Error experimental	21	99.0		
Total	30	973480.0		

Nota. **: $p<0.01$; *: $p<0.05$; NS: No significativo; SC: Suma de Cuadrados; EE: Error Estándar.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La tabla 3.1 muestra la capacidad de extracción de cada mezcla de los solventes orgánicos utilizados, desde las unitarias, formadas por un sólo componente, las binarias por la mezcla de dos, hasta las ternarias, constituidas por diferentes proporciones de los tres solventes. El análisis de varianza de estos resultados, mostrado en la tabla 3.2, y el modelo obtenido (tabla 3.3) permiten estimar el efecto de cada uno de los componentes sobre

iThenticate Página 60 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 61 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

la extracción de polifenoles totales del grano de triticale. Con la excepción de las repeticiones (bloques), los efectos de todas las mezclas resultaron significativos. Esto trae como consecuencia que un modelo cúbico (en este caso formado por las mezclas ternarias) presente el coeficiente de determinación (R^2) más elevado.

Los coeficientes del modelo cúbico, mostrados en la tabla 3.3, permiten estimar el efecto de una mezcla determinada sobre la cantidad de polifenoles totales extraída. De acuerdo con este modelo, la mayor contribución a la extracción estuvo dada por la mezcla unitaria de metanol, seguida de la del agua. Cualquiera de las mezclas binarias o ternarias disminuyó significativamente la cantidad de polifenoles extraída. Una mezcla formada por metanol y una cantidad marginal de agua maximiza la extracción. De esta manera, cuando se utilizó el agua hasta un porcentaje máximo de 10% y en ausencia de etanol, se logró obtener un valor estimado de 220.39 mg EAG 100g. Esta mezcla se utilizó para las extracciones posteriores, relacionadas con la fertilización nitrogenada. Una mezcla cercana, metanol (80%) y agua (20%) fue utilizada por Jonnala et al. (2010) para evaluar la cantidad de polifenoles en el salvado de trigo y triticale.

Tabla 3.3. *Coeficientes del modelo cúbico para el efecto de las mezclas de solventes sobre la concentración de compuestos fenólicos totales del grano de triticale y su significancia*

Parámetro	*Coeficiente*	*Error estándar*	*t de Student*	*P*
A:Agua	175.46	1.21	-	0.0000
B:Etanol	168.52	1.21	-	0.0000
C:Metanol	239.35	1.21	-	0.0000
AB	−28.04	6.10	−4.60	0.0000
AC	−139.73	6.10	−22.91	0.0000
BC	−129.98	6.10	−21.31	0.0000
ABC	281.01	40.22	6.99	0.0000

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

iThenticate Página 61 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 62 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Rendimiento, actividad antioxidante y fibra dietética

En la tabla 3.4 se reportan las sumas de cuadrados (SC) obtenidas a partir del análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento (REND), la actividad antioxidante (FRAP y CPT) y la fibra dietética (AX y FDT) del triticale por efectos del genotipo y la dosis de nitrógeno (N), así como sus respectivos grados de libertad. El efecto de la dosis de N, del genotipo y de la interacción entre estos dos factores resultó significativo para todas estas variables, a excepción de la interacción para el contenido de polifenoles totales (CPT). La variabilidad observada en el rendimiento se explica principalmente por el efecto de la dosis de N, ya que este factor agrupó 64.2% de la SC total para esta variable, en comparación con el efecto del genotipo y la interacción que sólo explican 9.6 y 15.1%, respectivamente. La concentración de fibra dietética total (FDT) tuvo un comportamiento semejante con 71.7% de la variabilidad debida a la dosis de N, 7.2% al genotipo y 8.7% a la interacción. En el caso de los contenidos de polifenoles totales (CPT) y AX el efecto del genotipo es superior al de la dosis de N y a la interacción, ya que este agrupa, respectivamente, 52.7 y 32.3% de la suma de cuadrados en el ANOVA. Finalmente, en el caso de la actividad antioxidante (FRAP), los efectos de la interacción genotipo-dosis de N (43.5% de la SC) y de la dosis de N resultaron determinantes (32.3% de la SC) y en menor medida, el efecto individual del genotipo (11.7% de la SC).

Tabla 3.4. *Cuadrados medios del análisis de varianza para el rendimiento, la actividad antioxidante y la fibra dietética del triticale en función del genotipo y la dosis de nitrógeno*

Fuente de variación	*GL*	*Rendimiento*	*CPT*	*FRAP*	*AX*	*FDT*
Bloque (Nitrógeno)	8	19691.40^{NS}	4345.34^{NS}	0.33^{NS}	0.95^{NS}	3.53^{NS}
A: Nitrógeno	3	914553.00**	8801.77**	3.46**	4.80**	51.72**
B: Genotipo	3	137195.00**	37073.30**	1.26**	9.98**	5.17**
A*B	9	214994.00**	7797.94^{NS}	4.67**	7.19*	6.26*
Error experimental	24	138303.00	12282.80	1.02	7.97	5.41
Total	47	1424740.00	70301.20	10.74	30.89	72.09
R2		90.29	82.53	90.53	74.19	92.49

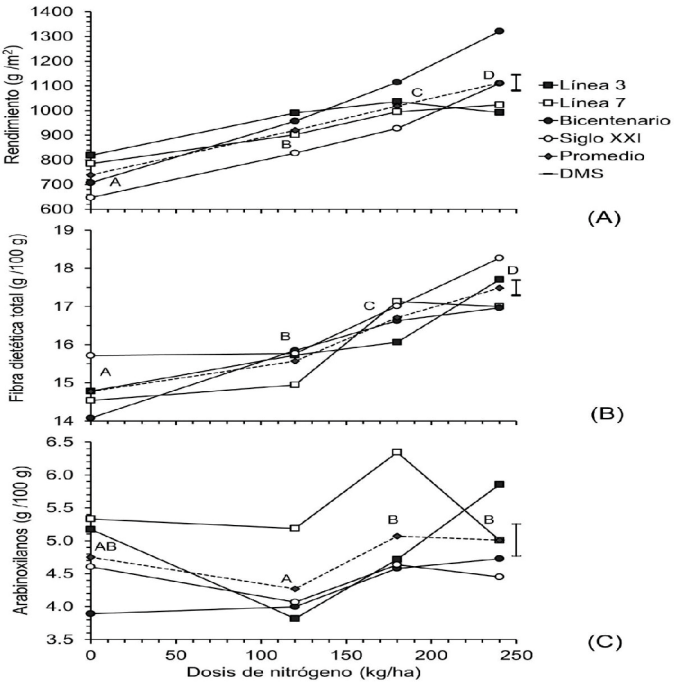
Nota. **: p<0.01; *: p<0.05; NS: No significativo; CPT: Contenido de polifenoles totales; FRAP. Actividad antioxidante; AX: Arabinoxilanos; FDT: Fibra dietética total.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

iThenticate Página 62 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 63 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Gráfica 3.1. *Interacción genotipo por dosis de N para el rendimiento y la concentración de fibra dietética total y arabinoxilanos del grano de triticale (DMS: Diferencia mínima significativa)*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

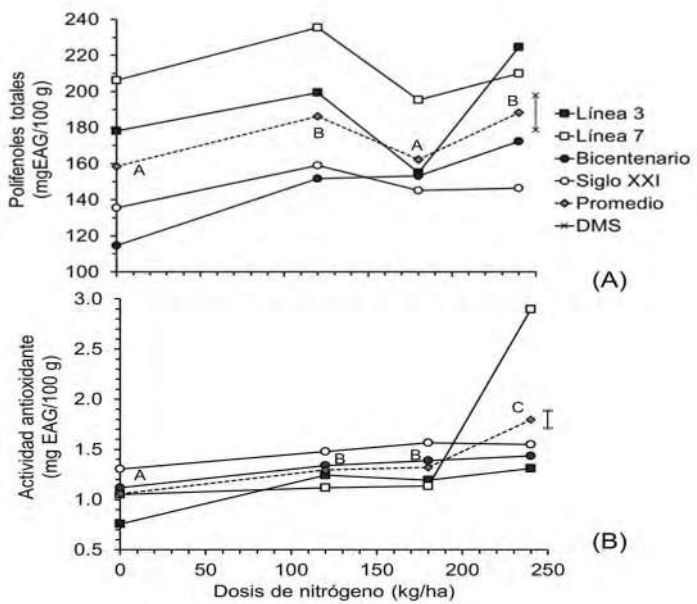
El efecto individual de la dosis de N en cada genotipo y la interacción de estos dos factores para cada una de las variables antes mencionadas se muestra en las gráficas 3.1 y 3.2. El aumento de la dosis de N, en promedio, produjo un incremento proporcional del rendimiento de grano. Una regresión lineal de los valores medios (línea entrecortada de la gráfica 3.1a) reflejó que el gradiente de incremento fue de alrededor de 15.6 kg ha^{-1} por cada unidad de N aplicada (R^2>0.99) siendo la variedad Bicentenario la que mejor responde a este factor. Como se puede observar en la gráfica 3.1b, en línea con el incremento en el rendimiento de grano, la fibra dietética aumentó con la dosis de N. En relación con esto, diversos investigadores han reportado que la fertilización nitrogenada incrementa de manera significativa el rendimiento de grano y, en consecuencia, su composición (Estrada-Campuzano et al., 2012). De acuerdo con Guillon et al. (2011), en los cereales, las paredes de las células del endospermo consisten princi-

iThenticate Página 63 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 64 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

palmente en AX y otras fibras, tales como los β-glucanos o la celulosa y se forman antes de que planta comience a translocar compuestos de reserva de los tallos hacia el endospermo. Estas paredes forman el "recipiente" que contendrá todos los compuestos de reserva del grano hasta su maduración. Durante las diversas etapas de desarrollo post-antesis, los AX se van depositando en las paredes celulares del endospermo y se mantienen ahí hasta la madurez fisiológica del grano (Philippe et al., 2006).

Gráfica 3.2. *Interacción genotipo por dosis de N para la concentración de polifenoles totales y actividad antioxidante del grano de triticale (DMS: Diferencia mínima significativa)*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

En relación con el efecto de la dosis de N sobre los AX, la gráfica 3.1c y los resultados mostrados en la tabla 3.4 ponen de manifiesto que cada genotipo responde de manera diferente a la fertilización nitrogenada. En este sentido, el efecto medio, mostrado en líneas punteadas, indica que sólo las dosis de 180 y 240 kg ha^{-1} provocan un aumento significativo de estos compuestos. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Noworolnik et al. (2014), quienes reportaron que las variaciones en el contenido de fibra so-

iThenticate Página 64 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 65 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

luble en la cebada, incluidos los AX, no dependían de la fertilización nitrogenada sino de la interacción entre este factor y el genotipo.

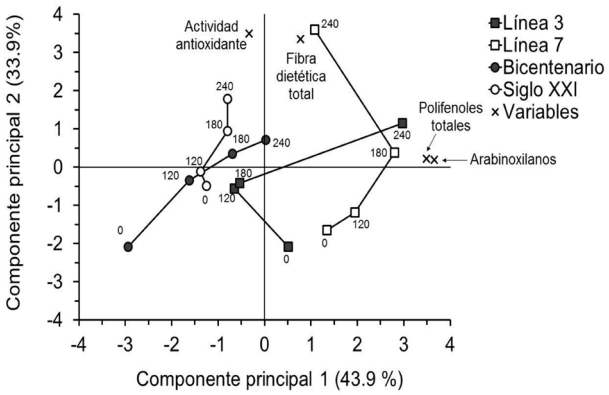
La gráfica 3.2a muestra el efecto de la dosis de N sobre la concentración de polifenoles totales en el grano de triticale y pone además de manifiesto la interacción genotipo-dosis. El efecto medio indica que hubo un aumento significativo de estos compuestos únicamente a la dosis de N más elevada y cada genotipo responde de manera diferente a este factor; por ejemplo, en la variedad Bicentenario se incrementan los polifenoles prácticamente de manera lineal con la dosis de N; la variedad Siglo XXI y la línea 7 produjeron una máxima concentración con la dosis de 120 kg ha^{-1}, mientras que la línea 3 expresó este máximo a los 240 kg ha^{-1}. Stumpf et al. (2015) reportaron que los compuestos polifenólicos libres, es decir no asociados con polisacáridos que forman parte de la fibra dietética, incrementaban con la fertilización nitrogenada, en cambio aquellos conjugados o ligados a esta fibra disminuían o no respondían a los cambios en este factor. De acuerdo con los resultados mostrados en la gráfica 3.2b, la concentración de polifenoles concuerda con la actividad antioxidante del grano solamente a nivel del efecto medio. Como en el caso de la gráfica 3.2a, se observaron efectos significativos a la dosis más elevada de N, pero la respuesta individual de cada genotipo es claramente diferente. En este caso, prácticamente todos ellos van incrementando su capacidad antioxidante en la medida que aumenta la dosis de N. La única excepción es la línea 7, donde se observó un incremento drástico a la dosis de 240 kg de N ha. La capacidad antioxidante del triticale, ha sido expresada, en este estudio, como la actividad contra los radicales libres que tendría una cantidad equivalente en mg de ácido gálico por 100 g de harina integral. Los valores observados no establecen distinción entre los tipos de moléculas antioxidantes ni cómo se encontraban asociadas con otros compuestos del grano tales como la fibra dietética. McGoverin et al. (2011) reportaron que, en el triticale, los compuestos polifenólicos están comúnmente ligados con la fibra dietética y particularmente con los AX, por lo que su actividad antioxidante depende también de la cantidad que contenga el grano de estos polisacáridos.

Cuando se sintetiza el conjunto de variables (fibra dietética, polifenoles y actividad antioxidante) en un espacio bidimensional, a través del análisis de componentes principales, entonces se puede observar el efecto general

iThenticate Página 65 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 66 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Gráfica 3.3. *Análisis de componentes principales de la actividad antioxidante, los polifenoles totales, la fibra dietética total y los arabinoxilanos del grano de triticale y su relación con la dosis de N(los números asociados a cada punto indican la dosis de N en kg ha^{-1})*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

de la dosis de N aplicada y el desempeño de cada genotipo. La gráfica 3.3 muestra el análisis de componentes principales de las variables estudiadas y su relación con la dosis de N. El componente principal 1 agrupa 43.9% de la varianza, mientras que el 2, 33.9% residual. Como se puede observar en esta gráfica, existe una relación entre los AX y los polifenoles totales del grano, puesto que ambas variables se encuentran altamente correlacionadas con el componente principal 1. Además, la actividad antioxidante se asocia con el contenido de fibra dietética total, dado que estas variables se correlacionan, en gran medida, con el componente principal 2. En términos generales, este análisis sugiere, que en la medida en que se incrementa el contenido de AX, aumentan también los polifenoles totales y que la actividad antioxidante, al estar asociada con la fibra dietética, refleja la concentración de polifenoles y de otros compuestos antioxidantes, tales como los fitatos (McGoverin et al., 2011) que se encuentran asociados con polisacáridos diferentes de los AX (β-glucanos, ligninas, celulosas, etc.). Por otro lado, en este análisis integral se distingue la manera en que cada genotipo modificó el contenido de estos compuestos en función de la dosis de N aplicada. Todo punto que se encuentre en el cuadrante superior derecho de la gráfica 3.3 indica que el genotipo, con su respectiva dosis de N, presentó los valores más elevados tanto de fibra dietética y AX como de polifenoles

iThenticate Página 66 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 67 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

totales y actividad antioxidante. Así, por ejemplo, la variedad Bicentenario incrementó, de manera prácticamente lineal, el contenido de todos estos compuestos y de la actividad antioxidante a medida en que se aumentaba la dosis de N. La respuesta de la línea 3.3 es evidente sólo con la dosis de 240 kg de N ha^{-1}, en donde se observó el contenido más elevado de polifenoles totales y de AX, mientras que la línea 7 tiene el mismo efecto, pero con los niveles más altos de fibra dietética y actividad antioxidante. Finalmente, este análisis sugiere que existe una relación entre la actividad antioxidante, los polifenoles y los polisacáridos que forman la fibra dietética en el triticale y que la dosis de N, al provocar el incremento de la fibra dietética, por ejemplo, promueve también el aumento de los compuestos con función antioxidante. Esta relación ha sido explicada por diversos autores por el grado reacción fisicoquímica entre la fibra dietética y los compuestos con capacidad antioxidante (Jonnala et al., 2010; Saura-Calixto et al., 2009) y por las funciones que tienen estos compuestos en la planta: esencialmente la neutralización de los radicales libres, producidos a consecuencia de los rayos ultravioleta, para proteger el DNA (Stumpf et al., 2015).

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, el rendimiento de grano, así como la concentración de fibra dietética aumentan de manera lineal con la dosis de N, aunque cada genotipo responde de manera diferente a este factor. El contenido de AX se incrementa también, pero solamente a dosis de N iguales o superiores a 180 kg ha^{-1} y con respuestas diferentes según el genotipo. La concentración de polifenoles totales y la actividad antioxidante del grano siguen un comportamiento cercano al de los AX: se verificaron incrementos significativos de estas variables sólo a las dosis de N más elevadas. Se observó una asociación entre los AX y los polifenoles totales, así como entre la concentración de fibra dietética y la actividad antioxidante. En este sentido, el efecto de la dosis de N sobre los compuestos que le otorgan capacidad antioxidante al grano podría explicarse por el incremento en su contenido de polisacáridos y fibra dietética en general. Una fertilización incrementada en N coadyuvaría a la produc-

iThenticate Página 67 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 68 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ción de un cultivo de triticale que, además de producir un rendimiento económicamente rentable, poseyera mejores propiedades como alimento funcional prebiótico, por su contenido de fibra dietética, y antioxidante, por su nivel de compuestos polifenólicos.

Referencias

Agil, R., y Hosseinian, F. (2012). Dual Functionality of Triticale as a Novel Dietary Source of Prebiotics with Antioxidant Activity in Fermented Dairy Products. *Plant Foods for Human Nutrition, 67,* 88-93.

Cornell Jhon, A. (1973). Experiments with mixtures: A Review. *Technometrics, 15,* 437-455.

Cornell Jhon, A. (1981). *Experiments with mixtures.* John Wiley and Sons.

Estrada-Campuzano, G., Miralles, D. J., y Slafer, G. A. (2008). Genotypic variability and response to water stress of pre- and post-anthesis phases in triticale. *European Journal of Agronomy, 28,* 171-177.

Estrada-Campuzano, G., Slafer, G. A., y Miralles, D. J. (2012). Differences in yield, biomass and their components between triticale and wheat grown under contrasting water and nitrogen environments. *Field Crops Research, 128,* 167-179.

Guillon, F., Bouchet, B., Jamme, F., Robert, P., Quéméner, B., Barron, C., Larré, C., Dumas, P., y Saulnier, L. (2011). Brachypodium distachyon grain: characterization of endosperm cell walls. *Journal of Experimental Botany, 62,* 1001-1015.

Hosseinian, F. S., y Mazza, G. (2009). Triticale bran and straw: potential new sources of phenolic acids, proanthocyanidins, and lignans. *Journal of Functional Foods, 1*, 57-64.

Jonnala, R. S., Irmak, S., Macritchie, F., y Bean, S. R. (2010). Phenolics in the bran of waxy wheat and triticale lines. *Journal of Cereal Science 52,* 509-515.

Karamac, M., Amarowicz, R., Weidner, S., Abe, S., y Shahidi, F. (2004). Antioxidant activity of triticale caryopses and embryos extracts. *Food Science and Biotechnology, 13,* 421-424.

Kiszonas, A. M., Courtin, C. M., y Morris, C. F. (2012). A Critical assessment of the quantification of wheat grain arabinoxylans using a phloroglucinol colorimetric assay. *Cereal Chemistry, 89,*143-150.

Mcgoverin, C. M., Snyders, F., Muller, N., Botes, W., Fox, G., y Manley M. (2011). A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 91,* 1155-1165.

Montgomery, D. C. (2009). *Design and analysis of experiments* (7ª ed., pp. 472-484). John Wiley & Sons Inc.

Noworolnik, K., Wirkijowska, A., y Mikos-Szymanska, M. (2014). Effect of genotype and

iThenticate Página 68 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 69 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

nitrogen fertilization on grain yield and quality of spring barley intended for health food use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, 20,* 576-580.

Philippe, S., Saulnier, L., y Guillon, F. (2006). Arabinoxylan and (1-3), (1-4)-β-glucan deposition in cell walls during wheat endosperm development. *Planta, 224,* 449-461.

Pulido, R., Bravo, L., y Saura-Calixto, F. (2000). Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48,* 3396-3402.

Saura-Calixto, F. (2011). Dietary fiber as a carrier of dietary antioxidants: An essential physiological function. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59,* 43-49.

Saura-Calixto, F., Pérez-Jiménez, J., y Goñi, I. (2009). Contribution of cereals to dietary fibre and antioxidant intakes: Toward more reliable methodology. *Journal of Cereal Science, 50,* 291-294.

Spizzirri, U. G., Iemma, F., Puoci, F., Cirillo, G., Curcio, M., Parisi, O. I., y Picci, N. (2009). Synthesis of antioxidant polymers by grafting of gallic acid and catechin on gelatin. *Biomacromolecules, 10,* 1923-1930.

Stumpf, B., Yan, F., y Honermeier, B. (2015). Nitrogen fertilization and maturity influence the phenolic concentration of wheat grain (Triticum aestivum). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 178,* 118-125.

Tungland, B.C., y Meyer, D. (2002). Nondigestible Oligo- and Polysaccharides (Dietary Fiber): Their Physiology and Role in Human Health and Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 3,* 90-109.

iThenticate Página 69 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

4. Efecto de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre el contenido de compuestos prebióticos del Triticale (*X Triticosecale* sp. Wittmack)

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.04

Gaspar Estrada Campuzano*§
Celia Cruz-Vázquez**
Adriana Villanueva Carvajal***
José Ramón Pascual Franco Martínez ****
Delfina de Jesús Pérez López*****
Carlos Gustavo Martínez Rueda******

Resumen

El triticale contiene cantidades relativamente elevadas de fibra dietética, particularmente de arabinoxilanos (AX) y de β-glucanos. Esto limita su empleo en la alimentación animal y en algunos procesos agroindustriales, pero le confiere un potencial significativo en la producción de alimentos prebióticos. El propósito de este trabajo fue evaluar el efecto del genotipo y de la dosis de nitrógeno (N) aplicada durante el cultivo, sobre la concentración de fibra dietética prebiótica en el grano. Para tal efecto, se sembraron dos variedades comerciales, Bicentenario y Siglo XXI, y dos líneas avan-

La autora Celia Cruz Vázquez agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conahcyt Beca: 615778) por la beca que le permitió realizar sus estudios de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

§ Autor para correspondencia: gestradac@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1189-0470
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México.
*** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2429-4387
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203
***** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003–1621-5690
****** Doctor en Ciencias. Profesor de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9644-5757

iThenticate Página 71 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

zadas de triticale y los tratamientos de fertilización consistieron en 00, 120, 180 y 240 kg N ha^{-1}. Al grano cosechado se le cuantificó la fibra soluble, insoluble, los AX y los β-glucanos, además del rendimiento y algunos de sus componentes. Los resultados mostraron que el aumento de la dosis de N produjo un incremento proporcional del rendimiento de grano a razón de 933 kg ha^{-1} por cada 60 unidades de N aplicadas (R^2>0.99). El número de granos también se incrementó de manera similar, pero a razón de 1762 granos m^{-2} (R^2>0.98) y el peso individual aumentó solamente a partir de 180 kg ha^{-1}. El rendimiento se explica mejor por el número de granos obtenido por superficie que por el peso individual de los mismos. En línea con el incremento en el rendimiento, el tiempo térmico a antesis se alargó con la dosis de N, sin importar el genotipo, obteniéndose los valores más altos a 240 kg ha^{-1}. La composición prebiótica del triticale también se modifica por la dosis de N. Se observaron incrementos significativos a partir de 120 kg ha^{-1}. La mayor parte de la variabilidad en el contenido de las fibras insoluble y total se explica principalmente por las diferentes dosis de N; pero las variaciones en la fibra soluble, β-glucanos y AX se debieron a los efectos conjuntos de la dosis de N, del genotipo y de su interacción. Se sugiere que un alargamiento de las etapas del cultivo, por efecto de la dosis de N, explicaría el incremento de la concentración de compuestos prebióticos en el grano de este cereal.

Palabras clave: *dosis de Nitrógeno, β-glucanos, arabinoxilanos, fibra dietética.*

Introducción

El triticale (*x Triticosecale* sp. Wittmack ex A. Camus 1927) (Stace, 1987) por su valor nutritivo, y tolerancia a condiciones ambientales desfavorables puede ser una alternativa para la producción agrícola en regiones de baja precipitación pluvial y suelos pobres. Planta desarrollada con el fin de producir grano para la alimentación humana, pero la rusticidad, el rendimiento y cualidades de su biomasa la han destinado principalmente para la producción de forraje (McGoverin et al., 2011; Darvey et al., 2000).

iThenticate Página 71 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 72 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

De su harina se producen masas débiles a causa de su bajo contenido y fuerza de gluten y a su alta actividad amilolítica (Mergoum et al., 2004; Glatthar et al., 2002) y su rendimiento harinero es más bajo que el del trigo (Dennett y Trethowan, 2013). Se ha propuesto como sustituto parcial del maíz (Vaca-García et al., 2011) o trigo (Serna-Saldívar et al., 2004) para la elaboración de tortillas; pero, su alta actividad α-amilásica y su elevado contenido de polifenoles y cenizas hacen que este tipo de productos sean relativamente dulces y con una coloración no convencional cuando la concentración de harina de triticale rebasa 25%.

Se puede producir cerveza de una calidad comparable a la obtenida usando trigo, pero a menor costo porque es posible evitar el uso de malta u otros ingredientes destinados a la sacarificación de los almidones (Glatthar et al., 2005). En el endospermo, el contenido de amilosa es relativamente elevado (McGoverin et al., 2011), así como su concentración de fibra dietética (FD) soluble e insoluble (Rakha et al., 2011). La primera está conformada por oligosacáridos del tipo de los arbinoxilanos (hasta 7.5% m. s.) y β-glucanos (hasta 1.0% m. s.) y la segunda básicamente por celulosas y hemicelulosas (Agil y Hosseinian, 2012). Este hecho limita su uso en la alimentación animal ya que el alto contenido de FD soluble aumenta la viscosidad y la retención de agua en el tracto gastrointestinal de los animales monogástricos y disminuye la absorción de nutrientes. Otros componentes importantes son los polifenoles y los compuestos derivados del ácido fítico, los cuales en general disminuyen la disponibilidad de las proteínas de los alimentos balanceados (McGoverin et al., 2011), además se pueden encontrar ligados a la FD (Agil y Hosseinian, 2012).

La elevada concentración de FD, compuestos polifenólicos y derivados del ácido fítico y su alta actividad amilolítica, le confieren a este cereal un potencial significativo como alimento prebiótico y funcional. Es decir, como un producto natural que además de proveer de nutrimentos, ayudaría a contrarrestar los efectos del estrés, del envejecimiento y en general del deterioro del cuerpo humano, o en algunos casos reducir sustancialmente el riesgo de contraer enfermedades como el cáncer. Esto se debe a que su consumo cotidiano podría estimular el desarrollo de bacterias benéficas como *lactobacilli* y *bifidobacteria* en el tracto gastrointestinal y en

iThenticate Página 72 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 73 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

consecuencia, protegerlo de estas enfermedades (Vardakou et al., 2008; Agil y Hosseinian, 2012).

El consumo de FD, a través de una alimentación rica en vegetales es relativamente bajo. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) aun cuando no se ha definido una ingesta dietética de referencia de estos nutrimentos, una manera conveniente de incorporarlos en una dieta regular es incluir al menos cinco porciones (80 g cada una) de frutas y verduras por día. Esta meta sólo es alcanzada por una minoría de la población mundial, problema particularmente importante en núcleos sociales de bajos ingresos en países subdesarrollados (Villanueva Carvajal et al., 2013). Una alternativa viable para satisfacer las necesidades de la población es la incorporación de estos nutrimentos en la dieta a través de productos alimenticios enriquecidos con extractos que hayan sido obtenidos mediante cultivos agrícolas extensivos. Estos cultivos, como es el caso del triticale, pueden sintetizar FD en cantidades superiores a las de las frutas y verduras convencionales cultivadas en ambientes similares y en un período de tiempo más corto.

La composición del grano de triticale, el rendimiento y sus componentes están influenciados por el ambiente, el genoma y la nutrición de la planta (Mendoza-Elos et al., 2011). Un estrés hídrico moderado durante el desarrollo del grano provoca una reducción en el contenido y variaciones en la morfología del gránulo de almidón (Bechtel et al., 1990); además, incrementa la acumulación de amilosa, disminuye en consecuencia la concentración de amilopectina (He et al., 2012).

El incremento de nitrógeno en el suelo, incrementa la cantidad de proteína en el grano y mejora su morfología y rendimiento (Davis-Knight y Weightman, 2008). Es posible, en consecuencia, que la concentración y características de los compuestos prebióticos, como la FD en el grano también estén determinadas genotípicamente y por los factores ligados al cultivo. Aspecto poco estudiado, el uso del grano de triticale para la producción de FD tampoco ha sido estudiado ampliamente y representa una alternativa original para generar, alrededor de este cereal, un nicho de oportunidades agroindustriales que coadyuven a la vez para lograr la autosuficiencia alimentaria con respecto a los granos básicos, para ofrecer una alternativa de cultivo en las zonas agrícolas de temporal y baja precipitación pluvial y para

iThenticate Página 73 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 74 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

la producción de materias primas destinadas a la elaboración de alimentos funcionales. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue verificar la existencia de variabilidad genética para la concentración de los compuestos prebióticos (esencialmente FD) del triticale y, al mismo tiempo, explicar estas variaciones en función de la fertilización nitrogenada y de la interacción genotipo-dosis de nitrógeno.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

El experimento se estableció, bajo temporal, durante el ciclo verano-otoño de 2014, en la Facultad de Ciencias Agrícolas (Universidad Autónoma del Estado de México), localizada al norte de la ciudad de Toluca (19°15'33" de latitud norte, 99°39'38" de longitud oeste, y una altura de 2 640 msnm) en México. El clima de esta localidad se clasifica como semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con un rango anual de precipitación de 800 a 1 300 mm y de temperatura de 8 a 14°C. Las parcelas se establecieron en un suelo de tipo vertisol pélico con textura franco-arcillosa. Análisis preliminares mostraron que el pH del suelo fue igual a 6.6, con 6.7% de materia orgánica, 35 kg ha^{-1} de N, 123 ppm de P y 564 ppm de K. Según la determinación de la fertilidad del suelo de la Nom-021-Semarnat-2000 (2002), este se clasifica como neutro, con niveles medios de materia orgánica y nitrógeno inorgánico, y niveles altos de fósforo y potasio.

Actividades de campo y tratamientos

Previo a la siembra, la semilla se colocó en cintas de papel biodegradable a una distancia equidistante de 1.5 cm con el fin de garantizar el stand de plantas requerido. La siembra se llevó a cabo manualmente colocando las cintas en el fondo del surco y a una densidad de 336 semillas m^{-2}. La parcela experimental consistió de seis hileras de 4 m de largo separadas a 0.20 m (3.6 m^2). Se consideró como parcela útil para mediciones un área de 0.4 m^2

iThenticate Página 74 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 75 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

formada por dos hileras centrales de 1 m de longitud. Las malezas se controlaron manualmente durante todo el ciclo del cultivo. No se presentaron plagas o enfermedades en el cultivo durante el periodo de crecimiento. Se utilizaron dos variedades comerciales, Bicentenario y Siglo XXI, y dos líneas avanzadas de triticales hexaploides (línea 3 y 7). Los tratamientos de nitrógeno (N) consistieron de 00, 120, 180 y 240 kg de N por hectárea. Se utilizó urea (46% N), superfosfato de calcio triple (46% P_2O_5) y Cloruro de Potasio (60% K_2O). Las dosis de N señaladas se aplicaron en siembra (S), amacollamiento (AM) y hoja bandera (HB) según la dosis, de tal forma que la de 120 fue aplicada en S y AM, 180 y 240 en S, AM y HB. En cada dosis de N, los cuatro cultivares fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Cosecha y análisis de grano

La cosecha se realizó de forma manual a los 164 días después de la emergencia. Se cosecharon las plantas en 1 m lineal de los dos surcos centrales en cada unidad experimental. Las espigas presentes fueron secadas en una estufa de aire forzado a 60°C por 72 horas. Con el grano obtenido en la muestra se determinó el rendimiento de grano (REND, g m^{-2}), número de granos por m^2 (NG) y peso individual de grano (PIG, mg $grano^{-1}$).

A cada muestra de grano se le determinó su composición prebiótica, es decir, el contenido de β-glucanos, fibra dietética total, soluble e insoluble mediante el kit enzimático K-TDFR adquirido en Megazyme (Megazyme International Ireland Limited) (Hollmann et al., 2013) y los arabinoxilanos a través del método colorimétrico de Kiszonas et al. (2012). Con los datos obtenidos se practicó un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo al modelo lineal utilizado y se realizó la comparación de las medias de Tukey, con la ayuda del software Statistical Analysis System (V.6.12). Para evaluar la relación entre estas variables se utilizó un análisis de componentes principales.

iThenticate Página 75 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 76 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Resultados y discusión

Rendimiento de grano y algunos de sus componentes

En la tabla 4.1 se reportan los valores de *F* obtenidos a partir del análisis de varianza para el rendimiento (REND), el número de granos por metro cuadrado (NG), el peso individual de grano (PIG) y el tiempo térmico a antesis (TTA, en °Cd) del triticale en función de la fertilización nitrogenada y del genotipo. El efecto de la dosis de N, del genotipo y de la interacción entre estos dos factores resultó, en general, altamente significativo para las tres variables relacionadas con el rendimiento. Asimismo, el TTA solamente se vio afectado por la dosis de N ($p<0.01$). La variabilidad observada en el REND y en el NG se explica principalmente por el efecto de la dosis de N (64.2 y 60.4%, del total de la suma de cuadrados, respectivamente), en comparación con el efecto del genotipo que sólo explica un porcentaje marginal de 9.6 y 7.9%, respectivamente. En el caso del PIG, esta variabilidad se explica esencialmente por el efecto de la interacción genotipo-dosis de N (46.7%) y por el efecto individual del genotipo (29.7%), ya que el efecto de la dosis de N solamente contribuyó con 8.9%. En lo que corresponde a la variabilidad en el TTA ésta sólo se explicó por las variaciones en la dosis de N aplicada, ya que este factor integró por sí solo 80% de la suma de cuadrados en el ANOVA.

Tabla 4.1. *Valores de F del análisis de varianza para algunos componentes del rendimiento del triticale*

Fuente de variación	*GL*	*Rend*	*SC (%)*	*NG*	*SC (%)*	*PIG*	*SC (%)*	*TTA*	*SC (%)*
Bloque (Nitrógeno)	8	0.36^{NS}	1.2	0.30^{NS}	1.6	0.44^{NS}	1.9	1.07^{NS}	3.72
A: Genotipo	3	7.79**	9.6	3.98*	7.9	18.56**	29.7	0.80^{NS}	1.04
B: Nitrógeno	3	51.94**	64.2	30.42**	60.4	5.57**	8.9	61.37**	80.00
A*B	9	4.07**	15.1	2.38*	14.2	9.74**	46.7	1.23^{NS}	4.82
Error (CM)		5869.76		3610250		3.124		128.516	
R2 (%)		90.11		84.11		87.20		89.57	

Nota. **: $p<0.01$; *: $p<0.05$; NS: No significativo; Rend: Rendimiento; NG: Número de granos; PIG: Peso individual de granos; TTA: Tiempo térmico a antesis; SC: Suma de Cuadrados; CM: cuadrado medio.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

iThenticate Página 76 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 77 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

La comparación de medias para la dosis de N y para los genotipos en cada una de las variables que definen algunos componentes del rendimiento se muestra en la tabla 4.2. El aumento de la dosis de N produjo un incremento proporcional del REND a razón de 93.3 g m^{-2} por cada 60 unidades de N aplicadas (R^2>0.99). El NG también se incrementó de manera similar, pero a razón de 1761.7 granos m^{-2} (R^2>0.98) y en cuanto al PIG, éste aumentó 3.2% solamente a partir de la dosis de 180 kg ha^{-1} (p<0.05). Por otra parte, aun cuando la línea 7 produjo un mayor número de granos, en los genotipos Bicentenario y línea 3 se observaron los mayores rendimientos. Esto se explica, aunque no con una alta correlación, por un mayor peso individual de los granos: la línea 7 produjo el menor PIG y uno de los rendimientos más bajos, mientras que Bicentenario y Siglo XXI mostraron los pesos individuales más elevados. De manera general, los resultados mostrados en la tabla 4.2 sugieren que, para los genotipos evaluados, el rendimiento de grano se explica mejor por el número de granos obtenido por superficie que por el peso individual de los mismos.

Tabla 4.2. *Valores medios para las variables REND, NG y PIG para 4 genotipos de triticale cultivados en 4 dosis de N bajo condiciones de temporal en Toluca, México*

Fuente de variación	*Dosis de N*	*REND (g m^{-2})*	*NG m^{-2}*	*PIG (mg)*	*TTA (°D)*
Dosis de Nitrógeno (kg ha^{-1})	0	739.27^{A}	15173.9^{A}	48.83^{AB}	941.2A
	120	919.54^{B}	19321.5^{B}	47.65^{A}	958.8B
	180	1018.44^{C}	20382.3^{BC}	50.44^{B}	961.7B
	240	1111.94^{D}	22342.9^{C}	49.72^{B}	1001.8C
Genotipo	Bicentenario	1025.19^{B}	19835.7A^{B}	51.35^{C}	966.0A
	Línea 3	959.48A^{B}	19556.2A^{B}	49.16^{B}	961.8A
	Línea 7	926.35^{A}	20127.7^{B}	46.15^{A}	967.3A
	Siglo XXI	878.17^{A}	17700.9^{A}	49.97^{BC}	968.4A
DSH		86.31	2140.4	1.99	

Nota. Rend: Rendimiento; NG: Número de granos; PIG: Peso individual de granos; TTA: Tiempo térmico a antesis.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

Como se puede observar en la tabla 4.2, en línea con el incremento en el rendimiento de grano, el TTA se alargó con la dosis de N independientemente del genotipo, obteniéndose los valores más altos a 240 kg ha^{-1}. Diver-

iThenticate Página 77 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 78 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

sos investigadores han reportado que la fertilización nitrogenada incrementa de manera significativa la duración de las etapas fenológicas del cultivo de los cereales (Gibson et al., 2007; Lestingi et al., 2010). Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que la etapa post-antesis, donde ocurre el desarrollo del grano, también podría haberse alargado promoviendo una mayor acumulación de compuestos de reserva y de fibra dietética.

Composición prebiótica del grano de triticale

En la tabla 4.3, se reportan los valores de *F* obtenidos a partir del análisis de varianza para las variables que definen la composición prebiótica del triticale. El efecto de bloque no resultó significativo en ningún caso; sin embargo, la dosis de N afecta, de manera altamente significativa, la concentración de cada uno de los compuestos evaluados. En cuanto al efecto del genotipo, se observó algo similar con excepción de la concentración de fibra insoluble y en lo que concierne a la interacción, genotipo-nitrógeno, ésta fue significativa sólo en la fibra dietética soluble, los β-glucanos y los arabinoxilanos.

Tabla 4.3. *Valores de F del análisis de varianza para la composición prebiótica del triticale (entre paréntesis, porcentaje de la suma de cuadrados total)*

Fuente de variación	***GL***	***Fibra dietética***						***AX***	***SC (%)***	***β-Gluc***	***SC (%)***
		Insoluble	SC (%)	Soluble	SC (%)	Total	SC (%)				
Bloque (Nitrógeno)	8	0.12^{NS}	0.8	1.21^{NS}	2.5	0.08^{NS}	0.3	0.38^{NS}	3.2	0.53^{NS}	4.2
A: Genotipo	3	0.58^{NS}	1.4	42.09**	33.1	4.76**	7.2	10.11**	32.3	6.28**	18.5
B: Nitrógeno	3	28.21**	66.6	47.41**	37.3	47.55**	71.7	4.85**	15.5	6.63**	19.5
A*B	9	1.74^{NS}	12.3	8.84**	20.8	1.92^{NS}	8.7	2.43*	23.3	3.88**	34.3
Error (CM)		0.405		0.021		0.363		0.330		0.015	
R2 (%)		81.10		93.71		87.93		74.42		76.46	

Nota: **: $p<0.01$; *: $p<0.05$; NS: No significativo; AX: Arabinoxilanos; β-Gluc: β-Glucanos; SC: Suma de Cuadrados; CM: cuadrado medio.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

La mayor parte de variabilidad en la concentración de las fibras insoluble y total (66.6 y 71.7% de la suma de cuadrados total, respectivamente) se

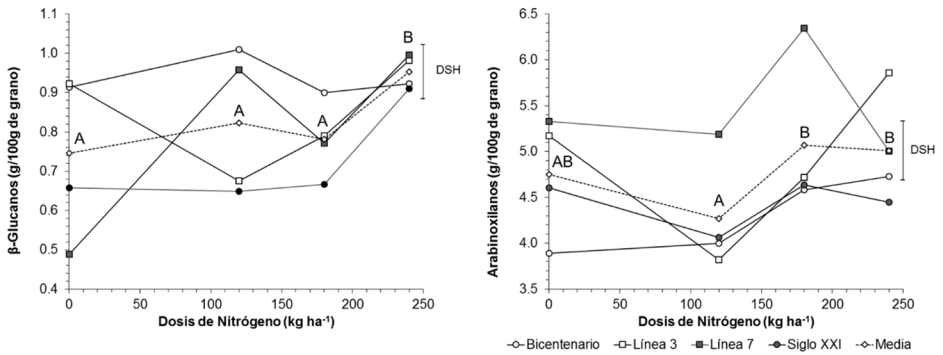
iThenticate Página 78 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 79 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

explica principalmente por las diferentes dosis de N aplicadas; pero las variaciones en el contenido de fibra soluble, β-glucanos y arabinoxilanos se debió a los efectos conjuntos de la dosis de N, del genotipo y de la interacción entre estos dos factores, como se puede ver en la distribución respectiva del porcentaje de la suma de cuadrados mostrada en la tabla 4.3.

Las gráficas 4.1 y 4.2 muestran los valores medios de la composición prebiótica del triticale e ilustran la interacción genotipo-dosis de N. Estas gráficas y los resultados del análisis de varianza mostrado en la tabla 4.3, ponen de manifiesto que cada genotipo responde de manera diferente a la fertilización nitrogenada. Por ejemplo, en el caso de la concentración de β-glucanos, mientras que los granos de la variedad Bicentenario incrementaron ligeramente su contenido de este compuesto cuando se les aplicó una dosis de 120 kg ha^{-1}, la línea 3 decreció y la variedad Siglo XXI no manifestó respuesta alguna. Además, la concentración de este prebiótico en la línea 7 aumentó significativamente. En este sentido, el efecto medio, mostrado en líneas punteadas, indica que sólo la dosis de 240 kg ha^{-1} provoca un aumento significativo en este compuesto. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Güler (2003), quien encontró que altos niveles de N aumentaban significativamente el contenido de β-glucanos en la cebada y por Noworolnik et al. (2014), quienes, además, reportaron que las variaciones en el contenido de fibra insoluble en la cebada no dependían de la fertilización nitrogenada.

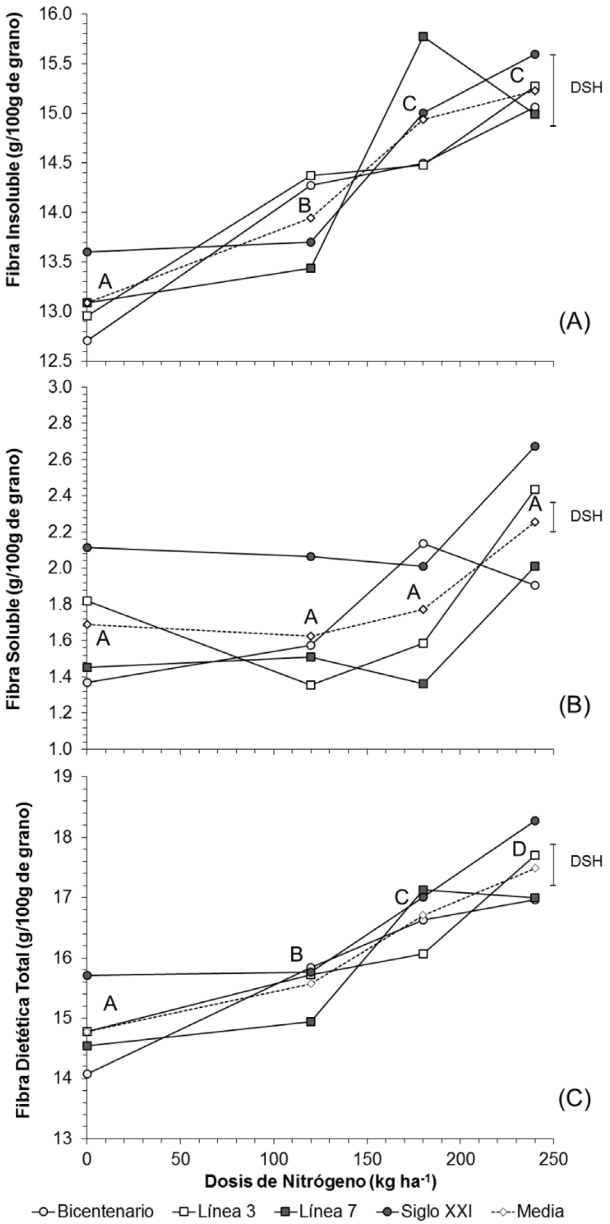
Gráfica 4.1. *Interacción genotipo por dosis de N para la concentración de β-glucanos y arabinoxilanos del grano de triticale (DHS: Diferencia significativa honesta)*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

iThenticate Página 79 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Gráfica 4.2. *Interacción genotipo por dosis de N para la concentración de fibra dietética insoluble, soluble y total del grano de triticale (DHS: Diferencia significativa honesta)*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

iThenticate Página 81 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Así como en el caso del rendimiento, las fibras dietéticas total, soluble e insoluble promedio, aumentan con el incremento en la dosis de N. Este comportamiento medio es diferente en el caso de los β-glucanos y los arabinoxilanos; en este caso, la respuesta es evidente sólo a concentraciones elevadas del fertilizante. De acuerdo con estos resultados, aunque la concentración de β-glucanos es afectada por factores ambientales (en este caso, la dosis de N), está principalmente asociada con el genotipo.

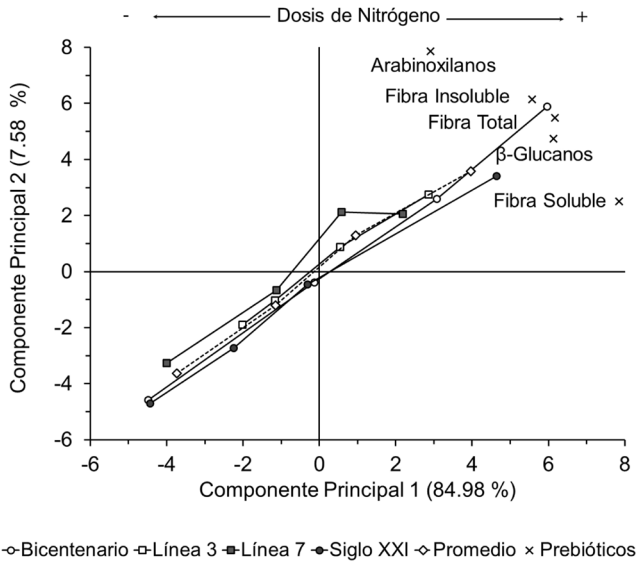
En el grano, las paredes celulares cumplen con muchas funciones fisiológicas. Por ejemplo, proporcionan la estructura de sostén para los tejidos y la cohesividad intercelular que mantiene la integridad de este (Guillon et al., 2011). Aunque están presentes en pequeñas cantidades en el endospermo, tienen efectos importantes cuando el grano se convierte en harina para diferentes procesos agroindustriales (molienda, horneado y uso de piensos) y, en tanto que fibra dietética, mejoran la calidad nutricional de los alimentos derivados. De acuerdo con Philippe et al. (2006), en los cereales, las paredes de las células endospermáticas consisten principalmente en AX y β-glucanos, con sólo niveles bajos de celulosa y otros compuestos. Durante las diversas etapas de desarrollo post-antesis, tanto los β-glucanos como los arabinoxilanos se van depositando en las paredes celulares del endospermo y se mantienen ahí hasta la madurez fisiológica. Los β-glucanos comienzan a depositarse a partir de que se forman las primeras paredes celulares (alrededor de 45°Cd post-antesis) y continúan acumulándose hasta la maduración del grano. Por su parte, los AX comienzan a depositarse más tarde, cuando inicia la etapa de diferenciación celular y comienza a formarse la capa de aleurona (cerca de 245°Cd). Esto sugiere que un alargamiento de las etapas post-antesis pudiera dar oportunidad de promover una mayor acumulación tanto de β-glucanos como de arabinoxilanos en el endospermo. En este estudio se observó que la dosis de N provoca un incremento del período pre-antesis, lo que sugiere que la etapa post-antesis también se alargó, lo que explicaría el incremento significativo de estos compuestos en el grano de triticale.

Cuando se sintetiza el conjunto de variables que definen la composición prebiótica en un espacio bidimensional y, además, cada una de ellas se expresa en términos de producción de compuestos prebióticos por hectárea de cultivo, entonces se observa una tendencia clara a aumentar en función

iThenticate Página 81 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 82 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Gráfica 4.3. *Análisis de componentes principales de la composición prebiótica del grano de triticale y su relación con la dosis de N*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

de la dosis de N aplicada. La gráfica 4.3 muestra el análisis de componentes principales de las variables estudiadas y su relación con la dosis de N. El componente principal 1 agrupa 84.98% de la varianza, mientras que el 2, 7.58% residual. En general, se observa que los dos primeros puntos de cada uno de los genotipos que fueron cultivados, y que representan la dosis de 0 y de 120 kg de N ha^{-1}, se sitúan en el cuadrante inferior izquierdo. Esto significa que los niveles de la composición prebiótica están por debajo de la media general (o sea, los ejes que definen los componentes principales). Por otro lado, los dos últimos puntos, que constituyen las dosis de 180 y 240 kg de N ha^{-1} para cada genotipo, se sitúan en el cuadrante superior derecho. Al contrario que en el caso anterior, esta posición indica concentraciones de los compuestos prebióticos evaluados superiores a la media general. En esta gráfica también se pone en evidencia que las variedades Bicentenario y Siglo XXI respondieron mejor a las dosis de N que las dos líneas avanzadas. Los dos últimos puntos de la Línea 7, por ejemplo, son los más cercanos a la intersección de los dos componentes principales. La fertilización nitroge-

iThenticate Página 82 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 83 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

nada incrementa de manera significativa la cantidad de compuestos prebióticos producida por hectárea y aunque algunos genotipos, como Bicentenario, responden mejor a este factor, el efecto genotípico no es tan notorio porque, en general, el rendimiento aumenta con la dosis de N.

2 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, el rendimiento de grano aumenta de manera lineal con la dosis de N, aunque cada genotipo responde de manera diferente a este factor. Este parámetro del cultivo se explica mejor por el número de granos obtenido por superficie que por el peso individual de los mismos. En línea con el incremento en el rendimiento, el tiempo térmico a antesis también se alargó con la dosis de N, sin importar el genotipo. Esto sugiere que un alargamiento de las etapas del cultivo también explicaría el incremento de la concentración de compuestos prebióticos en el grano. En efecto, la composición prebiótica del triticale también se modifica por la dosis de N ya que se observaron aumentos significativos a partir de 120 kg ha^{-1}. La mayor parte de la variabilidad en el contenido de las fibras insoluble y total se explica principalmente por este factor; aunque las variaciones en la fibra soluble, β-glucanos y AX se debieron a los efectos conjuntos de la dosis de N, del genotipo y de su interacción.

Referencias

Agil, R., y Hosseinian, F. (2012). Dual Functionality of Triticale as a Novel Dietary Source of Prebiotics with Antioxidant Activity in Fermented Dairy Products. *Plant Foods for Human Nutrition, 67,* 88-93.

Bechtel, D. B., Zayas, I. Y., Kaleikau, L., y Pomeranz, Y. (1990). Size-distribution of wheat starch granules during endosperm development. *Cereal Chemistry, 67,* 59-63.

Darvey, N. L., Naeem, H., y Gustafson, J. P. (2000). Triticale: Production and utilization. En K. Kulp y J. Ponte (Eds.), *Handbook of Cereal Science and Technology* (2ª ed., pp. 257-271). Marcel Dekker.

Davis-Knight, H. R., y Weightman, R. M. (2008). *The potential of triticale as a low input cereal for bioethanol production.* Project Report No. 434. The Home-Grown Cereals Authority. ADAS UK Ltd, Centre for Sustainable Crop Management.

iThenticate Página 83 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 84 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Dennett, A. L., y Trethowan, R.M. (2013). Milling efficiency of triticale grain for commercial flour production. *Journal of Cereal Science, 57,* 527-530.

Gibson, L., Nance, C., y Karlen, D. (2007). Winter triticale response to nitrogen fertilization when grown after corn or soybean. *Agronomy Journal, 99,* 49-58.

Glatthar, J., Heinisch, J. J., y Senn, T. (2002). A study on the suitability of unmalted triticale as a brewing adjunct. *Journal of the American Society of Brewing Chemists, 60,* 181-187.

Glatthar, J., Heinisch, J. J., y Senn, T. (2005). Unmalted triticale cultivars as brewing adjuncts: effects of enzyme activities and composition on beer wort quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 85,* 647-654.

Guillon, F., Bouchet, B., Jamme, F., Robert, P., Quéméner, B., Barron, C., Larré, C., Dumas, P., y Saulnier, L. (2001). Brachypodium distachyon grain: characterization of endosperm cell walls. *Journal of Experimental Botany, 62,* 1001-1015.

Güler, M. (2003). Barley grain β-glucan content as affected by nitrogen and irrigation. *Field Crops Research, 84,* 335-340.

He, J.-F., Goyal, R., Laroche, A., Zhao, M.-l., y Lu, Z.-X. (2012). Water stress during grain development affects starch synthesis, composition and physicochemical properties in triticale. *Journal of Cereal Science, 56,* 552-560.

Hollmann, J., Themeier, H., Neese, U., y Lindhauer, M. G. (2013). Dietary fibre fractions in cereal foods measured by a new integrated AOAC method. *Food Chemistry, 140,* 586-589.

Kiszonas, A. M., Courtin, C. M., y Morris, C. F. (2012). A Critical assessment of the quantification of wheat grain arabinoxylans using a phloroglucinol colorimetric assay. *Cereal Chemistry, 89,*143-150.

Lestingi, A., Bovera, F., De Giorgio, D., Ventrella, D., y Tateo, A. (2010). Effects of tillage and nitrogen fertilisation on triticale grain yield, chemical composition and nutritive value. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 90,* 2440-2446.

Mcgoverin, C. M., Snyders, F., Muller, N., Botes, W., Fox, G., y Manley, M. (2011). A review of triticale uses and the effect of growth environment on grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 91,* 1155-1165.

Mendoza-Elos, M., Cortez-Baheza, E., Rivera-Reyes, J. G., Rangel-Lucio, J. A., Andrio-Enríquez, E., y Cervantes-Ortiz, F. (2011). Época y densidad de siembra en la producción y calidad de semilla de triticale (*X Triticosecale* Wittmack). *Agronomía Mesoamericana, 22,* 309-316.

Mergoum, M., Pfeiffer, W. H., Peña, R. J., Ammar, K., y Rajaram, S. (2004). Triticale crop improvement: the CIMMYT programme. En M. Mergoum y H. Gómez- Macpherson (Eds.), *Triticale Improvement and Production* (pp. 11-22). FAO Plant Production and Protection Paper 179.

NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002). *Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.* Diario Oficial (Segunda Sección).

iThenticate Página 84 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 85 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Noworolnik, K., Wirkijowska, A., y Mikos-Szymanska, M. (2014). Effect of genotype and nitrogen fertilization on grain yield and quality of spring barley intended for health food use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, 20,* 576-580.

Philippe, S., Saulnier, L., y Guillon, F. (2006). Arabinoxylan and (1-3),(1-4)-β-glucan deposition in cell walls during wheat endosperm development. *Planta, 224,* 449-461.

Rakha, A., Aman, P., y Andersson, R. (2011). Dietary fiber in triticale grain: Variation in content, composition, and molecular weight distribution of extractable components. *Journal of Cereal Science, 54,* 324-331.

Serna-Saldivar, S. O., Guajardo-Flores, S., y Viesca-Rios, R. (2004). Potential of triticale as a substitute for wheat in flour tortilla production. *Cereal Chemistry, 81,* 220-225.

Stace, C. A. (1987). Triticale: a case of nomenclatural mistreatment. *Taxon, 36,* 445-452.

Vaca-García, V. M., Martínez-Rueda, C. G., Mariezcurrena-Berasain, M. D., y Domínguez-López, A. (2011). Functional Properties of Tortillas with Triticale Flour as a Partial Substitute of Nixtamalized Corn Flour. *LWT - Food Science and Technology, 44,* 1383-1387.

Vardakou, M., Nueno Palop, C., Christakopoulos, P., Faulds, C. B., Gasson, M. A., y Narbad, A. (2008). Evaluation of the prebiotic properties of wheat arabinoxylan fractions and induction of hydrolase activity in gut microflora. *International Journal of Food Microbiology, 123,* 166-170.

Villanueva-Carvajal, A., Domínguez-López, A., Bernal-Martínez, L. R., y Díaz-Bandera, D. (2013). Hibiscus sabdariffa L. confectionery gels, in vitro digestion, antioxidant activity and phenolic compounds quantification: a nutraceutical application. *International Journal of Food Science and Technology, 48,* 2659-2667.

iThenticate Página 85 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

5. Efecto de la fertilización y densidades de siembra sobre el rendimiento de chía

Andrés Xingú López*
Andrés González Huerta**
Eulogio de la Cruz Torres***
Dora María Sangerman-Jarquín****
Gaspar Estrada Campuzano*****
Martín Rubí Arriaga******§

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.05

Resumen

La chía (*Salvia hispanica* L.) es un cultivo originario de México y Guatemala, actualmente es cultivada y consumida en varias partes del mundo; desafortunadamente se tienen pocos datos agronómicos que permitan un cultivo con manejo adecuado de la nutrición, densidad de población y genotipo; puntos clave en la producción. El objetivo consistió en evaluar el efecto de la fertilización y densidades de siembra sobre el rendimiento de ocho accesiones de chía, durante el año 2018 se desarrollaron una serie de experimentos en cuatro ambientes del valle de Toluca, bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones por sitio, usando un arreglo de parcelas subdivididas en una serie de experimentos en espacio. Las parcelas grandes correspondieron a tres densidades de po-

§ Autor para correspondencia: mrubia@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0456-727X0
** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6870-1765
**** Doctora en Ciencias. Editora en jefa de la *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-1182
***** Doctor en Ciencias Agropecuarias por la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1189-0470
****** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017

iThenticate Página 87 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

blación, las subparcelas a ocho accesiones y la parcela pequeña a tres dosis de fertilización. El mayor peso de planta, diámetro de tallo y biomasa seca, correspondieron a la densidad de 82 000 plantas por hectárea, pero los rendimientos de 1 805 kg corresponden a densidades de 252 000 plantas por hectárea y dosis de fertilización de 60-60-60.

Palabras clave: salvia hispanica *L, densidad de población, fertilización.*

Introducción

Salvia hispanica L. es una planta herbácea de la familia *Lamiaceae*, nativa del sudeste de México y norte de Guatemala (Busilacchi et al., 2013). La domesticación de chía se remonta a las antiguas culturas prehispánicas mexicanas en el año 2 600 a. C., junto con el amaranto, frijol y maíz conformaban la base de la alimentación de aztecas y mayas. A raíz de la conquista española, granos como el trigo y cebada se introdujeron, desplazando a la chía (Ayerza y Coates, 2006).

La chía se caracteriza por presentar semilla de diferentes colores: entre ellos el negro, gris jaspeado, blanco y marrón (Rovati et al., 2012), es un alimento nutritivo que contiene: lípidos, proteínas y fibra alimentaria; es fuente de potasio, calcio, hierro, magnesio y zinc (Michajluk et al., 2018); ácidos grasos (Gutiérrez et al., 2014), polifenoles, actividad antioxidante, ácidos orgánicos y aminoácidos (de Falco et al., 2018a y 2018b). La composición de la semilla de chía es afectada por temperatura, luz, tipo de suelo y disponibilidad de nutrientes (Ayerza y Coates, 2004).

Cuando la chía se cultiva en zonas con presencia de heladas tempranas, debe considerarse como un ciclo de 160 días, lo que marca la necesidad de programar la siembra para que estas no afecten la floración, fructificación y llenado de grano, lo cual resulta determinante para el rendimiento; además debe de establecerse en zonas con precipitaciones promedio de 800 a 900 mm por año y con temperaturas menores de los 33°C (Manzaneda, 2015), fertilizar (Miranda, 2012) y debe procurarse una densidad de siembra adecuada (Manzaneda, 2015; Noriega-González et al., 2018).

iThenticate Página 87 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 88 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

La demanda global de chía inició en la década de 1990, actualmente se cultiva en Argentina, Bolivia, Paraguay, Australia y México (Busilacchi et al., 2015), y se exporta a Japón, Estados Unidos y Europa (Alenbrant et al., 2014). El interés de cientos de agricultores, las perspectivas de producción y la aceptación de diversos públicos por sus características nutraceúticas, hacen que su mercado se amplíe día a día (Xingú et al., 2017).

El potencial productivo está estimado en 3 140 kg ha^{-1} (Ketthaisong et al., 2016), pero el rendimiento promedio en México es de 810 kg ha^{-1} (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2021), esto debido a que se desconoce el uso de: variedades mejoradas, dosis de fertilización, métodos de labranza, sistemas de riego, densidades, fechas de siembra, el control y manejo adecuado de plagas, enfermedades y malezas (Sosa et al., 2017a y 2017b).

El manejo adecuado de la nutrición es clave en la producción con rendimientos potenciales y con calidad de semilla adecuada (Noriega-González et al., 2018). Por tanto, el exceso o déficit de nutrientes, puede afectar negativamente el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Anjos et al., 2018). Los micronutrientes, requeridos en trazas (100 mg kg^{-1} de peso seco) por las plantas, desempeñan un papel significativo e importante en los procesos celulares y metabólicos, por lo cual se debe asegurar su suministro (Tripathi et al., 2015).

Con base en lo anteriormente expuesto se planteó la presente investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización y densidades de siembra sobre el rendimiento de ocho accesiones de chía.

Materiales y métodos

El estudio se realizó durante el ciclo primavera-verano 2018 en cuatro sitios experimentales del Valle de Toluca, México (ambientes): Rancho San Lorenzo (A1), localizado a 19°14’40.3” latitud norte y 99°35’36.5” longitud oeste, a una altitud de 2 606 msnm, presenta suelo tipo Feozem háplico; San Francisco Tlalcilalcalpan (A2), ubicado a 19°18'17.9" latitud norte y 99°46’29.7” longitud oeste, a una altura media de 2,750 msnm y suelo vertisol eútrico; El Cerrillo Piedras Blancas (A3) localizado a 19°24’49.0” lati-

iThenticate Página 88 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 89 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

tud norte, 99°41'29.8" longitud oeste, a una altitud de 2,640 msnm, posee un suelo vertisol, y San Juan Xochiaca (A4), ubicado a 19°00'50.2" latitud norte y 99°31'52.1" longitud oeste a una altitud de 2 330 msnm, suelo tipo andosol úmbrico. El clima del Valle de Toluca es templado subhúmedo, con temperatura media anual de 13.7°C y precipitación pluvial entre 1 000 y 1 200 mm, con heladas de 80-140 días en la época de octubre a marzo (García, 2005; Sotelo et al., 2011).

Factores y niveles de estudio

Para el experimento se utilizaron ocho accesiones de *S. hispanica,* tres densidades de siembra y tres fórmulas de fertilización (tabla 5.1). Las accesiones fueron proporcionadas por las siguientes instituciones; una por el Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICA-MEX), tres por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) y cuatro por la empresa ChíaBlanca de Acatic Jalisco, las cuales han presentado buena adaptación a la zona de estudio. Los factores y niveles de estudio se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. *Factores y niveles de estudio evaluados en chía, en el valle de Toluca, México, en el ciclo primavera-verano 2018*

Factores de estudio	*Niveles*
Densidad de población (plantas ha^{-1}) (A)	252 000
	126 000
	84 000
Accesiones (B)	ICAMEX-1
	ININ-5
	CHB-30Pz
	ININ-11
	ININ-10
	CHB-122 Az
	CHB-17Pz
	CHB-59 Normal
Dosis de fertilización (C)	20-20-20
	40-40-40
	60-60-60

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

iThenticate Página 89 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 90 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

2

Diseño experimental y tamaño de la parcela

Se empleó una serie de experimentos en espacio con un diseño experimental de bloques completos al azar en parcelas subdivididas, con tres repeticiones por ambiente. En la parcela grande se asignaron las densidades de población, en las medianas las accesiones y en las chicas las dosis de fertilización.

Manejo agronómico

La preparación mecánica del suelo consistió en dos pasos de rastra y surcado a 80 cm. La siembra se efectuó manualmente depositando la semilla a la distancia requerida (5, 10 y 15 cm), la maleza se controló por medio de deshierbes mecánicos y químicos (Paracuat). Las fuentes de fertilizantes fueron urea agrícola (46% N), superfosfato de calcio triple (46% P_2O_5) y nitrato de potasio (13-0-46), la fertilización se incorporó en una sola aplicación al costado de la línea de cultivo, a los 30 días de emergida la planta.

Registro de variables

Se seleccionaron 10 plantas de cada unidad experimental, en las que se registró: (a) longitud de planta (LP), con la ayuda de una cinta métrica fue medida en cm desde base del tallo a la punta de la espiga en una planta totalmente desarrollada; (b) peso seco de planta (SPS) registrada en gramos y secada en estufa a 60°C durante 72 hrs; (c) diámetro de tallo (DT), fue medido con un vernier digital en la base del tallo en milímetros; (d) longitud de inflorescencia (LI), medida en centímetros, de la parte inicial a la parte final de la inflorescencia totalmente extendida; (e) longitud de inflorescencia desde el nudo (LIN), medida en centímetros de la axila donde se muestra el ultimo nudo del tallo a la parte final dela inflorescencia; número de ramas (NR); (f) número de espigas (NE); (g) peso de semilla por planta (PSPP) en gramos y pesado en balanza analítica AS 220.R2 PLUS; (h) índice de cosecha (IC), y (i) rendimiento de grano (RG), kg ha^{-1}.

iThenticate Página 90 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 91 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables estudiadas se analizaron con base en un modelo lineal general para lo cual se consideró el efecto del bloque y los tratamientos, con el procedimiento PROC ANOVA y con la prueba de comparación de medias (Tukey $p \leq 0.05$) en una serie de experimentos en bloques completos al azar en arreglo de parcelas subdivididas (González et al., 2019), el procedimiento empleado permitió analizar los efectos de los tratamientos del diseño experimental, en el programa SAS, para Windows'99.

Resultados y discusión

De acuerdo con el resumen de análisis de varianza (tabla 5.2), se verifica que ocurre un efecto significativo ($p<0,01$) para efecto ambiente y en la interacción REP (AMB) para las variables estudiadas. El efecto de densidades de población sobre las variables PSP, AP, LE, LEN, NRP, NEP, PSPP, IC y R, fue altamente significativa, solo la variable DT no presento significancia. En la interacción amb*a, hubo significancia para las variables: PSP, AP, NRP, NE, NEP, PGP, IC y R; mientras que para la interacción REP*A(AMB), hubo diferencia significancia en la variable PSP, DT, AP, LE, LEN, NRP, NEP, PSPP, IC y R. El análisis de varianza permitió detectar un efecto positivo de las accesiones estudiadas en todas las variables, así mismo en la interacción A*B, en interacción AMB*B, en interacción AMB*A*B y en la interacción rep*b(amb*a).

En dosis de fertilización (C) existe significancia para PSP. AP, LE, LEN, NEP, PGP, IC y R; la interacción a*c se presenta alta significancia (0.01%) en las variables PSP y R y significancia (0.05%) para la variable PSPP; mientras que para la interacción B*C se presenta significancia para PSP, lo mismo que para la interacción A*B*C. Las medias totales de experimento indican PSP de 65 g, AP de 105.1 cm, LI de 16.3, NR de 17.1, NE de 52.5, PSPP de 9.83, IC de 15.2, R de 1 411 kg.

iThenticate Página 91 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate
Página 92 de 338 - Engrega de integridad
Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 5.2. *Cuadrados medios y significancia estadística para variables agronómicas en cultivo de chía en el valle de Toluca, Estado de México, ciclo primavera-verano 2018*

F V	*GL*	*PSP*	*DT*	*AP*	*LE*	*LEN*	*NRP*	*NEP*	*PGP*	*IC*	*R*
AMB	3	26210.3**	759.6**	57343.2**	3953.3**	4447.8**	1476.8**	19583.9**	682.7**	116.4**	14002598**
REP (AMB)	8	30300.2**	134.7**	1072.1**	2819.8**	60.7	60.2**	7256.8**	1536.2**	361.3**	31209903**
A	2	22539.9**	15.2	1497.7**	3214.9**	249.6**	108.8**	11669.3**	1058.6**	200.7**	86185213**
AMB*A	6	779.9**	22.4	242.7**	3038.6**	59.9	7.7**	1763.1**	9.4**	45.9**	679946**
REP*A(AMB)	16	1355.1**	21.6**	245.9**	4975.5**	44.4	9.4**	1058.7**	42.7**	43.6**	1830912**
B	7	2696.7**	109.9**	6163.1**	3586.9**	168.7**	133.2**	4398.9**	435.4**	1199.2**	9267854**
A*B	14	1142.3**	30.5**	459.4**	4162.8**	105.9**	10.7**	2268.6**	12.6**	85.9**	729584**
AMB*B	21	774.6**	30.6**	238.8**	3908.7**	83.8**	11.1**	934.8**	25.2**	43.2**	525307**
AMB*A*B	42	463.9**	35.9**	314.7**	4461.3**	36.9*	8.7**	633.9**	6.1**	27.9**	121887**
REP*B(AMB*A)	168	799.6**	40.7**	350.1**	4312.5**	88.9**	12.4**	1453.2**	14.5**	39.9**	271837**
C	2	7214.7**	0.6	14394.7**	439.9**	2406.5**	1.6	445.7	183.7**	12.4**	3817150**
A*C	4	32.2**	2.8	42.1	21.6	46.4	2.5	71.9	2.3*	0.27	207029**
B*C	14	15.6**	2.2	54.9	16.3	44.5	1.9	168.8	0.6	1.59	14869
A*B*C	28	8.1**	5.8	29.9	21.8	20.6	1.4	83.9	0.2	0.76	5453
AMB*C	6	53**	2.1	103.4	19.5	23.5	1.6	145.3	3.1**	4.36**	55925
AMB*A*C	12	10**	5.1	100.4	15.9	9.6	1.2	67.8	0.3	0.76	5100**
AMB*B*C	42	11.4**	1.5	39.6	19.1	15.1	1.4	73.1	0.3	1.44	4412
Error	468	9.2	4.8	46.2	20.8	18.9	1.5	94.3	0.4	0.7	5796
Media		65	10.5	105.1	16.2	29.4	17.1	52.5	9.83	15.2	1411
CV (%)		5	20.8	6.4	28.1	14.8	7.1	18.5	6.4	5.6	4.5

Nota: A = Densidad; B = accesiones; C = dosis de fertilización; AMB (Ambiente); REP (Repetición); GL = grados de libertad; CV = coeficiente de variación; PSP = peso seco de planta; DT = diámetro de tallo; LP = longitud de planta; LI = Longitud de inflorescencia; LIN = longitud de inflorescencia desde nudo; NR = número de ramas; NE = número de espigas; PSPP = peso de semilla por planta; IC = índice de cosecha; RG = Rendimiento de grano en kg ha^{-1}.

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

iThenticate
Página 92 de 338 - Engrega de integridad
Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 93 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Interacción ambiente-variables agronómicas

Los resultados obtenidos de las variables agronómicas por ambiente (tabla 5.3), permiten determinar a Rancho San Lorenzo como el mejor ambiente en la producción de chía, presentó diferencia significativa en peso seco de planta con 79.2 g, 119.9 cm de longitud de planta, 65.8 espigas por planta, un peso de 12.3 g de grano por planta y un rendimiento en semilla de 1 757.7 kg ha^{-1}; el ambiente San Francisco Tlalcilalcalpan, presentó rendimiento de 1 446.2 kg ha^{-1} y una longitud de planta de 115.9 cm, estos dos ambientes presentan precipitaciones semejantes y su tipo de suelo son franco arenosos, por lo cual las condiciones de clima durante el ciclo de cultivo de *S. hispanica*, incidieron significativamente en el desarrollo, producción y calidad de la semilla (Busilachi et al., 2019), además se confirma que entre más desarrollo fisiológico se presente en la planta; este se ve reflejado en la producción de semilla, y que aunado a las condiciones climáticas, el manejo del cultivo y una siembra uniforme, en un período de lluvias normales; se presenta un mayor desarrollo y uniformidad en las plantas, lo que se refleja en los rendimientos (Quiroga et al., 2015).

Tabla 5.3. *Comparación de medias agronómicas en cuatro ambientes del Valle de Toluca, México*

Ambiente	*PSP*	*DT*	*LP*	*LI*	*LIN*	*NR*	*NE*	*PGP*	*IC*	*RG*
Rancho San Lorenzo	79.2a	11.5ab	119.9a	15.8a	34.2a	19.8a	65.8a	12.3a	15.8a	1757a
San Francisco Tlalcilalcalpan	68.8b	12.2a	115.9a	14.3a	31.8b	18.5b	53.1b	10.1b	14.7a	1446ab
Cerrillo Piedras Blancas	54.5c	7.9c	84.3c	22.3a	23.9d	13.9d	45.4b	8.3b	15.8a	1198b
San Juan Xochiaca	58.9bc	10.4b	99.9b	12.5a	27.7c	16.1c	45.9b	8.7b	14.4a	1244b

Nota: PP = peso seco de planta; DT = diámetro de tallo; LP = longitud de planta; LI = Longitud de inflorescencia; LIN = longitud de inflorescencia desde nudo; NR = número de ramas; NE = número de espigas; PSPP = peso de semilla por planta; IC = índice de cosecha; RG = Rendimiento de grano en kg ha^{-1}.
Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Los ambientes San Juan Xochiaca y el Cerrillo Piedras Blancas (tabla 5.3), se datos de variables como longitud de planta, peso seco de planta y número de espigas bajos, variables que determinan el rendimiento de grano del cultivo de la chía. El ambiente de El Cerrillo Piedras Blancas presentó

iThenticate Página 93 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 94 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

anegaciones, que impidieron un desarrollo adecuado de la planta, lo cual influyó en el rendimiento, debido a que la chía no soporta suelos anegados durante su desarrollo; y su rendimiento se ve afectado por las características edafoclimáticas predominantes del ciclo de cultivo (Ayerza, 2016).

Tabla 5.4. *Medias de variables estudiadas para densidad de población, accesiones y dosis de fertilización en el Valle de Toluca*

	PSP	*DT*	*AP*	*LE*	*LEN*	*NRP*	*NEP*	*PGP*	*IC*	*R*
					Densidad de población (plantas ha^{-1})					
252 000	56.7c	10.5a	102.7b	15.4a	28.9b	16.4b	46.8b	8.1c	14.3b	2031.7a
126 000	65.1b	10.3a	105.2ab	13.4a	28.7b	17.1ab	51.5b	9.6b	15.3ab	1206.2b
84 000	74.4a	10.7a	107.2a	19.9a	30.4a	17.7a	59.4a	11.9a	15.9a	997.1b
					Accesiones					
ICAMEX-1	69.6a	10.3ab	112.4ab	12.5a	29.4ab	17.5ab	47.7ab	11.6ab	16.7bc	1700ab
ININ-5	68.4ab	9.6b	109.7ab	13.3a	29.5ab	16.7b	45.9b	9.1cd	13.5d	1327d
CHB-30Pz	63.5ab	9.6b	107.2b	13.5a	28.9ab	17.6ab	57.2ab	10.1cd	15.4bcd	1421cd
ININ-11	71.5a	11.4ab	115.1a	28.6a	27.9b	18.6a	44.1b	6.1e	8.3e	870e
ININ-10	60.34ab	12.4a	97.9de	13.9a	32.1a	16.9b	52.4ab	10.6bc	17.9ab	1551bc
CHB-122 Az	68.2ab	10.9ab	105.1bcd	21.3a	28.9ab	16.7b	57.5ab	12.6a	19.5a	1804a
CHB-17Pz	64.5ab	9.5b	99.8bcd	12.4a	28.7ab	17.6ab	62.5a	9.9cd	15.1cd	1411cd
CHB-59 Normal	56.9b	10.3ab	93.1e	14.2a	29.9ab	14.8c	52.9ab	8.4d	15.1cd	1204d
					Dosis de fertilización					
20-20-20	62.4b	10.5a	101.1b	15.4b	27.5b	17.1a	51.4b	9.3c	14.9b	1328c
40-40-40	62.5b	10.6a	100.9b	15.6b	28.1b	16.9a	52.4ab	9.5b	15.3a	1363b
60-60-60	71.2a	10.5a	113.2a	17.6a	32.7a	17.1a	53.9a	10.7a	15.3a	1543a

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Densidad de población

El efecto de la densidad de población (tabla 5.4) en el cultivo de chía se ve reflejado en el peso de planta seca donde a menor densidad de población existe una mayor biomasa, el cual disminuye conforme se incrementa la densidad de población, así mismo la longitud de las espigas y el peso de semilla por planta tienen un comportamiento similar, ya que al existir mayor espacio entre planta y planta existe un mejor desarrollo por efecto de una menor competencia. La altura de planta disminuyó a medida que se

iThenticate Página 94 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 95 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

incrementa la densidad poblacional de 84 000 plantas / ha (107 cm), 156 000 (105 cm) y 252 000 (102 cm), la reducción de la altura de la planta bajo densidades intermedias y altas se puede deber a la disminución en la disponibilidad de nutrientes por planta existentes en la misma área que en el tratamiento con densidades bajas.

El efecto de la densidad se afirma al evaluar el rendimiento de semilla, que a pesar de que se tiene una mejor arquitectura de la planta porque se garantiza una buena conformación y desarrollo de la planta en densidades bajas, además de que la probabilidad de ataque de plagas y enfermedades es menor porque se asocia al ingreso de aire entre las plantas (Manzaneda, 2015); en las densidades de 84 000 y 126 000 plantas por hectárea; los rendimientos de 997 y 1 206 kg ha^{-1}, respectivamente son menores a los 2 031 kg ha^{-1} obtenido con una densidad de 252 000 plantas por hectárea. La densidad de 252 000 plantas ha^{-1} presentó la mejor respuesta para las variables de rendimiento de semilla; más sin embargo con una densidad de población reducida el cultivo genera semillas de mayor peso (Noriega-González et al., 2018).

Accesiones

Las variables agronómicas medidas son contundentes para seleccionar accesiones de chía adaptadas a las condiciones agroclimáticas del Valle de Toluca (tabla 5.4); un buen desarrollo de planta de chía tiene como resultado: un adecuado peso de planta, un buen diámetro de tallo, una longitud de espigas aceptable, un buen número de ramas y espigas por planta, una producción de semilla por planta que supere 9% de su peso total de planta y un rendimiento de más de 1 000 kg ha^{-1}; estas son características útiles para determinar que siete de las ocho accesiones pueden considerarse aptas para ser cultivadas de forma comercial, ya que el uso de variedades de alto rendimiento es una práctica agronómica que garantiza el rendimiento de chía (Sosa et al., 2017).

El desarrollo de S. hispanica en los genotipos estudiados fluctúa en un promedio de altura de planta de 93 (CHB-59 normal) a 115 cm (ININ-11), datos menores a los obtenidos por Busilachi et al. (2019) quienes reportan

iThenticate Página 95 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 96 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

una altura de planta de 1.59 m para el ciclo 2014 y de 1.34 m para el 2015. Analizando estos resultados obtenidos la planta puede tener un desarrollo aceptable para la variable altura; pero esta no siempre se puede reflejar en el rendimiento final de semilla, ya que la accesión ININ-11, fue el genotipo con más altura (115 cm), pero menor rendimiento (850 kg ha^{-1}) y la accesión CHB-122 Az, tiene una altura de planta de 105 cm y una producción de 1 804 kg ha^{-1}.

El rendimiento de semilla por planta entre las ocho accesiones es fluctuante; ININ-11 con peso de 6.1 g por planta es el más bajo, mientras que CHB-122 Az, presento un peso promedio de 12.6 g por planta; siete de los ocho genotipos presentaron resultados superiores a los obtenidos por Grimes y colaboradores (2018), quienes reportan peso medio de semillas por planta de a 6.3 g en el genotipo W13.1 y 6.4 g en el genotipo Sahi Alba 914.

Los genotipos CHB−122 Az, ININ−10 e ICAMEZ-1, comparten las medias de peso seco de planta, diámetro de tallo, altura de planta y largo de espiga desde el nudo; y tienen diferencias en producción de semilla por planta, en el índice de cosecha en referencia al peso de planta y en rendimiento por hectárea, pero supera los 1 500 kg ha^{-1}; rendimiento superior al rango de 618.39 a 1 171.33 kg ha^{-1} reportados por Grimes et al. (2019).

Dosis de fertilización

Al estudiar las tres dosis de fertilización se observó un aumento en datos de las variables conforme se incrementaron las unidades de fertilizante aplicado. El aumento de peso de plata, altura de planta, número de remas laterales y número de espigas, datos que concuerdan con Martínez et al. (2017), quien afirma que los más altos rendimientos obtenidos en plantas de chía se asocian a una mayor acumulación de biomasa, generada principalmente por la presencia de inflorescencias grandes y plantas de grandes, es decir plantas que hicieron un mejor reparto de sus asimilados y por ende presentan un mayor índice de cosecha.

La producción de semilla de chía fue más alta con la dosis de fertilización 60-60-60 con una producción de 1 543 kg ha^{-1}, en comparación a las otras dosis de fertilización con una producción de 1 328 kg ha^{-1} para 20-20-

iThenticate Página 96 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 97 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

20 y 1 362 kg ha^{-1} para 40-40-40; el potencial productivo de la chía (2.21 t ha^{-}1) se puede lograr con una fertilización nitrogenada adecuada (Sosa-Baldivia y Ruiz, 2018). Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Noriega-González et al. (2018), quienes afirman que el cultivo de chía incrementa productividad de semilla en un 65%, con la aplicación de nitrógeno aunado a que la aplicación foliar de vermicompost acrecienta la biomasa y el rendimiento de semilla (González Solano et al., 2019).

Lo anterior deja en claro que la producción de la especie en estudio posee un importante potencial de desarrollo, pero que aún hace falta trabajar ampliamente en varios aspectos de manejo agronómico como es la nutrición donde es escasa la información disponible.

Conclusiones

Las condiciones agroclimáticas en los diferentes ambientes evaluados, Las parcelas fueron diferentes con una siembra uniforme, en un período de lluvias normales; los ambientes Rancho San Lorenzo y San Francisco Tlalcilalcalpan, presentaron mayor desarrollo y uniformidad en las plantas, lo que se reflejó en los rendimientos. Una densidad de 252 000 plantas por hectárea y una dosis de fertilización de 60-60-60, aunado a la selección del genotipo adecuado (ICAMEX-1); la producción de chía es atractiva para las condiciones edafoclimáticas del Valle de Toluca.

Las accesiones ICAMEX-1, ININ-10 y CHB-122 Az, son los tres genotipos con características agronómicas sobresalientes que presentaron buena adaptación a las condiciones agroclimáticas y que pueden instalarse comercialmente en la zona de estudio, en suelos con buena capacidad de filtración para evitar anegaciones.

iThenticate Página 97 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 98 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Ayerza, R., y Coates, W. (2006). *Chía. Redescubriendo un olvidado alimento de los aztecas.* Ediciones del Nuevo Extremo.

Ayerza, R., y Coates, W. (2004). Composition of chia (Salvia hispanica) grown in six tropical and subtropical ecosystems of South America. Tropical. *Science, 44*(3), 131-135. https://doi.org/10.1002/ts.154

Ayerza, R. (2016). Crop year effects on seed yields, growing cycle length, and chemical composition of chia (Salvia hispanica L.) growing in Ecuador and Bolivia. *Emirates Journal Food and Agriculture, 28*(3), 196-200. https://doi.org/10.9755/ejfa.2015-05-323

Busilachi, H. A., Coronel, C. N., Bueno, M. S., Gonzalez, M. P., Müller, D. R., Quiroga, M., y Severin, C. R. (2019). Incidencia de las condiciones de clima en el desarrollo y producción de semillas de Salvia hispanica L. *Acta Agronómica, 68*(3), 244-250. https://doi.org/10.15446/acag.v68n3.68759

Dos Anjos, G., Costa, F., Lobo, C., Souza, A., De Souza, G., y Dos Santos, A. (2018). Growth and photosynthetic pigment content in Salvia hispanica L. with macronutrient omission in nutrient solution. *Journal of Agrarian Sciences, 46*(3), 323-328. https://doi.org/1010.15361/1984-5529.2018V46N3P324-329

De Falco, B., Fiore, A., Bochichio, R., Amato, M., y Lanzotti, V. (2018a). Metabolomic analysis by UAE-GC MS and antioxidant activity of Salvia hispanica (L.) seeds grown under different irrigation regimes. *Industrial Crops and Products, 112,* 584-592. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.030

De Falco, B., Fiore, A., Rossi, R., Amato, M., y Lanzotti, V. (2018b). Metabolomics driven analysis by UAEGC-MS and antioxidant activity of chía (Salvia hispanica L.) commercial and mutant sedes. *Food Chemistry, 254,* 137-143. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.189

García, E. (1981). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koeppen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana.* Offset Larios.

González, A, Pérez, D. J., Rubí, M., Gutiérrez, F., Franco, J. R. P., y Padilla, A. (2019). InfoStat, InfoGen y SAS para contrastes mutuamente ortogonales en experimentos en bloques completos al azar en parcelas subdivididas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10*(6), 1417-1431. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1767

Grimes, S. J., Phillips, T. D., Hahn, V., Capezzone. F., y Graeff-Hönninger, S. (2018). Growth, Yield Performance and Quality Parameters of Three Early Flowering Chia (Salvia hispanica L.) Genotypes Cultivated in Southwestern Germany. *Agriculture, 10*(8), 2-20. https://doi.org/10.3390/agriculture8100154

Grimes, S. J., Phillips, T. D., Capezzone, F., y Graeff-Hönninger, S. (2019). Impact of Row Spacing, Sowing Density and Nitrogen Fertilization on Yield and Quality Traits of chia (Salvia Hispanica L.) Cultivated in southwestern Germany. *Agronomy, 3*(9), 1-21. https://doi.org/10.3390/agronomy9030136

iThenticate Página 98 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 99 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Gutiérrez, R., Ramírez, M. L., Vega, S., Fontecha, J., Rodríguez, L. M., y Escobar, A. (2014). Contenido de ácidos grasos en semillas de chía (Salvia hispanica L.) cultivadas en cuatro estados de México. *Revista Cubana de Plantas Medicinales, 19*(1), 199-207.

González-Solano, K. D., Rodríguez-Mendoza, M. N., Escalante-Estrada, J. A. S., García-Cué, J. L., Pedraza-Santos, M. E., y Sánchez-Escudero, J. (2019). Crecimiento y producción de chía (Salvia hispanica L.) en función de la irradiancia y fertilización orgánica. *Interciencia, 6*(44), 340-346.

Manzaneda, F. (2015). Evaluación de la producción de dos variedades de Chía (Salvia hispánica L.), en dos densidades de siembra. *APTHAPI, 1*(1), 13-18.

Martínez, A., Ramírez, J. G., Montes, S., García, M. A., Raya, J. C., Escutia, J. M., y Calderón, A. (2017). *Efecto de las fechas de siembra sobre el rendimiento de la chía (Salvia hispanica L)* (pp. 187-196). 4° Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Agropecuaria.

Michajluk, B. J., Piris, P. A., Mereles, L. G., Wiszovaty, L. N., y Caballero, S. B. (2018). Semillas de Salvia hispanica L., "chía" como fuente de macronutrientes, fibra alimentaria y minerales. *Investigación Agraria, 20*(1), 74-77. https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2018.junio.74-77

Miranda, F. (2012). *Guía técnica para el manejo del cultivo de Chía (Salvia hispanica) en Nicaragua.* Sebaco.

Noriega-González, L. A., Caballero-Palacio, M. M., Montoro-Torres, V., y García-Vázquez, E. N. (2018). Fertilización nitrogenada y densidad de siembra en la productividad de chía. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 6*(2), 1-8.

Quiroga, M., Agüero, D., Zapata, R., Busilacchi, H., y Bueno, M. (2015). Activadores de crecimiento y biofertilizantes como alternativa al uso de fertilizantes químicos en cultivo de chía (Salvia hispanica L.). *Energías Renovables y Medio Ambiente,* (35), 31-40.

Rovati, A., Escobar, E., y Prado, C. (2012). Particularidades de la semilla de chía (Salvia hispanica L.). *Avance Agroindustrial, 33*(39), 39-43.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021). http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado

Sosa-Baldivia, A., Ruiz-Ibarra, G., Gordillo-Sobrino, G. V., Etchevers-Barra, J. D., Sharma, M., Liu, X., y Robles-de la Torre, R. R. (2017). Respuesta de cuatro cultivares de chía (Salvia hispanica L.) a la fertilización nitrogenada en el Petacal, Jalisco, México. *Informes Agronómicos de Hispanoamérica, 28,* 8-13.

Sosa, A., Ruiz, G., Rana, J., Gordillo, G., West, H., Sharma, H., Liu, X., y Robles-de la Torre, R. (2017). Diabrotica una plaga de importancia económica para la producción de chía (Salvia hispanica L.) en Jalisco México. *El Jornalero, 77,* 100-110.

Sosa-Baldivia, A. and Ruiz, G. (2018). Inadequate Nitrogen Fertilization: Main Cause of the Low Seed Yield on the Chia Crop (Salvia hispanica L.). *Biomedical Journal Science & Technical Research, 2*(1), 2255-2256. https://doi.org/10.26717/BJSTR.2018.2.000670

Sotelo, E. D., González, A., Cruz, G., Moreno, F., y Cruz, G. (2011). Los suelos del Estado

iThenticate Página 99 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 100 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de México y su actualización a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2006. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 2*(8),71-84.

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Chauhan, D. K., Prasad, S. M., y Dubey, N. K. (2014). Role of macronutrients in plant growth and acclimation: recent advances and future prospective. En *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes* (pp. 197-216). Springer. https://doi.org/10.1007/978−1-4614-8824-8_8

Tripathi, D. K., Singh, V. P., Chauhan, D. K., Prasad, S. M., y Dubey, N. K. (2015). Micronutrients and their diverse role in agricultural crops: advances and future prospective. *Acta Physiologiae Plantarum, 37*(139), 1-14.

Xingú, A., Gonzalez, A., de la Cruz, E., Sangerman-Jarquín, D. M., Orozco, G., y Rubí, M. (2017). Chía (Salvia hispanica L.) situación actual y tendencias futuras. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 7*(8), 1619-1631. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.516

iThenticate Página 100 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 102 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

6. Kiwi y espárrago para las zonas serranas tropicales

Juan Guillermo Cruz Castillo*

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.06

Resumen

El kiwi y el espárrago son dos cultivos hortícolas valorados por su capacidad nutritiva, normalmente, el cultivo de ambos ocurre en zonas templadas. Las regiones tropicales de altura presentan un clima apropiado para adaptar cultivos de zonas templadas. Sin embargo, en el caso de los frutales caducifolios existen pocas horas frío lo que limita su capacidad productiva. El kiwi Hayward tuvo muy pocas flores cuando fue plantado a 1 900, 2 100 y 2 400 m de altitud en una zona tropical de altura en Veracruz. La aplicación de cianamida de hidrógeno (AG3), o thidiazuron, a los kiwis plantados en esas tres altitudes fue ineficiente para promover floración. Se generaron dos tipos de kiwi de bajo requerimiento de horas frío con adecuada producción. Uno de la especie *Actinidia deliciosa* y el otro de la especie *Actinidia chinensis*. Ambos tipos de kiwi posibilitan la producción de kiwi en zonas con 180-200 h, abajo de 7.5°C. El sabor del kiwi *Actinidia deliciosa* fue evaluado sensorialmente y obtuvo una buena aceptación. El espárrago producido en una zona tropical de altura con bajos insumos tuvo un sabor agradable, y fue ligeramente menor en características nutracéuticas que los espárragos de supermercado producidos en zonas templadas con altos insumos. El espárrago producido con bajos insumos, un cultivo perenne para introducir en zonas tropicales de altura donde varias cosechas al año son posibles.

§ Autor para correspondencia: mrubia@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Hortícolas. Profesor de la Universidad Autónoma Chapingo. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8687-6235; correo electrónico: jcruzcastillo@yahoo.com

iThenticate Página 102 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 103 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Palabras clave: *Actinidia chinensis, Asparagus officinalis, agricultura de bajos insumos.*

Introducción

En las zonas tropicales de altura se han adaptado cultivos hortícolas que tradicionalmente se han desarrollado en zonas templadas. En el planeta, estas regiones se sitúan entre los 23.5° norte y sur del Ecuador, en esa franja se encuentran elevaciones o serranías mayores a 1 000 msnm definidas como montañas o tierras altas tropicales. Estas zonas presentan una alta degradación del suelo debido a las altas precipitaciones, y a su excesivo cultivo (Nyssen et al., 2009). En Mesoamérica, la zona tropical de altura con mayores innovaciones hortícolas posiblemente se encuentra en Guatemala, donde se produce arándano azul, manzanas y hortalizas para exportación (Cruz-Castillo et al., 2003).

En México, y particularmente en el estado de Veracruz donde existen zonas serranas cultivadas hasta los 2 800 msnm, la introducción de frutales de clima templado ha mejorado la nutrición de los habitantes de esas regiones (Sánchez-Cervantes y Cruz-Castillo, 2013). Así, frutales como la pera, ciruela y manzana se encuentran plantados en traspatios o en pequeñas huertas junto al maíz, frijol y papa. Estos frutales han formado parte de una estrategia de los pequeños productores para mejorar su alimentación y obtener mayores recursos económicos.

El cultivo del kiwi en México, y Mesoamérica no ha sido documentado a detalle (Cruz-Castillo et al., 2022). El kiwi verde (*Actinidia chinensis* var *deliciosa*, frutal caducifolio), que crece adecuadamente en países de clima templado, requiere de 700 a 900 abajo de 4°C para florecer, especie frutal que apareció en el mercado mexicano en el siglo xx, originario de China (Wall et al., 2008). En Veracruz, en zonas tropicales de altura se alcanzan sólo 180-300 horas frío con inviernos donde aparecen algunos días calurosos que afectan negativamente los requerimientos de frío para la floración. Así, arbustos de kiwi verde Hayward plantados a 1 900 m de altura en Veracruz producen muy pocas flores. Se ha intentado cultivar kiwi en las zonas templadas de Aguascalientes, Michoacán, Estado de México y Jalisco. Sin

iThenticate Página 103 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 104 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

embargo, no existen documentos publicados al respecto. México, no figura como país productor, y todo el kiwi que se consume en México y Mesoamérica es importado de California, Chile y Nueva Zelanda.

5 El espárrago (*Asparagus officinalis* L.) es una hortaliza que, desde su introducción a México, se ha cultivado en zonas templadas como Sonora y Guanajuato, su consumo se ha limitado a ciertos sectores de la población debido entre otras causas a su alto precio en el mercado. Hasta ahora, en México, se considera una hortaliza de lujo.

Hay una creciente demanda de espárragos en todo el mundo, pero la producción ha estado orientada a climas templados, significando que hay un periodo de aproximadamente 6 meses que no está disponible, esto proporciona una oportunidad a los productores de espárragos en ambientes tropicales (Onggo et al., 2018).

El espárrago crece satisfactoriamente en climas templados, pero puede adaptarse a zonas tropicales de altura, por ejemplo, en la India (Madalageri et al., 1990) e Indonesia (Onggo et al., 2018). En México, existe información limitada sobre el cultivo y manejo del espárrago en zonas tropicales. Sin embargo, existen experiencias agronómicas en Guatemala donde se ha adaptado adecuadamente a las condiciones de frío moderado, y alta humedad encontradas a 1 800 m de altitud, arriba de zonas cafetaleras.

Por lo anterior, los objetivos fueron: (a) mostrar la posibilidad de producir kiwi en México con la existencia de selecciones de bajo requerimiento de horas frío; (b) mostrar algunos aspectos de la calidad de espárrago producido con bajos insumos. Esto bajo un contexto ambiental de zona tropical de altura para las dos especies.

Materiales y métodos

Kiwi

Se establecieron tres parcelas experimentales con el kiwi Hayward a 1 900, 2 100 y 2 400 m de altitud. Cada parcela tuvo 100 plantas espaciadas a 5 × 3 m. Existió un polinizador por cada cinco plantas y se utilizó el sistema de plantación en "T". Al cuarto año, con el afán de incrementar la floración se

iThenticate Página 104 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 105 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

aplicó al final del invierno AG3 (100, 300, 500 ppm), thidiazuron (0.5, 1 y 5 ppm) y Hi-Cane (cianamida de hidrógeno 2 kg / 100 l de agua de i. a.).

Figura 6.1. *Frutos de kiwi (*Actinidia chinensis *var.* deliciosa*) producidos a 1 900 m de altitud en Huatusco, Veracruz, México*

Figura 6.2. *Frutos en madurez de consumo (izquierda), y frutos en crecimiento (derecha) de Actinidia chinensis var chinensis producidos a 1 900 m de altura en Huatusco, Veracruz, México*

Se obtuvieron dos selecciones de kiwi de bajo requerimiento de horas frío. Una selección de *Actinidia chinensis* var. *deliciosa*, y otra de *Actinidia chinensis* var. *chinensis*. Ambas, con alrededor de 180 h abajo de 7.5°C, producen una muy buena brotación de flores y buena producción de fruta.

La selección de la variación *deliciosa* de sexo femenino se originó de semillas del kiwi Hayward. Morfológicamente los frutos son parecidos al

iThenticate Página 105 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 106 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

cultivar Hayward y presentan un poco más de tricomas sobre la cascara. La selección de la variación *chinensis* de sexo hermafrodita fue generada también a partir de semilla, pero de frutos de la variación *chinensis* Jintao.

Una evaluación sensorial también se llevó a cabo. Los frutos de kiwi fueron cosechados del arbusto de *A. chinensis* var. *deliciosa* de bajo requerimiento de horas frío. Los kiwis se compararon sensorialmente con guayaba (*Psidium guava*) Media China y carambola (*Averrhoa carambola*) Maha, que fueron compradas en el mercado local de Texcoco. Se evaluó la aceptación global usando nueve atributos, y participaron 70 panelistas.

Espárrago

En una zona tropical de altura de Veracruz a 2 000 m de altitud (Huatusco, Veracruz) con una temperatura media anual es de 16.4°C y máxima de 20.5°C se produjo espárrago (turiones verdes) que provenían de semillas de cruzas entre plantas masculinas y femeninas de la variedad UC-157 cultivadas sin fertilización química, sin riego, sin aplicación de pesticidas y sin otros insumos comunes en la agricultura convencional para producir espárrago. La distancia entre plantas establecidas en un suelo andosol fue de 40 cm.

Las propiedades físicas y químicas evaluadas en los turiones de espárragos con edad de seis años después de la siembra fueron largo, diámetro y peso del turión, porcentaje de agua, materia orgánica, proteína cruda, fibra cruda, extracto etéreo, cenizas, índice de acidez, ácido ascórbico, clorofila, fenoles totales, flavonoides totales y la actividad antioxidante mediante FRAP. Estas variables fueron también evaluadas en espárragos comercializados en un supermercado. Las variables se evaluaron con un análisis de varianza y para determinar diferencias significativas entre medias se utilizó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Se llevó a cabo una evaluación sensorial, los espárragos fueron recolectados en la Comunidad de Elotepec en el Municipio de Huatusco, Veracruz. La transformación de los espárragos, ya sea entera o solo las puntas de los turiones se realizó en el Centro Regional Universitario Oriente de la Universidad Autónoma Chapingo. Fueron evaluados color, olor, forma, sabor,

iThenticate Página 106 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 107 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

fibrosidad, firmeza, jugosidad y sabor residual. Un total de 36 personas de diferentes edades y de ambos sexos participaron en la evaluación sensorial, los datos fueron recopilados y se realizaron comparaciones utilizando la prueba no paramétrico rango-suma de Wilcoxon.

Resultados y discusión

Kiwi

Ninguno de los tratamientos químicos incrementó el número de flores en las huertas establecidas en tres alturas. Después de 8 años, ninguna planta de Hayward produjo más de 15 flores / arbusto por año.

La selección de los kiwis var. *deliciosa* (figura 6.1) y var. chinensis (figura 6.2), es un aporte de investigación generado en la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Veracruz. En todo este proceso, han pasado 18 años donde existieron muchos fracasos, pero finalmente se obtuvieron plantas que pueden florecer con 180-200 horas frío.

En otros países, han sido seleccionados kiwis a partir de semilla que se han adaptado a condiciones climáticas particulares. Por ejemplo, en Estados Unidos la variedad de *A. deliciosa* AU Fitzgerald (Brantley et al., 2019) y en Italia la variedad de *A. chinensis* var. *deliciosa* Soreli (Testolin y Ferguson, 2009).

Tabla 6.1. *Aceptabilidad global para el kiwi, guayaba y carambola*

Fruta	*Media*
Kiwi	7.17 a
Guayaba	6.84 ab
Carambola	6.59 b

Nota: Medias que no comparten una letra son significativamente diferentes usando el método de diferencias mínimas significativas de Fisher, α = 0.05.

Fuente: Elaboración propia.

La aceptabilidad global para el kiwi fue adecuada en la evaluación sensorial (tabla 6.1), y su sabor es muy parecido al del kiwi Hayward. El sabor

iThenticate Página 107 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 108 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

del kiwi var. *chinensis* es parecido al del kiwi Gold que se comercializa en algunos supermercados de México. Históricamente en todas las regiones del mundo donde el cultivo del kiwi llega el contexto socioeconómico mejora. Parcelas de kiwi para pequeños productores ayudarían en mucho a la economía familiar. El sabor del kiwi producido en Huatusco es comparable al importado, aunque su tamaño es menor.

Espárrago

Los turiones de espárragos producidos bajo condiciones tropicales de altura y con agua de lluvia pudieron ser comercializados adecuadamente bajo las normas de calidad CODEX STAN 225-2001. Al ser comparados con espárragos producidos en zona templada tuvieron menores valores ($p \leq 0.05$) de proteína cruda, fibra cruda, cenizas totales, acidez titulable, vitamina C, fenoles, flavonoides y capacidad antioxidante (FRAP).

Los resultados del análisis sensorial del esparrago entero y de sus puntas mostraron una aceptación positiva por ser más jugosos y por el sabor residual que dejan, y además, en la cocción no pierden colorantes, turgencia ni olor original. Sin embargo, resultaron con mayor fibra al paladar que los comprados en el supermercado.

Con la selección de variedades y un manejo agronómico, las características físicas y químicas de espárragos producidos en zonas tropicales de altura podrían igualar a las de los espárragos producidos en zonas templadas, y con altos insumos.

Actividades como los cultivos de traspatio, huertos o explotaciones familiares generan cierto soporte económico para las familias de escasos recursos, pues ayudan a paliar el hambre y la pobreza, aportan seguridad alimentaria y mejoran los medios de vida mediante el acceso a productos como hortalizas, así el espárrago (figura 6.3) en la agricultura familiar puede ser un agente en la mejora de la alimentación. En la comunidad de Elotepec, en Huatusco, Veracruz, puede ser cosechado gran parte del año con una producción semanal de 1.5 a 2.0 kg con 65-75 plantas en una superficie de 25 a 30 m^2.

iThenticate Página 108 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 109 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Figura 6.3. *Espárragos producidos a 2 000 m de altura en Huatusco, Veracruz, México, utilizando semillas del pequeño productor*

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Se han generado los primeros dos kiwis (*Actinidia* spp) de bajo requerimiento de horas frío para zonas tropicales de altura de México, y Mesoamérica. Uno de la especie *A. deliciosa* y el otro de la especie *A. chinensis*. Estos individuos ayudarían a reducir las importaciones de este fruto, pues prácticamente todo el kiwi que se consume en México viene del extranjero. El espárrago verde es una hortaliza que puede ser producida con bajos insumos en las zonas tropicales de altura. Sus buenas características físicas y químicas y de buen sabor alcanzadas en esas zonas permiten su autoconsumo y su venta al mercado. Esta hortaliza puede ser producida con semillas generadas por el pequeño productor. Los espárragos y los kiwis producidos en zonas tropicales de altura con bajos insumos, y comercializados como un producto de agricultura familiar permitirían una buena retribución económica para los pequeños productores de las zonas serranas tropicales.

iThenticate Página 109 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 110 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Brantley, A. K., Spiers, J. D., Thompson, A. B., Pitts, J. A., Kessler, J. R. Jr., Wright, A. N., y Coneva, E. D. (2019) Effective Pollination Period of Actinidia chinensis 'AU Golden Sunshine' and A. deliciosa 'AU Fitzgerald' Kiwifruit. *HortScience, 54*(4), 656-660.

Cruz Castillo, J. G., Rodríguez-Bracamontes, F., Vásquez-Santizo, J., y Torres-Lima, P. A. (2006). *New Zealand Journal of Crops and Horticultural Science*, *34,* 341-348.

Cruz-Castillo, J. G., Reina-García, J., Guerra-Ramírez, D., Almaguer-Vargas, G., y Castañeda-Vildózola, A. (2022). Producción de kiwi (Actinidia chinensis) como contribución a la soberanía alimentaria frutícola de México. *Agro-Divulgación, 2*(4), 59-61.

Madalageri, B. B., Dharmatti, P. R., Madalageri, M. B., y Ramanjinigowd, P. H. (1990). Growth and yield potentiality of asparagus in the tropics of South India. *Acta Horticulturae, 271*, 211-214.

Nyssen, J., Poesen, J., y Deckers, J. (2009). Land degradation and soil and water conservation in tropical highlands. S*oil and Tillage Research, 103*(2), 197-202.

Onggo, T. M., Mubarok, S., y Kusumiyati. (2018). Cultivation of asparagus as an annual crop in the tropics: growth, spear yield and -size of two cultivars harvested at different plant age. *Acta Horticulturae,* 1228, 159-164.

Sánchez Cervantes, M., Cruz Castillo, J. G., y Inurreta Aguirre, A. G. (2013). Agronomía y ambiente de la pera *(Pyrus communis L.)* en la región central de Veracruz. *Revista de Geografía Agrícola,* (50-51), 55-63.

Testolin, R., y Ferguson, A .R. (2009). Kiwifruit (Actinidia spp.) production and marketing in Italy. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 37,* 1-32.

Wall, C., Dozier, W., Ebel, R. C., Wilkins, B., Woods, F., y Foshee IIII, W. (2008). Vegetative and Floral Chilling Requirements of Four New Kiwi Cultivars of Actinidia chinensis and A. deliciosa. *HortScience, 43*(3), 644-647.

iThenticate Página 110 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 112 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

7. Contenido de almidón y degradación de la materia seca en ensilado de maíz tratado con xilanasa, celulasa y miel de maguey

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.07

José Ramón Pascual Franco Martínez*§
Andrés González Huerta**
Gaspar Estrada Campuzano***
Rodolfo Serrato Cuevas****
Manuel González Ronquillo*****
Dora María Sangerman Jarquín******

Resumen

Con la finalidad de eficientar la nutrición animal, tanto de ganado productor de leche como de carne, se hace necesario conocer diversos valores de carbohidratos solubles y fibrosos, que permitan hacer el cálculo de raciones con mayor eficacia. El objetivo del este estudio fue aportar la composición de carbohidratos (CC) y la degradación de la materia seca de cuatro genotipos de maíz ensilado, tratados con las enzimas xilanasa (XIL) y celulasa (CEL), y miel de maguey (MM) como aditivo natural. De las enzimas y del aditivo natural se evaluó la aplicación de 1 ml kg^{-1} de materia verde (MV) aplicado en los ensilados de las variedades de maíz San Diego (grano amarillo) y Cacahuacintle (grano blanco), y en los híbridos P-1832 (grano amarillo) y Victoria (grano blanco).

§ Autor para correspondencia: jrfrancom@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203
** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1189-0470
**** Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5639-4542
***** Doctor en Veterinaria por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID://orcid.org/0000-0003-3316-4157
******Doctora en Ciencias. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-1182

iThenticate Página 112 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 113 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

En la evaluación de la CC se consideró la materia seca (MS), fibra detergente neutro (FDN), almidón (ALM), pH y cenizas (CEN); y en la degradación de la materia seca, evaluada atraves de la producción de gas (PG) a 96 h de incubación, se midieron las variables producción de gas (a), tasa de fermentación (*b*) y el tiempo de retardo de la incubación (*c*). El experimento se organizó mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 4×4. El contenido de almidón fue mayor para la variedad de grano amarillo San Diego y para las enzimas xilanasa y celulasa. La adición de XIL, CEL y MM promueven la degradación e incrementan su disponibilidad energética, con una mayor producción de gas *in vitro*.

Palabras clave: *composición química de maíz, almidón en forraje de maíz, degradación de ensilado de maíz.*

Introducción

El ensilaje es una forma de conservar el forraje húmedo mediante la fermentación adecuada, procurando mantener su calidad nutritiva por un largo periodo de tiempo. El forraje de maíz se utiliza en la alimentación animal, por su alto contenido de materia verde que va desde 57 a 114 t ha^{-1} (Franco et al., 2015); su forraje es muy utilizado y apreciado en la producción animal por su valor energético (Bates, 1998); en este sentido el ALM proporciona una gran cantidad de energía de fácil digestión y en el ensilaje de maíz, este carbohidrato, alcanza valores tan altos como 35% (Meléndez, 2015); el cual es fijado por la fotosíntesis y, su degradación nocturna garantiza la disponibilidad de la materia y energía para la síntesis de sacarosa que se distribuye a toda la planta (Patricia-Coello y Martínez-Barajas, 2022). Este forraje se utiliza en la crianza de todo tipo de rumiantes, pero tiene especial importancia para el ganado lechero, debido a que la producción de leche es altamente dependiente de la cantidad de energía que consume la vaca lactante (Staples, 2003), en esta línea, el uso de ALM en los suplementos alimenticios para incrementar la densidad energética de la ración y proporcionar el carbono para suplir los requerimientos de glucosa y de carbohidratos no estructurales (CNE) es una práctica común en la alimentación de

iThenticate Página 113 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 114 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

vacas lecheras de alta producción (Huntington et al., 2006). Pero también su forraje presenta algunas características poco deseables, como su bajo valor nutritivo dado su bajo contenido de proteína (63 a 95 g kg^{-1}) y alta concentración de fibra (447 a 633 g kg^{-1} FDN) (Vallejo et al., 2016).

Varios estudios se han centrado sobre la degradación de los alimentos fibrosos en rumiantes usando aditivos como ionoforos, microbios y enzima degradantes de la pared celular o enzimas exógenas degradantes de fibra que estimulan la actividad de microorganismos del rumen digestivo (Giraldo et al., 2004), específicamente con la adición de enzimas fibroliticas exógenas (EFE) como CEL o XIL se aumenta la degradación y fermentación del forraje de maíz (Valdés et al., 2015).

En México existe una creciente demanda de buen forraje de maíz, dado el crecimiento de la ganadería productora de carne y especialmente la de leche, pero su calidad sigue siendo un problema debido a su baja proteína y digestión de su pared celular; situación que poco ha sido atendida, ya que el mejoramiento genético que se continua realizando en la Meseta Central de México se ha enfocado principalmente a la obtención de cultivares de mayor producción de grano, pero se han descuidado sus atributos de calidad y propiedades forrajeras. De acuerdo con lo anterior, el objetivo del estudio fue conocer la composición de carbohidratos y la degradación de la materia seca de dos variedades y dos híbridos de maíz ensilado, tratadas con las enzimas xilanasa y celulasa y miel de maguey. Bajo el supuesto de que existe diferencia en el contenido de almidón y otros carbohidratos y la degradación de la materia seca entre ensilados de maíz de grano amarillo y grano blanco, tratados con aditivos.

Materiales y métodos

Material

Se evaluaron cuatro variedades de maíz, de las cuales dos fueron variedades criollas, Cacahuacintle Tlacotepec (grano blanco) y San Diego (grano amarillo) y dos Híbridos P-1832 (grano amarillo) y Victoria (grano blanco), cuyas características de producción, procedencia, tipo, siembra, etc., se

iThenticate Página 114 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 115 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

encuentran descritas por Franco et al. (2015). El corte de las plantas se efectuó cuando los granos del elote alcanzaron un estado masoso-compacto, siendo a los 155, 149, 176 y 168 días posteriores a la siembra, respectivamente. Las plantas completas de las parcelas experimentales de cada variedad fueron cortadas y después trozadas en un molino Wiley (DPM Junior, Noriega Máquinas Agrícolas), para obtener un tamaño de partículas de 1.5 a 4.0 cm; posteriormente para formar los microsilos se pesaron por cuadriplicado 10 kg de material fresco de cada variedad y se adicionaron 10 ml de cada aditivo, por lo que se uso 1 ml por cada kilogramo de ensilado. Las enzimas usadas fueron XIL (producto constituido por 34 000 a 41 000 unidades de xilanasa g^{-1}, de 12 000 a 15 000 unidades de β-glucanasa g^{-1} y 45 000 a 55 000 unidades de celulasa g^{-1}), CEL (constituido por 30 000 a 36 000 unidades de celulasa g^{-1} y 7 500 a 10 000 unidades de β-glucanasa g^{-1}) y MM (con 8.62% de azucares, 0.3% de aminoácidos, 3.0% de proteína y 3.0% de minerales); después fueron llenados tres cilindros de PVC de 15 × 30 cm, con cada una de las variedades de maíz y sus respectivos tratamientos, compactando el forraje de cada cilindro con una prensa metálica y finalmente sellarlos con plástico negro. Los microsilos fueron apilados dentro de un lugar fresco y cubierto durante 6 meses a temperatura ambiente.

Composición de carbohidratos

Muestras de forraje para el análisis químico posterior a la conservación se obtuvieron de los ensilados formados. Se tomaron al menos 6 submuestras de cada bolsa y se agruparon para producir una muestra por cada bolsa. Las muestras para el análisis químico se mantuvieron a una temperatura de −15°C. Las muestras agrupadas se secaron y se molieron hasta obtener un tamaño de 1 mm, usando un molino Mine-Mill Cutting Mod (5KH-39QN5525); después fueron analizadas por duplicado siguiendo el procedimiento de la Asociación de Químicos Agrícolas Oficiales (AOAC, por sus siglas en inglés, 1997). El pH se midió inmediatamente después de abrir cada uno de los silos; la materia seca (MS) se determinó mediante secado en horno a 105°C hasta peso constante (ref. 934.01); las cenizas totales por horno de mufla (ref. 942.05). El contenido de fibra detergente neutro (FDN)

iThenticate Página 115 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 116 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

se obtuvo según Van Soest et al. (1991), utilizando un analizador de fibra ANKOM 200 (ANKOM Technology) y su valor fue expresado sin cenizas. El almidón fue determinado de acuerdo con el procedimiento del Animal Nutrition and Environmental Modeling Applications Laboratory (ANEMAL) (Álvarez, 2009).

Producción de gas *in vitro*

Durante el día de inicio de la incubación, se utilizaron dos vacas Holstein (450 kg LW), fistulada de rumen y con una dieta alimenticia continua a base de alfalfa, concentrado comercial y agua a libre acceso; el líquido ruminal fue extraído a las 08:00 h, antes de alimentar a las vacas, y fue transportado en un termo al laboratorio donde fue filtrado usando triple capa de gasa, manteniéndolo a una temperatura de 39°C y gaseado con CO^2. Manteniendo en agitación las soluciones (Menke y Steingas, 1988) (buffer, macronutrientes, micronutrientes, resarzurina, reductora y agua destilada), a una temperatura de 39°C, se les agrego el 10% de líquido ruminal y se continuó mezclándolas. Se pesaron 950 mg de MS de cada uno de los tratamientos y depositados en 48 frascos ámbar de 120 ml (considerando los 16 tratamientos por triplicado), añadiéndoles 90 ml de la solución preparada, cerrándolos y una vez agitados fueron colocados dentro de un baño de agua con temperatura controlada a 39°C. Posteriormente se determinó la presión (PSI) mediante el uso de un transductor de presión Delta OHM (HD2124.1), y se realizó la medición de producción de gas a las 3, 6, 12 24, 48 y 96 horas de incubación, Para su corrección se utilizaron cuatro frascos sin sustrato como blancos; además, de cuatro frascos con heno de cebada como estándar (Theodorou et al., 1994).

En cuanto a los cálculos, los parámetros cinéticos de PG se estimaron a través de un procedimiento interactivo de análisis de regresión no lineal (PROC NLIN) (Sistema de Análisis Estadístico [SAS, por sus siglas en inglés], 2002), de acuerdo con Krishnamoorthy et al. (1991), calculado como:

$$PG = b\ (1-e-C^{(t-l)})$$

Donde PG es el volumen de PG en el tiempo *t*; *b* es la PG asintótica (ml / g MS); C es la velocidad de PG (g / h), l (h) es el tiempo de retraso discreto antes de la PG.

iThenticate Página 116 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 117 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Análisis estadístico

El experimento tuvo un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial 4×4 (Steel et al., 1997), en donde los tratamientos fueron los genotipos de maíz (G) ($n=4$) y los aditivos (control, enzimas y miel de maguey) (A) ($n=4$), con tres repeticiones. Los datos se analizaron con mediciones repetidas en el tiempo, usando procedimiento estadístico (SAS, 2002). El modelo estadístico fue:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + (G \times A)_{ij} + E_{ijk} \quad (7)$$

Donde Y_{ijk} es la variable respuesta de los ensilados tratados con la XIL, CEL y MM; μ es la media general; G_i es el efecto del i-esimo genotipo ($i=1-4$); A_j es el efecto del j-esimo aditivo ($j=1-4$); $(G \times A)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el i-esimo genotipo y el j-esimo aditivo; E_{ijk} es el error experimental del i-esimo genotipo, j-esimo aditivo y k-esima repetición. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p<0.05$).

Resultados

Composición de carbohidratos

En el factor genotipos la MS, FDN, ALM y pH, tuvieron efecto significativo ($p<0.05$), a excepción del porcentaje de CEN que tuvo igualdad estadística ($p>0.05$). El factor aditivos tuvo efecto significativo ($p<0.05$) en las variables ALM, MS, CEN y pH, encontrando efecto no significativo ($p>0.05$) en el contenido de FDN. En la interacción de los factores genotipos por aditivos, se observó diferencia altamente significativa ($p<0.01$) en las variables ALM, CEN y pH, con excepción de la MS y FDN que fueron no significativas. Es de considerar que la información analizada fue confiable, ya que el coeficiente de variación para las variables medidas fluctuó de 1.32 a 13.36% (tabla 7.1).

El contenido de AI fue evidentemente superior ($p<0.05$) para la variedad San Diego, seguida del híbrido P-1832, ambos de grano amarillo; en cuanto a los aditivos el mayor porcentaje de ALM fue para la XIL y CEL,

iThenticate Página 117 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 7.1. *Cuadrados medios y significancia estadística de los valores de F para composición de carbohidratos y producción de gas de cuatro genotipos de maíz ensilado tratados con miel de maguey, celulasa, xilanasa y control*

FV	*GL*	*MS*	*FDN*	*ALM*	*CEN*	*pH*	*Producción*	*Tasa de fermentación*	*Tiempo de incubación*
Genotipos (G)	3	70.71**	206.63*	155.68**	2.37^{NS}	8.94**	2505.25**	0.000258**	8.69**
Aditivos (A)	3	32.30*	106.63^{NS}	182.13**	13.44**	5.00**	3103.47**	0.000101**	3.83**
Interacción G×A	9	7.45^{NS}	63.56^{NS}	165.34**	10.15**	1.98**	508.93**	0.000050**	0.82**
Error	30	5.76	51.57	0.018	1.22	0.15	49.02	0.000003	0.05
C. V. (%)		11.80	14.05	1.32	7.54	7.54	3.24	5.34	14.40

Nota: ** Diferencia altamente significativa (p<0.01); * diferencia significativa (p<0.05); NS no significativo (p>0.05); C.V. coeficiente de variación; FV: Fuente de Variación; GL: Grados de Libertad; MT: Materia Seca; FDN: Fibra Detergente Neutro; ALM: Almidón; CEN: Cenizas.

Fuente: Propia formulada a partir de la información obtenida.

Tabla 7.2. *Composición química de carbohidratos de cuatro genotipos de maíz ensilado tratados con aditivos de miel de maguey, celulasa, xilanasa y control*

Factores	*Materia seca (%)*	*Fibra detergente neutro (%)*	*Almidón (%)*	*Cenizas (%)*	*pH*
Genotipos					
San Diego (grano amarillo)	22.92a	48.72a	15.24a	7.91a	4.31c
Cacahuacintle (grano blanco)	21.06a	46.49b	09.55c	8.62a	5.09b
P-1832 (grano amarillo)	20.27a	54.84a	10.14b	7.86a	4.95b
Victoria (grano blanco)	17.10b	54.37a	06.57d	8.68a	6.37a
DMS	2.66	7.94	0.19	1.22	0.72
Aditivos					
MM	20.39a	48.39a	07.82c	7.59b	4.87b
CEL	21.65a	48.90a	11.36b	7.28b	5.03b
XIL	21.29a	52.49a	15.45a	8.59a	4.70b
Control	18.01b	54.64a	06.87d	9.62a	6.13a
DMS	2.65	7.94	0.19	1.22	0.72

Nota. MM: miel de maguey; CEL: celulasa; XIL: xilanasa; DMS: diferencia mínima significativa. Valores con literal diferente en cada columna de cada variable, indica diferencia estadística, con base en la prueba de Tukey (p<0.05).

Fuente: Elaboración propia formulada a partir de la información obtenida.

iThenticate Página 119 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

estadísticamente diferentes entre sí. El mayor contenido de MS fue para las variedades San Diego y Cacahuacintle, así como para los tratamientos CEL y XIL. Es de observar que el mayor aporte de FDN fue para los materiales P-1832, Victoria y San Diego, que resultaron estadísticamente iguales entre si (p<0.05), pero diferentes a la variedad San Diego. Es de observar que el mayor pH (p<0.05) fue para el híbrido Victoria, seguido de Cacahuacintle, los cuales fueron estadísticamente diferentes entre sí; con relación al uso de aditivos, el pH más alto fue para el testigo (tabla 7.2).

Producción de gas *in vitro*

Se encontró efecto significativo (p<0.05) en las variables medidas de producción de gas, tasa de fermentación y tiempo de retardo de incubación (*a, b, c*) respectivamente, tanto para los genotipos y los aditivos evaluados, así como para su interacción de dichos factores. La información analizada fue confiable, de acuerdo con el coeficiente de variación para las variables evaluadas, el cual estuvo entre 3.24 a 14.40% (tabla 7.1).

La aplicación de las enzimas y MM incrementaron la producción de gas, principalmente en las variedades criollas Cacahuacintle y San Diego, siendo estadísticamente iguales entre sí (p<0.05), pero diferentes a los híbridos evaluados. La tasa de fermentación fue estadísticamente mayor (p<0.05) para los criollos San Diego y Cacahuacintle Tlacotepec. En relación con la aplicación de aditivos, el uso de MM, CEL y XIL mostraron igualdad estadística y la mayor tasa de fermentación (p<0.05), observando el menor comportamiento para el control. El mayor tiempo de retardo de la incubación fue para el híbrido Victoria, seguido por las variedades Cacahuacintle Tlacotepec y San Diego, y el menor tiempo de incubación fue para el híbrido P-1832. En relación con los aditivos, el tratamiento control fue el de mayor tiempo de retardo de incubación, seguido por el tratamiento de MM, con diferencia estadística entre ambos (p<0.05), y los de menor tiempo fueron CEL y XIL, que resultaron con igualdad estadística (tabla 7.4).

iThenticate Página 119 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 120 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Discusión

Composición de carbohidratos

Los microsilos con el forraje de los cuatro genotipos de maíz usados en el presente experimento fueron abiertos a los 6 meses después de su almacenamiento, tiempo suficiente para estabilizar el proceso de fermentación y producir las diversas acciones propias del forraje en estado anaerobio; BM Editores (2019) aseveran que con al menos 4 meses de almacenamiento el ensilado se vuelve más digerible, dando a las enzimas el tiempo suficiente para descomponer las proteínas en aminoácidos y el ALM se encuentre más disponible para digestión; coincidiendo con Meléndez (2017), quien menciona que cuando el ensilado de maíz húmedo permanece sellado por alrededor de 4 meses, existe mayor exposición y degradabilidad del ALM, propiciando que aumente la producción de leche.

La actividad de XIL, CEL y la MM mostraron una mayor aportación de materia seca en las variedades criollas San Diego y Cacahuacintle con respecto a los híbridos P-1832 y Victoria. Lo anterior es atribuible a que con la adición de las enzimas fibroliticas exógenas se puede alterar la estructura de la fibra y estimular la colonización microbiana (Giraldo et al., 2004); influida además por los carbohidratos solubles (CS) como azúcares y almidones contenidos en el forraje, que de acuerdo a Gagliostro y Gaggioti (2002), los CS en las gramíneas varia de 50-150 a 200-300 g kg^{-1} MS en las plantas jóvenes y en las maduras; comportamiento similar encontrado en el presente trabajo para el forraje maduro del hibrido P-1832, de grano amarillo, con 287 g kg^{-1} MS, y para la variedad San Diego, también de grano amarillo, con 177 g kg^{-1} MS, al aplicarles XIL. En el estudio la producción de MS de la CEL, XIL y MM fue mayor con respecto al control, en donde Schingoethe et al. (1999) mencionan que con el uso de enzimas fibroliticas se aumenta la MS y la digestibilidad de la FDN; por otro lado, Kuhad et al. (2011) observaron que la actividad de las celulasas puede causar hidrólisis parcial de la pared celular vegetal durante el ensilaje.

El grano de maíz tiene como elemento principal al ALM. Este polisacárido es el producto final de la fijación de carbono durante la fotosíntesis, su

iThenticate Página 120 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 121 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

contenido en el endospermo de maíz incrementa proporcionalmente con el llenado del grano, esto comienza 8 días después de la polinización (DDP) y continua hasta los 45 DDP (Prioul et al., 2008); en la presente investigación los genotipos San Diego (grano amarillo), Cacahuacintle (grano blanco), Victoria (grano blanco) y P-1832 (grano amarillo), fueron cosechados 50, 56, 51 y 37 DDP, lo que precisa que el grano estuvo formado al momento de cosechar el forraje y tuvo un alto contenido de ALM; ya que de acuerdo a Agama-Acevedo et al. (2015), encontraron que el contenido de ALM en maíz blanco a los 20 y 50 DDP fue de 71 y 76 g 100 g^{-1}, y en maíz azul de 71 y 81 g 100 g^{-1}, respectivamente. El ALM es un azúcar o carbohidrato soluble que se encuentra en los granos de cereales y en los forrajes, como el ensilaje de maíz que por tener granos aporta ALM, cuyo contenido es del 20-45% (Meléndez, 2017); en el actual estudio se encontraron valores más bajos, tanto en los promedios de las variedades (9.5-15.2% de ALM) como en los híbridos (6.5-10.1% de ALM); sin embargo, hay que considerar que los cultivares de grano amarillo P-1832 y San Diego, tratados con XIL, tuvieron los valores mayores de 28.76 y 17.78% de ALM (tabla 7.3).

Tabla 7.3. *Promedios del contenido de almidón (%) en los cuatro genotipos de maíz ensilado por cuatro tratamientos con aditivos*

Genotipo/Aditivo	*Xilanasa*	*Celulasa*	*Miel de maguey*	*Control*	*Promedios genotipos*
Cacahuacintle (grano blanco)	13.76	12.56	02.51	09.35	09.54
San Diego (grano amarillo)	17.78	15.38	14.19	13.62	15.24
Victoria (grano blanco)	01.50	08.54	13.45	02.80	06.57
P-1832 (grano amarillo)	28.76	08.97	01.12	01.71	10.14
Promedios aditivos	15.45	11.36	07.82	06.87	

Fuente: Elaboración propia formulada a partir de la información obtenida.

En los forrajes, la mayor parte de sus carbohidratos son aportados por la fracción de la FDN (Meléndez, 2017). El forraje de maíz puede ser utilizado en la alimentación de rumiantes después de la mejoría de su valor nutritivo (Elghandour et al., 2014), utilizando enzimas fibroliticas exógenas para mejorar la degradación de los hidratos de carbono y la pared celular (Alsersy et al., 2015); lo cual concuerda con la disminución en el contenido de FDN al aplicar CEL y MM, en particular en los genotipos criollos evaluados (San Diego y Cacahuacintle), evidenciando esto al observar al testigo con

iThenticate Página 121 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 122 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

el mayor contenido de FDN; también Nsereko et al. (2000) hacen mención de que la adición de enzimas fibroliticas al forraje, antes de la ingestión, altera la estructura de los alimentos haciéndolos más susceptibles a la hidroólisis ruminal; por su parte Casler (2001) dice que la reducción de FDN representa un aumento en la proporción de componentes solubles de alta digestibilidad. Además de lo anterior, las dietas de las vacas lecheras deben contener un valor máximo y un mínimo de ALM, debido a que es una fuente rápida de energía que ayuda a mantener un ambiente ruminal optimo; en este contexto, la vaca lechera en la etapa productiva seca temprana requiere de un rango de ALM del 11 a 15%, en la etapa de preparto del 15 al 18% y en la etapa de media lactancia del 24 al 28% (Meléndez, 2017); en el presente estudio, el ensilaje de maíz de la variedad San Diego tratada con XIL, CEL y MM, con un contenido promedio de ALM de 17.7, 15.3 y 14.2, respectivamente, el tercero se acopla a los requerimientos de la vaca lechera en la etapa productiva seca temprana, el segundo y primero a la vaca en la etapa de preparto; y el ensilaje del híbrido P-1832 tratado con XIL con 28.7% de ALM, se puede utilizar para las vacas en la etapa de media lactancia (tabla 7.3).

En el experimento se observó que al incrementar el contenido de ALM en los genotipos evaluados, principalmente en los de grano amarillo, el pH disminuyo; coincidiendo con lo reportado por Van Soest (1994), quien menciona que al aumentar los niveles de ALM en una dieta, disminuye el pH.

Es de considerar que se encontró mayor contenido de ALM y menor cantidad de CEN cuando se tiene mayor porcentaje de MS y con menor MS se tiene menor contenido de ALM y mayor en CEN (tabla 7.2); comportamiento análogo en ensilaje de maíz reporta Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Anima (Fedna, 2019), quien menciona que con porcentajes <20 MS hubo menor contenido de ALM y mayor en CEN y con porcentajes >20 MS se determinó mayor ALM y menor cantidad de CEN.

Producción de gas *in vitro*

La XIL fue la enzima más eficiente en cuanto a la PG, tiempo de fermentación, tiempo de retardo de incubación y una mayor PG acumulada a 96 h;

iThenticate Página 122 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 123 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Colombato et al. (2003) mencionan que si la enzima afecta la PG hasta el final de la fermentación esto implicara que la enzima aumento el material fermentable. El aumento en la PG *in vitro* con el uso de enzimas puede permitir un mayor consumo voluntario de alimentos (Gado et al., 2009); situación donde Rojo et al. (2015) trabajando con cabras lactantes suplementadas con CEL consumieron aproximadamente 11% más de MS, materia orgánica (MO) y FDN en comparación con las cabras control, incrementando su producción de leche y mejorando su composición.

En relación al almidón, se ha propuesto que su degradación nocturna depende de la disponibilidad de las enzimas participantes en el proceso (Patricia-Coello y Martínez-Barajas, 2022) también se menciona que la degradación del almidón en tejidos fotosintéticos depende de un control que garantice que la mayor parte se use durante la noche (Fernández et al., 2017) en este sentido se señala que la degradación nocturna del almidón es promovida por la activación de las enzimas participantes, en respuesta a cambios que en el estroma de los cloroplastos promueven la alternancia de los periodos de luz y oscuridad (Patricia-Coello y Martínez-Barajas, 2022); en el presente trabajo XIL fue la enzima de mayor degradación de la materia seca y de mejor contenido de almidón, al igual que los genotipos San Diego y P-1832, situación que se presta a señalar que dichos genotipos de grano amarillo, bajo la aplicación de XIL, produjeron el suficiente almidón para que la planta realizara eficientemente la fotosíntesis durante el día y la noche.

La PG con la adición de XYL, CEL y MM tuvo un mejor comportamiento que el control, debido a su acción conjunta con las enzimas endógenas y otros microorganismos ruminales para propiciar actividad continua; en lo cual Beauchemin et al. (2004), dicen que en el modo de acción con la adición de las enzimas hidrolíticas exógenas (EFE) a la dieta de rumiantes aumenta la capacidad hidrolítica del rumen, debido a un incremento en el ataque bacteriano, a la estimulación de poblaciones microbianas del rumen y a un efecto sinérgico con las hidrolasas de los microorganismos ruminales; y que de acuerdo con Kung et al. (2000) se llega a la mejora del valor nutritivo de los alimentos y se crea estabilidad entre el complejo enzima-alimento.

En el presente experimento la dosis usada de 1 ml kg^{-1} MV, tanto de XYL, CEL y MM agregada al sustrato de maíz, fue efectiva de acuerdo a los resultados obtenidos de PG con actividad continua hasta las 96 h; Vallejo et al.

iThenticate Página 123 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 124 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(2016) en un estudio al trabajar con XIL y CEL a las dosis de 10, 20, 40 y 80 mg g^{-1} MS de forraje de maíz, se aumentó la PG a diferentes horas de incubación, obteniendo la mayor PG al adicionar 40 mg g^{-1} MS tanto de xilanasa como de celulasa, pero con 80 mg g^{-1} MS de xilanasa se obtuvo la menor PG; Cysneiros et al. (2006) no observaron efectos sobre la desaparición ruminal de MS al adicionar 5, 10 y 20 mg de enzimas fibrolíticas por kilogramo de ensilado de maíz a las 96 h; por su parte Beauchemin et al. (2003) mencionan que con altos niveles de enzimas adicionadas, se tiene reducción de impactos de acuerdo al sustrato usado.

La actividad de la XIL, CEL y MM se vio mayormente reflejada en los criollos Cacahuacintle y San Diego con respecto a los híbridos P-1832 y Victoria, dado su notable aumento en la PG, el tiempo de la tasa se fermentación y el tiempo de retardo de la incubación (tabla 7.4) lo cual pudo deberse a que el germoplasma adaptado a las tierras altas, a la adición de los azucares de la MM, además de la liberación de los polisacáridos de la planta de maíz.

Tabla 7.4. *Producción de gas de cuatro genotipos de maíz ensilado tratados con miel de maguey, celulasa, xilanasa y control*

Factores	*a*	*b*	*c*	*gas 96 h*
Genotipos				
San Diego (grano amarillo)	226.25a	0.0396a	1.27b	219.45a
Cacahuacintle (grano blanco)	229.08a	0.0380a	1.29b	220.20a
P1832 (grano amarillo)	209.83b	0.0304b	0.96c	194.41b
Victoria (grano blanco)	198.33c	0.0313b	2.85a	177.77c
DMS	7.74	0.0021	0.254	6.87
Aditivos				
MM	220.33b	0.0371a	1.87b	209.22b
CEL	221.41b	0.0362a	1.20c	211.97a
XIL	229.25a	0.0353a	1.05c	219.74a
Control	192.50c	0.0306b	2.25a	170.90c
DMS	7.74	0.0021	0.254	6.87

Nota: a: producción de gas (ml g^{-1} MS); b: tasa de fermentación (h^{-1}); c: tiempo de retardo de incubación (h^{-1}); gas 96 h: producción de gas a las 96 horas; MM: miel de maguey; CEL: celulasa; XIL: xilanasa; DMS: diferencia mínima significativa. Literales diferentes en columnas para cada variable indican diferencia significativa, con base en la prueba de Tukey ($p<0.01$).

Fuente: Elaboración propia formulada a partir de la información obtenida.

iThenticate Página 124 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 125 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Los criterios ligados a la PG fueron más eficientes para las variedades criollas San Diego y Cacahuacintle, con excepción del tiempo de retardo de incubación del híbrido P-1832 que registro el menor tiempo con 0.96 h, y que de acuerdo a Franco et al. (2015) fue el material vegetal más tardío con 176 días a la cosecha para ensilar, sobre esto Van Soest (1994) dice que un genotipo de madurez tardía que vegetativamente perdura durante un periodo más largo de tiempo, tendera a ser menos lignificado que un genotipo de madurez temprana.

Conclusiones

Con la adición de xilanasa, celulasa y miel de maguey a ensilados de maíz almacenados por seis meses, se incrementa la materia seca disponible, principalmente para las variedades San Diego y Cacahuacintle, haciendo al ensilaje más digerible dado el incremento de almidón y digestibilidad de la fibra detergente neutro, además de disminuir el pH.

1 Los maíces criollos Cacahuacintle y San diego tratados con xilanasa, celulasa y miel de maguey, mostraron la mayor producción continua de gas, mejorando el valor nutritivo de este alimento con la consecuente desaparición ruminal de la materia seca, lo que puede permitir un mayor consumo voluntario de forraje.

El contenido de almidón fue mayor en los genotipos de maíz amarillo San Diego y P-1832 cuando los ensilados fueron tratados con xilanasa.

La miel de maguey funciona como un aditivo que actúa en el proceso de fermentación y en la degradación de ensilajes de maíz.

Referencias

Agama-Acevedo, E., Barba de la Rosa, A P., Méndez-Montalvo, G., y Bello-Pérez, A. (2008). Physicochemical and biochemical characterization of starch granules isolated of pigmented mayze hybrids. *Starch/Starke, 60*, 433-441.

Alsersy, H., Salem, A. Z. M., Borhami, B. E., Olivares, J., Gado, H. M., Mariezcurrena, M. D., Yacuot, M. H., Kholif, A. E., El-Adawy, M., y Hernández, S. R. (2015). Effect of Mediterranean saltbush (Atriplex halimus) ensilaging with two developed enzyme cock-

iThenticate Página 125 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 126 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

tails on feed intake, nutrient digestibility, and ruminal fermentation in sheep. *Journal of Animal Science, 86*, 51-58.

Association of Official Analytical Chemists (1997). *Official Methods of Analysis* (16ª ed.). Association of Official Analytical Chemists.

Álvarez, A. E. (2009). *Determination of starch. Animal Nutrition Lab Procedures.* Desert Research and Extension Center.

Bates, G. (1998). *Corn silage*. Agricultural Extension Service. University of Tennessee.

Beauchemin, K. A., Colombatto, D., Morgavi, P. D., y Yang, Z. W. (2003). Use of exogenous fibrolytic enzymes to improve feed utilization by ruminants. *Journal of Animal Science, 81*(2), 37-47.

Beauchemin, K. A., Colombatto, D., Morgavi, D. P., Yang, W. Z., y Rode, L. M. (2004). Mode of action of exogenous cell wall degrading enzymes for ruminants. Can. *Journal of Animal Science, 84,* 13-22.

BMeditores (2019). *Digestibilidad del almidón en el ensilado de maíz y en el maíz con alto contenido de humedad.* https://bmeditores.mx/secciones-especiales/centro-de-informacion-de-ensilaje-de-calidad/

Casler, M. D. (2001). Breeding forage crops for increased nutritional value. *Advances in Agronomy, 7,* 51-107.

Colombatto, D., Mould, F. L. Bhat, M. K., y Owen E. (2003). Use of fibrolytic enzymes to improve the nutritive value of ruminant diets. A biochemical and in vitro rumen degradation assessment. *Animal Feed Science and Technology, 107,* 201-209.

Cysneiros, C. S. S., Franco, G. L., Ulhoa, C. J., Diogo, J. M. S., y Ramos, A. K. B. (2006). Efeito de enzimas fibrolíticas sobre a composição química da silagem de milho. *Ciência Animal Brasileira, 7*(4), 339-348.

Elghandour, M. M. Y., Vázquez, Ch. J. C., Salem, A. Z. M., Kholif, A. E., Martínez, C. J. S., Camacho, L. M., y Cerrillo-Soto, M. A. (2014). Effects of Saccharomyces cerevisiae at direct addition or pre-incubation on in vitro gas production kinetics and degradability of four fibrous feeds. *Italian Journal of Animal Science, 13*, 295-301.

Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (2019). *Ensilado de maíz*. http://www.fundacionfedna.org/forrajes/ensilado-de-maiz/

Fernandez, O., Ishihara, G., George, G. M., Mengin, A., Flis, A., Summer, D., y Stitt, M. (2017). Leaf starchturnover occurs in long days and in falling light at the end of the day. *Plant fhysiology, 174,* 2199-2212.

Franco, M. J. R. P., González, H. A., Pérez, L. D. J., y González, R. M. (2015). Phenotypic characterization of hybrids and varieties of forage maize in High Valley State of Mexico, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6*(8),1915-1927.

Gado, H. M., Salem, A. Z. M., Robinson, P. H., y Hassan, M. (2009). Influence of exogenous enzymes on nutrient digestibility, extent of ruminal fermentation as well as milk production and composition in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology, 154*, 36-46.

Gagliostro, G. A., y Gaggiotti, M. (2002). *Evaluación de alimentos para rumiantes e implicaciones productivas*. http://www.produccionbovina.com/tablas-composicion-alimentos/

iThenticate Página 126 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 127 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Giraldo, L. A., Ranilla, M. J., Tejido, M. L., y Carro, M. D. (2004). Effect of enzyme application method on in vitro rumen fermentation of tropical forages. *Journal of Animal and Feed Sciences, 13*, 63-66.

Huntington, G. B., Harmon D. L. and Richards C. J. (2006). Sities, rates and limits of starch digestion and glucose metabolism in growing cattle. *J Animal Sci 84*: E14.

Krishnamoorthy, U., Soller, H., y Menke, K. H. (1991). A comparative study on rumen fermentation or energy supplements in vitro. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 65,* 28-35.

Kuhad, R. Ch., Gupta, R., y Singh, A. (2011). Microbial cellulases and their industrial applications. Enzyme Research. *SAGE-Hindawi Access to Research,* 280696, 110.

Kung, J. L., Treacher, R. J., Nauman, G. A., Smagala, A. M., Endres, K. M., y Cohen, M. A. (2000). The effect of treating forages with fibrolytic enzymes on its nutritive value and lactation performance of dairy cows, *Journal of Dairy Sciences, 83*, 115-122.

Meléndez, P. (2015). *El almidón y su importancia en la nutrición de las vacas lecheras.* http://www.elmercurio.com/campo/noticias/analisis/el-almidon-y-su-importancia-en-la-nutricion-de-las-vacas-lecheras/

Meléndez, P. (2017). *Revisitando el concepto de la digestibilidad del almidón.* http://www.elmercurio.com/campo/noticias/analisis/revisitando-el-concepto-de-la-digestibilidad-del-almidon/

Menke, K. H., y Steingass H. (1988). Estimation of the energetic fed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development, 28*, 7-12.

Nsereko, V. L., Morgavi, D. P., Rode, L. M., Beauchemin, K. A., y McAllister, T. A. (2000). Effects of fungal enzyme preparations on hydrolysis and subsequent degradation of alfalfa hay fiber by mixed rumen microorganisms in vitro. *Animal Feed Science and Technology, 88*, 153-170.

Patricia Coello, L. B., y Martínez-Barajas E. (2022). Regulación de la degradación del almidón en las hojas. *Revista de Fitotecnia Mexicana, 45*(4), 503-507.

Prioul, J. L., Méchin V., Lessard P., Thévenot C., Grimmer M., Chateau-Joubert S., Coates S., Hartings H., Kloiber-Maitz M., Murigneux A., Sarda X., Damerval C., y Edwards K. J. (2008). A joint transcriptomic, proteomic and metabolic analysis of maize endosperm development and starch filling. *Plant Biotechnology Journal, 6*, 855-869.

Rojo R., Kholif A. E., Salem A. Z. M., Elghandour M. M. Y., Odongo N. E., Montes de Oca R., Rivero N., y Alonso M. U. (2015). Influence of cellulase addition to dairy goat diets on digestion and fermentation, milk production and fatty acid content. *Journal of Agricultural Science, 153*(8), 1514-1523. www.researchgate.net/publication/281273665

Schingoethe, D. J., Stegeman, G. A., y Treacher, R. J. (1999). Response of lactanting dairy cows to a cellulase and xylanase enzyme mixture applied to forages at the time of feeding. *Journal of Dairy Science, 82*(5), 996-1003.

Steel R. G. D., Torrie J. H., y Dickey D. A. (1997). Principles and Procedures of Statistics. En *A biometrical approach* (3ª ed.). McGraw Hill Book Co.

iThenticate Página 127 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 128 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Staples, C. R. (2003). *Corn silage for dairy cows. Institute of Food and Agricultural Sciences.* University of Florida.

Theodorou M. K., Williams B. A., Dhanoa M. S., McAllan A. B., y France J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology, 48,* 185-197.

Valdés, K. I., Salem, A. Z. M., López, S., Alonso, M. U., Rivero, N., Elghandour, M. M. Y., Domínguez, I. A., Ronquillo, M. G., y Kholif, A. E. (2015). Influence of exogenous enzymes in presence of Salix babylonica extract on digestibility, microbial protein synthesis and performance of lambs fed maize silage. *Cambridge Journal of Agriculture Science, 153*, 732-742.

Vallejo, L. H., Salem, A. Z. M., Kholif, A. E., Elghandour, M. M. Y., Fajardo, R. C., Rivero, N., Bastida A. Z., y Mariezcurrena, M. D. (2016). Influence of cellulase or xylanase on the in vitro rumen gas production and fermentation of corn stover. *The Indian Journal of Animal Science, 86*(1), 70-74.

Van Soest P. J., Robertson J. B., y Lewis B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science, 74*, 3583-3597.

Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell University. Press, Ithaca.

iThenticate Página 128 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 130 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

8. Aflatoxinas: contaminantes incidentes de alimentos en el mundo

Anayansi Escalante Aburto*
Adriana Villanueva Carvajal**
Néstor Ponce García***§

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.08

Resumen

Debido a la gran preocupación por la salud en relación con la ingestión de alimentos contaminados con micotoxinas alrededor del mundo, continuamente se realizan estudios para verificar la aparición y prevalencia de estas toxinas en la cadena alimentaria. Las micotoxinas son compuestos que se producen como resultado del metabolismo secundario de ciertos hongos o mohos, principalmente del género *Aspergillus* sección *Flavi*. Las micotoxinas más importantes en términos de afectación a la salud y de pérdidas económicas son las aflatoxinas (AFs). Dentro de éstas, la aflatoxina B1 (AFB1) es considerada la más tóxica, debido a los efectos cancerígenos que tiene en humanos. Los alimentos más susceptibles al crecimiento de hongos y, en consecuencia, a la producción de micotoxinas son las oleaginosas, cereales, frutas secas, granos de café, especias y leche. En algunos países aún no se han establecido límites máximos permisibles de estos compuestos en alimentos para ser consumidos de manera segura. Sin embargo, en la mayoría de las regiones que establecen normativas a este respecto, los alimentos normal-

§ Autor para correspondencia: nponceg@uaemex.mx
* Doctora en Ciencia de los Alimentos. Profesora-investigadora en el Instituto de Investigación en Obesidad del Tecnológico de Monterrey, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6781-5154
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2429-4387
*** Doctor en Ciencia de los Alimentos. Facultad de Ciencias Agrícolas por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9342-0095

iThenticate Página 130 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 131 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

mente sobrepasan los límites permitidos y son ampliamente consumidos por la población. El objetivo de esta revisión es conocer aspectos actuales relacionados con la contaminación de algunos cultivos comúnmente contaminados con AFS en diversas regiones del mundo.

Palabras clave: *aflatoxinas, micotoxicosis,* aspergillus.

Introducción

Los alimentos pueden contaminarse de manera natural debido a la presencia de diversas toxinas producidas por organismos vivos. Las micotoxinas, toxinas bacterianas y ficotoxinas son ejemplos representativos de algunas de ellas. Las micotoxinas se producen *in situ* en algunos alimentos (principalmente granos oleaginosos y cereales) y si las condiciones de manejo a lo largo de la cadena alimentaria no son las adecuadas, pueden transferirse con facilidad a otros alimentos y contaminarlos (Bhatnagar et al., 2014). Las micotoxinas conforman un amplio grupo de toxinas resultado del metabolismo secundario de ciertos hongos o mohos. Son compuestos no esenciales para mantener la vida de la célula de manera primaria, entre otras razones, porque no cumplen función alguna para obtener energía o sintetizar componentes estructurales. Sin embargo, la segregación de estas toxinas se ha asociado a que su función principal es dar ventaja competitiva a los hongos que las producen sobre otras especies, o sobre ciertas bacterias. La mayoría de las micotoxinas son citotóxicas, por lo que su principal daño es a nivel de estructura celular, interfiriendo en procesos como la síntesis de proteínas, ácido ribonucleico (ARN) y ácido desoxirribonucleico (ADN) (Lillard-Roberts, 2019).

Actualmente se conocen alrededor de 300 tipos de micotoxinas, pero la atención se ha centrado principalmente en aquellas con mayor efecto tóxico en la salud de humanos y animales (Zain, 2011). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020), entre las micotoxinas ligadas a problemas de salud derivados por su ingesta (directa o indirecta, aún a bajas concentraciones) destacan las aflatoxinas, fumonisinas, ocratoxinas, patulina, zearalenona y desoxinivalenol. Dependiendo del tipo de micoto-

iThenticate Página 131 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 132 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

xina, estas se generan antes o después de la cosecha de los cultivos, principalmente cuando las condiciones ambientales o del entorno son cálidas y húmedas. Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) calcula que alrededor del 25% de los cultivos que se cosechan en el mundo están contaminados con uno o más tipos de micotoxinas (FAO, 2019). Particularmente, por las aflatoxinas, que son los compuestos naturales conocidos más tóxicos para el humano y los animales (Méndez-Albores y Martínez-Moreno, 2009). Desafortunadamente y de acuerdo con datos de Alshannaq et al. (2018) se estima que aproximadamente la mitad de la población del mundo está expuesta a elevados (y no monitoreados) niveles de aflatoxinas.

En este contexto, la presente revisión aborda las principales condiciones que favorecen el desarrollo de hongos productores de aflatoxinas y la consecuente contaminación de alimentos como oleaginosas, cereales y especias por estas sustancias tóxicas en diversas regiones del mundo.

Principales hongos productores de micotoxinas

Los hongos que invaden y contaminan los cultivos directamente en campo se denominan "hongos de campo", mientras que aquellos que proliferan en productos almacenados son llamados "hongos de almacén". La división se basa en la ecología del hongo, es decir, las condiciones que favorecen su desarrollo y diseminación, de las cuales, la humedad ambiental y el contenido de humedad del producto parecen ser los factores más importantes, y al mismo tiempo, se encuentran intrínsecamente relacionados con la temperatura (Esmaeilishirazifard y Keshavarz, 2014). La contaminación posterior a la cosecha es más común si el proceso de secado del producto se retrasa, o si durante el almacenamiento el contenido de humedad del producto es lo suficientemente alto para propiciar el desarrollo de hongos, de igual forma, la presencia de insectos, roedores e impurezas pueden propiciar la aparición y desarrollo de hongos en productos almacenados (Wrather et al., 2010). La FAO ha determinado que el manejo postcosecha inadecuado de los productos, es la principal causa de deterioro y contaminación por hongos y micotoxinas a nivel mundial, preva-

iThenticate Página 132 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 133 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

leciendo sustancialmente este tipo de prácticas en los países con economías emergentes (FAO, 2019).

Dentro de los principales géneros de hongos de campo se encuentran Alternaria, Cladiosporum y Fusarium. Este tipo de hongos requieren que para su óptimo desarrollo el contenido de humedad del producto esté en equilibrio con alrededor del 90% de humedad relativa. Por otro lado, los hongos de almacén crecen cuando el contenido de humedad se encuentra en equilibrio con humedad relativa entre 70 y 90%. Las principales especies de hongos de almacén comprenden los géneros *Aspergillus* y *Penicillum*, las cuales encuentran un momento favorable de propagación, cuando alimentos como los granos se almacenen inadecuadamente a contenidos de humedad altos y temperaturas bajas (Shapira y Paster, 2004).

Aspergillus flavus

El género *Aspergillus* comprende alrededor de 200 especies de hongos. Desde el descubrimiento de las aflatoxinas, *A. flavus* se convirtió en la especie más estudiada y de mayor interés, dada su importancia en la contaminación de los alimentos e impacto negativo en la salud y economía mundial (Pleadin et al., 2014). La especie *A. flavus* comúnmente se desarrolla como saprófito del suelo y sólo produce esporas asexuadas y conidios (Amaike y Keller, 2011). A su vez, se divide en dos cepas, basadas en el tamaño de sus esclerocios: cepas L (Grupo (*i*) con esclerocios >400 mm de diámetro, y cepas s (grupo (*ii*) con esclerocios de tamaño <400 mm de diámetro (Cotty, 1989).

A. flavus suele estar presente en residuos agrícolas o como parásito de plantas e insectos (Perrone et al., 2010) y frecuentemente infecta cereales (arroz, maíz, trigo) y oleaginosas (algodón, cacahuates, nueces, pistaches). Es un hongo que para su desarrollo y potencial producción de aflatoxinas requiere entre 12°C y 48°C, así como una humedad relativa de 85% (Kumar et al., 2017) (tabla 8.1). Se desarrolla óptimamente en granos cuyo contenido de humedad oscila entre 18 y 18.5%, pero difícilmente logra propagarse cuando este parámetro es menor a 13% (Wrather et al., 2010).

La contaminación de productos con aflatoxinas puede variar considerablemente de un año a otro, e inclusive en una misma localidad; debido a

iThenticate Página 133 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 134 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

la variación de las condiciones del medio ambiente y de las prácticas agrícolas de cultivo que favorecen o atenúan el desarrollo de hongos toxigénicos. En campo, la rotación de cultivos y las buenas prácticas agrícolas incrementan la posibilidad de que hongos y micotoxinas no proliferen excesivamente, sin embargo, las condiciones del medio ambiente y al parecer el cambio climático, son los dos factores que mayor influencia tienen en el grado de infestación. Además, la producción y potencial contaminación de alimentos con micotoxinas discrepa considerablemente entre países, debido principalmente a las marcadas diferencias económicas, tecnológicas, culturales y de consumo entre ellos (Esmaeilishirazifard y Keshavarz, 2014).

Tabla 8.1. *Parámetros límites para el desarrollo de* Aspergillus flavus *y la producción de aflatoxinas*

Parámetro	*Desarrollo de A. flavus*			*Producción de aflatoxina*		
	Mínimo	*Óptimo*	*Máximo*	*Mínimo*	*Óptimo*	*Máximo*
Temperatura (°C)	10 a 12	33	43	13	16 a 31	31 1 37
Actividad de agua	0.8	0.98	>0.99	0.82	0.95-0.99	>0.99
pH	2	5 a 8	>11	-	-	-

Fuente: Adaptado de ICMSF (1996) y Herrera et al. (2014).

Aflatoxinas

Las aflatoxinas (AFS) se producen principalmente por el metabolismo secundario de dos especies de hongos del género *Aspergillus* como lo son *A. flavus* y *A. parasiticus,* aunque la producción de estas toxinas principalmente proviene de la sección *Flavi* (Norlia et al., 2019). La palabra "aflatoxina" se formó a partir de la letra 'A' (primera letra de *Aspergillus*), el término "fla" (de *flavus*) y la palabra toxina (Sarma et al., 2017). Las AFS son las micotoxinas que han recibido mayor atención e interés, debido a sus efectos cancerígenos, teratogénicos y mutagénicos en animales de laboratorio susceptibles, así como por las secuelas ocasionadas por la toxicidad aguda que provoca en humanos (Norlia et al., 2019). La acción o efecto derivado por su consumo o inhalación provoca una enfermedad definida como aflatoxicosis (Bedi y Khare, 2012).

iThenticate Página 134 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 135 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Se conocen más de 20 especies de aflatoxinas, siendo las de mayor interés AFB1, AFB2, AFG1 y AFG2, por el efecto nocivo que causan en la salud de humanos y animales, además del impacto económico asociado a la contaminación de alimentos (Hussain y Anwar, 2008). Las letras 'B' y 'G' distinguen a las aflatoxinas por su color flourescente bajo la luz ultravioleta (*B*: *blue* [azul], y G: *green* [verde]) (Esmaeilishirazifard y Keshavarz, 2014; Zumbado et al., 2014). El nivel de toxicidad entre estas cuatro aflatoxinas no es el mismo, ponderándose de la siguiente forma: B1>G1>-B2>G2 (Dors et al., 2011). La AFB1 es el compuesto natural con mayor potencial cancerígeno conocido, por lo que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer la ha clasificado dentro del grupo 1 (compuestos o mezclas con alto poder cancerígeno en humanos) (Méndez-Albores y Moreno-Martínez, 2009). *A. flavus* produce principalmente AFB1 y AFB2 (Kumar et al., 2017). Otro par de aflatoxinas de interés en los alimentos lo constituyen las AFM1 y AFM2; metabolitos hidroxilados derivados de AFB1 y AFB2, respectivamente. Las AFM1 y AFM2 comúnmente se encuentran en leche contaminada, cuyo origen puede atribuirse directamente a hatos lecheros que se alimentaron con productos infectados con AFB1 o AFB2 (Herrera et al., 2014).

Las temperaturas mínima, óptima y máxima para la producción de AFS son 13°C, 28°C y 40 a 43°C, respectivamente, mientras que valores en el contenido de humedad alrededor de 18% en granos de cereales y entre 9 y10% en oleaginosas, se consideran igualmente óptimos (Bedi y Khare, 2012). En términos de actividad de agua (AW), se ha documentado que la mayor producción de AFS ocurre cuando los valores son próximos a 0.99, siendo importante ponderar que este parámetro está íntimamente asociado con la temperatura del medio ambiente y el contenido de humedad del alimento (Sanchis y Magan, 2004). La tabla 8.1 muestra los parámetros límites más importantes para el desarrollo de *A. flavus* y la producción de aflatoxinas. Además de lo anterior, los granos dañados, la disponibilidad de dióxido de carbono (CO^2) y oxígeno (O^2), la aplicación de pesticidas y fungicidas, la afluencia de insectos y la concentración de esporas afectan la cantidad de aflatoxinas (Bryden, 2012).

Por otro lado, es tal el problema de alimentos contaminados con aflatoxinas a nivel mundial, que aproximadamente 100 países (que representan

iThenticate Página 135 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 136 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

87% de la población mundial) han regulado y legislado límites máximos tolerables de estos compuestos tóxicos en alimentos para consumo humano y animal (Coradi et al., 2016). Estos países cuentan con límites bien definidos principalmente para AFB1 y sólo algunos de ellos consideran concentraciones máximas para los otros tipos de aflatoxinas. Dependiendo del país y tipo de alimento, los niveles de tolerancia máximos para AFB1 oscilan entre 1 y 20 µg/kg, siendo el valor más común 4 µg/kg, implementado en 29 países (Guzmán-de-Peña y Peña-Carbiales, 2005).

Desafortunadamente, las AFS son muy estables y pueden llegar a resistir algunos procesos térmicos durante la preparación de alimentos tales como el tostado, la extrusión, el horneado, el freído y la nixtamalización (García y Heredia, 2014).

Sin embargo, se ha demostrado que la aplicación de ciertos procesos físicos, químicos o biológicos logran disminuir considerablemente la concentración de micotoxinas en alimentos contaminados, pero prácticamente ninguno de ellos por sí mismo o combinado las elimina por completo (Ponce-García et al., 2018). En este sentido, los procesos o métodos de descontaminación aplicados en un alimento que previamente presentó niveles o concentraciones de micotoxinas superiores a los estándares permitidos no necesariamente garantizan o implican que la concentración de las toxinas haya alcanzado límites permisibles, siendo en términos generales, probable que ello ocurra (Al-Zoreky y Saleh, 2019).

Incidencia de aflatoxinas en diferentes alimentos

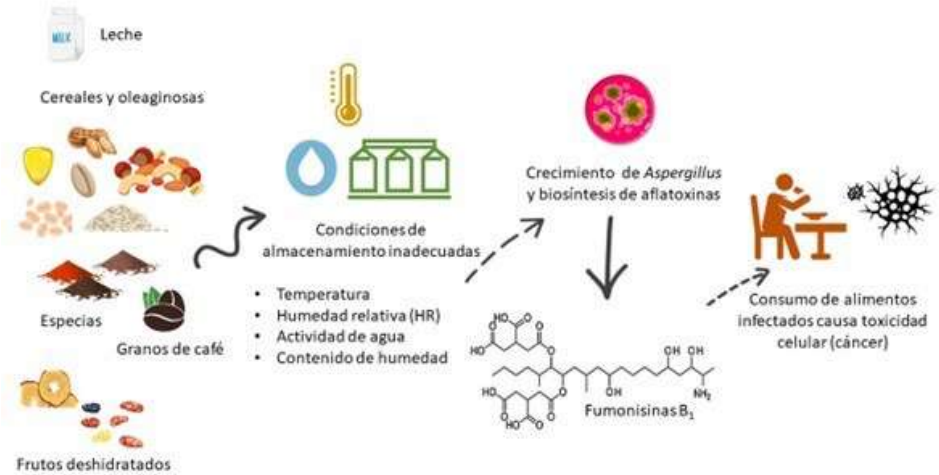
De acuerdo con una evaluación de los procesos de la cadena de suministro de alimentos, se ha determinado que *A. flavus* y sus respectivas aflatoxinas podrían estar presentes en cualquier eslabón de la cadena, desde el campo hasta la mesa (Norlia et al., 2019). A este respecto, el tema de la contaminación de alimentos con micotoxinas y, específicamente con AFS en el mundo, se encuentra bien documentada. La presencia de AFS ocurre en una amplia variedad de alimentos de consumo humano y animal, destacando por sobre otras la contaminación en semillas oleaginosas (nueces, cacahuates, pistaches, almendras), cereales (maíz, arroz, trigo, sorgo), granos de café, frutas

iThenticate Página 136 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 137 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

secas, especias y leche. La figura 8.1 esquematiza el proceso de contaminación de alimentos por aflatoxinas durante el su almacenamiento y los efectos por su consumo.

Figura 8.1. *Alimentos contaminados con aflatoxinas durante su almacenamiento inadecuado y sus efectos sobre la salud*



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el Sistema de Alerta Rápida para Alimentos (RASFF, por sus siglas en inglés) de la Unión Europea, los pistaches, cacahuates y maíz son los alimentos que con mayor frecuencia se contaminan con AFS (Herrera et al., 2014). Filazi y Tansel (2013) coinciden en señalar que oleaginosas como los cacahuates, las almendras y los pistaches son los productos más susceptibles de contaminación por AFS, mientras que en cereales determinaron que el arroz es significativamente la gramínea más viable de contaminarse, seguida del maíz.

A pesar de que las oleaginosas son los productos más susceptibles de infestación por AFS, la presencia de estas toxinas en los cereales tiene mayor impacto a nivel mundial. Lo anterior se explica debido a que los cereales conforman la base de la alimentación humana y animal en todas las regiones del mundo. Desafortunadamente, la acumulación de AFS en ellos ocurre prácticamente de manera natural tanto en campo (planta) como

iThenticate Página 137 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 138 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

durante su almacenamiento (granos). Sin embargo, e independientemente del tipo de cultivo, Santini y Ritieni (2013) señalaron que muchos sustratos y condiciones ambientales favorecen el desarrollo de hongos aflatoxigénicos y la consecuente producción de AFS, por lo que la contaminación natural de cereales, oleaginosas, higos, tabaco y una larga lista de cultivos, puede considerarse como una situación común.

Oleaginosas y derivados

Algunos cultivos de vaina (como los cacahuates) suelen contaminarse cuando las vainas que cubren las semillas tienen contacto directo con el suelo que a su vez está contaminado con hongos aflatoxigénicos. Si esto ocurre, los hongos pueden invadir y producir toxinas en los granos antes de la cosecha, mientras se realiza el secado y durante el almacenamiento, si es que éste se realiza en condiciones inadecuadas; en este tipo de productos, el problema central radica en el hecho de que una vez que el hongo infecta los granos, los niveles de AFS se incrementan considerablemente (Fu et al., 2008). En otro estudio realizado en granos de cacahuate, Norlia et al. (2019) precisaron que una vez que los granos se contaminan con AFS no es posible eliminarlas, por lo que las prácticas de manejo preventivo para reducir o evitar la presencia de estos compuestos tóxicos a lo largo de la cadena resultan de suma importancia.

Bedi y Khare (2012) reportaron presencia frecuente de AFS en diferentes alimentos y países, y entre sus hallazgos más relevantes fue una elevada concentración de AFS en residuos de extractos oleaginosos procesados en Alemania; en productos a base de cacahuate en Australia; en granos de soya producidos en Bangkok; en pistaches cosechados en Irán, Pakistán y Turquía, así como en muestras de cacahuates importados en el Reino Unido y Rusia.

iThenticate Página 138 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 139 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Cereales y derivados

Numerosos estudios han reportado detalladamente la presencia de aflatoxinas en diferentes tipos de cereales, destacando las investigaciones en maíz, cebada y avena (Pleadin et al., 2014); maíz, arroz, sorgo y trigo (Andrade y Caldas, 2015); arroz, maíz, trigo, sorgo y cebada (Filazi y Tansel, 2015); arroz, maíz y trigo (Mousavi et al., 2018). El maíz es el alimento de mayor preocupación mundial respecto a la incidencia de AFS, debido a que se cultiva en climas que probablemente tengan contaminación perenne de este tipo de micotoxinas (Santini y Ritieni, 2013). Pleadin et al. (2014) precisaron que los niveles más elevados de AFB1 en cereales se presentan en maíz en comparación con el trigo, cebada y avena (en la cual se presentaron los niveles más bajos).

Las especies de *Aspergillus* que colonizan con mayor intensidad al maíz son *A. flavus* y *A. parasiticus*, sin embargo, en la mayoría de los países y regiones con problemas de contaminación por aflatoxinas (Estados Unidos, México, y Sudamérica) la presencia de *A. parasiticus* es poco común (Payne y Widstrom, 1992). Se ha demostrado que el tipo de hongo y su respectiva concentración de conidios, así como el contenido de humedad de los granos juegan un papel crítico en el inicio de la producción de AFS en este cereal (Oyebanji y Efiuvwevwere, 2014).

Castillo-Urueta et al. (2011) realizaron un estudio en la ciudad de México para evaluar la presencia de AFS en 400 muestras de tortillas de maíz adquiridas en diferentes tortillerías y supermercados. Los resultados mostraron que 13% de las muestras analizadas superó el límite de AFS permisibles (12µg / kg) para ese producto. Torres et al. (2015) reportaron una alta frecuencia de AFS en productos alimenticios elaborados a base de maíz en Guatemala, donde 22% de las muestras evaluadas resultaron positivas. En un estudio similar establecido en Costa Rica, Granados-Chinchilla et al. (2017) comprobaron que la prevalencia de AFS fue positiva en 24 y 10.8% de las muestras destinadas para consumo humano y animal, respectivamente. En ambos tipos de alimentos, la presencia más elevada de AFS correspondió a productos elaborados a base de maíz. Bedi y Khare (2012) reportaron concentraciones elevadas de AFS en maíz en Kenya, Filipinas, Tailandia, Rusia, Pakistán, Irán, China, Malasia, India, Nigeria y Estados Unidos; en granos

iThenticate Página 139 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 140 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de sorgo provenientes de Uganda, Pakistán, India y Centroamérica, además de alta prevalencia en granos de trigo y mijo en Nigeria.

La FAO estimó que 15% de arroz que se cosecha cada año, se contamina con hongos y otros agentes perjudiciales, debido a las condiciones inapropiadas de almacenamiento (Dors et al., 2011). Elzupir et al. (2017) analizaron la prevalencia de AFS en arroz alrededor del mundo durante el periodo comprendido entre 2004 y 2014.

Ali (2019) estudió la ocurrencia de AFS en arroz a nivel mundial y el efecto adverso de su consumo en la salud y concluyó que existe una amplia variación en los niveles de contaminación, principalmente entre países emergentes y desarrollados. En contraste, Al-Zoreky y Saleh (2019) evaluaron el contenido de AFS en arroz proveniente de países como India, Pakistán, Estados Unidos, Egipto y Australia y concluyeron que los niveles totales de AFS y específicamente de AFB1 se encontraba dentro de los límites permisibles de acuerdo con los lineamientos de la Unión Europea. La influencia que tienen la temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento sobre el comportamiento de *A. flavus* en arroz, quedó demostrada cuando las concentraciones de esta especie de hongo permanecieron constantes y la producción de AFS no se presentó bajo condiciones de almacenamiento a 21°C y 85% de humedad relativa, mientras que las poblaciones y concentraciones más levadas de *A. flavus* y AFB1, se presentaron a 21°C y 97% de humedad relativa (Choi et al., 2015).

Especias

Las especias forman parte esencial de la alimentación, debido a sus atributos como potenciadores de sabor y aroma, e incluso como ingrediente para prolongar la vida de anaquel de diversos alimentos preparados, desafortunadamente y al igual que las oleaginosas y los cereales, algunas especias son propensas a contaminarse con AFS, principalmente porque se producen en regiones tropicales donde las condiciones ambientales favorecen la propagación de hongos (Filazi y Tansel, 2015).

De acuerdo con Khazaeli et al. (2017) la Unión Europea ha establecido en especias una concentración máxima tolerable de aflatoxinas totales de

iThenticate Página 140 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 141 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

10 mg / kg, mientras que para AFB1 el límite permisible es 5 mg / kg. Zahara et al. (2018) evaluaron la incidencia de aflatoxinas en chiles rojos y pimienta negra, determinando que 39 y 18% de las muestras respectivamente se encontraban contaminadas con AFB1.

De manera similar, Khazaeli et al. (2017) determinaron que 100% de las muestras analizadas de pimienta roja resultaron positivas para AFS y que, del total de especias y hierbas estudiadas, 30.8% tuvieron presencia de AFB1. De acuerdo con los resultados, la contaminación por aflatoxinas en las especias, incluso a niveles bajos, puede ser una amenaza grave, dado el uso frecuente de estas en la preparación de alimentos. Por lo cual, el monitoreo regular de estos cultivos (especialmente la pimienta roja), es muy recomendable.

Conclusiones

La elevada y creciente contaminación de cultivos y alimentos con aflatoxinas alrededor del mundo, ha despertado un gran interés en diferentes sectores de la comunidad científica, tanto por el impacto que causan en la salud de humanos y animales, así como por las pérdidas económicas generadas en todos los eslabones de la cadena alimentaria. Si bien las condiciones ambientales en campo pueden favorecer el desarrollo y diseminación de hongos que producen micotoxinas, el inadecuado manejo postcosecha de los productos que son más susceptibles, es el factor que más favorece este tipo de contaminación.

Diferentes tipos de micotoxinas pueden estar presentes en los alimentos, pero a la fecha, la aflatoxina B1 es el compuesto natural más tóxico que se conoce y por desgracia sus concentraciones rebasan los límites permisibles en alimentos como el maíz, arroz, cacahuates, pistaches y pimienta.

El control de aflatoxinas se debe centrar en métodos de control preventivos que al menos involucren la realización de buenas prácticas agrícolas, manejo postcosecha (transporte y almacenamiento) oportuno y adecuado, además de un procesamiento de materias primas sustentado en buenas prácticas de manufactura e higiene.

iThenticate Página 141 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 142 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Ali, N. (2019). Aflatoxins in rice: Worldwide occurrence and public health perspectives. *Toxicology Reports, 6,* 1188-1197.

Alshannaq, A. F., Gibbons, J. G., Lee, M-K., Han, K-H., Hong, S-B., y Yu, J-H. (2018). Controlling aflatoxin contamination and propagation of Aspergillus flavus by a soy-fermenting Aspergillus oryzae strain. *Scientific Reports, 8*(1), 1-14.

Al-Zoreky, N. S., y Saleh, F. A. (2019). Limited survey on aflatoxin contamination in rice. *Saudi Journal of Biological Sciences, 26*(2), 225-231.

Amaike, S., y Keller, N. P. (2011). Aspergillus flavus. *Annual Review of Phytopathology, 49*, 107-133.

Andrade, P. D., y Caldas, E. D. (2015). Aflatoxins in cereals: worldwide occurrence and dietary risk assessment. *World Mycotoxin Journal, 8*(4), 415-431.

Bedi, P. S., y Khare, R. (2012). Aflatoxins: Occurrence and their effects-A Review. *Current Trends in Biotechnology and Chemical Research, 2*(1), 15-25.

Bhatnagar, D., Payne, G., Klich, M., y Leslie, J. F. (2014). Identification of toxigenic Aspergillus and Fusarium species in the maize grain chain. En J. F. Leslie y A. F. Logrieco (Eds.), *Mycotoxin Reduction in Grain Chains*. Wiley Blackwell.

Bryden, W. L. (2012). Mycotoxin contamination of the feed supply chain: Implications for animal productivity and feed security. *Animal Feed Science and Technology, 173*(1-2), 134-158.

Castillo-Urueta, P., Carvajal, M., Méndez, I., Meza, F., y Gálvez, A. (2011). Survey of aflatoxins in maize tortillas from México city. *Food Additives & Contaminants: Part B. 4*(1), 42-51.

Choi, S., Jun, H., Bang, J., Chung, S-H., Kim, Y., Kim, B.-S., Kim, H., Beuchat, L. R., y Ryu, J.-H. (2015). Behaviour of Aspergillus flavus and Fusarium graminearum on rice as affected by degree of milling, temperature, and relative humidity during storage. *Food Microbiology, 46*, 307-313.

Coradi, P. C., Maier, D. E., Channaiah, L. H., y Campabadal, C. (2016). Effect of the processing on the distribution of aflatoxin and fumonisin levels in corn fractions and feeds. *Journal of Food Process Engineering, 39*(3), 215-225.

Cotty, P. J. (1989). Virulence and cultural characteristics of two Aspergillus flavus strains pathogenic on cotton. *Phytopathology, 79*(7), 808-814.

Dors, G. C., Souza, C. S., Feddern, V., Heidtmann, B. R., Dos Santos, H. H. C., Morales, de S. M., Dos Santos, O. M., Garda-Buffon, J., Gilberto, P. E., y Badiale-Furlong, E. (2011). Aflatoxins: Contamination, analysis and control. En R. Guevara-González (Ed.), *Aflatoxins. Biochemistry and Molecular Biology* (pp. 415-438). IntechOpen.

Elzupir, A. O., Alamer, A. S., y Dutton, M. F. (2017). Aflatoxin in rice crop: Prevalence and assessment of daily exposure. En J. M. Mérillon y K. Ramawat (Eds.), *Fungal Metabolites* (pp. 219-237). Springer.

Esmaeilishirazifard, E., y Keshavarz, T. (2014). Aflatoxin occurrence. En A. G. Faulkner

iThenticate Página 142 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 143 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(Ed.), *Aflatoxins. Food sources, occurrence and toxicological effects* (pp. 35-62). Nova Publishers.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2019). http://www.fao.org/faostat/en/#home

Filazi, A., y Tansel, S. U. (2013). Occurrence of aflatoxins in food. En A. G. Faulkner (Ed.), *Aflatoxins-Recent Advances and Future Prospects* (pp. 143-170). Intech Open.

Fu, Z., Huang, X., y Mina, S. (2008). Rapid determination of aflatoxins in corn and peanuts. *Journal of Chromatography A, 1209*(1-2), 271-274.

García, S., y Heredia, N. L. (2014). Aflatoxins: An overview. En J. B. Dixon, V. A. L. Barrientos y Y. Deng (Eds.), *Aflatoxin Control: Safeguarding animal feed with calcium smectite* (pp. 1-10). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.

Granados-Chinchilla, F., Molina, A., Chavarría, G., Alfaro-Cascante, M., Bogantes-Ledezma, D., y Murillo-Williams, A. (2017). Aflatoxins occurrence through the food chain in Costa Rica: Applying the one health approach to mycotoxin surveillance. *Food Control, 82*, 2017-226.

Guzmán-de-Peña, D., y Peña-Carbiales, J. J. (2005). Regulatory considerations of aflatoxin contamination of food in Mexico. *Revista Latinoamericana de Microbiología, 47*(3-4), 160-164.

Herrera, M., Herrera, A., y Ariño, A. (2014). Aflatoxins in food and feed: Contamination exposure, toxicology and control. En A. G. Faulkner (Ed.), *Aflatoxins. Food sources, occurrence and toxicological effects* (pp. 63-89). Nova Publishers.

Hussain, I., y Anwar, J. (2008). A study on contamination of aflatoxin M1 in raw milk in the Punjab province of Pakistan. *Food Control, 19*(4), 393-395.

International Commission on Microbiological Specifications for Food (1996). *Toxigenic Fungi: Aspergillus Microorganism in foods 5. Characteristics of food pathogens* (pp. 347-381). Academic Press.

Khazaeli, P., Mehrabani, M., Heidari, M. R., Asadikaram, G., y Lari Najafi, M. (2017). Prevalence of aflatoxin contamination in herbs and spices in different regions of Iran. *Iran Journal of Public Health, 46*(11), 1540-1545.

Kumar, P., Mahato, D. K., Kamle, M., Mohanta, T. K., y Kang, S. G. (2017). Aflatoxins: A global concern for food safety, human health and their management. *Frontiers in Microbiology, 7,* 1-10.

Lillard-Roberts, S. (2019). Micotoxins List. *Boletim Científico,* (46). Mold Help Organization. https://docplayer.net/32968499-Mycotoxin-list-boletim-cientifico-no-46-susan-lillard-roberts-mold-help-organization.html

Méndez-Albores, A., y Moreno-Martínez, E. (2009). Las micotoxinas: Contaminantes naturales de los alimentos. *Ciencia, 60*(3), 1-7.

Mousavi, K. A., Eş, I., Raeisi, S., y Fakhri, Y. (2018). Aflatoxins in cereals: State of the art. *Journal of Food Safety, 38*(6), 1-7.

Norlia, M., Jinap, S., Nor-Khaizura, M. A. R., Radu, S., Samsudin, N. I. P,. y Azri, F. A. (2019). Aspergillus section Flavi and aflatoxins: Occurrence, detection, and identification in raw peanuts and peanut-based products along the supply chain. *Frontiers in Microbiology, 10,* 1-17.

iThenticate Página 143 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 144 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Organización Mundial de la Salud (2020). *Micotoxinas*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins.

Oyebanji, A. O., y Efiuvwevwere, B. J. O. (1999). Growth of spoilage mould and aflatoxin B1 production in naturally contaminated or artificially inoculated maize as influenced by moisture content under ambient tropical condition. *International Biodeterioration & Biodegradation, 44*(4), 209-217.

Payne, G. A., y Widstrom, N. W. (1992). Aflatoxin in maize. *Critical Reviews in Plant Sciences, 10*(5), 423-440.

Perrone, G., Gallo, A., y Susca, A. (2010). Aspergillus. En D. Liu (Ed.), *Molecular Detection of Foodborne Pathogens. Section IV Foodborne Fungi* (pp. 529-548). CRC Press. Taylor and Francis Group.

Pleadin, J., Markov, K., Frece, J., Vulić, A., y Perši, N. (2014). Bio-Prevalence, determination and reduction of aflatoxin B1 in cereals. En A. G. Faullner (Ed.), *Aflatoxins. Food sources, occurrence and toxicological effects* (pp. 1-34). Nova Publishers.

Ponce-García, N., Serna-Saldivar, S. O., y García-Lara, S. (2018). Fumonisins and their analogues in contaminated corn and its processed foods-a review. *Food Additives & Contaminants: Part A, 35*(11), 2183-2203.

Sanchis, V., y Magan, N. (2004). Environmental conditions affecting mycotoxins. En N. Magan y M. Olsen (Eds.), *Mycotoxins in Food. Detection and Control. Part II. Controlling Risks* (pp. 174-189). CRC Press.

Santini, A., y Ritieni, A. (2013). Aflatoxins: Risk, exposure and remediation. En M. Razzaghi-Abyaneh (Ed.), *Aflatoxins - Recent Advances and Future Prospects* (pp. 343-376). Intech Open.

Sarma, U. P., Bhetaria, P. J., Devi, P., y Varma, A. (2017). Aflatoxins: Implications on health. *Indian Journal of Clinical Biochemistry, 32*(2), 124-133.

Shapira, R., y Paster, N. (2004). Control of mycotoxins in storage and techniques for their decontamination. En N. Magan y M. Olsen (Eds.), *Mycotoxins in food detection and control* (pp. 190-133). CRS Press.

Torres, O., Matute, J., Gelineau-van Waes, J., Maddox, J. R., Gregory, S. G., Ashley-Koch, A. E., Showker, J. L., Voss, K. A., y Riley, R. T. (2015). Human health implications from co-exposure to aflatoxins and fumonisins in maize-based foods in Latin America: Guatemala as a case study. *World Mycotoxin Journal, 8*(2), 143-159.

Wrather, A., Sweets, L., Bailey, W., Claxton, T., Sexten, J., y Carlson, M. (2010). *Aflatoxins in corn. Agricultural MU Guide* (pp. 1-4). University of Missouri Extension.

Zahara, N., Khan, M., Mehmood, Z., Saeed, M. K., Kalim, I., Ahmad, I., y Malik, K. A. (2018). Determination of aflatoxins in spices and dried fruits. *Journal of Scientific Research, 10*(3), 315-321.

Zain, M. E. (2011). Impact of mycotoxins on humans and animals. *Journal of Saudi Chemical Society, 15*(2), 129-144.

Zumbado, S. C. A., Ulloa, F. M., y Rojas, S. G. (2014). Aflatoxina B1 y su relación con el cáncer hepático. *Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica, 71*(612), 637-641.

iThenticate Página 144 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 146 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

9. Situación actual de la mecanización agrícola en cuatro municipios del valle de Toluca

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.09

Francisco Gutiérrez Rodríguez*§
Jesús Hernández Ávila**
Gaspar Estrada Campuzano***
Andrés González Huerta****
Rodolfo Serrato Cuevas****
Carlos Gustavo Martínez Rueda****

Resumen

Para el agricultor mexicano, la mecanización agrícola es principalmente atractiva porque permite un aumento sustancial en la productividad de las labores, ya que con ello se abaten costos de la producción, así como reducción de tiempo en los períodos de siembra y de labores culturales, procurando reducir los costos de inversión; por lo cual es necesario conocer el nivel de mecanización agrícola que tienen los municipios que conforman el eje urbano-agrícola (actividades agropecuarias), esto es: Toluca-Metepec, Zinacantepec y Almoloya de Juárez, del Estado de Mé-

§ Autor para correspondencia: fgutierrezr@uaemex.mx
* Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1464-0976
** Doctor en Gobierno y Administración Pública. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4544-9250
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002–1189-0470
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
**** Doctor en Ciencias Ambientales. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5639-4542
**** Doctor en Ciencias. Profesor de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9644-5757

iThenticate Página 146 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 147 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

xico; puesto que poseen características agrícolas similares, con un nivel tecnológico agrícola óptimo. De acuerdo a la investigación realizada ningún tractor sobrepasa las 450 moto horas (MH)de trabajo al año, la relación superficie tractor en el municipio de Almoloya de Juárez es de 12.81 ha / tractor, la más alta; mientras que la menor es de 4.44 ha / tractor en Toluca-Metepec; por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) plantea como óptimo un rendimiento de 50 ha / tractor. La relación implemento por tractor se considera buena, ya que la más baja para implementos de preparación primaria de suelos es de 0.98 en Toluca-Metepec, mientras que en los demás municipios la relación es mayor de 1.0. En lo referente a la vida útil de los tractores es importante señalar que 46% de estos se compraron entre los años 2007 y 2017; 11.2% son tractores de la marca Ford, que tienen un promedio de vida útil de 20 años, considerándose un parque de máquinas agrícolas obsoleto, de acuerdo con el avance científico, técnico y tecnológico a nivel global.

Palabras clave: *tractores, máquinas agrícolas, potencia, sistema de rodaje.*

Introducción

La mecanización de la agricultura es un factor de la producción agrícola comparable a la que tienen los recursos naturales como clima, suelo y agua; es uno de los medios para elevar la productividad de los procesos de trabajo. Ésta permite aplicar con mejores resultados y eficiencia factores importantes de la intensificación de la producción como el riego, fertilización, introducción de nuevas variedades y cultivos y razas de animales, técnicas de manejo y control en la producción de cultivos.

La mecanización generalizada y la intensificación de la producción constituyen un camino fundamental para la modernización de la agricultura mexicana y la satisfacción de la creciente demanda de productos agrícolas en el país. El análisis del escenario en la rama de la mecanización permite plantear que México, a partir de una frontera agrícola con 24 000 000 ha, posee una superficie mecanizable de 18 600 000 ha, para lo cual se requieren

iThenticate Página 147 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 148 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

del orden de 360 000 tractores con potencias de 28, 32 y hasta 44.74 kW (de 50 a 60 caballos de vapor (CV) (Negrete, 2006).

Estimaciones de la industria de construcción de tractores en México indican que el parque de maquinaria agrícola en 2003 ascendió a 175 000 tractores, los cuales trabajan una superficie de 18 000 000 ha (Negrete, 2006), con una relación de 102 ha / tractor. De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA, 2017) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), del total de tractores propios 44.3% cuentan con más de 15 años de uso; 12.1%, de 10 a 15 años; 19.7%, de 5 a 10 años; 16.9%, hasta 5 años, y 7.1%, no fue especificado.

El estudio de la productividad del conjunto máquina tractor tiene capital importancia, como instrumento de aplicación práctica para la mejor utilización de los recursos destinados a la agricultura (Soto, 1983).

La mecanización agrícola ha tenido efectos de largo alcance en la agricultura, ha logrado que ésta sea más eficiente y productiva, lo que ha permitido que la población quede disponible para otras ocupaciones, y esto ha permitido a nuestro país convertirse, de una nación casi totalmente agrícola, en una potencia industrial (Soto, 1983). Es necesario mostrar, según algunos investigadores las horas de trabajo por hectárea para algunos cultivos en la república mexicana: según Reina (2004) y Slater (2008), así mismo, Collado (1986) y Cadena (1997) el tiempo real promedio en México de preparación de tierras, siembra, fertilización, aplicación de pesticidas y cultivos, es de aproximadamente de 14 h / ha. Estos datos de Reina (2004) y Slater (2008) fueron utilizados por Negrete et al. (2013).

La mecanización agrícola tiene lugar bajo especiales condiciones y algunos de sus factores los cuales no pueden ser controlados por el hombre. Ello constituye una limitación, que a diferencia de la industria, las labores agrícolas no se pueden distribuir en el tiempo ni a voluntad, ni uniformemente. Si no que es necesarios realizarlas en tiempos determinados en dependencia de la estación del año, de las condiciones climatológicas y del suelo, factores que en la mayoría de los casos no pueden ser controlados plenamente por el hombre y que incidirán sobre la economía de la explotación (Garrido, 1984). La mecanización no es un proceso que se produce de forma aislada, es decir, existe una estrecha relación entre proceso como tal, y las características de los diferentes cultivos ya que no

iThenticate Página 148 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 149 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

presentan iguales requisitos. Estas poseen diferentes especificidades; de igual forma distintas variedades de plantas dentro de las mismas especies tampoco manifiestan el mismo comportamiento lo que incide de una u otra forma sobre mecanización (Iofinov, 1984).

Materiales y métodos

Los municipios objeto de estudio se encuentran ubicados en el valle de Toluca, en la zona central del Estado de México. Los municipios estudiados fueron los siguientes: (a) Toluca de Lerdo: El uso del suelo correspondiente a la agricultura es de 37.01% (15 540 ha) y su uso potencial para la agricultura mecanizada es de de 100%; (b) Zinacantepec: El uso del suelo agrícola es de 45.52% (14 566 ha) y su uso potencial para la agricultura mecanizada es de 55%; (c) Metepec: A este municipio corresponde una superficie con vocación agrícola de 31.95% (2 157 ha), de las cuales se ubican con una agricultura mecanizada de 94%; (d) Almoloya de Juárez: El municipio cuenta con una extensión territorial de 67.52 km^2, La superficie agrícola estimada en 29 747 6 ha, 61.47% del territorio municipal, de las cuales 29 608 ha (99%) se utilizan para el cultivo de maíz, en el régimen de temporal (INEGI, 2009). El presente estudio es exploratorio, descriptivo, no experimental; es transaccional descriptivo porque ha tenido como propósito conocer la situación actual de la funcionalidad de las máquinas agrícolas en particular de los tractores.

El estudio transversal es un diseño de investigación de uso frecuente. Se trata de estudios observacionales, se han considerado aspectos relacionados con la población estudiada, los sujetos o empresas de quienes se obtuvo la información fue voluntaria. Para la recolección de datos se aplicó un instrumento tipo matriz, previamente diseñado, que permitió describir estadísticamente las variables de: nombre y tipo de productor, ubicación, tipo de cultivo, superficie, tipo de máquina agrícola, marca, modelo, potencia, numero de implementos o accesorios agrícolas, programa de mantenimiento: preventivo o correctivo, preparación técnica, cultivos, superficie agrícola, edad de los tractores, cantidad de implementos y máquinas agrícolas, etc. Antes de realizar las encuestas a los agricultores de los cuatro municipios

iThenticate Página 149 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 150 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

se calculó el tamaño de las muestras, de acuerdo con las fórmulas planteadas por Aguilar-Barojas (2005).

Con este estudio se pretende explicar la competitividad de las máquinas agrícolas en los tractores a partir de la teoría económica en general. La metodología aplicada se basa en el reconocimiento de las unidades primarias, llámese productores agrícolas y la economía global para explicar el funcionamiento y operación de los tractores agrícolas con la dinámica de la realidad. El alcance del impacto socioeconómico, que se pretende lograr a través del conocimiento del balance del conjunto máquina-tractor, el cual conlleve a una relación óptima en función de lograr aumentar la productividad del trabajo y con ello hacer que su economía sea de mayor cuantía, dándole un uso más racional de su conjunto máquina-tractor. Los índices que se analizan en esta investigación son los siguientes y siguen un patrón de los siguientes autores: dinámica de compra de tractores en los últimos 10 años, relación de superficie por tractor agrícola, cantidad de máquinas agrícolas por tipos, cantidad de tractores en función de su potencia, cantidad de tractores en función de su sistema de rodaje, cantidad de tractores por marca. Para el estudio se tomaron como referencia los índices propuestos por los siguientes investigadores: Karpenko (1989), Larque-Savedra (2012), Gutiérrez (1990) y Mogorianu (1987).

Resultados y discusión

De acuerdo a la cantidad calculada de tractores que poseen los agricultores, se realizaron las encuestas de forma aleatoria, en la gráfica 9.1 se muestran las cantidades de encuestas realizadas en cada uno de los municipios y la cantidad de tractores, en algunos casos la cantidad de tractores están por encima de las encuestas realizadas, ya que hay agricultores que tienen más de un tractor que es el caso de Almoloya de Juárez y con la excepción del municipio de Metepec, los demás tuvieron un comportamiento idéntico, por las razones antes expuestas.

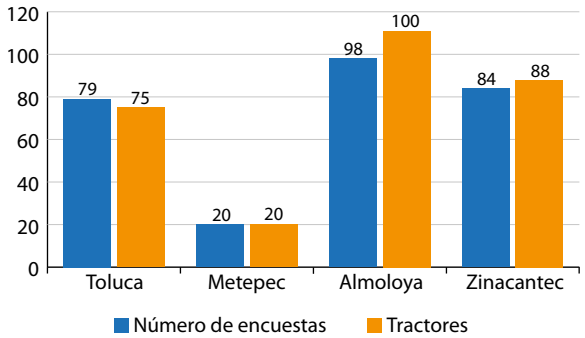
Las encuestas realizadas se tomaron al azar en cada uno de los diferentes municipios, hasta completar la cantidad de tractores calculados, con los distintos propietarios. Como se puede observar el municipio de Metepec,

iThenticate Página 150 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 151 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

tiene una pequeña cantidad de tractores debido al desarrollo habitacional por un crecimiento poblacional e industrial, lo que resulta que la superficie agrícola, día a día es menor, es decir las propiedades rurales han disminuido y su población se dedica poco a las labores del campo.

Gráfica 9.1. *Encuestas realizadas en cada uno de los municipios y dadas en porcentaje del total de tractores calculados a tomar en cuenta. Estado de México, 2018*



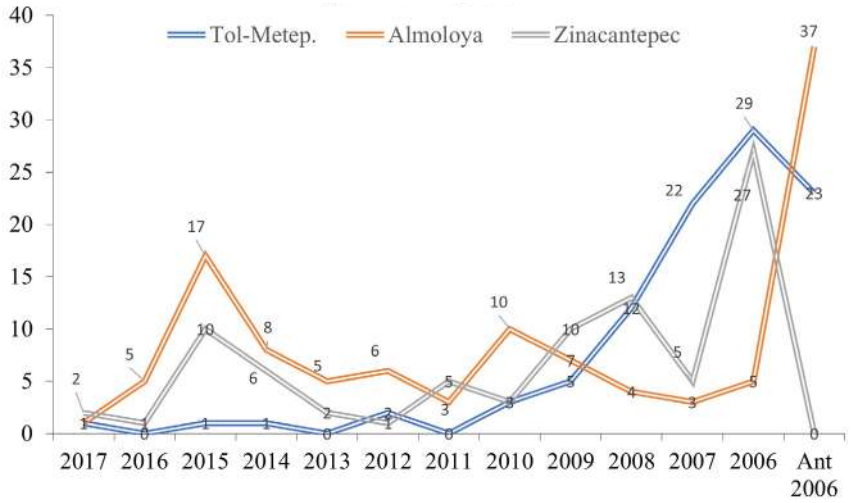
Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

En la gráfica 9.2, se puede apreciar la dinámica de compra de tractores en estos municipios y la misma ha sido coincidente en los mismos años, ya que del año 2010 al 2013, se percibe una disminución en la adquisición de tractores y la misma comienza de nuevo en 2013 en el municipio de Almoloya de Juárez y se suma a este el municipio de Zinacantepec, no así el de Toluca y Metepec el cual sufre un periodo que se extiende desde 2011 hasta el año 2017, lo que indica que los cuatro municipios sufren una caída en la compra de tractores en el año 2016 y 2017. Todo esto debido a la disminución o desaparición de programas públicos por parte de los gobiernos federal y estatal, aunado al alto costo de los tractores y las máquinas agrícolas, considerando que este mercado es más bien de sustitución y no de expansión ya que los tractores en 21% pasan de los 17 años de servicio, esto de acuerdo, a las encuestas realizadas. Esta situación según se ha podido investigar con las distribuidoras de máquinas y tractores agrícolas de la región, la contracción del mercado ha repercutido en la compra-venta de los tractores e implementos mecanizados agrícolas.

iThenticate Página 151 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 152 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Gráfica 9.2. *Dinámica en la compra de tractores desde el año 2006 al 2017, en los municipios muestreados, del Estado de México, 2018*



Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Es necesario plantear que la amortización de los tractores y las máquinas agrícolas en estos municipios es lenta, ya que la cantidad de moto horas (MH) de trabajo no superan en la inmensa mayoría las 450 MH de trabajo al año, caso contrario al que se tiene en España el cual la amortización de estos medios es muy rápida, ya que la cantidad de MH trabajadas por año es alta y supera a algunos países europeos como son Francia y Alemania (Ortiz-Cañavate, 2010).

Los tractores y máquinas agrícolas tienen un alto costo o valor económico, sin embargo, la amortización no se corresponde con la cantidad de horas que se trabajan anualmente. En la república mexicana debe darse un impulso a los planes de renovación del parque de tractores y máquinas agrícolas, así como políticas públicas para el subsidio y estímulos económicos, fiscales, de arrendamiento, etc., que contemplen la adquisición de dicha maquinaria con nuevas tecnologías por los productores agrícolas. Estos planes deben ayudar a la renovación de máquinas agrícolas obsoletas con alto índice de contaminación y a su vez con poca seguridad para su operación y manejo.

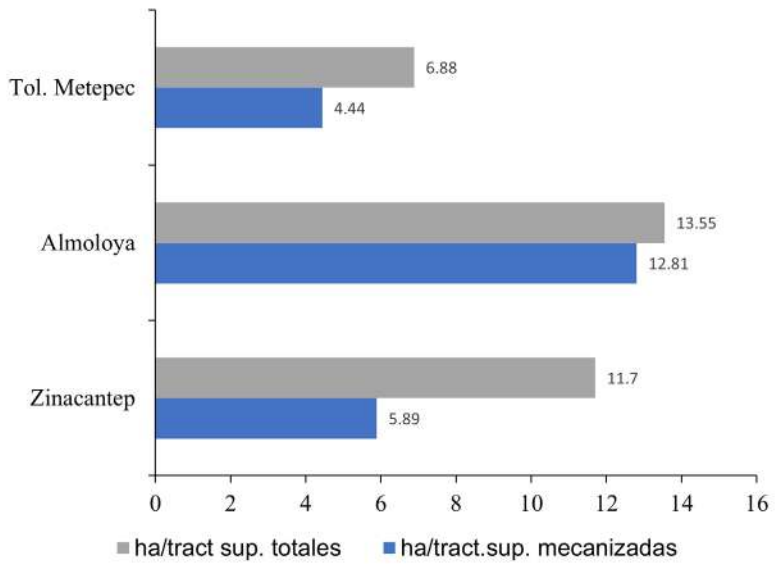
iThenticate Página 152 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 153 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Las máquinas agrícolas deben de tener una edad media de explotación de 15 años, pues después de ese periodo, se consideran que no cumplen con las exigencias ergonómicas y medio ambientales de nuestro país, pues debe de tenerse en cuenta el cuidado del hombre que opera estos medios mecanizados, como son los tractores, máquinas para la aplicación de herbicidas, control de plagas, cosechadora y sembradoras de precisión, transformación de productos e insumos.

En la gráfica 9.3, se plantea la superficie en hectáreas por tractor de suelos cultivados o también mecanizado que están siendo cultivados mecanizadamente con los tractores que se encuentran en cada uno de estos municipios; la relación es de 4.44 ha / tractor; en Almoloya de Juárez es de 12.81 ha / tractor y en Zinacantepec es de 5.89 ha / tractor; de acuerdo a la FAO un tractor debe de dar servicio 50 ha de cultivo en la realización de todas la tareas mecanizadas que se necesiten, lo que demuestra una gran subutilización del parque de tractores de estos municipios.

Gráfica 9.3. *Superficie de suelo mecanizada atendida por tractor y la relación de superficie total por tractor agrícola en cada municipio, Estado de México, 2018*



Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

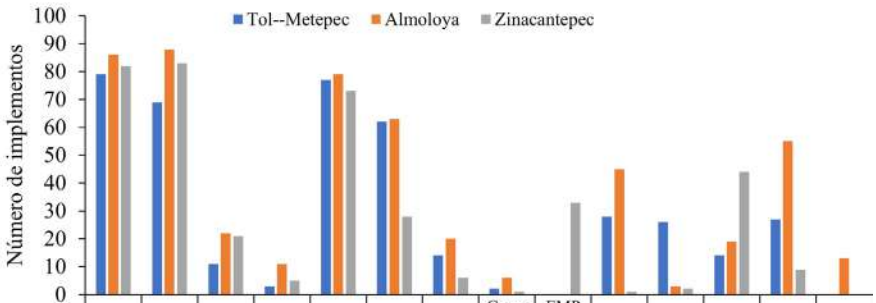
iThenticate Página 153 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 154 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

En el caso de la cantidad de hectáreas totales (mecanizadas y no mecanizadas) y que tienen potencial de ser mecanizadas en algunos casos en el municipio Toluca y Metepec, la relación es de 6.88 ha / tractor; Almoloya de Juárez de 13.55 ha / tractor y en Zinacantepec es de 11.7 ha / tractor; existe poco potencial de que esta relación aumente con lo que se plantea en la base de datos estadísticos de la FAO [FAOSTAT, por sus siglas en inglés), 2011).

Se puede plantear que el nivel de implementos para la preparación primaria de suelos de acuerdo con la cantidad de tractores es aceptable, pues se debe de tener en cuenta que tanto el arado, subsoladores y los multiarados son implementos idóneos para la preparación primaria de suelos. En la gráfica 9.4, se muestran las diferentes máquinas agrícolas que poseen cada uno de estos municipios y al realizar un análisis de la proporción de máquinas agrícolas por tractor del parque total de cada municipio, arroja lo siguiente, así se tiene que en los municipios Toluca-Metepec existe una relación de 0.98 implementos de preparación primaria de suelos por cada tractor; en Almoloya de Juárez 1.07; en Zinacantepec 1.17 implemento por tractor.

Gráfica 9.4. *Cantidad de implementos y máquinas agrícolas declaradas por los propietarios en cada uno de los municipios, Estado de México, 2018*



	Arado	Rastra	Subsoleador	Multiarado	Sembradora	Fertilizadora	Asperjadora	Cargador Frontal	EMPACADORA	Remolque	Cosechadora	Desgranadora	Molinos	otros
Tol--Metepec	79	69	11	3	77	62	14	2	0	28	26	14	27	0
Almoloya	86	88	22	11	79	63	20	6	0	45	3	19	55	13
Zinacantepec	82	83	21	5	73	28	6	1	33	1	2	44	9	0

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Estas relaciones implemento por tractor se consideran apropiadas, ya que su valor se acerca o pasa de la unidad, por lo que se plantea que cada tractor

iThenticate Página 154 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 155 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

tiene un implemento de preparación primaria de suelos. Al considerar las sembradoras de grano u de otro tipo de cultura, se tienen las siguientes relaciones, en Toluca-Metepec es de 0.81 sembradora por tractor, Almoloya de Juárez, 0.71 y en Zinacantepec es de 0.83. Al parecer estas cifras son bajas; sin embargo son consideradas buenas, ya que las sembradoras son muy costosas y el tiempo que se utilizan es bastante corto. No obstante en Almoloya de Juárez se tienen por algunos agricultores dos o tres tractores, lo que hace muy difícil que cada tractor tenga una sembradora. Por su parte, en los otros tres municipios los valores son altos y son considerados buenos de acuerdo a comparaciones que se realizan con algunos países, como es el caso de España, en el cual solo se trabaja en labores de siembra 8.95% del total de horas trabajadas por tractores en la gama de potencia de 70 a 89 HP de 51 a 65 kW de potencia (Ortiz-Cañavate, 2010), que es la gama de potencia de los tractores encuestados en dichos municipios.

En lo referente a las fertilizadoras, la relación fertilizadora-tractor, la más alta la tienen los municipios de Toluca-Metepec siendo de 0.65; registrándose datos de siembra en el año 2017 de 3249 ha, teniendo un rendimiento de 3.96 t/ha siguiéndole en este orden Almoloya de Juárez con 0.56; este municipio en el año 2017 sembró 26 500 ha de maíz con un rendimiento de 5.27 t/ha, lo cual se considera bueno en las condiciones del valle de Toluca y por último, Zinacantepec con 0.32; siembra en este mismo año 11 038 ha de maíz grano y con rendimiento de 4.19 t/ha (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de México, 2017), siendo el más bajo de los municipios considerados en este ensayo y es posible que en influya la poca cantidad que se tienen de fertilizadoras.

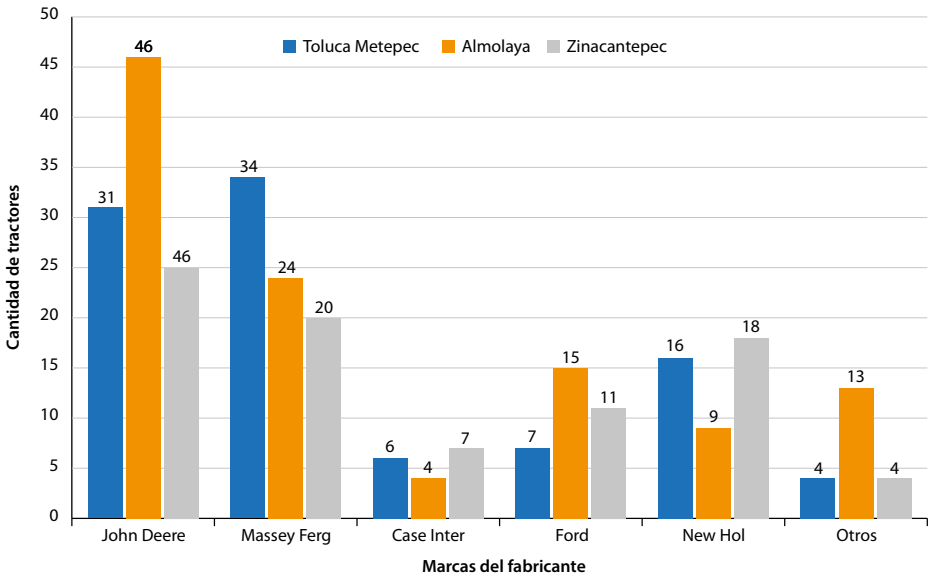
Las marcas de tractores predominantes en estos municipios son la John Deere con 102 tractores, le siguen la Massey Ferguson con 78 y, por último, la New Holland con 43, las demás marcas no tienen un gran peso específico como puede verse en la gráfica 9.5. Las cuales están repartidas: Case International, Ford (este modelo de tractor con muchos años de antigüedad) y otras. Las marcas y modelos de tractores predominantes en estos municipios están dadas por la tradición y características que los mismos tienen desde el punto de vista técnico explotatívo, accesibilidad de piezas de repuesto, longevidad y bajos índices de roturas. Es importante señalar que tanto los tractores John Deere, como los New Holland, son de fabricación nacional y esto influye

iThenticate Página 155 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 156 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

bastante en que estos tengan una gran presencia en el mercado agrícola mexicano, además de la gran gama de diferentes potencias para las diferentes labores y superficies agrícolas de los propietarios.

Gráfica 9.5. *Cantidad de tractores por marca en los municipios de Toluca-Metepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec, Estado de México, 2018*



Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

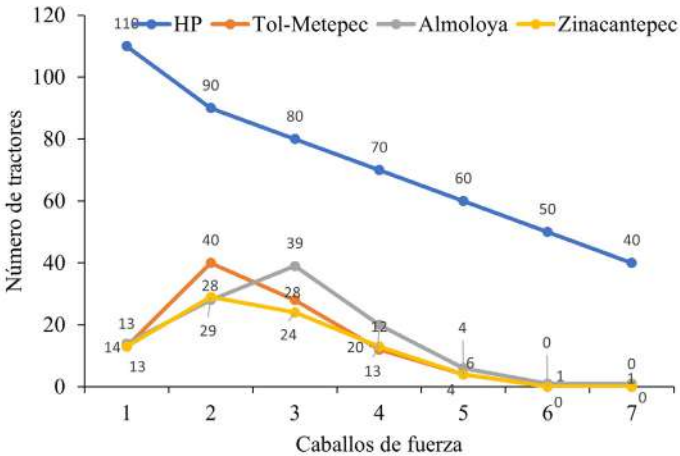
La cantidad de tractores y de máquinas agrícolas ha ido en aumento en los últimos 10 años y observando el crecimiento de tractores se tiene que en los últimos 10 años se han comprado 178 de los 294 tractores encuestados, lo cual significa 60.5% y hasta finales del año 2017 en que se concluyó este estudio, 116 tractores tenían más de 10 años (gráfica 9.2), lo cual puede considerarse que es necesario un plan para renovación de este parque, el cual es obsoleto desde el punto de vista técnico y tecnológico. También, los agricultores se han visto motivados en la compra de tractores dada la evolución y el aumento de la potencia media, así como mejores prestaciones desde el punto de vista tecnológico y aunque no podemos mencionar de forma enfática el electrónico, ya que ninguno de los tractores encuestados cuentan con GPS u otras bondades de este tipo, si se puede plantear que son máquinas con la posibilidad de tener mayor equipamiento en el motor, ya

iThenticate Página 156 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 157 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

que son más ahorrativas, tienen mayor relación de compresión en sus motores, gran cantidad de ellos cuentan con turbo compresores como aditamento que los hace más ecológicos o sea adaptados a mejores criterios medio ambientales y cumplen con las exigencias de seguridad que tiene como normas nuestro país. En la gráfica 9.6, 283 tractores se encuentran en la gama de 70 a 110 CV (51 a 81 kW), y sólo 16 tractores en la gama de 40 a 60 CV (29 a 45 kW), la potencia media de los tractores de estos municipios estudiados es de aproximadamente 83 CV (≈61 kW), siendo en la República española de aproximadamente 120 CV, según lo planteado por Ortiz-Cañavate (2010).

Gráfica 9.6. *Cantidad de tractores y potencia en caballos de vapor (CV) situados en cada municipio, Estado de México, 2018*



Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

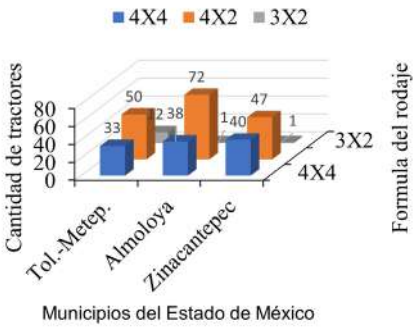
Es importante señalar que en los últimos años la mayor parte de los tractores que se comercializan en la república mexicana cumplen con las normativas de homologación antes de ser puestos en circulación y con esta homologación deben de cumplir los requisitos establecidos que se comprueban, cuando se aplican toda una serie de pruebas y ensayos en laboratorio, que en México se tienen en el municipio de Texcoco (centro nacional experimental de máquinas agrícolas), estas pruebas incluyen potencia del motor, niveles sonoros del motor del tractor, emisión de gases de escape, así como niveles sonoros para el sistema auditivo de los opera-

iThenticate Página 157 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 158 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

rios de dichas máquinas agrícolas, vibraciones y todo lo referente con los mínimos esenciales exigidos desde el punto vista ergonómico del tractor y las máquinas agrícolas en general.

Gráfica 9.7. *Cantidad de tractores y sus diferentes fórmulas de sus sistemas de rodajes por municipios encuestados, Estado de México, 2018*



Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

En la gráfica 9.7 se muestran por municipios los tipos de tractores que se utilizan en función de la fórmula de su sistema de rodaje y ha sido una tendencia mundial, la cual ha permeado entre los agricultores al comenzar a utilizar tractores con doble diferencial o los llamados tractores con formula 4×4, de manera tal que en Toluca-Metepec se tiene 38% de tractores con doble tracción, en el municipio de Almoloya de Juárez 34% y en Zinacantepec 45% de esta fórmula 4×4 (doble tracción), esto significa un logro por parte de los agricultores al momento de elegir este tipo de tractor con esta prestación, que si bien es cierto que hay un costo de inversión mayor al momento de la compra , esto lo puede costear con el trabajo posterior en su explotación. Estos tractores tienen toda una serie de ventajas, ya que los mismos tienen una mayor posibilidad de utilizar toda su masa durante el trabajo con los diferentes implementos agrícolas y por lo tanto, disminuyen de forma ostensible el patinaje de las ruedas traseras y delanteras, lo que trae como consecuencia un ahorro de combustible, aumento de la productividad del trabajo del conjunto máquina tractor, lo cual ha sido corroborado por Romantchik-Kriuchkova et al. (2015) en pruebas realizadas en campos experimentales de la Universidad Autónoma Chapingo,

iThenticate Página 158 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 159 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

entre tractores con formula de rodaje de 4×4 y 4×2 y se obtuvo un aumento de la productividad de 27 a 31% y un ahorro de combustible del aproximado de 16% en diferentes regímenes de trabajo por parte del tractor 4×4.

Conclusiones

Se tiene un alto porcentaje de tractores que rebasan los 15 años de explotación en las labores agrícolas, caso particular del tractor Ford, los cuales tienen una antigüedad mayor a los 20 años, es decir 11.2% del total de la maquinaria agrícola de los municipios de referencia; por lo tanto, estos tractores se consideran obsoletos.

La potencia media del parque de tractores es de aproximadamente 83 CV (≈61 kW), indicativo del crecimiento de este, solo que contra este crecimiento conspira con lo reducido de la relación superficie tractor, ya que el municipio con la relación más alta es Almoloya de Juárez con 12.81 ha / tractor, teniendo en cuanta superficie mecanizada y no mecanizada, pues esta relación de superficie mecanizada es de 13.55 ha / tractor en el mismo municipio, lo cual se considera muy baja.

Del total de tractores objeto de las encuestas en los cuatro municipios es importante señalar que 37.7% de los mismos es de la fórmula de sistema de rodaje 4×4, lo cual significa un avance creciente desde el punto de vista técnico y tecnológico. Debido al desarrollo habitacional e industrial en los municipios investigados, se prevé que la vocación agrícola en los municipios de Toluca y Metepec se convierta en casi nula, mientras que, en los municipios de Almoloya de Juárez y Zinacantepec, esta vocación agrícola se espera perdure por más tiempo para la explotación de cultivos arraigados, para lo cual se requiere forzosamente planes y programas basados en políticas públicas agrícolas, que a su vez incentiven a los productores para continuar con la producción de alimentos mediante esquemas de alta productividad y contar con la adquisición de tractores y maquinas agrícolas que eficienticen los procesos de producción agrícola, por lo que debe implementarse un esquema financiero-tecnológico para la renovación de la maquinaria agrícola *ad hoc* a la región, así como características ergonómicas en el

iThenticate Página 159 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 160 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

binomio tractor-operador, salvaguardando la sustentabilidad y sostenibilidad del medio ambiente.

Referencias

Aguilar-Barojas, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de la salud. *Salud en Tabasco, 1*(1- 2), 333 -338.

Cadena, Z. M. (1997). Situación de la mecanización agrícola en México. En *Maquinaria Agrícola, Antología* (p. 185). DGETA.

Ayala, G. A. V, Audelo, B. M. A, Garay, H. M., y Mendoza, C. C. E. (2011). *La situación del mercado de tractores en México, perspectivas y retos en la certificación*. OCIMA-INIFAP, CENEMA. Sagarpa.

Bassols, A. B. (1978). *Recursos naturales de México* (8ª ed. aumen.). Nuestro Tiempo.

Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2011). *FAO. Dirección de Estadística.* http://faostat.fao.org/site/576/DesktopDefault. Aspx?PageID=576#ancor.

Garrido, P. J. (1984). *Implementos y máquinas agrícolas y fundamentos para su explotación*. Ed. Científico Técnica.

Gutiérrez, F. R. (1990). *Explotación del parque de máquinas y tractore*s. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Instituto Nacional de Estadística, geografía e Informática (2007). *Revista del VIII Censo Agrícola y Ganadero, documento on-line.* http:// www.inegi.org.mx

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2009). *Censo Agropecuario 2007, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal.* http:// www.inegi.org.mx

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2009). *Conteo de Población y Vivienda (1995)*.

Iofinov, S. A. (1984). *Explotación del Parque de Maquinaria y Tractores.* Kolos.

Johan, B. L. Walter, M. C., Paul K. T., y David, W. S (1991). *Tractores diseño y funcionamiento.* Limusa.

Jróbostov, S. N. (1989). *Explotación del parque de máquinas y tractores* (trad. del ruso Luis Gómez I.) (pp. 100-105, 6ª ed.). MIR.

Karpenko (1989). *Celskojosiacbennie Mashino.* Agropromisdat.

Lara, L. A. (2000). Trends and Requirements of Mechanization: The case of México. En *Latin-American Meeting of the Club of Bologna* (pp. 20-31).

Larqué Saavedra, B. S., Sánchez Hernández, M. Á., Sangerman-Jarquín, D. M., Cortés Espinoza, L., y Ayala Garay, A. V. (2012). Análisis de la mecanización agrícola de la región Atlacomulco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263125299027

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Estado de México.

Mogorianu, V. I. (1987). *Efectivnosty ispolzobania mashino traktor nova parka isdatelsvo, Moskua.*

iThenticate Página 160 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 161 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Negrete, J. C. (2006). Mecanización Agrícola en México. *Revista Iberoamericana CTS.*

Negrete, J. C. (2011). Políticas de mecanización agrícola en México. *Revista Iberoamericana Ciencia, Tecnología y Sociedad.* Artículo de Portafolio. .

Negrete, J. C., Tavares, M. A. L., y Tavares M. R. L. (2013). Parque de tractores agrícolas en México: estimación y proyección de la demanda. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 22*(3).

Ochoa, B. J. G. (2010). *Estudio del parque de maquinaria agrícola en el Estado de México.* Sagarpa, INIFAP, CENEMA, Gobierno Federal.

Ortiz-Cañavate, J. (2010). *El sector de la maquinaria y la mecanización agraria en España.* https://www.google.com.mx/search?source=hp&ei=RBQeXY

Perea, E. (2011). *Rebasan 54% de tractores en México su vida útil.* www.imagenagropecuaria.com/articulos.php?id_art=1597&id_sec=25

Reina, J. L. C. (2004). *Análisis del parque de tractores agrícolas en el Ecuador.* [Tesis de Maestr{ia en Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.]

Romantchik-Kriuchkova, E., Morelos-Moreno, A., Villaseñor- Pera, A., y Pérez, S. L. (2015). Zonas de trabajo del conjunto del tractor agrícola con implemento en los esquemas de tracción 4X2 y 4X4. *Agrociencia, 49,* 53-67.

Smith, H. P. (1975). *Maquinaria y equipo agrícola* (pp. 9-14, 104-116, 137-146, 2ª ed.) (trad. del inglés José Abeijon Veloso). Omega.

Soto, M. S. (1983). *Introducción al estudio de la maquinaria agrícola* (pp. 144-156). Trillas.

Slater, D. A. S. (2008). *Evaluación Técnica de la Demanda y Disponibilidad de Tractores Agrícolas en Chile* [Tesis de licenciatura de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción.]

Wilkes, L. H. (1979). *Maquinaria y equipo agrícola* (pp. 121-168) (trad. del inglés José Ma. Serrano). Omega.

Página web: http://.www.ivex.com.mx

Página web: http: www FAO el uso del suelo en América latina

http://sedagro.edomex.gob.mx/produccion_floricola (consultado el 04 de septiembre del 2019)

iThenticate Página 161 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

10. Relevancia de los abonos orgánicos en la agricultura convencional

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.10

Laura Stephanie Flores Carrera*
Delfina de Jesús Pérez López**§
Andrés González Huerta***
Martín Rubí Arriaga****
Aurelio Domínguez López*****
Francisco Antonio Avila Granados******

Resumen

En México la producción orgánica de alimentos es relativamente nueva; representa una alternativa para los consumidores que prefieren alimentos libres de plaguicidas y fertilizantes sintéticos, inocuos y con un alto valor nutricional. Debido al incremento del costo, de los insumos agrícolas y a la contaminación que algunos propician en el ambiente, es necesario encontrar opciones de fertilización, económicas y más eficientes. La aplicación de abonos orgánicos se considera como una práctica benéfica y eficaz para los pequeños productores, así mismo son indispensables para el uso y manejo del suelo y sus propiedades, ya que ayudan a mejorar y mantener su componente orgánico, su fertilidad y su productividad.

Palabras clave: *fertilización, compostas, producción orgánica.*

§ Autor para correspondencia: djperezl@uaemex.mx
* Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8518-9636
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017
***** Doctor en Ciencia de los Alimentos. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2781-1597
****** Ingeniero Agrónomo Fitotecnista. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México.

iThenticate Página 163 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Introducción

En la actualidad, el uso de abonos orgánicos se ha convertido en tendencia, debido a que se han realizado diversas investigaciones y los resultados son satisfactorios en cuanto a rendimientos, características físicas y químicas de los alimentos, así como de los suelos, contribuyendo significativamente a la mejora de estos gracias al aporte de materia orgánica que al mineralizarse desempeñan la función de un fertilizante.

Se sabe que los abonos orgánicos se utilizan porque contienen cantidades importantes de nitrógeno mineral y oligoelementos que favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas; aumentan la cantidad de material orgánico del suelo y mejoran la cantidad de potasio, calcio y magnesio disponibles (Courtney y Mullen, 2008).

La producción orgánica de alimentos es una alternativa para los consumidores que prefieren alimentos libres de plaguicidas y fertilizantes sintéticos, inocuos y con un alto valor nutricional; además la fertilización orgánica balanceada tiene un efecto significativo en la producción y calidad de hortalizas (Márquez et al., 2010; Reyes et al., 2023).

Debido al incremento en el costo de los fertilizantes sintéticos y a la contaminación que algunos propician en el ambiente cuando se utilizan irracionalmente, es necesario encontrar alternativas de fertilización, económicas y más eficientes (Soria et al., 2001; Moreno et al., 2009).

Agricultura orgánica

La agricultura orgánica es un sistema de producción que sustenta la salud de los suelos, los ecosistemas y las personas. Se basa en procesos ecológicos, biodiversidad y ciclos adaptados a las condiciones locales, en lugar del uso de insumos con efectos adversos. La agricultura orgánica combina tradición, innovación y ciencia para beneficiar el medio ambiente compartido, promover relaciones justas y una buena calidad de vida para todos los involucrados (Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica [IFOAM, por sus siglas en inglés], 2018).

iThenticate Página 163 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 164 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

La producción orgánica en México es relativamente nueva, sin embargo, el sistema de producción de alimentos de nuestros antepasados era la agricultura orgánica; dicha forma de producir alimentos comenzó a desarrollarse en el mundo moderno como una respuesta a la agricultura intensificada e industrial, el uso de fertilizantes sintéticos, pesticidas químicos, la introducción de monocultivos en grandes áreas, la separación de la cría de animales de la producción vegetal y el uso de maquinaria pesada (Márquez et al., 2010; Rembiałkowska et al., 2012). Ésta a su vez brinda beneficios agronómicos y ambientales, como la preservación de los recursos naturales y la reducción de la contaminación del aire, agua, suelo y alimentos (Soltoft et al., 2010; Herencia et al., 2011; Domagała y Gastoł, 2012).

En la actualidad, diversos factores de carácter ambiental, social, económico, cultural y político han motivado el interés por el desarrollo de la agricultura orgánica, reconociéndose como una alternativa económicamente eficiente, socialmente justa y ecológicamente sostenible con potencial para atenuar los impactos negativos atribuidos a la agricultura convencional (Gómez et al., 2010).

De igual manera el aumento del consumo de alimentos cultivados orgánicamente se asocia con el interés generalizado de los consumidores en la seguridad y calidad de los alimentos (Domagała y Gastoł, 2012), esto debido a que las regulaciones específicas que determinan las condiciones de producción de los cultivos orgánicos son muy estrictas, lo cual se traduce en una alta calidad de los productos agrícolas (Rembiałkowska et al., 2012).

Hay que considerar que los nutrientes orgánicos contribuyen directamente a la nutrición de los cultivos puede parecer poco ortodoxo a la luz de la gran cantidad de literatura que demuestra que la adición de nutrientes minerales mejora con éxito el crecimiento de los cultivos y los mecanismos bien descritos para su absorción y asimilación. Sin embargo, existe una gran cantidad de literatura olvidada y reciente que propone una visión más completa de la nutrición vegetal, bajo un esquema orgánico y sustentable (Paungfoo et al., 2012).

En general la agricultura orgánica favorece el desarrollo de los agroecosistemas, lo cual implica una serie de ventajas medioambientales, tales como, el aumento de la biodiversidad que le da estabilidad al sistema, el equilibrio de los distintos elementos que los componen, el uso eficiente de los recursos,

iThenticate Página 164 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 165 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

la mantención de la fauna y flora, el estímulo al reciclaje, la protección de las aguas subterráneas, dentro de los más importantes. Cabe mencionar que contribuye al fortalecimiento de la cultura del medio rural, ya que recupera el conocimiento ancestral (Servicio Agrícola y Ganadero [SAG], 2013).

Abonos orgánicos

El uso de abonos orgánicos y órgano-minerales, principalmente a través del reciclaje de residuos de cultivos, estiércol u otras biomasas, está surgiendo para superar los inconvenientes de los fertilizantes inorgánicos. El desarrollo de abonos orgánicos que no dependen de la disponibilidad de recursos minerales o procesos intensivos en energía y basados en el uso de materiales renovables, es un avance significativo hacia la economía circular que reincorpora los materiales de desecho al ciclo de producción (Paungfoo et al., 2019).

En las últimas décadas, la importancia de los abonos orgánicos en el crecimiento de las plantas ha llamado nuevamente la atención tanto de consumidores como de productores (Bolan et al., 2010; Kumar y Maiti, 2015); esto se debe a que los abonos orgánicos no solo suministran nutrientes a las plantas, sino que también proporcionan efectos benéficos sobre la salud del suelo debido a su contenido de materia orgánica, un factor clave para la fertilidad, estructura, procesos biológicos y el ciclo de nutrientes (Haynes et al., 1998; Manlay et al., 2007; Johnston et al., 2009).

La aplicación de residuos orgánicos, como desechos orgánicos y estiércol, era una práctica agrícola tradicional antes de cambiar a fertilizantes sintéticos en cultivos de alta producción (Paungfoo et al., 2012). Los fertilizantes ricos en materia orgánica permiten mejorar la fertilidad del suelo reintegrando las sustancias orgánicas que sufren procesos de mineralización natural desde el punto de vista físico, químico y biológico, activa los procesos de los organismos y asegura a las plantas elementos esenciales (Bertsch, 2003; Pedraza et al., 2011; SAG, 2013; Cucci et al.,2019), esto a su vez se traduce en la reducción de costos para los agricultores, restauran y recuperan los suelos degradados manteniendo la materia orgánica y la fertilidad del suelo para la producción agrícola (Tejada et al., 2009; Mohanty et al., 2011).

iThenticate Página 165 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 166 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

A pesar de que los abonos orgánicos contienen una concentración baja de nutrientes en comparación con los fertilizantes químicos, la disponibilidad podría ser más constante durante el desarrollo del cultivo debido a la mineralización gradual que ocurre en los materiales orgánicos en función de la textura y aporte de carbono orgánico (Figueroa y Cueto 2003; Soliva et al., 2004; Vázquez et al., 2011).

Aunque los compuestos orgánicos se han considerado como fuentes de nutrientes y promotores de crecimiento para las plantas durante más de un siglo, el enfoque de la nutrición de las plantas se ha mantenido principalmente en los nutrientes inorgánicos. Con la necesidad de mejorar la eficiencia de los nutrientes en la producción de cultivos y el reciclaje de los nutrientes contenidos en los desechos de la agricultura y otras industrias, los nutrientes orgánicos son prometedores para su uso en los sistemas de cultivos modernos y garantizan nuevos enfoques para la nutrición de las plantas (Paungfoo et al., 2012).

Cabe mencionar que el tipo de manejo debe ayudar a mantener o incrementar la fertilidad del suelo usando una serie de estrategias tales como incorporación de estiércol compostado, uso de abonos verdes, establecimiento de rotaciones de cultivos y realizar un mínimo laboreo del suelo. Aunque la materia orgánica es sólo un pequeño porcentaje del peso de la mayoría de los suelos (generalmente de 1% a 6%), la cantidad y el tipo influyen en casi todas las propiedades que contribuyen a su calidad. Así mismo, la cantidad y calidad de la materia orgánica puede cambiar las propiedades del suelo, mejora su estructura y disponibilidad de nutrientes (SAG, 2013).

Según Enríquez (2022) dentro de las características deseables de los abonos orgánicos se encuentran la protección del suelo a la erosión y lixiviación, la reducción de pérdidas de agua y la escorrentía, regula las temperaturas del suelo, también ayudan a eliminar las hierbas o plantas que suelen competir con el cultivo. Así mismo menciona que la calidad de éstos es una característica relativa, ya que su desempeño depende de una serie de factores como el clima, tipo de suelo, bases o sustratos, mezclas, el manejo en su elaboración, el tipo de microorganismos que contiene, entre otros; y la cantidad a aplicar debe ser calculada de acuerdo a cada zona y a las condiciones de fertilidad del suelo.

iThenticate Página 166 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 167 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

El uso de abonos orgánicos es una práctica que se ha llevado a cabo desde hace mucho tiempo, así mismo se han mejorado, combinado y reinventado la forma de elaborarlos, aplicándolos en su forma sólida y líquida; se han probado con nuevas fuentes de materia orgánica disponible, combinados con minerales como harina de rocas (diatomeas, roca fosfórica, zeolita), extractos vegetales con función insecticida o fungicida, residuos orgánicos de la industria agroalimentaria, entre otros.

De acuerdo con Herrera (2008) e Infante (2011), la composta es un tipo de procedimiento que aprovecha la descomposición de los desechos orgánicos por una diversidad de microorganismos, en un medio aeróbico que se mantiene húmedo y caliente, que da como resultado final un material de alta calidad que finalmente será utilizado para fertilizar y acondicionar los suelos. La elaboración de composta a partir de los desechos domésticos y rastrojos, como también la de otros residuos orgánicos disponibles localmente, puede proporcionar una mejora valiosa del suelo, ayuda a disminuir el volumen de material, a matar las semillas de malezas y las enfermedades que causan los organismos, disminuye las emanaciones putrefactas posiblemente nocivas y estabiliza los nutrientes.

Ortiz (2010) menciona que una composta bien realizada, tendrá una buena proporción de nutrientes por kilogramo de peso, ya que los microorganismos que intervienen en el proceso de composteo, consumen una gran cantidad de azucares, aminoácidos y lípidos, dejando finalmente los minerales que la planta necesita cuando la composta se ha humificado; la regla es mientras más tiempo de composteo, mayor humificación, aunque dependiendo del manejo que se le dé, una buena composta puede realizarse en 6 meses. Según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2017) los materiales vegetales o animales compostados se deben producir a través de un proceso que establezca una relación inicial de carbono a nitrógeno (C:N) entre 25:1 y 40:1, así mismo deben alcanzar una temperatura entre 130°F y 168°F (54.4-75.6°C). Dicha relación C:N es un factor de control en el proceso de compostaje. Así mismo las actividades de compostaje establecidas bajo un sistema de hileras, deben mantener una temperatura dentro del rango prescrito, por un mínimo de 15 días y los materiales deben girarse cuatro o cinco veces durante este periodo.

iThenticate Página 167 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 168 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

La composta de champiñón es un subproducto de la industria de los hongos comestibles (*Agaricus bisporus*) y representa el sustrato de cultivo que queda después de que ha sido cosechado. Dichos residuos presentan potencial para ser compostados, debido a que poseen biomoléculas que se liberan lentamente durante la mineralización de la materia orgánica, dando lugar a niveles apreciables de nitratos, fosfatos y sulfatos en el suelo durante largos periodos de tiempo. Se ha demostrado que la composta de champiñón tiene nutrientes esenciales para las plantas y posee una variedad de usos, como enmienda para el suelo y como fertilizante aplicado en techos verdes, jardines, césped, así como cultivos de campo (Fidanza et al., 2010; Pardo et al, 2010; Castelo et al., 2016; American Mushroom Institute, 2017).

Por otro lado, la lombricomposta o también conocida como vermicomposta o humus de lombriz, es el producto de la acción de las lombrices sobre restos orgánicos, como residuos vegetales de hortalizas, estiércol de animales y restos de cocina. En general se utilizan lombrices del tipo roja californiana (*Eisenia foetida*), debido a su rápida reproducción y gran capacidad de transformar los restos orgánicos a través de su tracto digestivo en humus, el cuál se encuentra libre de organismos patógenos tanto para el cultivo como para el ser humano; además de que son fuertes, resistentes y fáciles de manejar (Infante, 2011). En condiciones óptimas de producción aporta más nitrógeno, fósforo y potasio que otros abonos orgánicos, una parte de los nutrientes son absorbidos por los cultivos y otra parte se queda como reserva en el suelo, beneficia al suelo con millones de microorganismos, que procesan los nutrientes que ayudan a incrementar la producción de los cultivos, además aumenta entre 5 a 30% la capacidad de retención del agua en el suelo (Bazán et al., 2014).

Dentro de los abonos orgánicos se encuentra el bocashi, producido por la descomposición y fermentación de residuos orgánicos vegetales y animales, que en condiciones adecuadas de humedad y temperatura incorpora al suelo macro y micronutrimentos como N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B (Weindorf et al., 2011; Boechat et al., 2013; Footer, 2014; Ramos et al., 2014; Bertoli et al., 2015). Contribuye positivamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, proporciona materia orgánica humificada o humus y es una importante fuente de carbohidratos para los microorganismos favoreciendo el desarrollo normal de las cadenas tróficas

iThenticate Página 168 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 169 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

del suelo, también favorece la formación de agregados en el suelo, lo que mejora su permeabilidad (Osman, 2013; Tan, 2014; Paul, 2015). Este abono puede ser enriquecido con la inclusión de microorganismos eficaces; la tecnología de los microorganismos eficaces (EM), desarrollada en Japón, es una combinación de varios microorganismos benéficos usados en la producción de alimentos de alta calidad y libres de agroquímicos; su aplicación directa sobre la materia orgánica que se agrega a los cultivos o a la composta reduce el tiempo requerido para la preparación del fertilizante biológico (Sharma et al., 2016; Hu et al., 2018).

Cotrina et al. (2020) mencionan que el bocashi contribuye al mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a través de la incorporación de nutrientes por medio de la regulación del balance hídrico de éste, mejora la concentración de macronutrientes en el suelo, especialmente el nitrógeno y reduce la acidez de mismo.

El uso de estiércoles es otra forma de aportar materia orgánica al suelo, y de cierta manera la más común para abonar la tierra entre los pequeños productores del medio rural, debido a que la mayoría los obtiene de sus propios animales. La USDA (2017) establece que el estiércol animal crudo debe ser compostado, aplicarse a la tierra utilizada para un cultivo no destinado al consumo humano, o incorporase al suelo por lo menos 90 días antes de cosechar un producto comestible que no entra en contacto con el suelo o las partículas de éste, y al menos 120 días antes de cosechar un producto comestible que sí entra en contacto con el suelo o sus partículas. Así mismo menciona que el estiércol fresco a diferencia del estiércol compostado tendrá un mayor contenido de nitrógeno, lo que puede conducir a pérdidas por lixiviación cuando se aplica en exceso, además puede contener altas cantidades de semillas de malezas viables, por su parte el uso de estiércol compostado contribuirá más al contenido de materia orgánica en el suelo.

La gallinaza es un estiércol que se han aplicado durante siglos a las tierras para aumentar la producción de cultivos, si se gestiona de manera adecuada, esta es una opción efectiva (Williams, 2012). Sin embargo, un inapropiado manejo en cualquier parte del flujo, ya sea en la generación, procesamiento o disposición de la gallinaza, puede llegar a contaminar fuentes de agua, suelos y aire; también es susceptible a generar crecimiento

iThenticate Página 169 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 170 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de vectores, malos olores y polvo (Molaey, 2017). Generalmente posee concentraciones altas de nitrógeno y la relación C : N es baja, lo cual promueve una liberación rápida de nitrógeno, haciéndolo disponible para la planta. Una parte del nitrógeno en la gallinaza es orgánico y la cantidad liberada generalmente es menor comparado con los fertilizantes sintéticos; aproximadamente de 30 a 50% del nitrógeno total en la gallinaza queda disponible para el cultivo, ésta contiene una amplia variedad de nutrientes para la planta y es considerada una buena fuente de magnesio (Prakesh, 1990; Mengbo et al., 1997).

El Biol es un abono foliar orgánico, producto de la fermentación anaeróbica (sin oxígeno) de restos orgánicos de animales y vegetales (estiércol, residuos de cosecha). Se caracteriza por ser una fuente orgánica de fitoreguladores, los cuales en pequeñas cantidades son capaces de promover actividades fisiológicas y estimular el desarrollo de las plantas. Puede ser utilizado en una gran variedad de cultivos, complementando la nutrición e incrementando la calidad de los cultivos. Se aplica preferentemente a las hojas y tallos mezclado con agua, el aplicarlo solo es muy fuerte y puede quemar las plantas, también puede aplicarse directamente al cuello de la raíz y al suelo. Aplicado a la semilla permite una germinación más rápida y buen crecimiento de las raíces, por su riqueza en compuestos orgánicos que estimulan el crecimiento. Aplicado al suelo mejora la actividad microbiana y estructura, incrementando el desarrollo radicular de las plantas gracias a las hormonas y precursores hormonales que contiene (Infante, 2011; Bazán et al., 2014). Es en general una forma de incorporar nutrientes a la planta es a través de la fertilización foliar; su instrumentación es necesaria cuando se presentan limitantes para que los nutrientes del suelo entren a la raíz y se transloquen a los tejidos aéreos (hojas, frutos, etc.) en la cantidad y momento oportuno. Las situaciones más comunes son: (a) condiciones de estrés que reduzcan la actividad de la planta (sequía, inundación, aplicación de pesticidas al suelo, heladas, otros); (b) cuando en el suelo existe algún bloqueo químico o físico que reduce la disponibilidad de los nutrientes (pH, sales, competencia entre nutrientes); y (c) cualquier condición que limite la actividad radicular (sequía, compactación del suelo, inundación, patógenos, elementos tóxicos, temperaturas, extremas altas o bajas, etc.) y que reducen parcialmente la toma de nutrientes del suelo (Gómez y Gómez, 2017).

iThenticate Página 170 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 171 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Díaz et al. (2024) reportaron que la aplicación de biol más Consorcio Microbiano en la variedad de maíz Marginal 28t, contribuyo a tener mayor altura de planta (164.17 cm) y mazorca (65.83 cm), mayor área foliar (361.17 cm^2); mejorando también el rendimiento de grano (3.42 t ha^{-1}).

Alcalán et al. (2023) evaluaron la capacidad de germinación y emergencia de cuatro especies de hortalizas en condiciones *in vitro,* al ser expuestas a diferentes biofertilizantes líquidos (BFL) producidos a partir de halófitas. En todas las especies evaluadas hubo reducciones significativas ($p \leq 0.05$) en el crecimiento relativo de radícula (CRR), índice de germinación (IG) y longitud de las plántulas (LT), conforme aumentaba la concentración de biofertilizante líquido; por tanto, concentraciones de BFL superiores a 10% disminuyen considerablemente la germinación y emergencia de las especies evaluadas (IG <80%); mientras que a dosis bajas de BFL (entre 5 y 10%) no representan un riesgo (IG>80%).

Por otro lado en la comunidad Andina de las Pampas, se evaluó la palicación de biol elaborado a base de desechos de pescado en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), considerando las variables de peso de cabeza, altura de plantas y número de hojas por planta. El tratamiento de Biol 3 reportó los más altos valores en cuanto al volumen final, obteniendo mayor rendimiento de producción de biol, peso de cabeza, altura y cantidad de número de hojas de lechuga (Chávez et al., 2024).

Ventajas

Las ventajas que obtenemos al aplicar abonos orgánicos son diversas, las cuales podemos considerar como fortalezas dentro de nuestra unidad de producción. Las ventajas agronómicas del uso de abonos orgánicos de mayor importancia es la posibilidad de elevar el potencial productivo de los suelos, generando condiciones para una mayor actividad biológica, mejorando su estructura y perfil químico, así mismo contribuye a la disminución de la erosión. Además, existe un enriquecimiento genético donde interactúan distintas especies animales y vegetales, lo que logra un equilibrio ecológico que permite disminuir el ataque de plagas y enfermedades. Por otra parte, los productos agrícolas presentan mejor poscosecha y algunos

iThenticate Página 171 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 172 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

estudios demuestran que tienen mejor calidad nutricional y organoléptica (SAG, 2013).

De acuerdo con Gómez y Gómez (2017) el uso de composta como abono orgánico proporciona altas cantidades de humus al suelo, los materiales que se utilizan son generalmente disponibles y baratos, mejora las características físicas, químicas y biológicas del suelo. Por otro lado, el bocashi, es considerado como un abono orgánico que se elabora en poco tiempo y que contiene una alta diversidad de nutrientes disponibles rápidamente para las plantas. Por su parte la lombricomposta brinda otro tipo de ventajas, entre las cuales destacan que la lombriz es un organismo muy prolifero, adaptable a diferentes estiércoles y desperdicios, puede manejarse en altas densidades de lombrices por metro cuadrado, permite la transformación de los desechos orgánicos en abonos ricos en nutrientes, los cuales se emplean para la fertilización de cualquier cultivo, además de contar con un beneficio adicional que consta en la alimentación de peces, patos, camarones, cerdos, gallinas, etcétera.

Los lixiviados o abonos foliares como los bioles pueden ser aplicados de manera foliar a las plantas, estos permiten complementar la nutrición del cultivo y del suelo en momentos específicos de la producción. La aplicación de abonos verdes facilita el reciclaje y movilización de nutrientes lixiviados de las capas más profundas del suelo a las capas superiores, enriquece al suelo con nitrógeno, propicia un mullimiento biológico del suelo y se puede obtener una cosecha adicional según la variedad seleccionada.

Se han realizado estudios comparando el efecto de la aplicación de fertilizantes y abonos orgánicos, reportándose que estos últimos mejoran la fertilidad del suelo e incrementan significativamente el rendimiento de varios cultivos (Afreh et al., 2018; Gai et al., 2018).

Scherer (2013) y Doan et al. (2013) han adelantado estudios para evaluar el efecto del compost en parámetros productivos del cultivo de maíz y frijol asociados o individualmente, en producciones de agricultura familiar.

Luna et al. (2016) en sus estudios han concluido que, la aplicación de los abonos orgánicos favorece la producción del cultivo del tomate, alcanzando valores mayores en el número total de frutos (23.88) con el tratamiento humus de lombriz más ácido húmico; así mismo el peso total de frutos (3249.93 g) y diámetro del fruto (74.61 cm) fue superior en el tratamiento bocaschi más ácido húmico.

iThenticate Página 172 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 173 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Castelo et al. (2016) realizaron estudios con composta de residuos de champiñón en su presentación sólida, así como los extractos acuosos, té de vermicompost y extracto de compost, aplicados al cultivo de tomate. Todos los tratamientos mostraron potencial para servir como mejoradores de suelo, especialmente la composta y extracto de compost, que influyeron directamente para mejorar las características fisicoquímicas del suelo como la materia orgánica, la densidad aparente y la CIC del suelo. Además, lograron satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo en macro y micronutrientes, manteniendo los rendimientos del cultivo con respecto al tratamiento control (químico).

Por otro lado, Coles et al. (2020) en un ensayo de maíz aplicaron composta fresca de champiñón a diferentes dosis (0, 5, 10, 20 y 40 t / acre), demostrando en sus resultados que la composta a razón de 10 t / acre (24.71 t ha^{-1}) alcanza rendimientos de 17.23 libras por 100 pies cuadrados (2.562 t ha^{-1}). El mayor aumento de rendimiento se observó en parcelas que recibieron 40 t / acre (98.84 t ha^{-1}) con 25 libras por 100 pies cuadrados (3.710 t ha^{-1}), aunque no se detectó ninguna diferencia estadística entre los rendimientos en parcelas que recibieron 20 y 40 t / acre (49.42 y 98.84 t ha^{-1}).

Cruz et al. (2018) evaluaron el efecto de la aplicación de abonos orgánicos (composta, bocashi, biol, humus y un testigo químico) en diferentes dosis (1, 2 y 3 kg / m^2; biol-1, 2 y 3 l / 7.2 m^2) sobre la producción de brócoli; sus resultados demostraron que la aplicación Compost al suelo en el cultivo de brócoli fueron positivos, en la variable altura de la planta a los 60 días alcanzo 52.25 cm, diámetro de la pella de 19.91 cm, peso de la pella con 0.97 kg y el rendimiento más alto con 23.10 kg / tratamiento. De las dosis y tipos de abonos orgánicos evaluados, la dosis media D2 (2 kg / m^2) de composta, obtuvo un diámetro de la pella de 19.11 cm, peso de la pella de 0.93 kg, con un rendimiento de 22.45 kg / tratamiento.

Sarmiento et al. (2019) determinaron el efecto de bocashi y microorganismos eficaces (EM) en el rendimiento del cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) cv. Selva, evaluando tres niveles de bocashi (4, 6 y 8 t ha^{-1}) y dos niveles de EM (1 y 2 l / t de bocashi). Los resultados refieren que el mayor rendimiento total de frutos de fresa CV Selva fue 6 942 t ha^{-1}, producto de la interacción entre 8 t de bocashi ha^{-1} y 1 l de EM / t de bocashi; logrando la mejor clasificación de frutos según su calibre: 30% de categoría A (2.083 t

iThenticate Página 173 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 174 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ha^{-1}), 35% categoría B (2.430 t ha^{-1}), 25% categoría C (1.736 t ha^{-1}), 6% categoría D (0.417 t ha^{-1}) y 4% de categoría E (0.276 t ha^{-1}).

Salinas et al. (2007) evaluaron el rendimiento y calidad de espigas del maíz dulce variedad Bright Jean en función a cinco dosis de gallinaza (0, 10, 20, 30 y 40 t ha^{-1}); los resultados obtenidos indican que la dosis de 20 t ha^{-1} permitió obtener las mayores medias para longitud y diámetro de espigas, masa de granos, masa de espigas y rendimiento.

Desventajas

Aunque el uso de abonos orgánicos posee un sin número de ventajas, es importante mencionar las posibles desventajas de su uso. Sin embargo, dichos puntos pueden ser considerados como áreas de oportunidad, en los que se pueden proponer mejoras en los procesos o ejecuciones para su optimización y desempeño.

Bazán et al. (2014) consideran como gran desventaja el tiempo en que demora la transformación de la materia orgánica, procesos como la lombricomposta o el biol que tardan de 3 a 6 meses, dependiendo de la materia prima y las condiciones climáticas. Así mismo por la limitada cantidad de materia prima disponible por área de producción y la mano de obra que requiere para su elaboración no puede ser aplicado en grandes extensiones de terreno.

En la aplicación de compostas, los nutrientes pueden permanecer inaccesibles para la planta durante las primeras semanas; en el caso de abonos verdes el terreno es ocupado parte del tiempo en un cultivo que no siempre proporciona ganancias económicas, además se debe dedicar tiempo y labores para su desarrollo (Gómez y Gómez, 2017). Rembiałkowska et al. (2012) mencionan que los agricultores orgánicos están obligados a mantener el ambiente en buen estado y deben tratar de apoyar el enfoque de ciclo cerrado; a su vez, deben tener la capacidad de obtener productos orgánicos que cumplan con las características que exige el mercado, por lo cual los métodos de producción orgánica se centran en la protección de todos los componentes del medio ambiente, contra la presión de las técnicas agrícolas.

iThenticate Página 174 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 175 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Por su parte Vega et al. (2006), señalan que la aproximación al mercado de productos orgánicos ha generado problemas respecto a la regularización de la oferta y demanda, sobre todo si éstos no se perciben como una aportación significativa a la agricultura sustentable, sino como un plus para ofertar los productos a mayor precio. De igual manera mencionan que técnicos y productores deben ser capacitados de forma adecuada para trabajar bajo un esquema de producción orgánica, ya que una de las desventajas que más afectan al productor es el decremento del rendimiento con respecto a la producción convencional.

Conclusiones

Debido a los efectos favorables que los abonos orgánicos aportan al suelo y sus propiedades, pueden ser considerados como indispensables en el uso y manejo de dicho recurso, para optimizar y en el mejor de los casos mantener su componente orgánico, fertilidad y productividad.

La producción orgánica es una alternativa que beneficia tanto a productores como a consumidores, debido a la reducción de contaminantes del agrosistema, así mismo asegurando el consumo de un producto libre de químicos, saludable y de alto valor nutritivo.

Referencias

Afreh, D., Zhang, J., Guan, D., Liu K., Song, Z., Zheng, C., Deng, A., Feng, X., Zhang, X., Wu, Y., Huang, Q., y Zhang, W. (2018). Long-term fertilization on nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions in a double maize cropping system in subtropical China. *Soil and Tillage Research, 180*(1), 259-267. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.016

Alcalán, L. L. A., Lastiri, H. M. A., y Álvarez, B. D. (2023). Efecto de biofertilizantes líquidos, obtenidos a partir de halófitas, en la germinación y emergencia de cuatro especies de hortalizas (Daucus carota L., Lactuca sativa L., Raphanus sativus L. y Cucumis sativus L.). *Biotecnia, 25*(3), 197-207. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.2127

American Mushroom Institute (2017). *Information on the benefits and uses of mushroom compost*. http://www.mushroomcompost.org/

iThenticate Página 175 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 176 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Bazán, B. F., León, S. R., Ling, L. A. M., Alarcón, M. P., Linares, P. G., Zuiko, F. A., Pérez, S. J., Canales, S. L., Valer, B. F., y Mora, A. A. (2014). *Producción y Uso de Abonos Orgánicos: Biol, Humus y Compost. Manual técnico No. 5.* Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social.

Beltrán, M. F. A., Fenech, L. L., Ruiz, E. F. H., Zamora S. S., Murillo, A. B., García, H. J. L., y Troyo, D. E. (2004). *Tópicos Selectos de Agronomía.* CIBNOR-UABCS.

Bertoli, H. M. P., Terry, A. E., y Ramos, A. D. (2015). *Producción y Uso del Abono Orgánico Tipo Bocashi. Una Alternativa para la Nutrición de los Cultivos y la Calidad de los Suelos.* Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.

Bertsch, F. (2003). Abonos Orgánicos. Manejo de la Fracción Orgánica y de los Aspectos Biológicos del Suelo. *Memoria del Curso de Capacitación, Fertilizantes: Características y Manejo* (pp. 112-130). Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilizantes.pdf

Boechat, C., Gonzaga, S. J., y De Aguilar, A. (2013). Net mineralization nitrogen and soil chemical changes with application of organic wastes with fermented bokashi compost. *Acta Scientiarum-agronomy, 35*(2), 257-264. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i2.15133

Bolan, N. S., Szogi, A. A., Chuasavathi, T., Seshadri, B., Rothrock Jr., M. J., y Panneerselvam, P. (2010). Uses and management of poultry litter. *World's Poultry Science Journal, 66*(4), 673-698. https://doi.org/10.1017/S0043933910000656

Brust, G. E. (2019). *Management strategies for organic vegetable fertility. Safety and Practice for Organic Food* (pp. 193-212). University of Maryland, Academic Press.

Buchanan, M., y Gliesmann, S. R. (1991). How compost fertilization affects soil nitrogen and crop yield. *BioCycle, 32*(12), 72-77.

Castelo, G. A. A., García, M. H. A., Castro, E. L., Lares, V. F., A. G. M., Figueroa, L. P., y Gutiérrez, C. M. A. (2016). Compost de residuos de champiñón como mejorador de suelo y biofertilizante en producción de tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 22*(2), 83-93. http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.06.012

Chávez, M. I. P., Gutiérrez, C. J. E., Saldaña, C. C. F., Palomino, S. E. R., Chavarría, M. E. Y., y Pantoja, M. B. (2024). Empleo de biol con desechos de pescado en el cultivo de lactuca sativa en Huancavelica. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, Bolivia, 11*(2), 30-36. https://doi.org/10.53287/iddb9973jm14n

Coles, P. S., Nogin, G., Fidanza, M., y Roth, G. (2020). Evaluation of Fresh Mushroom Compost in a Field Corn Production System. *Compost Science & Utilization, 28*(2), 1-11. https://doi.org/10.1080/1065657X.2020.1749184

Cotrina, C. V. R., Alejos, P. I. W., Cotrina, C. G. G., Córdova, M. P., y Córdova, B. I. C. (2020). Efecto de abonos orgánicos en el suelo agrícola de Purupampa Panao, Perú. *Centro Agrícola, 47*(2), 31-40.

Courtney, G. y Mullen, J. (2008). Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. Bioresour. Technology, 99(8): 2913-2918.

Cruz, T. E., Vega, C. J., Gutiérrez, A. A., González, R. M., Saltos, E. R., y González, R. V.

iThenticate Página 176 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 177 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(2018). Efecto de la aplicación de abonos orgánicos en la producción de brócoli *(Brassica oleraceae)*. *Revista de Investigación Talentos, 5*(1), 1-8.

Cucci, G., Lacolla, G., Summo, C., y Pasqualone, A. (2019). Effect of organic and mineral fertilization on faba bean *(Vicia faba L.)*. *Scientia Horticulturae, 243*(12)- 338-343. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.051

Díaz, C. H., Díaz, C. P., y Arévalo, A. Y. G. (2024). Respuesta del maiz a la aplicación de consorcio microbiano y su combinacion con biol, en condiciones de trópico seco. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 27*(70), 1-70.

Domagała, I., y Gastoł, M. (2012). Estudio comparativo sobre el contenido mineral de zanahorias, apio y zumos de remolacha orgánica y convencional. *Ciencia de las plantas, 11,* 173-183.

Doan, T. T., Ngo, P. T., Rumpel, C., Van Nguyen, B., y Jouquet, P. (2013). Interactions between compost, vermicompost and earthworms influence plant growth and yield: a one-year greenhouse experiment. *Science Horticulture, 160*(1), 148-154. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.05.042

Enríquez. G. A. (2022). *Manual de buenas prácticas para la elaboración de abonos orgánicos*. IICA.

Escobar, N. E., Mora, D. J., y Romero N. (2013). Respuesta agronómica de Zea mays L. y Phaseolus vulgaris L. a la fertilización con compost. *Revista Luna Azul, 37:* 18-29.

Fidanza, M. A., Sanford, D. L., Beyer, D. M., y Aurentz, D. J. (2010). Analysis of fresh mushroom compost. *HortTechnology, 20*(2), 449-53. https://doi.org/10.21273/HORTTECH.20.2.449

Figueroa V. U., y Cueto W. J. A. (2003). *Uso Sustentable del Suelo y Abonos Orgánicos. Abonos Orgánicos y Plasticultura* (pp. 1-20). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED.

Footer, A. (2014). *Bokashi Composting: Scraps to Soil in Weeks*. New Society Publishers.

Gai, X., Liu, H., Liu, J., Zhai, L., Yang, B., Wu, S., Ren, T., Lei, Q., y Wang, H. (2018). Long-term benefits of combining chemical fertilizer and manure applications on crop yields and soil carbon and nitrogen stocks in north china plain. *Agricultural Water Management, 208,* 384-392. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.002

Gómez, C. M. A., Schwentesius, R. R., Ortigoza, R. J., y Gómez, T. L. (2010). Situación y desafíos del sector orgánico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 1*(4), 593-608.

Gómez, T. L., y Gómez, C. M. A. (2017). *Agricultura orgánica: Bases técnicas.* Universidad Autónoma Chapingo. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias para el Desarrollo Rural Integral.

Haynes, R., y Naidu, R. (1998). Influence of Lime, Fertilizer and Manure Applications on Soil Organic Matter Content and Soil Physical Conditions: a Review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems, 51*(2), 123-137. https://doi.org/10.1023/A:1009738307837

Herencia, J., García, P., Dorado, J., y Maqueda, C. (2011). Comparación de la calidad nutricional de los cultivos cultivados en un suelo fertilizado convencional y orgánico. *La Ciencia de Horticultura, 129,* 882-888.

iThenticate Página 177 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 178 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Herrera, I. F. (2008). *Manual de Agricultura Orgánica: Verdes Gotas de Vida.* FUNDAR-Galápagos. Instituto Nacional Galápagos.

Hu, C., Xia, X., Chen, Y., y Han, X. (2018). Soil carbon and nitrogen sequestration and crop growth as influenced by long-term application of effective microorganism compost. *Chilean Journal of Agricultural Research, 78*(1), 13-22. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392018000100013

Infante, L. A. (2011). *Manual de Biopreparados para la Agricultura Ecológica.* Programa Territorial Orgánico. Fundación para la Innovación Agraria. Trama Impresores.

International Federation of Organic Agricultur8e Movements (2018). *Organic Agriculture & Healthy Soils.* https://www.ifoam.bio/organic-agriculture-healthy-soils

Johnston, A. E., Poulton, P. R., y Coleman, K. (2009). Soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. *Advances in Agronomy, 101*(1), 1-57.

Kumar, A., y Maiti, S. K. (2015). Effect of organic manures on the growth of cymbopogon citratus and chrysopogon zizanioides for the phytoremediation of chromite-asbestos mine waste: a pot scale experiment. *International Journal of Phytoremediation, 17*(5), 437-447. https://www.ifoam.bio/organic-agriculture-healthy-soils

López, M. J. D., Salazar, S. E., Zúñiga, T. R., Martínez, P. P., Trejo, E. H. I., y Chavarria, G. J. A. (2009). *Generalidades sobre Construcción, Mantenimiento, Fertilización y Preparación del Suelo para Cultivo en Invernaderos. Agricultura Orgánica* (2ª ed.). Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, COCyTED.

Luna, M. R. A., Reyes, P. J. J., Espinosa, C. K. A., Luna, M. M. V., Luna Q. F. V., Celi, M. M. V., Espinoza, C. A. L., Rivero, H. M., Cabrera, B. D. A., Alvarado, M. A. F., y González, R. J. C. (2016). Efecto de diferentes abonos orgánicos en la producción de tomate *(Solanum lycopersicum L.)*. Universidad de Sonora. *Biotecnia, 18*(3), 33-36.

Manlay, R. J., Feller, C., y Swift, M. J. (2007). Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 119(3-4), 217-233. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.011

Márquez, H. C., Cano, R. P., García, H. J. L., Rodríguez, D. N., Preciado, R. P., Moreno, R. A., Salazar, S. E., Castañeda, G. G., y De La Cruz, L. E. (2010). *Agricultura Orgánica: El Caso de México. Agricultura orgánica, Tercera parte.* Universidad Juárez del Estado de Durango.

Mengbo, L., Hue, N. V., y Hussain, S. K. (1997). Changes of metal forms by organic amendments to Hawaii soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis. 28*(3-5), 381-394. https://doi.org/10.1080/00103629709369797

Miller, F. P., Vandome, A. F., y Mc Brewster, J. (2009). *Organic Farming.* Alphascript Publishing.

Molaey, A. R., Bayrakdar, R. S., y Çalli, B. (2017). Anaerobic digestion of chicken manure: Mitigating process inhibition at high ammonia concentrations by selenium supplementation. *Biomass and Bioenergy, 108*(1), 439-446. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.050

iThenticate Página 178 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 179 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Mohanty, M., Reddy, S. K., Probert, M. E., Dalal, R. C., Rao, S. A., y Menzies, N. W. (2011). Modelling N mineralization from green manure and farmyard manure from a laboratory incubation study. *Ecological Modelling, 222*(3), 719-726. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.10.027

Moreno, R. A., Cano, R. P., y Rodríguez, D. N. (2009). Producción orgánica de melón bajo condiciones de invernadero. En R. P. Cano, C. I. Orona y J. I. Reyes (Eds.), *Simposio nacional sobre producción moderna de melón y tomate. XIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Torreón, Coahuila México* (pp. 17-21).

Ortiz, C. F. G. (2010). Manual Básico para la Producción Agrícola Orgánica I: Bases para la Elaboración de un Plan de Trabajo en un Huerto Orgánico. México Tradición Orgánica (Metrocert). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

Osman, K. T. (2013). *Soils: Principles, Properties and Management.* Springer.

Pardo, G. A., Cunha, Z. D., y Pardo, G. J. E. (2010). Utilización de compost agotado de champiñón como capa de coberturas en nuevos ciclos de producción. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, 45*(10), 1164-1171. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010001000016

Paungfoo, L. C., Visser, J., Lonhienne, T. G. A., y Schmidt, S. (2012). Past, present and future of organic nutrients. *Plant Soil, 359,* 1-18. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1357-6

Paungfoo, L. C., Redding, M., Pratt, C., y Wang, W. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria increase the efficiency of fertilisers while reducing nitrogen loss. *Journal of Environmental Management, 233,* 337-341. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.052

Paul, E. A. (2015). *Soil microbiology, ecology, and biochemistry* (4ª ed.). Eldor A. Paul (ed.), Natural Recourse Ecology Laboratory and Department of Soil and Crop Sciences, Colorado State University.

Pedraza, L. A., Pérez, T. M. M., Cortés, S. I., y Arias, G. L. (2011). Evaluación de un biofermento de preparación local para el abonamiento orgánico del tomillo *(Tymus vulgaris),* romero *(Rosmarinus officinalis)* y orégano *(Origanum vulgare). Revista Facultad de Ciencias Básicas, 17*(1)- 10-31. https://doi.org/10.18359/rfcb.2107

Prakesh, V. (1990). *Leafy spinces* (pp. 3-11). CRC Press.

Ramos, A. D., Terry, A. E., Soto, C. F., y Cabrera, R. J. A. (2014). Bocashi: abono orgánico elaborado a partir de residuos de la producción de plátanos en Bocas del toro, Panamá. Cultivos Tropicales. *Revista del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 35*(2), 90-97.

Rembiałkowska, E., Załęcka, A., Badowski, M., y Ploeger, A. (2012). *The Quality of Organically Produced Food* (pp. 65-93). Organic Farming and Food Production. http://dx.doi.org/10.5772/54525

Restrepo Rivera, J. (2007). *El ABC de la Agricultura Orgánica y Harina de Rocas.* Servicio de Información Mesoamericano sobre Agricultura Sostenible.

Reyes Hernández, R., Carrillo Rodríguez, J. C., Chávez Servia, J. L., Perales Segovia, C., Vera Guzmán, A. M., Hernández Delgado, S., Mayek Pérez, N., Aquino Bolaños, E. N., y Alba Jiménez, J. E. (2023). Fertilización orgánica y su respuesta en caracteres de

iThenticate Página 179 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 180 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

planta y fruto de tomate en cultivo sin suelo. *Revista Mexicana de Agrosistemas, 10*(1), 1- 17. https://doi.org/10 60158/rma.v10i1.375

Salinas, G. O. N., Enciso, G. C. R., y Ríos, A. R. (2007). Respuesta del maíz dulce *(Zea mays L. var Saccharata)* a la aplicación de dosis crecientes de gallinaza. *Investigación Agraria, 9*(1), 67-72.

Santamaría, R. S., Ferrera, C. R., Almaraz, S. J. J., Galvis, S. A., y Barois, B. I. (2001). Dinámica y relaciones de microorganismos, C-orgánico y N-total durante el composteo y vermicomposteo. *Agrociencia, 35*(4), 377-384.

Sarmiento, S. G. J., Amézquita, M. A., y Mena, C. L. M. (2019). Uso de bocashi y microorganismos eficaces como alternativa ecológica en el cultivo de fresa en zonas áridas. *Scientia Agropecuaria, 10*(1), 55-61. http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.01.06

Servicio Agrícola y Ganadero (2013). *Agricultura Orgánica Nacional: Bases Técnicas y Situación Actual.* Ministerio de Agricultura. División de Protección de Recursos Naturales Renovables, Subdepartamento de Agricultura Orgánica.

Sharma, A., Singh, S., Sharma, R., Chaudhary, P., y Pandey, A. (2016). Enhanced biodegradation of pahs by microbial consortium with different amendment and their fate in in-situ condition. *Journal of Environmental Management, 181,* 728-736. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.024

Scherer, E. E. (2013). Doses e formas de aplicação do composto de dejetos suínos no cultivo orgânico de milho e feijão. *Revista Agropecuaria Catarinense, 26*(2), 74-78.

Soltoft, M., Bysted, A., Madsen, K. N., Mark, A., Bügel, S., Nielsen, J., y Knuthsen, P. (2010). Efectos de los sistemas de crecimiento orgánico y convencional sobre el contenido de carotenoides en raíces de zanahoria, y sobre la ingesta y el estado plasmático de los carotenoides en humanos. *Revista de la Ciencia de la Alimentación y la Agricultura, 91*(4), 767-775.

Soliva, M., López, M., Huerta, O., Valero, J., y Felipó, M. T. (2004). Waste organic matter quality versus soil amendment effects. Murcia, Spain. *Sustainable organic waste management for environmental protection and food safety, 1*(1), 201-204.

Soria, F. M. J., Ferrera, C. R., Etchevers, B. J., Alcántar, G. G., Trinidad, S. J., Borges, G. L., y Pereyda, P. G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestion de excreta líquida de cerdo. *Terra latinoamericana, 19*(4), 353-362.

Tan, K. H. (2014). *Humic Matter in Soil and the Environment: Principles and Controversies.* CRC Press a Taylor & Francis Group.

Tejada, M., Hernández, M. T., y García, C. (2009). Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil and Tillage Research, 102*(1), 109-117. https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.004

United States Department of Agriculture (2017). *Program Handbook: Guidance and Instructions for Accredited Certifying Agents & Certified Operations.* Agriculture Marketing Service, National Organic Program. https://www.ams.usda.gov/services/organic-certification

Vega, L. S., Coronado, H. m., Gutiérrez, T. R., García, H. L. A., y Díaz, G. G. (2006). Un apor-

iThenticate Página 180 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 181 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

te sobre la industria láctea orgánica y la innovación tecnológica. *Revista Mexicana de Agronegocios, 10*(19), 1-19.

Vázquez, V. C., García, H. J. L., Salazar, S. E., López, M. J. D., Valdez, C. R. D., Orona, C. I., Gallegos, R. M. A., y Preciado, R. P. (2011). Aplicación de estiércol solarizado al suelo y la producción de chile jalapeño *(Capsicum annuum L.)*. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 17*(Especial 1), 69-74.

Weindorf, D. C.; James, P.; Muir, J. P. and Landeros, S. C. (2011). Organic compost and manufactured fertilizers: Economics and ecology. En W. Campbell y S. López Ortiz (Eds.), *Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism: Examples from the Field. Issues in Agroecology – Present Status and Future Prospectus* (pp. 27-53). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007–1309-3_2

Williams, C. M. (2012). *Gestión de Residuos de Aves de Corral en los Países en Desarrollo.* North Carolina State University, Department of Poultry Science.

iThenticate Página 181 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Sección II

GENÉTICA Y MEJORAMIENTO DE CULTIVOS

11. Diseño de una cruza dialélica parcial simétrica en maíz cacahuacintle

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.11

Gerardo Jasso Bobadilla*
Andrés González Huerta**§
Delfina de Jesús Pérez López***
José Ramón Pascual Franco Martínez****
Jaime Mejía Carranza*****
Francisco Gutiérrez Rodríguez******

Resumen

Las cruzas dialélicas son una herramienta muy importante en el mejoramiento genético vegetal y animal. Se han usado para estimar el potencial de producción de cruzas simples, al obtener los parámetros genéticos de los componentes del rendimiento de los progenitores que integran una cruza. Esta información es útil ya que permite elegir las mejores líneas endogámicas para formar un hibrido de dos o más progenitores. Para un experimento de cruzas dialélicas completas hay $p2$ combinaciones genéticas posibles que incluyen progenitores ($i=j$), $p(p-1)/2$ cruzas directas (CD; $i<j$) y $p(p)/2$

§ Autor para correspondencia: agonzalezh@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8357-0660
** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
*** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003–1621-5690
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203
***** Doctor en Genética y Biología de Estrés de Cultivos Vegetales. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3876-0788
****** Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1464-0976

iThenticate Página 185 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

cruzas recíprocas (CR; *i>j*), siendo impráctico al haber un incremento en el número de progenitores, lo que genera un mayor gasto en tiempo y recursos. Por lo que se diseñó un muestreo para un subconjunto de cruzamientos a partir del método 4 de Griffing, describiéndose una técnica para un dialélico incompleto generada con la metodología que proponen Kempthorne y Curnow formando 40 cruzamientos que se obtendrán a partir de la siembra de 16 variedades criollas de la raza Cacahuacintle en un lote de cruzamiento dividido en bloques incompletos al azar establecido siguiendo el paquete tecnológico de los productores de la zona de Calimaya de Díaz González así como el manejo agrónomico al mismo. El análisis y discusión de este experimento será abordado con algún paquete estadístico como Statistical Analysis System (SAS), Opstat o Genes, con alguna modificación en su código que permita el análisis para al menos un experimento.

Palabras clave: *parámetros genéticos, dialélico incompleto, paquete tecnológico, manejo agronómico.*

Marco bibliográfico

Como ha sido mostrado en Saavedra et al. (2021), desde la década de la década de 1940 la cruza dialélica (CD), compuesta de todos los apareamientos simples que se pueden formar con un grupo de progenitores, se ha convertido en un plan común de investigación para el mejoramiento genético en plantas y animales. Su uso inició con el desarrollo de los conceptos de aptitud combinatoria general y específica (*ACG* y *ace*, respectivamente), acuñados por Sprague y Tatum (1942). La CD es empleada para estimar los componentes genéticos de la variación que existe entre los rendimientos de las cruzas que la conforman (Jinks y Hayman, 1953; Hayman, 1954a y 1954b; Griffing, 1956a y 1956b; Kempthorne, 1956 y 1957).

La CD también se ha utilizado para estimar el potencial de producción en cruzas simples formadas con *n* materiales genéticos. Esta información podría utilizarse para elegir las mejores líneas endogámicas que permitan formar un híbrido de dos, tres, cuatro o más progenitores. Aun cuando en la mayoría de los experimentos conducidos con CD no han sido estimados

iThenticate Página 185 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 186 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

los efectos maternos, podrían incluirse las cruzas recíprocas para realizar su estimación. Las grandes interrogantes que surgieron con relación al diseño y al análisis de una CD a través de los años o localidades, también denominados ambientes de evaluación, no fue posible resolverlas hasta que Singh (1972a y 1972b) desarrolló los procedimientos genético-estadísticos apropiados para su estimación en múltiples ambientes.

Sin cruzas recíprocas, que son las que resultarían de la autofecundación o del apareamiento realizado entre plantas de la misma línea, hay $n(n-1)/2$ cruzas diferentes que se pueden formar con esos n progenitores. Este número se incrementará significativamente al incluir más progenitores en el experimento de CD; con $n = 10$, 20 o 30 habrá 45, 190 o 435 cruzas entre dos líneas. Con restricciones económicas para evaluar las CD en varios ambientes, formados por la combinación de años, localidades o ambos, sólo será posible incluir pocos cruzamientos, pero la estimación de la varianza de ACG relacionada con la población formada con todas las líneas endogámicas disponibles estará sujeta a un mayor error de muestreo y muchas líneas con mayor potencial podrían no ser evaluadas. En este contexto sería más deseable considerar otro diseño genético que incluya más progenitores pero que permita muestrear sólo a un subconjunto de ellos, sin pérdida de eficiencia; la recomendación sería utilizar cruza por probador, para la formación de mestizos, o un dialélico incompleto.

En un experimento de cruzas dialélicas completo hay p2 combinaciones genéticas que incluyen p progenitores ($i = j$), $p(p-1)/2$ cruzas directas (CD; $i<j$), y $p(p-1)/2$ cruzas recíprocas (CR; $i>j$) (Griffing, 1956). Este diseño ha sido ampliamente utilizado en fitomejoramiento (Saavedra et al., 2021), pero es impráctico cuando p aumenta debido a que CD y CR también se incrementan. Una situación similar se presentó cuando se diseñaron experimentos 2H, con H variando de 2 a 8, para ser analizados con InfoStat e InfoGen, pero si H = 8 habrá 256 tratamientos y 247 interacciones. Para ahorrar tiempo y recursos podría diseñarse un experimento factorial fraccionado que incluya sólo a un subconjunto de éstos (Pérez et al., 2021). Si 13 progenitores, 78 CD y 78 CR serán estudiados, aun para los diseños experimentales en Látice rectangular habría serias limitantes (González et al., 2007).

Cochran y Cox (1958), Gomez y Gomez (1984), y Martínez (1998), entre otros, mostraron los planes básicos para látice balanceado y parcial-

iThenticate Página 186 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 187 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

mente balanceado; se podrían aleatorizar hasta 144 tratamientos en un látice triple 12×12. Si en un ambiente se evalúa maíz (*Zea mays* L.) de la raza Cacahuacintle, en tres repeticiones, con parcelas de tres surcos de 5.0 m de longitud, cada hilera distanciada a 0.80 m, para evaluar esos 144 tratamientos serían necesarios casi 6 500 m^2 (repeticiones separadas a 2.0 m y bloques incompletos separados a 1.5 m). Este problema será mayor al considerar varios años, localidades o combinaciones de éstos. En el otro extremo, con cuatro progenitores, las estimaciones de aptitud combinatoria general serán sesgadas debido al pequeño tamaño de muestra utilizando.

La cruza dialélica parcial (CDP) fue sugerida por G. W. Brown en 1948 y fue usada por primera vez en la Universidad Estatal de Iowa, en Estados Unidos de Norteamérica (Jensen, 1959). En ésta, el mejorador asume que puede manejar ns / 2 apareamientos, donde *n* y *s* son el número de progenitores y de veces que cada uno de estos es considerado en el plan de cruzamientos, pero si *n* es par, *s* debe ser non, y viceversa. Hinkelmann y Stern (1960), Kempthorne y Curnow (1961), Fyfe y Gilbert (1963) y Rojas (1973), entre otros, diseñaron metodologías para muestreo y análisis de un dialélico parcial en un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA). Kempthorne y Curnow (1961) describieron una técnica dialélica incompleta a partir del método 4 de Griffing (1956); la precisión con la que se estiman los parámetros de interés para el fitomejorador depende de *n* y *s*. Murthy et al. (1966) y Chaudhary et al. (1977) precisaron que el sesgo es mayor cuando *s* es menor que p / 2; con s = p−1 se tendrá el método 4 de Griffing (1956).

Introducción al muestreo de las cruzas

El número de cruzas que serían muestreadas se calcula considerando *p*, *s*, y *k*. Los dos primeros fueron definidos previamente y *k*, un número entero, se calcula cómo:

$$k = ((p + 1 - s))/2$$

Los *p* progenitores, aleatorizados y numerados consecutivamente, generarán las cruzas:

Progenitor $1 \times$ progenitor $k+1, k+2, k+3, \ldots, k+s$

iThenticate Página 187 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 188 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Progenitor $2 \times$ progenitor $k+2, k+3, k+4, \ldots, k+1+s, \ldots$

Progenitor p $\times$ progenitor $k+p, k+p+1, \ldots, k+p-1+s$

Como ejemplo preliminar, si un fitomejorador dispone de ocho variedades criollas de maíz de la raza Cacahuacintle, que en lo sucesivo serán denominadas variedades de Cacahuacintle y, además, $s=5$ y $k=2$, las 20 cruzas por muestrear serán:

Variedad $1 \times$ variedades $2+1, 2+2, 2+3, 2+4, 2+5 = 1\times3, 1\times4, 1\times5, 1\times6, 1\times7$.

Variedad $2 \times$ variedades $2+2, 2+3, 2+4, 2+5, 2+6 = 2\times4, 2\times5, 2\times6, 2\times7, 2\times8$.

Variedad $3 \times$ variedades $2+3, 2+4, 2+5, 2+6, 2+7 = 3\times5, 3\times6, 3\times7, 3\times8$.

Variedad $4 \times$ variedades $2+4, 2+5, 2+6, 2+7, 2+8 = 4\times6, 4\times7, 4\times8$.

Variedad $5 \times$ variedades $2+5, 2+6, 2+7, 2+8, 2+9 = 5\times7, 5\times8$.

Variedad $6 \times$ variedades $2+6, 2+7, 2+8, 2+9, 2+10 = 6\times8$.

La variedad hembra identificada cómo 7 se cruzaría con los machos $2+7, 2+8, 2+9, 2+10$ y $2+11$, como estas son mayores que p se aplican múltiplos de 8 y se obtendrían las cruzas: $7\times(9-8)=7\times1$; $7\times(10-8)=7\times2$; $7\times(11-8)=7\times3$; $7\times(12-8)=7\times4$; $7\times(13-8)=7\times5$. Sin embargo, estas se eliminan por ser CR. Este mismo criterio se aplica para las cruzas formadas con la variedad 8 (tabla 11.1).

Tabla 11.1. *Las 20 cruzas que serían formadas si $p=8$, $s=5$ y $k=2$*

Variedad i (♂)	*Variedad j (♂)*							
	V1	*V2*	*V3*	*V4*	*V5*	*V6*	*V7*	*V8*
V1	0	0	1	1	1	1	1	0
V2	0	0	0	1	1	1	1	1
V3	1	0	0	0	1	1	1	1
V4	1	1	0	0	0	1	1	1
V5	1	1	1	0	0	0	1	1
V6	1	1	1	1	0	0	0	1
V7	1	1	1	1	1	0	0	0
V8	0	1	1	1	1	1	0	0

Nota: *aij* = 1 o *aij* = 0 si la cruza *ixj* es o no muestreada, respectivamente. También se indican CR.
Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

iThenticate Página 188 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 189 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Este tipo de metodologías también están relacionadas con los diseños circulantes que fueron discutidos por Kemthorne (1953) en éstos, cuando se han calculado los valores para la primera hilera de la matriz circulante, la siguiente hilera se genera simplemente desplazando esos valores a la siguiente columna (Jasso et al., 2022).

Aspectos metodológicos relevantes

Modelos genético-estadísticos

Para la evaluación de un dialélico completo se utilizan dos tipos de modelos: los estadísticos, que permiten determinar cuanta variabilidad existe entre familias, y los genéticos, que contribuyen al fraccionamiento de la variabilidad que existe entre éstas, en efectos o varianzas de aptitud combinatoria, así como en el tipo de acción génica predominante en el material evaluado. En ambos modelos frecuentemente se incluyen familias de autohermanos, medios hermanos y hermanos completos (Saavedra et al., 2020).

El modelo estadístico para analizar un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA) es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde: μ es la media aritmética de los *tr* datos, τ_i es el efecto del *i*-ésimo tratamiento, β_j es la contribución de la *j*-ésima repetición, y ε_{ij} es el error experimental o residual del modelo. τ_i corresponderá a las cruzas formadas con las *n* líneas endogámicas de la raza Cónico (Jasso et al., 2022) o con las *p* variedades de polinización libre de Cacahuacintle que son consideradas en esta propuesta.

El modelo genético para analizar variables cuantitativas en un ensayo de cruzas dialélicas parciales en un DBCA es (Kempthorne y Curnow, 1961):

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + S_{ij} + \beta_k + \varepsilon_{ijk}$$

iThenticate Página 189 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 190 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Dónde: μ, β_k, ε_{ijk} se definieron previamente; g_i y g_j, son efectos de aptitud combinatoria general causados por ambos progenitores; S_{ij} son los efectos no aditivos vinculados a la aptitud combinatoria específica de la cruza formada por los padres *i*, *j*. En este modelo se asume que g_i, S_{ij}, y ε_{ijk} se distribuyen normal e independientemente, con media cero y varianzas σ^2_g, σ^2_s, y σ^2_e, respectivamente. También se considera que cada variable analizada, como el rendimiento de grano o elote en maíz de la raza Cacahuacintle, en la cruza identificada como *ixj*, consiste en un efecto de ésta, un efecto de la repetición, un error asociado a desviaciones aleatorias entre parcelas y, si la hubiera, al causado por segregación genética dentro de cada cruza. En el modelo anterior, el efecto general causado por los tratamientos, T_{ij}, es igual a $T_{ij} = g_i + g_j + S_{ij}$, y la interacción de éstos con las repeticiones es igual al error experimental, cuando no hay epistasis.

Con relación a la estructura genética vinculada a un dialélico incompleto, las progenies de la misma cruza son clasificados como hermanos completos y las de cruzas diferentes con un progenitor común son medios hermanos. Si las líneas o los progenitores son una muestra aleatoria de una población grande, el efecto que se origine en cada cruza puede representarse cómo:

$$T_{ij} = g_i + g_j + S_{ij}$$

Además:

$$\sigma^2_g = Cov(H.S.)$$
$$\sigma^2_s = Cov(F.S.) - 2\ Cov(H.S.)$$

Dónde: *H. S.*, y *F. S.*, son las covarianzas entre medios hermanos y hermanos completos, respectivamente. Si la población de referencia manifiesta apareamiento aleatorio, no es endogámica y existe ausencia de ligamiento factorial (Kempthorne y Curnow, 1961):

$$Cov(H.S.) = (1/4)\ \sigma^2_A + (1/16)\ \sigma^2_{AA} + , \ldots$$
$$Cov(F.S.) = (1/2)\ \sigma^2_A + (1/4)\ \sigma^2 D + (1/4)\ \sigma^2_{AA} + , \ldots$$

En estas covarianzas, sus componentes principales son varianzas aditivas, aditiva por aditiva y dominante.

iThenticate Página 190 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 191 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Con $F=0$:

$$\sigma^2_g = (1/4)\ \sigma^2_A + (1/16)\ \sigma^2_{AA} + ,\ldots,$$
$$\sigma^2_s = (1/4)\ \sigma^2_D + (1/8)\ \sigma^2_{AA} + ,\ldots,$$

En ausencia de epistasis, la proporción de la varianza aditiva con relación a la genética es:

$$\sigma^2_g/(\sigma^2_g + \sigma^2_s)$$

El grado de dominancia promedio es:

$$(2\sigma^2_s/\sigma^2_g)^{(1/2)}$$

Si $F=0$, la varianza del error (σ^2_e) tendrá una componente debida a variabilidad genética dentro de cruzas; será igual a la varianza genética total menos la covarianza de hermanos completos. Esta última será igual a cero sólo si *F*, el coeficiente de endogamia, es igual a uno ($F=1$). La variabilidad ambiental relacionada con ε_{ijk} consistirá en la que exista entre parcelas y entre plantas, mientras que la competencia entre y dentro de éstas últimas también deberá considerarse en el modelo genético. El uso de submuestreo dentro de las unidades experimentales será de gran utilidad para determinar el error muestral (González et al., 2023), que es una de las componentes del modelo genético que permitiría probar con mayor precisión los efectos o varianzas de *ACG* y *ACE*.

Establecimiento del experimento en campo

Descripción del área de estudio

Este estudio podría realizarse en el año 2026 en un terreno de un agricultor cooperante del municipio de Calimaya de Díaz González, situado a 17 km de la capital mexiquense. Sus colindancias con otros municipios son: al norte con Toluca, al sur con Tenango del Valle, al oriente con Mexicatzingo y Santa

iThenticate Página 191 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 192 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

María Rayón y al poniente con el volcán Xinantecatl. La cabecera municipal se localiza a 19°09'30" de latitud norte y 99°37'17" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, a 2 650 msnm. Su clima predominante es templado subhúmedo con tendencia al frío, con temperatura media anual de 12.8°C, mínima y máxima de −4.0 y 26°C, respectivamente. Sus suelos son sueltos (tipo andosol), encontrándose desde el arcillo limoso hasta los franco-arenoso y arenoso, éstos últimos formados por el arrastre de materiales sedimentados hacia las partes más bajas, problema que las lluvias originan durante la época de máxima precipitación, cuyo cauce se originó en las partes altas aledañas al volcán Xinantecatl y que ha contribuido al aumento de la superficie erosionada. Los suelos son muy friables, derivados de cenizas volcánicas, pH ácido (entre 3.8 y 6.0) y descansa sobre un sustrato volcánico de pumicita suelta (tepojal) que se encuentra entre 40 y 100 cm, con condiciones particularmente benignas para el control natural de patógenos, especialmente pudriciones de mazorca y grano causadas por *Fusarium spp*. También se ha observado que las condiciones climatológicas frías del periodo invernal causan ausencia de plagas insectiles de los granos almacenados que afectan con mayor rapidez a los granos de textura suave y amilácea, como los de Cacahuacintle (Tarango, 1997; Ramos y Gerón, 1998; González et al., 1999; González et al., 2006).

Material biológico

Como progenitores serán consideradas 16 variedades criollas de maíz Cacahuacintle, las cuales podrían colectarse durante el invierno del 2025, 2026 y 2027 (diciembre-enero), en las localidades de Zaragoza de Guadalupe, San Marcos de la Cruz, San Lorenzo Cuauhtenco, Santa María Nativitas y Cabecera Municipal. Estas colectas serían elegidas aleatoriamente de un padrón de 30 agricultores cooperantes, quienes han participado voluntariamente en la realización de otros estudios en este municipio (González et al., 2006; Jasso et al., 2019). Las variedades criollas serían donadas por los agricultores cooperantes que se muestran en la tabla 11.2.

iThenticate Página 192 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 193 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 11.2. *Relación de agricultores cooperantes*

Municipio de Calimaya de Díaz González	
Nombre	***Localidad***
Leobardo Jasso	Cabecera municipal
Miguel Romero	Cabecera municipal
Cosme Mendoza	Cabecera municipal
Esteban López	Cabecera municipal
Isaac Carmona	San Marcos de la Cruz
Pablo Bobadilla	San Marcos de la Cruz
Miguel Estévez	San Marcos de la Cruz
Federico Colín	San Lorenzo Cuauhtenco
Ubaldo Colín	San Lorenzo Cuauhtenco
Raúl Guadarrama	San Lorenzo Cuauhtenco
Ascensión Esquivel	Santa María Nativitas
Melitón Muciño	Santa María Nativitas
Pascual Rosales	Santa María Nativitas
Ariel Colín	Zaragoza de Guadalupe
Carmelo Delgado	Zaragoza de Guadalupe
Cupertino Delgado	Zaragoza de Guadalupe

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Diseño genético

Las cruzas intervarietales serán generadas con la metodología propuesta por Kemthorne y Curnow (1961), para un dialélico incompleto simétrico sin apareamientos recíprocos. Con $n = p = 16$, $s = 5$ y $k = 6$, se formarían 40 cruzas (tabla 11.1). Adicionalmente, se diseña otra opción con $n = 15$ y $s = 4$ para generar 30 cruzas (tabla 11.2); en ambos cuadros se incluyen sus cruzas recíprocas, previendo algún problema para generar los cruzamientos directos.

Para asegurar 2.0 kg de semilla en cada cruza se realizarán 40 polinizaciones; se estima una pérdida de 10 mazorcas en cada apareamiento y que cada mazorca cosechada rendirá 80 g de semilla de buena calidad.

iThenticate Página 193 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 194 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Fecha de siembra

Para garantizar que todos los cruzamientos planificados sean realizables, se establecerán en un mismo terreno dos lotes de polinización. Con base en la disponibilidad de humedad residual en los suelos para esa región, las fechas propuestas serían entre 1º y 10, y 11 y 20 de abril del 2026, aislado de otros predios donde se establezca este u otro tipo de maíz.

Distribución de las variedades en campo

En la tabla 11.3 se muestra la aleatorización de las 16 variedades progenitoras de Cacahuacintle para la fecha 1. En el lote habrá 16 parcelas trazadas en dos bloques incompletos, con ocho variedades dentro de cada uno. Cada parcela estará conformada por ocho hileras de 10.0 m de longitud, distanciados cada una a 0.80 m. Los bloques incompletos estarán separados a 2.0 m y el ancho de cada uno de éstos será de 52.0 m. En los extremos de ambos lotes se sembrará maíz Cacahuacintle a 83 333 plantas por ha (distancia entre plantas igual a 15 cm), dejando 4.0 m a la izquierda y a la derecha y 6.0 m en las partes superior e inferior. Con estas medidas la dimensión aproximada de cada lote de cruzamientos será de 3 600 m^2. La fecha 2 se aleatorizará de manera independiente a la fecha 1. Se utilizará rafia para delimitar ambos bloques dentro de cada fecha de siembra; en sus extremos será colocada una estaca de madera de 60 cm de altura. Con cal agrícola se delimitará su perímetro, el área que corresponda a cada progenitor, y a los bloques incompletos.

Tabla 11.3. *Fecha de siembra 1*

101	102	103	104	105	106	107	108
C1	**C16**	**C5**	**C8**	**C11**	**C4**	**C13**	**C9**
109	110	111	112	113	114	115	116
C2	**C15**	**C7**	**C4**	**C10**	**C12**	**C3**	**C6**

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

iThenticate Página 194 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 195 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

En la tabla anterior, las parcelas están numeradas consecutivamente, de izquierda a derecha; el primer número indica la fecha de siembra. Los cultivares de Cacahuacintle, aleatorizados dentro de cada fecha, se identificarían como C1, C2, C3, …, C16.

Tabla 11.4. *40 cruzas en Cacahuacintle que serían muestreadas si n = 16, s = 5, y k = 6 (CD, i<j; CR, i>j)*

Variedad i (♂)	***Variedad j (♂)***															
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16
V1							x	x	x	x	x					
V2								x	x	x	x	x				
V3									x	x	x	x	x			
V4										x	x	x	x	x		
V5											x	x	x	x	x	
V6												x	x	x	x	X
V7	x												x	x	x	X
V8	x	x												x	x	X
V9	x	x	x												x	X
V10	x	x	x	X												X
V11	x	x	x	X	x											
V12		x	x	X	x	X										
V13			X	X	x	X	x									
V14				X	x	X	x	x								
V15					x	X	x	x	x							
V16						X	x	x	x	x						

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Manejo agronómico en el lote de polinización

La preparación mecánica del suelo se realizará con un implemento agrícola llamado rotor, para incorporar los residuos de tallos y hojas de maíz que aun permanezcan en el suelo desde el ciclo agrícola anterior. Posteriormente éste se arará y rastreará usando tractor; durante casi dos meses no habrá movimiento de tierra (enero-febrero). Con la llegada de las primeras lluvias se efectuará una última rastra, uno o dos días antes del surcado, con la finalidad de no perder humedad residual ya que en esta zona no hay riego. El surcado

iThenticate Página 195 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 196 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 11.5. *30 cruzas en Cacahuacintle que serían muestreadas si n = 15, s = 4, y k = 6 (CD, i<j; CR, i>j)*

Variedad i (♂)	*Variedad j (♂)*														
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15
V1							x	x	x	x	x				
V2								x	x	x	x	x			
V3									x	x	x	x	x		
V4										x	x	x	x	x	
V5											x	x	x	x	x
V6												x	x	x	x
V7	x												x	x	x
V8	x	x												x	x
V9	x	x	x												x
V10	x	x	x	x											
V11		x	x	x	x										
V12			x	x	x	X									
V13				x	x	X	x								
V14					x	X	x	x							
V15						X	x	x	x						

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

en la fecha 1 se hará a 0.80 m entre hileras. Inmediatamente se trazará el lote de cruzamientos y se sembrarán manualmente las 16 variedades criollas de Cacahuacintle (tabla 11.1). En la siembra o con el surcado, se aplicarán 73 unidades de nitrógeno (N), 184 de fósforo (P) y 0 de potasio (K). Sin fertilizante químico podrían aplicarse 3 500 kg por ha^{-1} de gallinaza.

Como el distanciamiento entre plantas será de 20 cm, para manejar una densidad de población de 62 500 plantas por ha y, para ahorrar tiempo durante la siembra manual, se depositarán tres semillas por "golpe"; cuando las plántulas tengan entre 12 y 15 cm se eliminará la más débil en cada mata. En cada lote de cruzamiento se aplicarían 64 unidades de N, 46 de P y 60 de K, más 540 kg de materia orgánica, ésta última incorporada previamente.

En general, para una ha^{-1}, los agricultores contemplan en su paquete tecnológico una dosis de fertilización de 330 unidades de N, 368 de P y 120 de K, pero si se sustituye el fertilizante químico por la materia orgánica (3 500 kg) la dosis que utilizarían sería de 257 unidades de N, 184 de P y 120 de K. En siembra comercial esta dosis de fertilización variará, depen-

iThenticate Página 196 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 197 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

diendo de los recursos financieros de que dispongan los agricultores de esta región.

El control de maleza será manual, mecánico y químico; en este último serán aplicados 0.5 l y 0.3 kg de carfentrazone etil más ácido 2,4-diclorofenoxiacético, Gesaprim Calibre 90 y 0.2 kg de diurón; éstos serán mezclados físicamente para controlar maleza de hoja ancha. Para maleza de hoja angosta, como pastos, se aplicará paraquat en dosis de 0.5 l/ha. Éstos se aplicarán antes de los 95 días de haberse realizado la siembra. Para el control preventivo de insectos se aplicará 0.5 l de dimetoato y 200 ml de deltalmetrina. También, se utilizarán productos foliares de amplio espectro para favorecer el llenado de grano; se aplicará 0.5 l de Impulsor (bioestimulante) y 0.5 l de Sintek (inmunopotencializador), entre los 100 y 115 días de efectuada la siembra y previo a la floración femenina. Para un mejor llenado de grano se aplicará 1 kg de potasio por ha^{-1}. Estas aspersiones se harán cuando los estigmas aún están cubiertos por el totomoxtle para evitar daños durante la polinización y la fecundación. Ésta es una observación que pocos han identificado correctamente, llegándose a confundir con el efecto ocasionado por el daño de plagas o enfermedades.

La propuesta anterior está relacionada con un paquete tecnológico basado en la experiencia de los agricultores cooperantes que producen maíz raza Cacahuacintle en este municipio mexiquense. Las dosis que serán aplicadas en el lote de cruzamiento se calcularán a partir de la superficie sembrada considerando el ciclo vegetativo y reproductivo del maíz. Si hubiera algún daño extremo originado por insectos, enfermedades o por un factor abiótico se repetirían las dosis indicadas anteriormente.

Control manual de la polinización

Previo a esta actividad serán identificadas plantas que muestren competencia completa entre hileras y dentro de ellas; serán elegidas las de menor altura para facilitar la labor de referencia. Después del espigamiento se harán recorridos cada dos días en ambos lotes de cruzamiento para identificar plantas con anteras visibles que empiecen a derramar polen, inmediatamente se practicará el jiloteo introduciendo una bolsa de glassine entre el tallo y

iThenticate Página 197 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 198 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

el elote en desarrollo (jilote), esta bolsa de material encerado permanecerá sobre el jilote y cuando los estigmas tengan un desarrollo protuberante, con una longitud entre 2.0 y 2.5 cm, se colectará polen de varias plantas en una bolsa de papel de fondo automático del número 20, preferentemente entre las 9:00 y 11:00 am, y éste se trasladará a las parcelas que tengan en común a un progenitor. La bolsa de glassine será rota en su parte superior y al interior de esta se espolvoreará el polen, se hará una trenza en su extremo superior e inmediatamente se colocará una bolsa de papel del número 25. La bolsa de papel, colocada entre el jilote y el tallo, será engrapada por ambos extremos hacia su parte central. En su parte frontal se anotará, con marcador de cera, el tipo de cruza, la fecha en la que esta se realizó y un número consecutivo, comprendido entre 1 y 40. Durante toda la etapa de formación de grano, y previo a la cosecha manual, se harán recorridos diarios durante un mes y, cada cuatro días posteriormente, para verificar que las bolsas de papel no estén rotas, desengrapadas o desprendidas del tallo de las plantas; si éste fuera el caso, esas bolsas tendrían que reemplazarse.

Identificación de parcelas y de plantas dentro del lote de cruzamientos

En el lote de cruzamiento serán colocados dos tipos de etiquetas, entre mayo y junio del 2026. Al inicio de cada parcela se colocará una etiqueta grande (10 × 15 cm), en la parte central de la primera planta que sea la más visible. Posteriormente, en las hileras centrales de cada parcela, serán colocadas 40 etiquetas (3.5 × 7.0 m) por cruza y habrá en total 200 etiquetas por progenitor hembra. Los dos tipos de etiquetas serán rotulados con marcadores de cera.

Cosecha, secado, desgrane y selección de material

Las mazorcas provenientes de cada cruza serán cosechadas manualmente después de que éstas logren la madurez fisiológica, la cual se presentará en su mayor porcentaje al final de noviembre del 2026. Esta actividad se realizará por tipo de cruza entre el 5 y 15 de diciembre. Se utilizarán costa-

iThenticate Página 198 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 199 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

les de rafia o de henequén y las mazorcas serán trasladadas al invernadero núm. 1 de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Como opción, el material cosechado podría resguardarse en un cuarto o bodega en la cabecera municipal de referencia. Antes de desgranar cada una de las mazorcas cosechadas, en forma individual, éstas serán expuestas al sol, dentro del invernadero o fuera del cuarto o de la bodega, durante 15 días, para que el grano tenga entre 13 y 16% de humedad. Esta actividad evitará daños causados por hongos y bacterias. Preferentemente, se hará una selección visual de mazorcas sanas evitando desgranar la parte superior e inferior de cada una de estas debido a que el grano es más pequeño o grande, respectivamente, pero más heterogéneo que el que se produce en la parte central de la mazorca; si no hay suficiente semilla en algunas cruzas, deberá practicarse selección visual adicional en los granos provenientes de ambos extremos de la mazorca. Después de mezclar el grano proveniente de las mazorcas cosechadas en cada parcela, éste será pesado y almacenado en recipientes de aluminio o de plástico o en bolsas de plástico de cierre automático. Dentro y fuera de cada una de estas se mostrará visiblemente su identificación; la rotulación se hará con marcador de tinta permanente.

Uso de software gratuito

Se han encontrado tres paquetes estadísticos para realizar análisis genético estadístico para un sólo experimento de cruzas dialélicas parciales; en este contexto las opciones son: Statistical Analysis System (SAS), Opstat y Genes. De éstos, sólo los dos últimos se encuentran disponibles gratuitamente sin ninguna restricción, y SAS podría utilizarse con el mismo propósito en su versión académica de prueba o en su modalidad de SAS on Demand for Academics. Jasso et al. (2022) evaluaron ocho progenitores en un solo ambiente y Pérez et al. (2022) diseñaron algunos artificios para analizar una serie de experimentos. En ambas situaciones se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar aplicado a ocho líneas endogámicas de maíz de la raza Cónico con el uso de Opstat software. Esta misma situación podría abordarse si se utilizará el programa para SAS elaborado por Martínez (1991) con

iThenticate Página 199 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 200 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

una modificación en su código y con el diseño de algunos artificios, éste permitiría el análisis simultáneo de diversas variables en una serie de experimentos en tiempo, en espacio, o en ambos, pero esta última opción aun podría llevar más de un año debida a que una parte teórica para el análisis de este tipo de ensayos aún no ha sido desarrollada (Pérez et al., 2022).

Referencias

Awata, L. A. O., Tongoona, P., Danquah, E., Efie, B. E., y Marchelo-Dragga, P. W. (2018). Common Mating Designs in Agricultural Research and Their Reliability in Estimation of Genetic Parameters. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science, 11*(7), 16-36.

Christie, B. R., y Shattuck, V. I. (1992). The Diallel Cross: Design, Analysis, and Use for Plant Breeders. *Plant Breeding Reviews, 9*(1), 9-36.

Chaudhary, B. D., Kakar, S. N., y Singh, R. K. (1977). Comparison of diallel and its modifications. *Silvae Genetica, 26*(1), 61-120.

Fyfe, J. L., y Gilbert, N. (1963). Partial diallel crosses. *Biometrics, 19*(2), 278-286.

Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences, 9*(4), 463-493.

Gomez, K. A., y Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. (2ª ed.). John Wiley and Sons, Inc.

González, H. A., Aguilar, L. B., Nájera, F. I., Calvo, G., Sahagún, J., Pérez, D. J., Landeros, V., y Serrato, R. (1999). Problemática ambiental y análisis económico de la agricultura del municipio de Calimaya de Díaz González, México. En UAQ-IPN (Coord.), Memoria del Primer Seminario Internacional Tecnología-Industria-Territorio.

González, H. A., Sahagún, C. J., Pérez, L. D. J., Domínguez, L. A., Landeros, F. V., y Serrato, C. R. (2006). Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 29*(3), 255-261.

González, H. A., Sahagún, C. J., y Pérez, L. D. J. (2007). Estudio de ocho líneas de maíz en un experimento dialélico incompleto. *Revista de Ciencias Agrícolas Informa, 16*(1), 3-9.

Hinkelmann, K., y Stern, K. (1960). Kreuzungspläne zur selektionszüchtung bei waldbäumen. *Silvae Genetica, 9*(3), 121-133.

Jasso, B. G., Pérez, L. D, J., González, H, A., Sangermán, J, D, M., Navarro B, A. (2019). Estudio Preliminar para determinar diferencias fenotípicas y tamaño de muestra en maíz Cacahuacintle. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10*(8), 1771-1782.

Jasso, B. G., González, H, A., Pérez, L. D, J., Franco, M, J. R. P., Rubí, A. M., y Mejía, C. J. (2022). Uso de Opstat para validar resultados en un dialélico parcial con ocho líneas de maíz evaluadas en un ambiente. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13*(1), 41-52.

iThenticate Página 200 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 201 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Kempthorne, O., y Curnow, R. N. (1961). The partial diallel cross. *Biometrics, 17*(2), 229-250.

Martínez, G. A. (1991). Análisis de los experimentos dialélicos a través del procedimiento IML de SAS. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Estado de México. *Comunicaciones en Estadística y Cómputo. Centro de Estadística y Cálculo, 10*(2), 1-36.

Martínez, G. A. (1998). *Diseños experimentales: métodos y elementos de teoría*. Trillas.

Miranda, F., J. B., y Vencovsky, R. (1999). The Partial Circulant Diallel Cross at the Interpopulation level. *Genetics and Molecular Biology, 22,* 249-255.

Muntaz, A., Zafar, F., Aamar, S.S. (2015). A Review on Mating Designs. *Nature and Science, 13*(2), 98-105.

Murthy, B. R., Arunachalam, V., y Anand, I. J. (1966). Diallel and partial diallel analysis of some yield factors in Linum usitatissimum. *Heredity, 22*(1), 35-41.

Pérez, L. D. J., Franco, M. J. R. P., Gutiérrez, R. F., Hernández, A. J., Balbuena, M. A., González, H. A. (2021). Diseño de experimentos factoriales 2n para su análisis con infoStat e infoGen. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 12(6): 1087−1099.

Ramos, R. A., Gerón, X. F. (1998). Origen y Distribución Geográfica, Diversidad y Potencial Productivo de la Raz a de Maíz Cacahuacintle. En *Memoria del Seminario Mesoamericano sobre Agrodiversidad en la Agricultura Campesina* (pp. 89-94). UAEMéx.

Rojas, M. B. A. (1973). *Design and analysis of diallel crosses. Department of Experimental Statistics.* New Mexico State University.

Tarango, M. V. M. (1997). *Plan de Desarrollo Municipal 1997-2000* (pp. 25-40). H. Ayuntamiento Constitucional de Calimaya de Díaz González.

Saavedra, G. C., Pérez, D. J., González, A., Franco, J. R. P., Rubí, M., y Ramírez, J. F. (2021). Métodos de Griffing: revisión sobre su importancia y aplicación en fitomejoramiento convencional. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12*(7), 1275-1286.

Shunmugathai, R., y Srinivasan, M. R. (2012). Robustness of PDC Plan using BIB Mating Designs against unavailability of One or More Observations. *International Journal of Mathematics and Scientific Computing, 2*(2), 32-40.

Silva, C.M., Miranda, F. J.B., Mendes, U.C., y Reis, E. F. (2017). Partial Diallel Cross for Predicting Yield of Semiexotic Maize Populations. *Genetics and Molecular Research, 16*(1), 1-16.

Singh, R. K., y Chaudhary, B. D. (1985). *Biometrical Methods in Quantitative Genetic Analysis. Revised.* Kalyani Publishers.

Agradecimientos

Se le agradece al programa de Investigadoras e investigadores Comecyt 2025, modalidad Cátedra de Investigación por el apoyo recibido para el envío y publicación del presente capítulo.

iThenticate Página 201 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 202 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

12. Análisis de la aptitud combinatoria y de la heterosis en chile manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.)

Imelda Martinez Estrada*
Jaime Mejía Carranza**§
Andrés González Huerta***

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.12

Resumen

Las cruzas dialélicas han sido usadas como una herramienta útil para investigar la aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE), para identificar progenitores superiores y cruzas sobresalientes, y para predecir el comportamiento potencial en nuevo material genético. En esta investigación se estimó la ACG en seis poblaciones de chile Manzano (*Capsicum pubescens* R. y P.), la ACE de sus 15 cruzas y la heterosis. El experimento se hizo en un invernadero del Centro Universitario Tenancingo de la Universidad Autónoma del Estado de México. Se establecieron 21 tratamientos en hileras en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la distancia entre plantas y entre hileras fue de 0.6 y 2.0 m, respectivamente. Se midieron días a emergencia (DE), altura de planta (ADP), ancho de planta (AP), días a floración (DFL), flores por planta (NFL), días a fructificación (DFR) y peso promedio del fruto (PIF). Los efectos de ACG y ACE se estimaron con el método 2 de Griffing. La heterosis se estimó con la media

§ Autor para correspondencia: jmejiac@uaemex.mx
* Maestra en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por el Centro Universitario Tenancingo, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8057-6426
** Doctor en Genética y Biología de Estrés de Cultivos Vegetales. Profesor de tiempo de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3876-0788
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597

iThenticate Página 202 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 203 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de ambos progenitores y con el mejor de ellos. En los progenitores identificados como P1 a P10 se estimaron efectos de *gi* negativos en DFL y DFR que influyeron en mayor precocidad a la producción. Los efectos de ACE fueron positivos en PIF en la cruza P3 × P8, y negativos en DE, DFL y DFR en P10 × P7 y P10 × P8; P10 × P8 fue más precoz que la variedad comercial P3. P10 × P6 mostró 60% de heterosis con respecto a la media de sus progenitores en NFL. En DFR, P3 × P8 tuvo una heterosis de 9.43% respecto al mejor de sus padres. Los resultados anteriores indicaron que los progenitores podrían utilizarse en nuevos programas de mejoramiento genético por selección para el desarrollo de poblaciones sobresalientes.

Palabras clave: *Método 2 de Griffing, modelo I, variabilidad genética, selección, hibridación.*

Introducción

México, en superficie cultivada de chile (*Capsicum* spp.) ocupa el tercer lugar a nivel mundial, después de China e Indonesia; se siembran 92 292.22 ha y cosechan 2 718 211.88 t (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta [Siacon], 2018). Entre las especies más cultivadas destacan *Capsicum annuum* L., con las variedades Jalapeño (29 000 ha), Poblano (17 000 ha), Serrano (13 000 ha) y Guajillo (6 000 ha); *Capicum chinensis*, con chile Habanero (847.86 ha); y *C. pubescens* Ruiz y Pavón con chile Manzano (490.5 ha). Esta última se cultiva en sistema tradicional a cielo abierto en 438 ha y de manera intensiva bajo invernadero en 52.5 ha, principalmente para exportación (Siacon, 2018; Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [Senasica], 2019); *C. pubescens* se cultiva entre 1 300 y 3 000 msnm (Montes, 2010) en Michoacán, Puebla, Veracruz y el Estado de México (Aguilar et al., 2010); en este último, la producción se concentra en Coatepec Harinas, Texcaltitlán, Villa Guerrero y Tenancingo.

El rendimiento en chile Manzano cultivado a cielo abierto es de 14.11 t ha^{-1}, pero bajo invernadero y con manejo agronómico para exportación se alcanzan hasta 75 t ha^{-1} (Pérez y Castro, 2008), y se vende entre 2.0 y 4.0

iThenticate Página 203 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 204 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

dólares por kilo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [Sader], 2013). Esta especie tiene un alto valor nutritivo y también posee propiedades útiles para la industria farmacéutica (Antonius et al., 2006). La producción de *C. pubescens* en el sur mexiquense, se fundamenta en el uso de genotipos criollos contrastantes en forma, tamaño del fruto y tolerancia a enfermedades, entre otros caracteres (Vallejo et al., 2018), los cuales repercuten directamente en el rendimiento. En este contexto, la caracterización morfológica, fisiológica y molecular son importantes para hacer inferencias sobre su potencial genético y para identificar lo más sobresaliente (Borgi y Baldi, 1970; Cervantes, 2010).

Las cruzas dialélicas se han utilizado para estimar ACG y ACE y para determinar el valor genético de un grupo élite de progenitores y de sus cruzas (Sprague y Tatum, 1942; González et al., 2007a y 2007b; Guillen et al., 2009) de tal manera que puedan ser usados en el desarrollo de mejores cultivares (Yan y Hunt, 2002) o en la predicción del comportamiento potencial en nuevo un material genético (González et al., 2007a y 2007b). En los últimos 70 años se han diseñado y aplicado varios métodos para el análisis de cruzas dialélicas, como los de Jinks y Hayman (1953), y Jinks (1954), pero los más usados han sido los de Griffing (1956).

Otro parámetro genético que debe evaluarse es la heterosis o vigor híbrido, orientado a la determinación de la superioridad en crecimiento, tamaño, rendimiento y calidad, entre otros caracteres, que las progenies deben manifestar con relación a sus progenitores o al mejor de ellos (Moll et al., 1962; González et al., 2007a), cómo en el género *Capsicum* donde se observó un incremento en el rendimiento y en la concentración de capsaicina (8-metil-N-vanillil-6-nonenamida) (Souza y Maluf, 2003; Seneviratne y Kannangara, 2004). A pesar del incremento en la superficie cultivada del chile Manzano en los últimos 5 años, existen serios problemas que aquejan su productividad y calidad, como la heterogeneidad que causan los efectos ambientales, de manejo agronómico, los paquetes tecnológicos y los daños que originan las plagas y las enfermedades, entre otros. Por lo tanto, es deseable definir su estructura genética para evaluar, identificar y recomendar comercialmente a los progenitores y cruzas más sobresalientes. El objetivo principal de esta investigación fue estimar la

iThenticate Página 204 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 205 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ACG y ACE en chile Manzano, así como la heterosis relacionada con algunos componentes del rendimiento del fruto.

Materiales y métodos

Ubicación

Esta investigación se realizó en el Centro Universitario Tenancingo, de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicado a 18º 58' 05.53" de latitud norte y 99º 36' 50.51" de longitud oeste, a 2 065 msnm.

Material biológico

Se utilizaron muestras de seis poblaciones, contrastantes en forma, color y rendimiento de fruto (tabla 12.1).

Derivación de las cruzas

Al aplicar $p(p-1)/2$, donde $p=6$ es el número de progenitores elegido (Reyes, 1982), de mayo a octubre del 2017 se formaron 15 cruzas. En el progenitor femenino se eligieron botones florales con tres días previos a la apertura, emasculados por desprendimiento mecánico de anteras indehiscentes. Del progenitor masculino se utilizaron flores completamente abiertas con anteras dehiscentes y abundantes en polen. La polinización en los estigmas se hizo por fricción suave de la antera, previamente desprendida por su filamento de la flor. Las cruzas fueron protegidas durante ocho días con bolsas de glassine, para evitar contaminación con polen extraño.

iThenticate Página 205 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 206 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Recolección de frutos y siembra de semilla híbrida

Los frutos se cosecharon en madurez fisiológica, identificada por uniformidad en la coloración típica del pericarpio, y de estos se extrajo la semilla que se sembró en laboratorio en charolas negras de polietileno con turba (Kekkila) y agrolita en una relación 1:1 (v/v).

Tabla 12.1. *Descripción de los seis progenitores utilizados en este estudio*

Progenitor	*Color*	*Número de lóculos*	*Peso promedio del fruto*
P1		2	45-60 g
P3		3	45-65 g
P6		3	40-50 g
P7		2	45-68 g
P8		3	40-50 g
P10		3	40-60 g

Fuente: Elaboración propia.

iThenticate Página 206 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 207 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Trasplante

Se hizo en invernadero a los 62 días de la siembra, cuando las plántulas, de 15 cm en promedio, presentaron ocho hojas verdaderas. Se colocó una plántula por bolsa de plástico negro de 45 cm, y con 80% de tezontle rojo de granulometría entre 0.5 y 1.0 cm de diámetro.

Diseño y conducción del experimento

Las plantas de los seis progenitores y de sus 15 cruzas (tratamientos) se establecieron en hileras separadas a 2.0 m, con distancia entre plantas de 0.6 m, en un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue una bolsa de plástico conteniendo una planta. Las condiciones ambientales del invernadero fueron intensidad lumínica promedio de 60 µmol•m^{2}•s^{-1}, humedad relativa de 50-75% y temperatura promedio de 24 °C, con oscilaciones desde 5 a 36°C. El suministro de agua y la aplicación de la fertilización se hicieron como lo sugirió Steiner (1984), a 100%, suministrado en riego por goteo. Complementariamente, se aplicaron dosis foliares de 19N–19P–19K cada 15 días. El control de mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood), trips (*Frankliniella occidentalis* Pergande), araña roja (*Tetranychus urticae* Koch) y ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus* Bancs), se hizo con abamectinas, cipermetrinas, mancoceb, zineb, benomilo, prochloraz, en dosis recomendada por el fabricante.

Variables medidas

Se evaluaron días a emergencia de plántula (DE), altura de planta (ADP, en centímetros), ancho de planta (AP, en centímetros), días a floración (DFL), flores por planta (NFL), días a fructificación (DFR) y peso promedio del fruto (PIF, en gramos).

iThenticate Página 207 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 208 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Análisis estadístico

Se hizo un análisis dialélico y cuando hubo diferencias significativas entre tratamientos se hizo la comparación de medias entre todas las parejas diferentes de progenitores y cruzas con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los efectos de ACG y ACE se estimaron con el método 2 de Griffing (1956), modelo I. Estos análisis estadísticos se efectuaron con el Sistema para Análisis Estadístico (SAS, versión 6.01) y con InfoStat (versión 2017), ambos para ambiente Windows; las salidas fueron verificadas con el programa de Zhang y Kang (1997), modificado por los autores del presente capítulo. El análisis de componentes principales, para representar las interrelaciones entre variables y tratamientos, se hizo con InfoStat. En los componentes 1 y 2 del biplot se representó el mayor porcentaje de la variabilidad fenotípica total.

Heterosis

Se estimó con la media de los padres, P1 y P2 (H), y con el mejor de ellos, PS (HB) (Fehr, 1987; Falconer y Mackay, 1996; González et al., 2007a).

$$(1)\quad \mathrm{H} = \left[\frac{F1 - \left(\frac{P1 + P2}{2}\right)}{\left(\frac{P1 + P2}{2}\right)}\right]100$$

$$(2)\quad HB = \left[\frac{F1 - PS}{PS}\right]100$$

Los cálculos de heterosis fueron verificados con TNAUSTAT software; con este se estimaron los efectos y varianzas de ACG y ACE para el método 2 de Griffing (1956), modelos I y II, respectivamente, cuando se utiliza DOSBox software, que se transforma en plataforma y vínculo entre MS DOS y Windows.

Resultados y discusión

La estratificación del área de trabajo, colocando las unidades experimentales en sentido perpendicular al principal gradiente de variación, fue eficiente

iThenticate Página 208 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 209 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

para disminuir la heterogeneidad dentro de las repeticiones; sólo se detectaron diferencias significativas entre bloques ($p = 0.05$) en el peso promedio del fruto (PIF). Los coeficientes de variación (CV) fueron del 2.25 a 25.86%. Este hecho es importante para reducir el error experimental y, principalmente, para probar confiablemente las pruebas de hipótesis relacionadas con las fuentes de variación de interés en una tabla dialélica (tabla 12.2). Resultados similares se encontraron en chiles nativos de Oaxaca, pero con CV superiores a 30% en número y peso de frutos por planta, lo que muestra que los progenitores e híbridos difirieron fenotípicamente en una o más características (Martínez et al., 2014). En otros estudios realizados en *C. annuum* hubo CV entre 2.38 y 35.76% (Chakrabarty et al., 2019).

Tabla 12.2. *Cuadrados medios y significancia estadística de los valores de F*

Fuente de variación	*G. L.*	*DE*	*AP*	*ADP*	*DFL*	*NFL*	*DFR*	*PIF*
Repeticiones	4	2.46ns	130.59ns	112.36ns	10.60ns	344.8ns	335.5ns	152.6*
Cruzas	20	4.39**	1251.77**	392.15**	1686.86**	441.4**	1640.8**	220.6**
ACG	5	1.44ns	1742.93**	568.52**	1854.91**	606.4**	1850.5**	326.8**
ACE	15	5.37**	1088.04**	333.36**	1630.85**	386.4*	1570.9**	185.3**
Error	80	1.27	112.48	86.87	15.83	185.8	368.2	61.1
MA		12.91	76.52	100.87	176.83	52.71	193.44	50.50
CV (%)		8.76	13.86	9.24	2.25	25.86	9.92	15.48

Nota.:DE = días a emergencia; AP = ancho de planta; ADP = altura de planta; DFL = días a floración; NFL = flores por planta; DFR = días a fructificación; PIF = peso promedio del fruto; G.L. = grados de libertad; ACG = aptitud combinatoria general; ACE = aptitud combinatoria específica; MA = media aritmética; CV = coeficiente de variación; * o ** = significativo al 0.05 o 0.01, respectivamente.

Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada (2020).

Los efectos entre tratamientos (progenitores más cruzas) fueron altamente significativos ($p = 0.01$) en todas las variables. Este hecho indica que existe variabilidad fenotípica importante que debe ser analizada con otras metodologías estadísticas, como la prueba de Tukey, el método 2 de Griffing y el cálculo del vigor híbrido, para identificar una fracción superior del material genético para recomendación en otros estudios genéticos o para generar, validar, aplicar o transferir tecnología (González et al., 2007a y 2007b).

iThenticate Página 209 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 210 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 12.3. *Efectos de* gi *y* Sij *para seis progenitores y sus 15 cruzas, respectivamente*

Progenitor/ cruza	*DE*	*AP*	*ADP*	*DFL*	*DFR*	*NFL*	*PIF*
P10	0.19	11.34**	0.02	−11.77**	−2.63	0.35	0.34
P3	−0.03	−8.91**	4.02*	6.23**	−5.25	−3.62	3.92*
P6	0.09	−2.21	2.92	6.18**	8.63*	0.58	−1.78
P7	0.14	−0.86	1.07	3.08**	6.90	−5.40*	1.79
P8	−0.33	1.74	−1.50	−1.72*	0.95	4.40	−4.36*
P1	−0.06	−1.11	−6.55**	−1.97*	−8.60*	3.70	0.09
P10xP3	1.15*	−10.36*	16.64**	13.58**	22.45**	−7.84	4.85
P10xP6	−0.18	1.54	9.34*	10.83**	0.57	23.16**	−3.45
P10xP7	−1.83**	28.19**	−11.01**	−9.67**	−26.50**	−1.06	−6.43
P10xP8	−1.15*	22.39**	−12.84**	−40.07**	−21.15	−5.46	−8.48*
P10xP1	−1.03*	19.84**	1.01	−37.82**	−11.00	−9.56	−8.13*
P3xP6	−0.95	1.19	1.34	−4.97**	7.20	−1.86	−5.63
P3xP7	1.20*	−3.96	4.79	−1.87	10.92	2.11	−4.80
P3xP8	1.07*	0.24	0.36	0.93	10.87	2.11	4.15
P3xP1	−0.40	7.89	1.21	1.18	22.42**	0.41	−5.90
P6xP7	0.07	3.94	−0.11	−1.82	−4.95	7.31	0.30
P6xP8	−0.65	−4.06	2.66	1.58	−3.00	0.91	−1.35
P6xP1	0.67	5.19	−0.89	1.83	5.55	1.81	4.00
P7xP8	−0.30	−3.81	6.31	6.08**	2.72	−8.51	−2.93
P7xP1	0.42	−3.96	6.96	2.33	12.27	3.59	1.22
P8xP1	0.70	−2.36	1.34	9.73**	−2.78	0.79	3.77
SE gi	0.1631	1.5308	1.3453	0.5744	2.7698	10.5145	1.1285
SE SJI	0.4479	4.2042	3.6948	1.5775	7.6072	40.1184	3.0994

Nota. *, ** Significativo a 5 o 1%, respectivamente. SE *gi* y SE *Sij*, errores estándar para la comparación de efectos genéticos entre progenitores o cruzas, respectivamente.
Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada, 2020.

Los efectos de aptitud combinatoria general (ACG) que se observaron en los progenitores en la tabla dialélica fueron altamente significativos ($p = 0.01$), excepto en días a emergencia de plántula (DE) (tabla 12.2). Estos resultados fueron verificados al fraccionar la estructura genética de los progenitores por medio de sus estimaciones de *gi* o *gj* (tabla 12.3). Pérez et al. (2009) reportaron resultados similares. Si existe poca variabilidad fenotípica entre progenitores o menor diversidad genética entre ellos, hay menor probabilidad de detectar alelos aditivos significativos (González et

iThenticate Página 210 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 211 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

al., 2007a y 2007b; El-Badawy, 2013). Estos hechos sugieren que es posible iniciar un programa de mejoramiento aplicando alguna técnica de selección en los progenitores más sobresalientes, debido a que los efectos genéticos aditivos fueron más importantes en la determinación de su estructura genética (tablas 12.2 y 12.3).

Valores de ACG positiva para rendimiento, longitud y peso de fruto también han sido reportados por otros investigadores (Chakrabarty et al., 2019; Cervantes-Ortiz et al., 2016) si en una población Estos son mayores que los de ACE, es más recomendable su mejoramiento por selección recurrente para seguir acumulando genes deseables. También lo son para ampliar la diversidad genética en el germoplasma y para predecir confiablemente el comportamiento fenotípico promedio en las progenies de las cruzas que surjan entre los progenitores más deseables (González et al., 2007a y 2007b).

Los efectos de aptitud combinatoria específica (ACE) que se detectaron en la tabla dialélica también fueron altamente significativos ($p = 0.01$) en todas las variables. Estos resultados son verificables al observar las estimaciones de *Sij* que se muestran en la tabla 12.3. Pérez et al. (2009) coincidieron en la estimación de efectos no aditivos significativos en tamaño del fruto en chile Manzano. Este hecho sugiere la formación de híbridos a partir de poblaciones contrastantes y indica que hay heterosis en el material más sobresaliente, la misma que tiene relación directa con genes no aditivos. Desafortunadamente, el método 2 de Griffing (1956) no permite separar la contribución de la epistasis y de la dominancia (González et al., 2007a y 2007b; El-Badawy, 2013).

En peso promedio del fruto (PIF) los mejores tratamientos correspondieron a los progenitores P10, P3 y P7 (62, 62 y 60); los híbridos más sobresalientes (entre 50.0 y 59.6 g), iguales estadísticamente a ellos, fueron P10 × P3, P3 × P7, P3 × P8, P6 × P7, P6 × P1, P7 × P1 y P8 × P1; estos se agruparon estadísticamente de la misma manera en DE (tabla 12.4). Este hecho subraya la importancia de identificar material genético con más días a emergencia de la plántula, como un indicador confiable de plantas con mayor ciclo biológico o reproductivo, que contribuya a favorecer frutos más grandes (tabla 12.4). Hasanuzzaman et al. (2013), en investigaciones realizadas en híbridos de *C. annuum*, también reportaron una disminución en días a floración.

iThenticate Página 211 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 212 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

En los híbridos, al haber más flores y frutos, se incrementa la competencia *inter* e *intra* planta por los fotoasimilados, condición que puede limitar su crecimiento individual, pero una práctica de aclareo podría contribuir a un mejor llenado de fruto (Rodríguez et al., 2015), o también se puede aplicar un mejor paquete tecnológico para aumentar la producción por planta (González et al., 2007a y 2007b; Cedeño et al., 2018).

Tabla 12.4. *Comparación de medias entre tratamientos (padres y cruzas)*

Núm. de tratamiento	*DE*	*ADP*	*AP*	*DFL*	*NFL*	*DFR*	*PIF*
1. P10	14.8 a	99.4 bcde	68.4 cd	184.8 a	53.8 ab	206.0 ab	62.0 a
2. P3	11.8 bc	96.8 bcde	61.2 d	184.8 a	48.0 ab	146.0 c	62.0 a
3. P6	13.6 abc	100.6 a-e	68.2 cd	185.4 a	38.2 b	208.0 a	50.0 abc
4. P7	13.4 abc	99.6 bcde	64.6 cd	185.4 a	40.2 b	210.0 a	60.4 ab
5. P8	12.4 abc	99.0 bcde	73.8 cd	184.2 a	66.6 ab	202.0 ab	44.2 abc
6. P1	12.6 abc	83.0 e	61.0 d	184.2 a	61.6 ab	163.0 bc	53.2 abc
7. P10xP3	14.2 ab	121.6 a	68.6 cd	184.8 a	41.6 b	208.0 a	59.6 ab
8. P10xP6	13.0 abc	113.2 ab	87.2 bc	182.0	76.8 a	200.0 ab	45.6 abc
9. P10xP7	11.4 c	91.0 cde	115.2 a	158.4 b	46.6 ab	171.2 abc	46.2 abc
10. P10xP8	11.6 bc	86.6 de	112.0 a	123.2 c	52.0 ab	170.6 abc	38.0 c
11. P10xP1	12.0 bc	95.4 bcde	106.6 ab	125.2 c	47.2 ab	171.2 abc	42.8 bc
12. P3xP6	12.0 bc	109.2 abc	66.6 cd	184.2 a	47.8 ab	204.0 ab	47.0 abc
13. P3xP7	14.2 ab	110.8 abc	62.8 cd	184.2 a	45.8 ab	206.0 ab	51.4 abc
14. P3xP8	13.6 abc	103.8 a-e	69.6 cd	182.2 a	55.6 ab	200.0 ab	54.2 abc
15. P3xP1	12.4 abc	99.6 bcde	74.4 cd	182.2 a	53.2 ab	202.0 ab	48.6 abc
16. P6xP7	13.2 abc	104.8 abcd	77.4 cd	184.2 a	55.2 ab	204.0 ab	50.8 abc
17. P6xP8	12.0 bc	105.0 abcd	72.0 cd	182.8 a	58.6 ab	200.0 ab	43.0 bc
18. P6xP1	13.6 abc	96.4 bcde	78.4 cd	182.8 a	58.8 ab	199.0 ab	52.8 abc
19. P7xP8	12.4 abc	106.8 abcd	73.6 cd	184.2 a	43.2 b	204.0 ab	45.0 abc
20. P7xP1	13.4 abc	102.4 a-e	70.6 cd	180.2 a	54.6 ab	204.0 ab	53.6 abc
21. P8xP1	13.2 abc	94.2 bcde	74.8 cd	182.8 a	61.6 ab	183.0 abc	50.0 abc

Nota.: DE = días a emergencia; AP = ancho de planta; ADP = altura de planta; DFL = días a floración; DFR = días a fructificación; NFL = flores por planta; PIF = peso promedio del fruto; CV = coeficiente de variación; DMSH = Diferencia Mínima Significativa Honesta. Las medias de tratamiento dentro de cada columna, identificadas con la misma literal, son iguales estadísticamente (Tukey, $p = 0.05$).

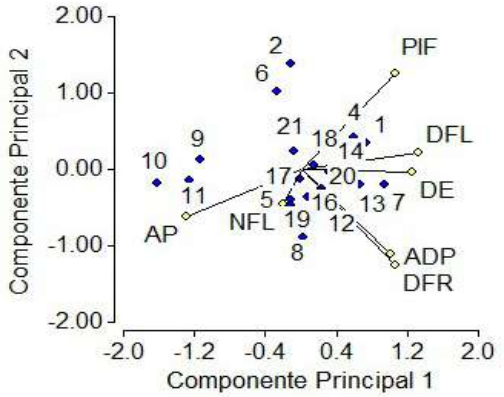
Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada (2020).

iThenticate Página 212 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 213 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

La superioridad que mostraron las tres cruzas sobresalientes y, particularmente P10×P3, se atribuye a que tuvieron más días a floración (DFL) y a fructificación (DFR), menos flores por planta (NFL), y mayor anchura (AP) y porte de planta (ADP) (tabla 12.4; gráfica 12.1). En chiles nativos de Oaxaca, floración y fructificación en híbridos derivados a partir de estos fue ligeramente más tardía que en sus progenitores (Martínez et al., 2014).

Gráfica 12.1. *Biplot que muestra las interrelaciones entre los tratamientos (en números), y las variables (en letras)*



Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada (2020).

Sin embargo, los efectos de *Sij* para P10 × P3 sólo fueron positivos y significativos en DE, ADP y DFL, y negativos y significativos en AP. En P10 las estimaciones de *gi*, positivas y significativas, se observaron en AP, y estas fueron negativas y significativas en DFL. En P3, los valores de *gj*, positivos y significativos, se registraron en ADP, PIF, y DFL, y éstos fueron negativos y significativos en AP (tabla 12.4).

P3 × P8, la segunda mejor cruza en PIF, también se agrupó similarmente con P10 × P3 en las otras variables evaluadas, con excepción de ancho de planta (AP), donde ambas difirieron estadísticamente. P3 tuvo valores de gi positivos y significativos en ADP, DFL, y PIF, y negativos y significativos en AP, DFR y NFL. En P8 las estimaciones de *gj* fueron negativas y significativas en DFL y PIF. En las progenies generadas con ambos padres sólo en DE los efectos de *Sij* fueron positivos y significativos (tabla 12.3).

P7 × P1, la tercera mejor cruza en PIF, se comportó estadísticamente de

iThenticate Página 213 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 214 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

manera similar a P3 × P8. Las estimaciones para *gi* en P7 fueron positivas y significativas en DFL, y negativas y significativas en NFL. Los efectos de *gj* en P1 fueron negativos y significativos en ADP, DFL y DFR, pero no en *Sij* en ninguna variable (tabla 12.3).

En ADP, P10×P3 superó estadísticamente a la media de sus padres (H) en 23.9%. Esta misma condición se observó en DFR (H = 18.8%). Con relación al mejor progenitor (HB), sólo hubo diferencias significativas en ADP (22.3%). En DE y DFR, P3 × P8 fue significativamente mejor que sus progenitores (H = 12.4 y 14.9%, respectivamente). En ADP y DFL, P7 × P1 mostró heterosis promedio estadísticamente superior (H = 2.1%) o inferior (H = −2.5%), respectivamente. En DFL, la estimación de HB fue de −2.8% (tabla 12.5).

Los resultados anteriores, y otros que se pueden observar en la tabla 12.5, indican que hubo poca heterosis en la variable más importante, el peso promedio del fruto, debido a que las progenies de la mayoría de las cruzas no superaron a la media de sus padres o al mejor de ellos. Resultados similares se encontraron en híbridos de *Capsicum annuum* en el sur de Etiopía en número de frutos por planta y peso seco del fruto (Shumbulo et al., 2017). En estudios con *C. annum*, Chakrabarty et al. (2019) mencionaron que sólo dos cruzas superaron en rendimiento al mejor progenitor; ellos atribuyeron esta limitante al poco distanciamiento genético que presentaron sus progenitores. A nivel genético, en la mayoría de las especies domesticadas, se ha reportado una reducción drástica de la diversidad genética con respecto a sus parientes silvestres; ésta se ha atribuido al efecto fundador durante el proceso de domesticación, en el que pocas plantas silvestres fueron elegidas progenitores de nuevas poblaciones cultivadas (Ladizinsky, 1998). Cruz y Souza (2003) mencionaron que cuando dos padres son distantes genéticamente, difieren en más *loci* heterocigotos y los efectos de dominancia son más evidentes y éstos contribuyen a la manifestación de mayor vigor híbrido.

En el presente estudio, debido a la cercanía de los progenitores no fue tan notorio el aumento en vigor. Estos resultados coinciden con los de Pérez et al. (2009) quienes mencionaron que para calidad de fruto pueden ser utilizadas las técnicas de selección, ya que solo tres de las 15 hibridaciones mostraron heterosis positiva donde se utilizó un progenitor proveniente de Perú, con un distanciamiento geográfico mayor al de los demás padres. En

iThenticate Página 214 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate
Página 215 de 338 - Engrega de integridad
[216]
Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 12.5. *Heterosis (%) estimada con la media de los padres (H) o con el mejor de ellos (HB)*

Cruza	*DE*		*AP*		*ADP*		*DFL*		*NFL*		*DFR*		*PIF*	
	H	*HB*	*H*	*HB*	*H*	*HB*	*H*	*HB*	*H*	*HB*	*H*	*HB*	*H*	*HB*
P10 x P3	6.7	−4.0	5.8	0.3	23.9**	22.3*	0.0	0.0	−18.2	−22.6	18.8**	0.9	−3.8	−3.8
P10 x P6	−8.4	−12.1*	27.6**	27.5**	13.2*	12.5*	−1.6	−1.8	66.9**	42.7**	−3.3	−3.8	−18.5**	−26**
P10 x P7	−19.1**	−22.9**	73.2**	68.4**	−8.5	−8.6	−14.4**	−14.5**	−0.8	−13.3	−17.7**	−18.5**	−24.5**	−25**
P10 x P8	−14.7**	−21.6**	57.5**	51.7**	−12.7*	−12.9*	−33.2**	−33.3**	−13.6	−21.9	−16.3**	−17.2**	−28.4**	−38**
P10 x P1	−12.4**	−18.9**	64.7**	55.8**	4.6	−4.0	−32.1**	−32.2**	−18.2	−23.3	−7.2	−16.9**	−25.7**	−31**
P3 x P6	−5.5	−11.7*	2.9	−2.3	10.6*	8.5	−0.5	−0.6	10.9	−0.4	15.2*	−1.9	−16.0*	−24**
P3 x P7	12.7*	5.9	−0.1	−2.8	12.8*	11.2	−0.5	−0.6	3.8	−4.6	15.7**	−1.9	−16.0*	−17*
P3 x P8	12.4*	9.6	3.1	−5.7	6.0	4.85	−1.2	−1.4	−2.9	−16.5	14.9*	−1.0	2.0	−12.5
P3 x P1	1.6	−1.6	21.7*	21.6	10.8	2.9	−1.2	−1.4	−2.9	−13.6	30.7**	23.9**	−15.6*	−21**
P6 x P7	−2.2	−2.9	16.5	13.5	4.7	4.1	−0.6	−0.6	40.8*	37.3	−2.3	−2.8	−7.9	−15.9
P6 x P8	−7.7	−11.7*	1.4	−2.4	5.2	4.3	−1.0	−1.4	11.8	−12.0	−2.4	−3.8	−8.7	−14.0
P6 x P1	3.8	0.0	21.3*	14.9	5.0	−4.1	−1.0	−1.4	17.8	−4.5	7.3	−4.3	2.3	−0.7
P7 x P8	−3.8	−7.46	6.3	−0.2	7.5	7.2	−0.3	−0.6*	−19.0	−35.1**	−0.9	−2.8	−13.9	−25**
P7 x P1	3.1	0.0	12.4	9.3	12.1*	2.8	−2.5*	−2.8*	7.2	−11.3	9.4	−2.8	−5.6	−11.2
P8 x P1	5.6	4.7	10.9	1.3	3.5	−4.8	−0.7	−0.7	−3.9	−7.5	0.2	−9.4	2.6	−6.0
SE	0.618	0.714	5.809	6.707	5.105	5.894	2.179	2.517	7.467	8.622	10.51	12.136	4.282	4.945

Fuente: Tesis doctoral de Imelda Martínez Estrada, 2020.

iThenticate
Página 215 de 338 - Engrega de integridad
Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 216 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

chile Manzano existe la tendencia a elegir plantas de menor porte para favorecer un mejor manejo agronómico, y sería deseable aplicar selección individual o utilizar progenitores con mayor divergencia para realizar hibridación, ya que esta especie fue introducida a México y su variabilidad genética se ha reducido debido a un posible efecto fundador en la especie, consecuente de una selección direccional (Pickersgill, 1969).

El hallazgo anterior contradice parcialmente la posición que se manifestó al estudiar la estructura genética de los tratamientos, y muestra que es poco viable la explotación de híbridos derivados de estas poblaciones. Estos resultados difieren de los publicados por Cervantes et al. (2016) quienes recomendaron usar híbridos para explotar su vigor híbrido. También se fortalece la hipótesis científica de que es más deseable y práctico aplicar alguna metodología de selección recurrente para acumular más genes aditivos, que permitan predecir confiablemente su comportamiento genético promedio en futuras combinaciones y su uso apropiado en la formación de nuevas poblaciones (González et al., 2007a y 2007b).

Conclusiones

Los progenitores P8 y P1, mostraron la mejor ACG en la mayoría de las variables. Los progenitores P3 y P1 mostraron buena ACG en peso promedio del fruto, y ambos pueden aprovecharse como progenitores elite para el desarrollo de nuevos materiales sobresalientes de chile Manzano. Las cruzas P10 × P3, P10 × P7 y P10 × P8 son recomendables por su precocidad a emergencia de plántula, floración y fructificación. Los valores de heterosis positivos en la variable peso individual de fruto permitieron identificar a P3 × P8 y P8 × P1, como cruzas superiores que desde el punto de vista agronómico pudieran ser de importancia comercial.

iThenticate Página 216 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 217 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Aguilar, V. H., Corona, T., López, P., Latournerie, L., Ramírez, M., Villalón, H., y Aguilar, J. A. (2010). *Los chiles de México y su distribución.* SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, ITConkal, UANL, UAN.

Antonius, F., Kochhar, S., Jarret, L., y Syder, C. (2006). Antioxidants in hot pepper: variation among accesions. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*(41), 1237-1243. https://doi.org/10.1080/03601230600857114

Borghi, B., y Baldi, V. (1970). Variabilita tra cloni di gerbera allevati *(Gerbera jamesonii)* in diverse condizione ambientali. *Sementi elette, 16*(6), 25-32.

Cedeño, J., Cedeño, G., Alcívar, J., Cargua, J., Cedeño, S., Cedeño, G., y Constante, T. (2018). Incremento del rendimiento y calidad nutricional del arroz con fertilización NPK complementada con micronutrientes. *Scientia Agropecuaria, 9*(4), 503-509. http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.05

Cervantes, M. A. (2010). *Hibridaciones en plantas hortícolas; Mejora vegetal.* Escuela Familiar Agraria Campomar. https://www.infoagro.com/hortalizas/hibridaciones_horticolas.htm

Cervantes, F., Hernández, J., Rangel, J. A., Andrio, E., Mendoza, E., Rodríguez, G., y Guevara, L. (2016). Aptitud combinatoria general y específica en la calidad de semilla de líneas S3 de maíz. *Revista de Fitotecnia Mexicana, 39*(3), 259-268. http://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v39n3/0187-7380-rfm-39-03-00259.pdf

Chakrabarty. I., Aminul, M., y Ahamed, T. (2019). Combining Ability and Heterosis for Yield and Related Traits in Chili *(Capsicum annuum L.)*. *The Open Agriculture Journal, 13,* 34-43. https://doi.org/10.2174/1874331501913010034

De Souza, A. and Maluf, R. (2003). Diallel analysis and estimation of genetic parameters of hot pepper *(Capsicum chinense Jacq.)*. *Scientia Agricola, 60,* 105-113. https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000100016

El-Badawy, E. M. (2013). Heterosis and combining ability in maize using diallel crossed among seven new inbred lines. *Asian Journal Crop Science, 5,* 1-13. https://doi.org/10.3923 / ajcs.2013.1.13

Falconer, S., y Mackay, F. C. (1996). *Introduction to Quantitative Genetics.* Logman Group Ldt. https://vulms.vu.edu.pk/Courses/GEN733/Downloads/Introduction%20to%20Quantitative%20Genetic-DS%20Falconer.pdf

Fehr, W. R. (1987). *Principles of cultivar Development. Vol. I. Theory and Techniques*. MacMillan Publishing Company.

González, H. A., Pérez L., D. J., Sahagún, C. J., Norman, M. T. H., Balbuena, M. A., y Gutiérrez, R. F. (2007a). Análisis de una cruza dialélica completa de líneas endogámicas de maíz. *Revista de Ciencias Agrícolas Informa, 16,* 10-17.

González, H. A., Sahagún C. J., y Pérez L., D. J. (2007b). Estudio de ocho líneas de maíz en un experimento dialélico incompleto. *Revista de Ciencias Agrícolas Informa, 16,* 3-9.

Guillen, C. P., Cruz, E., Castañón, G., Osorio, R., Brito, N. P., Lozano, A., y López, U. (2009).

iThenticate Página 217 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 218 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10*(1), 101-107.

Griffing, B. (1956). Concepts of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences 9,* 463-493. https://www.publish.csiro.au/bi/pdf/BI9560463

Hasanuzzaman, M., Hakim, M. A., Hanafi, M. M., Shukor-Juraimi, A., Islam, M. M., y Shamsuddin, A. K. M. (2013). Study of heterosis in Bangladeshi Chilli *(Capsicum annuum L.)* Landraces. *Agrociencia, 47*(7), 683-690. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952013000700005&lng=es&tlng=en

Jinks, L. (1954). The analysis of continuous variation in a diallel cross of Nicotiana rustica varieties. *Genetics, 39,* 767-788. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1209688/pdf/767.pdf

Ladizinsky, G. (1998). *Plant evolution under domestication.* Kluwer Academic Publishers. https://www.springer.com/gp/book/9780412822100

Martínez, N., Méndez, I., Castañeda, H. M., Vera, A. M., Chávez, J. L., y Carrillo, J. C. (2014). Heterosis interpoblacional en agromorfología y capsicinoides de chile nativos de Oaxaca. *Revista de Fitotecnia Mexicana, 37*(3), 199-207. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802014000300004

Moll, H., Salhuana, S., y Robinson, F. (1962). Heterosis and genetic diversity in varieties of maize. *Crop Science, 2,* 197-198. https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200030005x

Montes, S. (2010). *Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género Capsicum que crecen y se cultivan en México.* Campo Experimental Bajío, INIFAP. https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/centrosOrigen/Capsicum/Informe_Final/Informe%20final%20Capsicum.pdf

Rodríguez, N. M., Caca, G., García, J. L., y Urritea, A. (2015). Aclareo de frutos y aspersiones foliares de calcio y miel de abeja sobre la calidad de tomate tipo costilla. *Revista de Fitotecnia Mexicana, 38*(2), 197-204. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-73802015000200010&lng=es&nrm=iso

Pérez, M., y Castro, R. (2008). *El Chile Manzano.* Universidad Autónoma Chapingo.

Pérez, M., González, V. A., Peña, A., y Sahagún, J. (2009). Combining ability and heterosis for fruit yield and quiality in manzano hot peper (*Capsicum pubescens R & P)* landraces. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 15*(1), 103-109.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1027−152X2009000100015&script=sci_abstract&tlng=pt

Pickersgill, B. (l969). The domestication of chili peppers. En P. J. Ucko y G. W. Dimbley (Eds.), *The domestication and exploration of plants and animals* (pp. 443-450). Duckwor.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2013). *Chile manzano en invernadero.* http://www.sicde.gob.mx/portal/bin/Nota.php?accion=buscar&notaId=81263127451b69ce074cac

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2019). *Relación de huertos de chile manzano Certificados para exportación del Estado de México a los es-*

iThenticate Página 218 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 219 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

tados Unidos de América con tratamiento de Irradiación. https://www.gob.mx/senasica/documentos/huertos-de-chile-manzano-registrados-para-exportacion-a-los-estados-unidos-de-america?idiom=es

Seneviratne, G. S. and Kannangara, N. (2004). Heterosis, heterobeltiosis and commercial heterosis for agronomic traits and yield of Chilli *(Capsicum annumm L.)*. *Annals of the Sri Lanka Department Agriculture, 6,* 195-201.

Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (2018). *Información de la producción agrícola nacional por entidad federativa de los años 1980 a 2018*. https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430.

Shumbulo, A., Nigussie, M., y Alamerew, S. (2017). Study of heterosis and heterobeltiosis of pepper genotypes spicy *(Capsicum annuum L.)* in southern Ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Genetics, 11,* 63-70. http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n7/v47n7a5.pdf

Sprague, F., y Tatum, A. (1942). General vs specific combining ability in single-crosses of corn. *American Society of Agronomy, 34,* 923-932. http://www.garfield.library.upenn.edu/classics1986/A1986E023900001.pdf

Vallejo, A. J., Mejía, C. J., García, V. R., y Ramírez, G. M. G. (2018). Respuesta de genotipos de Capsicum pubescens al daño ocasionado por el complejo fúngico de la marchitez. *Revista Mexicana de Fitopatologia, 37,* 50-70.

DOI: http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1809-3

Yan, W., y Hunt, L. A. (2002). Biplot analysis of diallel data. *Crop Science, 42*, 21-30. https://doi.org/10.2135/cropci2002.0021

iThenticate Página 219 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

13. Un ejemplo para parcelas divididas en cuadro latino, sin y con submuestreo balanceado

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.13

José Antonio Rodríguez González*
Delfina de Jesús Pérez López**
Artemio Balbuena Melgarejo***
Jesús Hernández Ávila****
J. Ramón Pascual Franco Martínez*****
Laura Stephanie Flores Carrera******
Claudia Saavedra Guevara*******
Gerardo Jasso Bobadilla********
María Teresa Oliveros González*********
Andrés González Huerta**********§

Resumen

Debido a la escasa información que se ha encontrado en la literatura reportada para un arreglo en parcelas divididas en diseño en cuadro latino, sin y con submuestreo balanceado, en esta contribución se presenta un ejemplo para generar un análisis de varianza y una comparación de medias para dos factores y para la combinación entre los niveles de cada factor aplicando la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher obtenidas con el paquete estadístico InfoStat; se presentan los cálculos manuales para generar grados de libertad y suma de cuadrados cuando se utilizan las formulas

§ Autor para correspondencia: agonzalezh@uaemex.mx
* Maestro en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690
*** Maestro en Fitomejoramiento de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México.
**** Doctor en Gobierno y Administración Pública. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4544-9250
***** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203

iThenticate Página 221 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

derivadas por Rodríguez et al. (2025) a datos provenientes de un solo ensayo, pero éstos se pueden extender a una serie de experimentos si fueran empleadas las fórmulas presentadas por Pérez et al. (2025). Si el propósito adicional fuera comparar modelos, el que corresponde al caso de sin submuestreo estadístico difiere sólo en una componente con relación a un arreglo en franjas o bloques divididos con aleatorización en cuadro latino.

Palabras clave: *mínimos cuadrados, experimentos bifactoriales, aplicación de InfoStat.*

Introducción

Cuando se analiza un ensayo frecuentemente se utilizan los promedios aritméticos de cada parcela o unidad experimental considerando una muestra de *s* datos; previamente, éstos se pueden calcular manualmente lo que implica destinar mayor tiempo a esta actividad o se puede construir un código, un programa o un algoritmo en la computadora que permita generarlos de manera rápida y confiable. Pero sería más pertinente utilizar directamente esos *s* datos para generar un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias entre tratamientos, como una alternativa importante a lo previamente expuesto.

No obstante, no todos los paquetes estadísticos tienen una plataforma que permita implementar submuestreo balanceado dentro de las unidades

****** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8518-9636
******* Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de Asignatura de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5519-6125
******** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8357-0660
********* Maestra en Ciencias en Biotecnología Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7991-3292
********** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597

iThenticate Página 221 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 222 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

experimentales, como STAR, PB Tools, WASP, OPSTAT o Navure, entre otros. En contraparte, InfoStat, InfoGen y Sistema para Análisis Estadístico (SAS, por sus siglas en inglés) permiten generar este tipo de análisis, sin y con submuestreo balanceado, de manera rápida y confiable, pero los primeros dos paquetes estadísticos son más fáciles de descargar a una computadora, y ambos se pueden utilizar sin necesidad de estar conectados a internet, aunque no son tan rápidos, versátiles y potentes como lo es SAS.

En la literatura especializada se ha encontrado poca información sobre el análisis de datos provenientes de arreglos en parcelas divididas y subdivididas en diseños tipo cuadrado latino, así como en sus series de ensayos en tiempo, espacio, o en ambos, especialmente cuando se aplica submuestreo balanceado. También se encontraron pocas evidencias del uso de software para el caso que es considerado en la presente contribución, por lo que el objetivo principal de este estudio fue presentar un ejemplo con cálculos manuales para grados de libertad y suma de cuadrados en ambas modalidades, validando éstos con InfoStat considerando los modelos estadísticos construidos previamente por Rodríguez et al. (2025).

Revisión de literatura

El análisis de datos para arreglos en parcelas divididas (PD) o subdivididas (PSD) en ensayos bi o trifactoriales sin submuestreo estadístico y aplicando InfoStat e InfoGen pueden consultarse en Balzarini et al. (2008), Rienzo et al. (2008), Balzarini y Rienzo (2016), Tirado y Tirado (2017), entre otros. Las series de experimentos cuando éstos se extienden a diversos ambientes, conformados por años, localidades o combinaciones de ambos también pueden consultarse en González et al. (2019) y Pérez et al. (2022). Los planes de aleatorización más utilizados en dichos arreglos de unidades experimentales corresponden a los diseños experimentales completamente al azar (DCA) y bloques completos al azar (DBCA) (Martínez, 1988; Gomez y Gomez, 1984; Little y Hills, 2008; Montgomery, 2009), pero Ledolter (2010) realizó una discusión acerca de los arreglos de PD para ensayos completos y para experimentos factoriales fraccionados.

iThenticate Página 222 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 223 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

El DCL, en PD o PSD, no ha sido muy utilizado, pero podría ser de mayor utilidad que los diseños DCA y DBCA para estratificar las diferencias que causan las componentes del tiempo, del espacio o de ambos cuando se evalúan diversos factores de la productividad como distanciamiento entre plantas, fertilización, abonos orgánicos, insecticidas, fungicidas, herbicidas, métodos de labranza, láminas de riego, y fechas de corte en forrajes, entre otros, eligiendo varias especies vegetales o variedades contrastantes de alguna de éstas (González et al., 2019; Pérez et al., 2022). Los terrenos de agricultores que son muy heterogéneos en los Valles Altos de la Mesa Central de México también presentan variabilidad aleatoria que es indeseable para establecer un experimento adecuado; ésta podría controlarse más eficientemente utilizado un PD o PSD en DCL (González et al., 2019; Pérez et al., 2022).

También se ha encontrado poca información sobre modelos estadísticos, análisis de varianza y comparación de medias (Tirado y Tirado, 2017; González et al., 2019) cuando se aplica submuestreo balanceado y algún paquete estadístico (Gómez y Gómez, 1984; Martínez, 1994; Montgomery, 2009).

Materiales y métodos

Simbología

El rendimiento de grano (t ha^{-1}) será identificado como Y. Adicionalmente, será empleada la simbología descrita por Mendenhall (1987), Sahagún (2007), Montgomery (2009), Pérez et al. (2022) y González et al. (2023, 2004a y 2024b). Los factores hileras, columnas, A, B, tendrán niveles: $i = 1, 2, 3, \ldots, h$; $j = 1, 2, 3, \ldots, c$; $k = 1, 2, 3, \ldots, t$; $l = 1, 2, 3, \ldots, b$. Para submuestreo balanceado será incluido el factor S ($m = 1, 2, 3, \ldots, s$).

Modelos estadísticos

Los dos modelos reportados en Rodríguez et al. (2025), sin y con submuestreo, son:

iThenticate Página 223 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 224 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

1

$$Y_{ijkl} = \mu + H_i + C_j + A_k + (HA)_{ik} + B_l + (AB)_{kl} + \varepsilon_{ijkl}$$
$$Y_{ijklm} = \mu + H_i + C_j + A_k + (HA)_{ik} + B_l + (AB)_{kl} + \delta_{m(\mathrm{ikl})} + \varepsilon_{ijklm}$$

Donde: Y es la variable de interés; μ es la media aritmética general; H_i, C_j, A_k, B_l, son los efectos causados por hileras, columnas, y factores A y B, respectivamente; $(HA)_{ik}$ es el error a; $(AB)_{kl}$ es la interacción entre ambos factores; $\delta_{m(ikl)}$ es el error muestral; ε_{ijkl} y ε_{ijklm} son el error experimental, sin y con submuestreo.

Diseño experimental

Los niveles del factor A fueron asignados a parcelas principales en un diseño en cuadro latino, y los niveles del factor B se aleatorizaron en subparcelas de manera completamente al azar. Los datos artificiales que serán utilizados en el presente ejemplo se presentan en la tabla 13.1. Cada valor es la media de cuatro datos en cada muestra.

Tabla 13.1. *Datos para generar los cálculos manuales y para aplicar InfoStat, sin y con submuestreo (S)*

	C1 a1			***C2 a2***			***C3 a3***			***C4 a4***			***S***
	7.0	1.9	5.6	2.1	6.3	7.6	7.0	8.2	2.7	9.6	7.7	3.9	***S1***
H1	7.6	2.1	6.0	2.8	6.9	8.2	7.3	8.8	3.1	10.1	8.2	4.2	***S2***
	8.0	2.3	6.5	3.0	7.2	8.4	7.6	9.1	3.5	10.4	8.5	4.4	***S3***
	b3	***b1***	***b2***	***b1***	***b2***	***b3***	***b2***	***b3***	***b1***	***b3***	***b2***	***b1***	
	C1 a2			***C2 a1***			***C3 a4***			***C4 a3***			
	2.3	6.6	7.4	6.0	7.5	2.0	4.4	8.0	9.1	7.2	3.0	8.7	***S1***
H2	2.6	7.1	8.0	6.3	8.0	2.3	4.8	8.5	9.6	7.6	3.2	9.1	***S2***
	2.9	7.5	8.6	6.6	8.3	2.6	5.1	9.0	9.8	8.0	3.5	9.4	***S3***
	b1	***b2***	***b3***	***b2***	***b3***	***b1***	***b1***	***b2***	***b3***	***b2***	***b1***	***b3***	
	C1 a3			***C2 a4***			***C3 a1***			***C4 a2***			
	7.0	9.0	3.0	9.9	4.0	7.6	7.0	2.3	6.1	3.0	8.0	6.2	***S1***
H3	7.4	9.3	3.4	10.6	4.6	8.1	7.4	2.6	6.8	3.3	8.4	6.6	***S2***
	7.8	9.6	3.7	10.8	4.9	8.5	7.7	3.0	7.1	3.8	8.6	6.9	***S3***
	b2	***b3***	***b1***	***b3***	***b1***	***b2***	***b3***	***b1***	***b2***	***b1***	***b3***	***b2***	

iThenticate Página 224 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 225 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

	C1 a4			C2 a 3			C3 a2			C4 a1			
	4.3	9.6	8.4	6.6	2.6	8.4	7.0	7.4	2.4	6.0	2.1	7.7	S1
H4	4.7	10.3	8.6	7.0	3.0	8.8	7.3	8.0	2.9	6.5	2.4	8.0	S2
	4.9	9.9	8.7	7.3	3.2	8.9	7.7	8.2	2.6	6.9	2.8	8.3	S3
	b1	b3	b2	b2	b1	b3	b2	b3	b1	b2	b1	b3	

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación. Cada valor es promedio de cuatro datos diferentes para cada submuestra.

Software recomendable

Para obtener un plan de aleatorización se puede utilizar el paquete estadístico STAR, del Instituto Internacional de Investigación en Arroz (IRRI, por sus siglas en inglés). También se pueden emplear Statistical Analysis System (SAS) u otros paquetes estadísticos. Para analizar los datos se utilizó InfoStat, pero también podría emplearse InfoGen (Balzarini et al., 2008; Rienzo et al., 2008; Balzarini y Rienzo, 2016); éstos se han aplicado para dividir al error conjunto en errores muestral y experimental en ensayos con un solo factor, para DCA, DBCA, y DCL (González et al., 2023), pero pueden generalizarse para el caso de experimentos factoriales.

Resultados

Como hileras (H), columnas (C) y niveles del factor *A* son iguales, *ht* o *ct* es igual a t^2. Para un DCA o DBCA, *h* o *c* podría considerarse como *r*, el número de repeticiones elegido en el experimento.

Grados de libertad (GL) sin submuestreo

$$GL\ \text{Total} = t^2b - 1 = 4(4)(3) - 1 = 47$$

$$GL\ H = h - 1 = t - 1;\ GL\ C = c - 1 = t - 1 = GL\ A = t - 1 = 4 - 1 = 3;$$

$$GL\ \text{Error a} = (t-1)(t-2) = 3(2) = 6$$

iThenticate Página 225 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 226 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

GL Parcelas Principales $(PP) = GL\ H + GL\ C + GL\ A + GL$ Error a $= 3 + 3 + 3 + 6 = 15$

Para verificación: $GL\ PP = t^2 - 1 = 4(4) - 1 = 15$

$GL\ B = b - 1 = 3 - 1 = 2$; $GL\ A \times B = (t-1)(b-1) = 3(2) = 6$

GL Error b $= t(t-1)(b-1) = 4(3)(2) = 24 = (t^2 - t)(b-1) = (16-4)(2) = 24$

GL Total $- GL\ H - GL\ C - GL\ A - GL$ Error a $- GL\ B - GL\ A \times B = 47 - 3 - 3 - 3 - 6 - 2 - 6 = 24$

También: $GL\ SUB = GL\ B + GL\ A \times B + GL$ Error b $= 2 + 6 + 24 = 32$

Para verificación: $GL\ SUB = t^2(b-1) = 4(4)(2) = 32$

1 $GL\ PP + GL\ SUB = GL$ Total $= (t^2 - 1) + t^2(b-1) = t^2 b - 1 = 15 + 32 = 47$

Suma de Cuadrados (SC) sin submuestreo

En el denominador de las siguientes fórmulas, H o C es nulo; H, C, A, B estarán representados por i, j, k, l, respectivamente. Aun cuando no se presenta un ejemplo para calcularlas, las formas cuadráticas o matriciales se escribirán como lo hicieron González et al. (2023) y González et al. (2024a y 2024b). En los siguientes cálculos se utilizaron los datos de cada hilera en su subhilera dos (para S igual a 2). Otra opción sería considerar las medias calculadas sobre S, el tamaño de la submuestra para aplicar las fórmulas anteriores.

7

$$\text{SC Total} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = (7.6^2 + 2.1^2 + 6.0^2 + \ldots, + 8.0^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 + \ldots, + 8.0)^2 = 2276.5 - 1981.47 = 295.03$$

$$\text{SC H} = \left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{i=1}^{h} Y_{i\ldots}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)}\right)(75.3^2 + 77.1^2 + 78.5^2 + 77.5^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 + \ldots, + 8.0)^2 = 1981.9166 - 1981.47 = 0.4466$$

$$\text{SC C} = \left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{j=1}^{c} Y_{.j.}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)}\right)(77.1^2 + 76.6^2 + 77.1^2 + 77.6^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 + \ldots, + 8.0)^2 = 1981.5116 - 1981.47 = 0.04166$$

$$\text{SC A} = \left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k.}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)}\right)(66.0^2 + 72.1^2 + 78.0^2 + 92.3^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 + \ldots, + 8.0)^2 = 2013.1416 - 1981.47 = 31.6716$$

iThenticate Página 226 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 227 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Para calcular *SC* Error a, primero deberá calcularse *SC TRAT*1 utilizando la información de la tabla 13.2.

Tabla 13.2. *Valores para calcular SC para parcelas principales*

Factor H (i niveles)	*Factor A (k niveles)*				
	1	*2*	*3*	*4*	*Suma*
1	15.7	17.9	19.2	22.5	75.3
2	16.6	17.7	19.9	22.9	77.1
3	16.8	18.3	20.1	23.3	78.5
4	16.9	18.2	18.8	23.6	77.5
Suma	66.0	72.1	78.0	92.3	308.4

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

$$\text{SC TRAT1} = \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k.}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = \text{SC H} + \text{SC C} + \text{SC A} + \text{SC Error a}$$

$$\text{SC TRAT1} = \left(\frac{1}{3}\right)(15.7^2 + 17.9^2 + 19.2^2 +,\ldots,+ 23.6^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 +,\ldots,+ 8.0)^2 = 2014.1133 - 1981.47 = 32.6433$$

$$\text{SC Error a} = \text{SC TRAT1} - \text{SC H} - \text{SC C} - \text{SC A} = 32.6433 - 0.4466 - 0.04166 - 31.6716 = 0.48344$$

Para verificar que *SC Error a* sea correcta, aplicar la fórmula alternativa:

$$\textbf{SC Error a} = \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k.}^2 - \left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{i=1}^{h} Y_{i..}^2 - \left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{j=1}^{c} Y_{.j.}^2 - \left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k.}^2 + 2\,FC$$

$$= 2014.1133 - 1981.9611 - 1981.5116 - 2013.1416 + 2(1981.47) = 0.4835$$

De lo anterior también podrá verificarse que la suma de cuadrados de las Parcelas Principales (*SC PP*) es igual a:

$$\textbf{SC PP} = \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k.}^2 - FC = 2014.1133 - 1981.47 = 32.6433$$

$$\textbf{SC B} = \left(\frac{1}{t^2}\right)\sum_{l=1}^{b} Y_{...l}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(4)}\right)(52.0^2 + 116.2^2 + 140.2^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 +,\ldots,+ 8.0)^2 = 2241.405 - 1981.47 = 259.935$$

Para calcular *SC* $A \times B$, deberá obtenerse primero *SC TRAT*2 utilizando la información de la tabla 13.3.

iThenticate Página 227 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 228 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 13.3. *Datos para calcular SC TRAT2*

Factor A (k)	*Factor B (l)*			
	1	*2*	*3*	*Suma*
1	9.4	25.6	31.0	66.0
2	11.6	27.9	32.6	72.1
3	12.7	29.3	36.0	78.0
4	18.3	33.4	40.6	92.3
Suma	52.0	116.2	140.2	308.4

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

$$SC\ TRAT2 = \left(\frac{1}{t}\right)\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{..kl}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}}{t^2 b}\right)^2 = \left(\frac{1}{4}\right)(9.4^2 + 25.6^2 + 31.0^2 +,\ldots,$$

$$+ 40.6^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(7.6 + 2.1 + 6.0 +,\ldots,+ 8.0)^2 = 2273.76 - 1981.47 = 292.29$$

$$SC\ AxB = SC\ TRAT2 - SC\ A - SC\ B = 292.29 - 31.6716 - 259.935 = 0.6834$$

$$SC\ Error\ b = SC\ Total - SC\ H - SC\ C - SC\ A - SC\ Error\ a - SC\ B - SC\ AxB$$

$$= 295.03 - 0.4466 - 0.04166 - 31.6716 - 0.48344 - 259.935 - 0.6834 = 1.7683$$

Para verificar que el cálculo anterior sea correcto deberá aplicarse la fórmula alternativa:

$$SC\ Error\ b = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}^2 - \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k.}^2 - \left(\frac{1}{t}\right)\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{..kl}^2 +$$

$$\left(\frac{1}{tb}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k.}^2 = 2276.5 - 2014.1133 - 2273.76 + 2013.1416 = 1.7683$$

También es verificable para subparcela (*SUB*) aplicar la fórmula:

$$\mathbf{SC\ SUB} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{ijkl}^2 - \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k.}^2 = 2276.5 - 2014.1133$$

$$= 262.3867$$

En el contexto previo deberá verificarse: $SC\ Total = SC\ PP + SC\ SUB$

Grados de libertad (GL) con submuestreo

Debido a la adición del factor S ($m = 1,2,3,\ldots,s$):

$GL\ Total = t^2bs - 1 = 4^2(3)(3) - 1 = 143$

$GL\ H = h - 1 = t - 1 = 4 - 1 = 3$

iThenticate Página 228 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 229 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$GL\ C = c - 1 = t - 1 = 4 - 1 = 3$

$GL\ A = t - 1 = 4 - 1 = 3$

$GL\ Error\ a = (t-1)(t-2) = 3(2) = 6$

$GL\ PP = GL\ H + GL\ C + GL\ A + GL\ Error\ a = 3 + 3 + 3 + 6 = 15$

También: $GL\ PP = t^2 - 1 = 4^2 - 1 = 15$

$GL\ B = b - 1 = 3 - 1 = 2$

$GL\ A \times B = (t-1)(b-1) = 3(2) = 6$

$GL\ EC = GL\ Total - GL\ H - GL\ C - GL\ A - GL\ Error\ a - GL\ B - GL\ A \times B$
$= 143 - 3 - 3 - 3 - 6 - 2 - 6 = 120$

Donde: $GL\ EC$ son los grados de libertad del Error Conjunto

También: $GL\ EC = t(tbs - t - b + 1) = 4(36 - 4 - 3 + 1) = 120$

Además, se sabe que (González et al., 2023):

$GL\ EC = GL\ EM + GL\ EE$

Pero $GL\ EE = t(t-1)(b-1) = 4(3)(2) = 24$, por lo tanto:

$GL\ EM = GL\ EC - GL\ EE = t^2 b(s-1) = 4^2(3)(2) = 96$

Para verificación:

$GL\ SUB = t^2(bs-1) = 4^2(8) = 128$

$GL\ PP + GL\ SUB = (t^2 - 1) + t^2(bs-1) = t^2 bs - 1 = GL\ Total = 15 + 128 = 143$

Suma de cuadrados (SC) con submuestreo

$$SC\ Total = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2 bs}\right)^2$$

$$= (7.6^2 + 7.0^2 + 8.0^2 + \ldots + 8.3^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 + \ldots + 8.3)^2 = 6733.5 - 5849.7 = 883.799$$

$$SC\ H = \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{i=1}^{h} Y_{i....}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2 bs}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)(3)}\right)(223.8^2 + 230.6^2 + 234.0^2 + 229.4^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 + \ldots + 8.3)^2 = 5851.198889 - 5849.70 = 1.49888$$

$$SC\ C = \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{j=1}^{c} Y_{.j...}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2 bs}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)(3)}\right)(229.6^2 + 226.9^2 + 229.1^2 + 232.1^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 + \ldots + 8.3)^2 = 5850.095 - 5849.70 = 0.3947$$

iThenticate Página 229 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 230 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$SC\ A = \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k..}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2bs}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)(3)}\right)(197.3^2 + 213.8^2 + 233.0^2 + 273.7^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 +,\ldots,+ 8.3)^2 = 5939.95611 - 5849.70 = 90.256$$

Para calcular suma de cuadrados de parcelas principales (*SC PP*) deberá construirse la tabla 13.4:

Tabla 13.4. *Datos para calcular suma de cuadrados para Parcelas Principales (SC PP)*

Factor H (i niveles)	*Factor A (k niveles)*				
	1	*2*	*3*	*4*	*Suma*
1	47.0	52.5	57.3	67.0	223.8
2	49.6	53.0	59.7	68.3	230.6
3	50.0	54.8	60.2	69.0	234.0
4	50.7	53.5	55.8	69.4	229.4
Suma	197.3	213.8	233.0	273.7	917.8

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

SC PP = SC H + SC C + SC A + SC HxA. En esta, SC HxA = SC Error a

Así:

$$SC\ PP = SC\ TRAT\ 1 = \left(\frac{1}{bs}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k..}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2bs}\right)^2$$

$$= \left(\frac{1}{3(3)}\right)(47.0^2 + 52.5^2 + 57.3^2 +,\ldots,+ 69.4^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 +,\ldots,+ 8.3)^2$$

$$= 5942.9444 - 5849.70 = 93.24$$

$$SC\ HxA = SC\ TRAT\ 1 - SC\ H - SC\ C - SC\ A = 93.24 - 1.49888 - 0.3947 - 90.2561 = 1.09$$

También puede verificarse que:

$$SC\ H\ x\ A = SC\ Error\ a = \left(\frac{1}{bs}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k..}^2 - \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{i=1}^{h} Y_{i....}^2 - \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{j=1}^{c} Y_{.j...}^2 - \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k..}^2 + 2\left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2bs}\right)^2$$

$$= 5942.9444 - 5851.198889 - 5850.095 - 5939.95611 + 2(5849.70)$$

$$= 17642.3444 - 17641.25 = 1.094$$

$$SC\ B = \left(\frac{1}{t^2s}\right)\sum_{l=1}^{b} Y_{...l.}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2bs}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(4)(3)}\right)(154.2^2 + 347.3^2 + 416.3^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 +,\ldots,+ 8.3)^2 = 6618.7629 - 5849.70 = 769.06$$

iThenticate Página 230 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 231 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Para calcular $SC\ A \times B$, primero deberá elaborarse la tabla 13.5:

Tabla 13.5. *Datos para generar SC A x B*

Factor A (k)	*Factor B (l)*			*Suma*
	1	*2*	*3*	
1	28.4	76.4	92.5	197.3
2	33.7	83.3	96.8	213.8
3	37.9	87.8	107.3	233.0
4	54.2	99.3	119.7	273.7
Suma	154.2	347.3	416.3	917.8

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

La interacción $A \times B$ se define en los siguientes términos:

SC TRAT2 = SC A + SC B + SC A x B, dónde:

$$SC\ TRAT2 = \left(\frac{1}{ts}\right)\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{..kl.}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2bs}\right)^2 = \left(\frac{1}{4(3)}\right)(28.4^2 + 76.4^2 + 92.5^2 + ,\ldots,+ 119.7^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 + ,\ldots,+ 8.3)^2$$

$$= 6710.741667 - 5849.70 = 861.041$$

Por cálculo indirecto : $SC\ A \times B = SC\ TRAT2 - SC\ A - SC\ B = 861.041 - 90.2561 - 769.06 = 1.72$

Por cálculo directo:

$$SC\ A\ x\ B = \left(\frac{1}{ts}\right)\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{..kl.}^2 - \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k..}^2 - \left(\frac{1}{t^2s}\right)\sum_{l=1}^{b} Y_{...l.}^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2bs}\right)^2$$

SC AxB = 6710.741667 - 5939.95611 - 6618.7629 + 5849.70 = 1.7226

Para calcular la suma de cuadrados del *Error Conjunto* (*SC EC*) se utiliza la siguiente expresión :

$SC\ EC = SC\ Total - SC\ H - SC\ C - SC\ A - SC\ Error\ a - SC\ B - SC\ A \times B$

$= 883.799 - 1.49888 - 0.3947 - 90.2561 - 1.09 - 769.06 - 1.72 = 19.779$

También es verificable:

$$\mathbf{SC\ EC} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}^2 - \left(\frac{1}{bs}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k..}^2 - \left(\frac{1}{ts}\right)\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{..kl.}^2 + \left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{..k..}^2 = 6733.5 - 5942.9444 - 6710.741667 + 5939.95611 = 19.77$$

iThenticate Página 231 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 232 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

De manera similar a casos anteriores, para calcular la suma de cuadrados del error muestral (*SC EM*) y la del error experimental (*SC EE*) deberá construirse la tabla 13.6.

Tabla 13.6. *Datos necesarios para calcular SC del error muestral*

Niveles en H(i)	*Combinación de niveles en A y B (kl)*												
	11	*12*	*13*	*21*	*22*	*23*	*31*	*32*	*33*	*41*	*42*	*43*	*Suma*
1	6.3	18.1	22.6	7.9	20.4	24.2	9.3	21.9	26.1	12.5	24.4	30.1	223.8
2	6.9	18.9	23.8	7.8	21.2	24.0	9.7	22.8	27.2	14.3	25.5	28.5	230.6
3	7.9	20.0	22.1	10.1	19.7	25.0	10.1	22.2	27.9	13.5	24.2	31.3	234.0
4	7.3	19.4	24.0	7.9	22.0	23.6	8.8	20.9	26.1	13.9	25.7	29.8	229.4
Suma	28.4	76.4	92.5	33.7	83.3	96.8	37.9	87.8	107.3	54.2	99.8	119.7	917.8

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

En el contexto previo, $SC\ EM = SC\ total - SC\ TRAT3$

Pero

$$SC\ TRAT3 = \left(\frac{1}{s}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{i.kl.}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{t}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}}{t^2 bs}\right)^2$$

$$= \left(\frac{1}{3}\right)(6.3^2 + 18.1^2 + 22.6^2 + ,\ldots, + 31.3^2) - \left(\frac{1}{4(4)(3)(3)}\right)(7.6 + 7.0 + 8.0 + ,\ldots, + 8.3)^2$$

$$= 6719.4933 - 5849.70 = 869.793$$

Así: $SC\ EM = 883.799 - 869.793 = 14.006$

Adicionalmente: $SC\ EE = SC\ EC - SC\ EM = 19.77 - 14.006 = 5.76$

Otra ruta para calcular la componente anterior sería:

$$SC\ EE = SC\ TRAT3 - SC\ H - SC\ C - SC\ A - SC\ Error\ a - SC\ B - SC\ A \times B$$

$$= 869.793 - 1.49888 - 0.3947 - 90.2561 - 1.09 - 769.06 - 1.72 = 5.773$$

$$\textbf{SC Error Muestral (EM)} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b}\sum_{m=1}^{s} Y_{ijklm}^2 - \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{i.kl.}^2$$

$$= 6733.5 - 6719.4933 = 14.0067$$

Adicionalmente, la *SC* del error experimental (*SC EE*) es igual a:

$$SC\ EE = \left(\frac{1}{b}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{i.kl.}^2 - \left(\frac{1}{bs}\right)\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{i.k..}^2 - \left(\frac{1}{ts}\right)\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{b} Y_{..kl.}^2 +$$

$$\left(\frac{1}{tbs}\right)\sum_{k=1}^{t} Y_{...k..}^2 = 6719.4933 - 5942.9444 - 6710.741667 + 5939.95611 = 5.7633$$

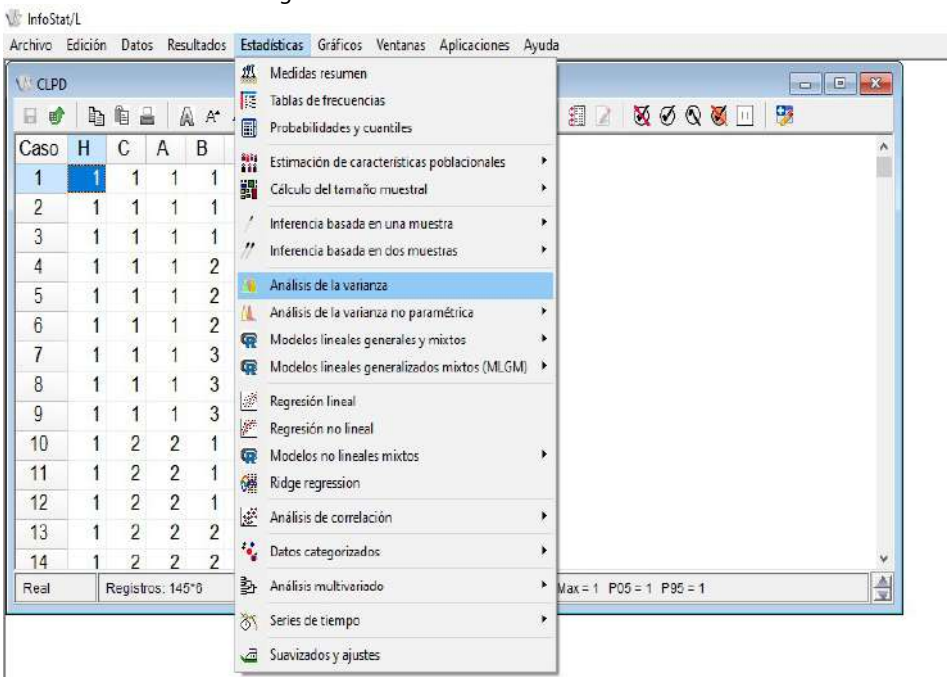
iThenticate Página 232 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 233 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Aplicación de InfoStat

Las cinco imágenes que se muestran a continuación contienen el procedimiento que deberá aplicarse, sin submuestreo, en este paquete estadístico para construir la base de datos y para generar un análisis de varianza y una comparación de medias entre niveles del factor *A*, del factor *B* y para cada combinación entre parejas de niveles diferentes de ambos factores, con la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher (*DMS* o *LSD*) (figuras 13.1, 13.2, 13.3, 13.4 y 13.5). En éstas se puede observar que el Error Experimental en el Análisis de Varianza corresponde al Error Conjunto (*EC*); la salida no permite verificar los cálculos manuales por la modalidad sin submuestreo balanceado, porque en éstos últimos se utilizó el valor de *S* correspondiente a la observación 2.

Figura 13.1. *Elección del Análisis de Varianza*



iThenticate Página 233 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Figura 13.2. *Captura del tipo de variables a manejar*

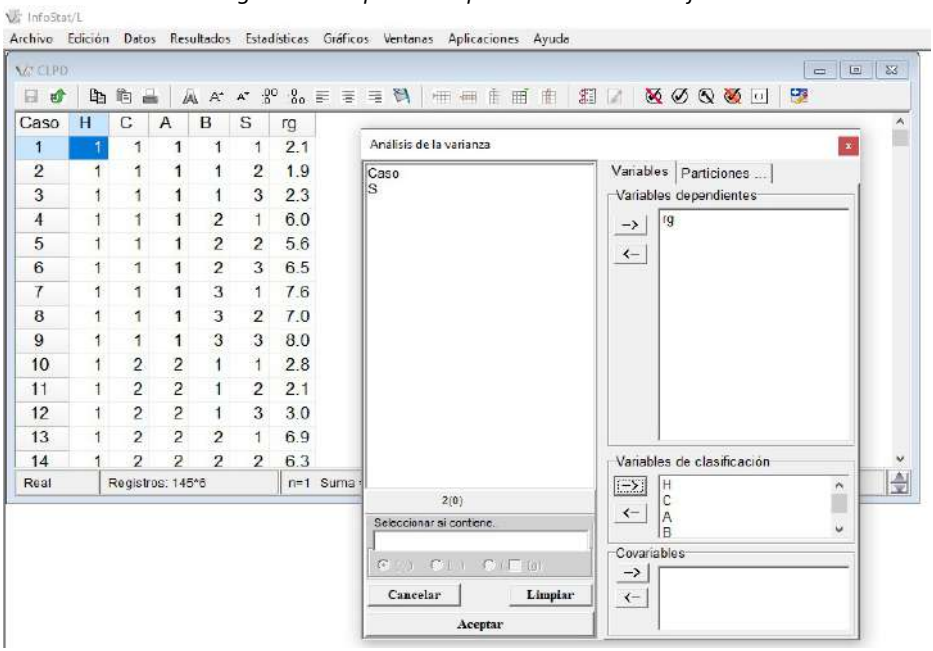


Figura 13.3. *Introducción del tipo de modelo a analizar*

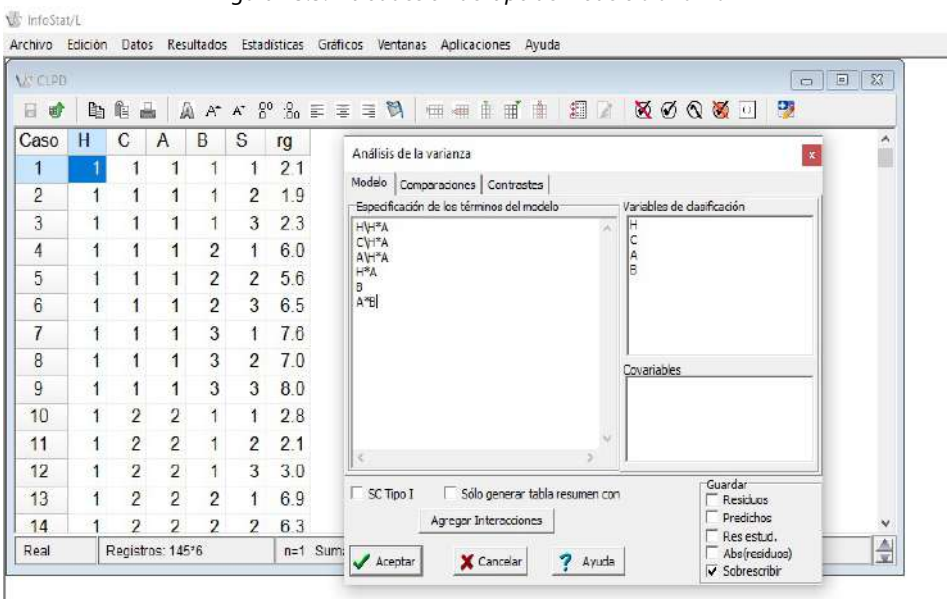


Figura 13.4. *Procedimiento para la comparación de medias*

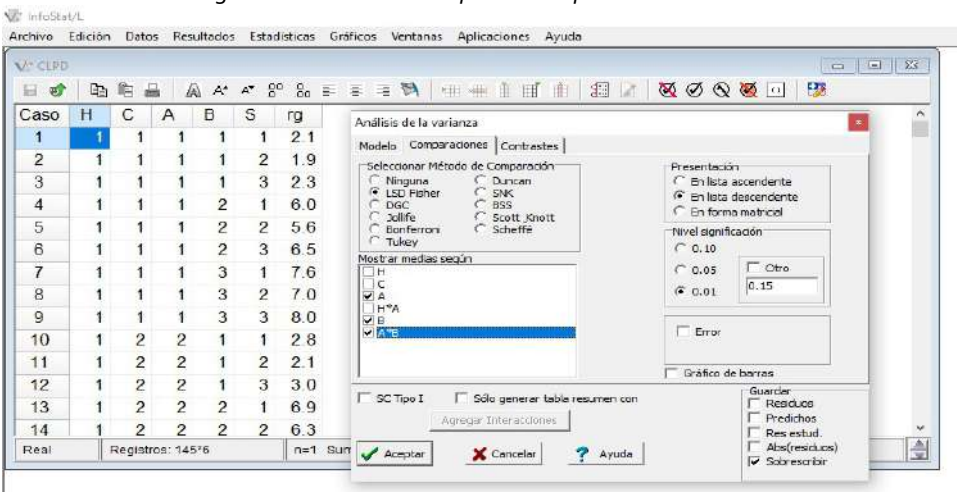
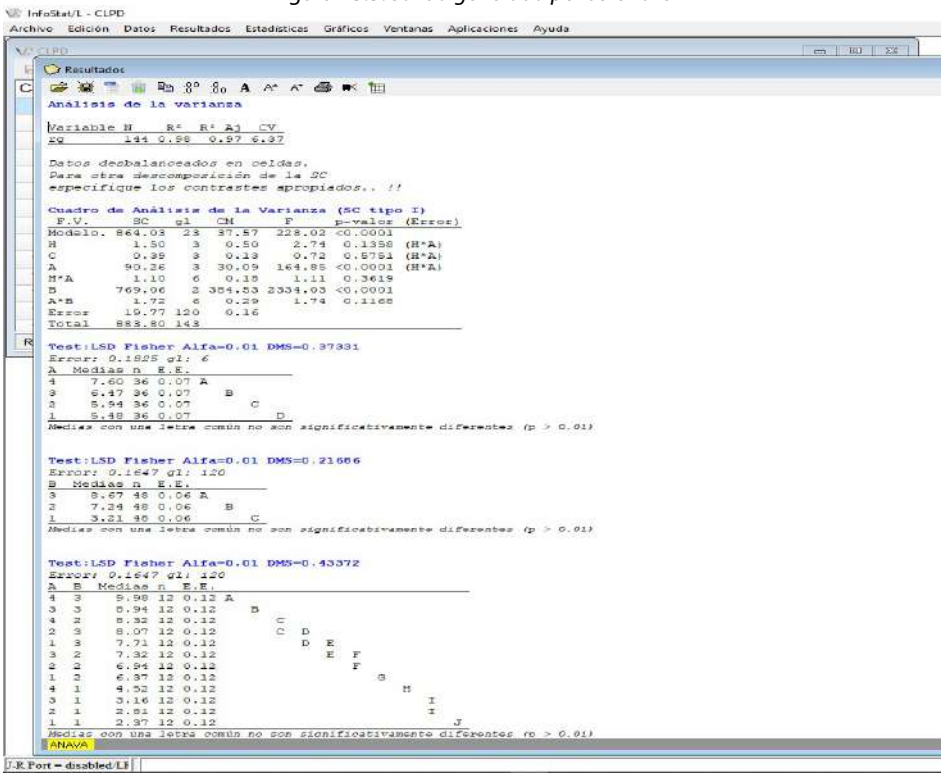


Figura 13.5. *Salida generada por software*



iThenticate Página 236 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Las cuatro imágenes siguientes corresponden al análisis de los datos cuando se aplica submuestreo balanceado (figuras 13.6, 13.7, 13.8 y 13.9).

Figura 13.6. *Elección del Análisis de Varianza con submuestreo balanceado*

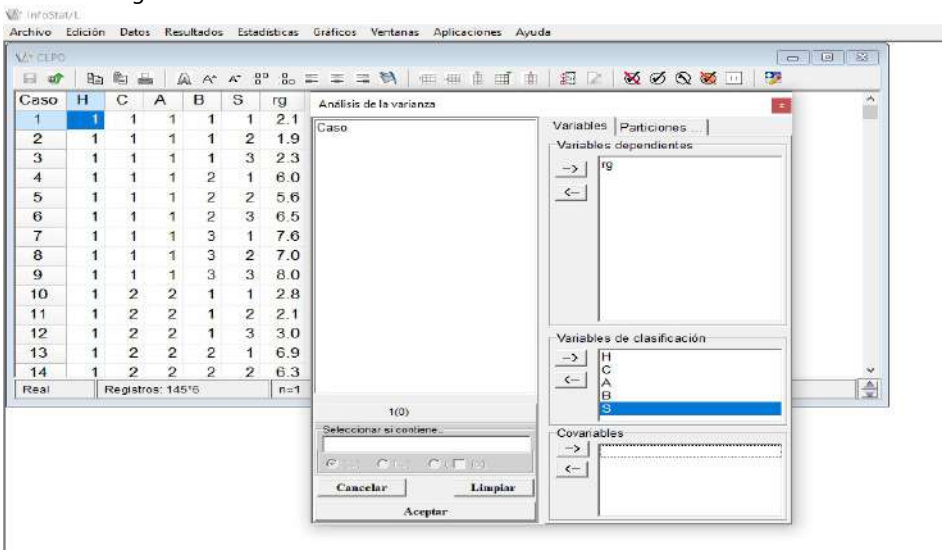
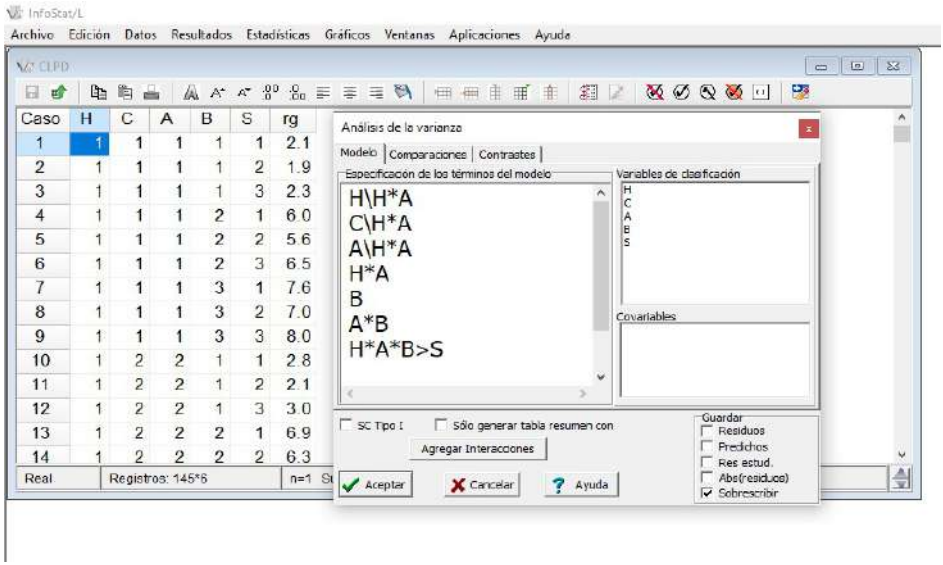


Figura 13.7. *Introducción del tipo de modelo a analizar con submuestreo balanceado*



iThenticate Página 236 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Figura 13.8. *Procedimiento para la comparación de medias con submuestreo balanceado*

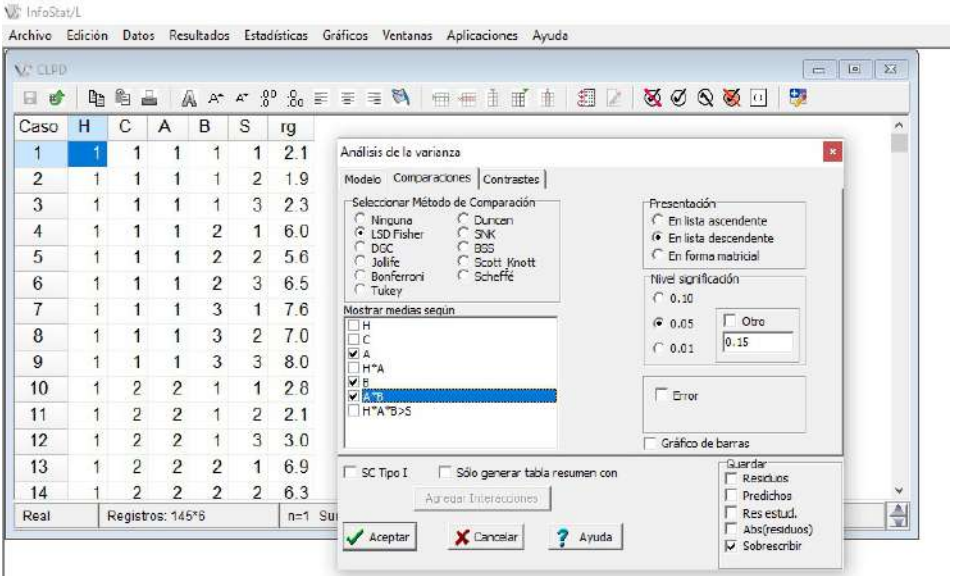
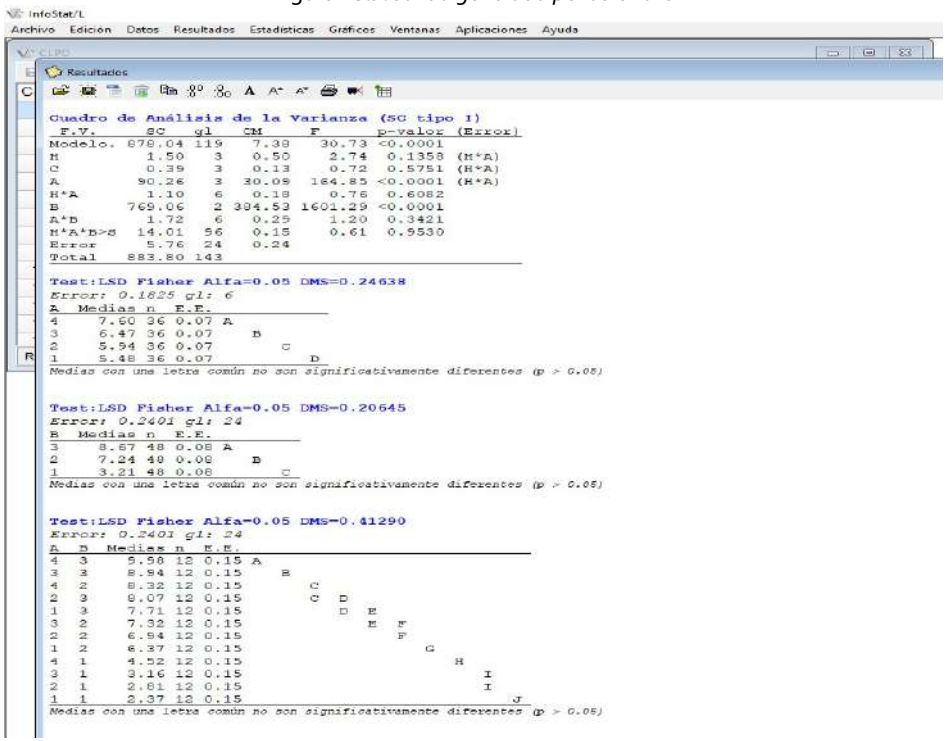


Figura 13.9. *Salida generada por software*



iThenticate Página 238 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Conclusiones

Al aplicar InfoGen o InfoStat es correcto considerar como Error *a*: $H \times C$, $C \times H$, $H \times A$, $C \times A$, o $H \times C \times A$, pero en el presente estudio $H \times A$ fue elegida. En ambos paquetes estadísticos el Error Muestral (*EM*) será estimado directamente con la instrucción $H \times A \times B > S$, pero $C \times A \times B > S$ originará los mismos resultados. Al aplicar ambos paquetes estadísticos, la diferencia que se origine al considerar o no a *S*, el número de veces que se aplica submuestreo balanceado, permitirá el cálculo indirecto de *SC EM*, pero para validar resultados, también podrán emplearse las fórmulas presentadas previamente, así como las que fueron construidas para estimar *EC* y *EE*, si el usuario usa Mínimos Cuadrados, formulas cuadráticas o matriciales, o ambas. También podría construirse una tabla para la interacción $H \times A \times B$; la diferencia entre *SC* total y *SC* de esta triple interacción producirá *SC EM*. Así, *SC EE* sería la diferencia entre *SC EC* y *SC EM*.

Para un *PD* en *DCL* sin submuestreo, las hipótesis estadísticas relacionadas con *H*, *C*, y *A* serán probadas utilizando al *Error a*, o la interacción $H \times A$, mientras que las correspondientes al factor *B*, y a la interacción $A \times B$ serán evaluadas con el error conjunto. Para el modelo con submuestreo, primero deberá determinarse si *EM* es significativo: si lo es, éste será utilizado para probar las hipótesis estadísticas del factor *B* y de su interacción; si no lo es, ambas fuentes de variación serán evaluadas utilizando el residual del modelo. Con este mismo enfoque serán realizadas las pruebas de comparación de medias para las componentes dentro de Parcelas Principales y dentro de Subparcelas, pero también podría recurrirse a las recomendaciones proporcionadas por Gomez y Gomez (1984), Little y Hills (2008), y Sahagún (1998), si es que *H*, *C*, pero no ambas, no fueran significativas, en cuyo caso ese tipo de comparaciones serán equivalentes a las de un *DBCA* en *PD*. Si *H* y *C* tampoco son significativas, el usuario tiene la opción de analizar sus datos como un *DCA* en *PD* utilizando la misma base de datos que para los casos referenciados previamente.

iThenticate Página 238 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 239 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Balzarini, M. G., y Di Rienzo, J. A. (2016). *InfoGen*. Universidad Nacional de Córdoba. http://www.info-Gen.com.ar

Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A., y Robledo, C. W. (2008). *Manual del usuario de InfoStat*. Brujas.

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2008). *InfoStat, versión 2008*. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. https://www.infostat.com.ar

Gomez, K. A., y Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.

González, H. A., Pérez, L. D. J., Rubí A., M., Gutiérrez, R. F., Franco M., J. R. P., y Padilla, L. A. (2019). InfoStat, InfoGen y SAS para contrastes mutuamente ortogonales en experimentos en bloques completos al azar en parcelas subdivididas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10*(6), 1417-1431.

González, H. A., Pérez L., D. J., Balbuena, M. A., Franco, M. J. R., Gutiérrez, R. F., y Rodríguez, G. J. A. (2023). Submuestreo balanceado en experimentos monofactoriales usando InfoStat y InfoGen: validación con SAS. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14*(2), 235-249. https://doi.org/10.29312/remexca. v14i2.3418

González H., A., Pérez L., D. J., Hernández A., J., Franco M., J. R. P., Rubí A., M., y Balbuena M., A. (2024a). Tratamientos anidados dentro de un arreglo en grupos de bloques completos balanceados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,15*(2), e3634. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i2.3634

González H., A., Pérez L., D. J., Hernández A., J., Franco M., J. R. P., Balbuena M., A., y Rubí A., M. (2024b). Serie de experimentos para tratamientos anidados en grupos en arreglo de bloques completos balanceados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 15*(7).

Ledolter, J. (2010). Split-plot design: discussion and examples. *International Journal of Quality Engineering and Technology, 1*(4), 441-457. https://doi.org/10.1504/IJQET.2010.035588

Little, T. M., y Hills, F. J. (2008). *Métodos Estadísticos para la Investigación en la Agricultura*. Trillas.

Martínez, G. A. (1988). *Diseños experimentales. métodos y elementos de teoría*. Trillas.

Martínez, G. A. (1994). *Experimentación Agrícola: Métodos Estadísticos*. Universidad Autónoma Chapingo.

Mendenhall, W. (1987). Introducción a la Probabilidad y la Estadística. Iberoamérica.

Montgomery, D. C. (2009). *Design and Analysis of Experiments* (7ª ed.). John Wiley & Sons.

Pérez, L., D., Jasso, B., G., Saavedra, G., C., Franco, M., J. R. P., Ramírez, D. J. F., González, H., A. (2022). Uso de artificios en Opstat para analizar series de experimentos en dialélico parcial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13*(2), 273-287. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.3130

iThenticate Página 239 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 240 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Pérez, L. D. J., Balbuena, M. A.; Hernández, A., J.; Franco, M., J. R. P.; Rodríguez, G., J. A.; González, H., A. (2025). Fórmulas para Series de Experimentos en Cuadro Latino en arreglo de Parcelas Divididas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (En revisión: noviembre del 2024).

Rodríguez G., J. A., Pérez L., D. J., Hernández A., J., Balbuena M., A., Franco M., J. R. P., y González, H., A. (2025). Parcelas Divididas en Cuadro Latino: Modelos Estadísticos y fórmulas, sin y con submuestreo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (En revisión: noviembre del 2024).

Sahagún, C. J. (1998). *Construcción y análisis de los modelos fijos, aleatorios y mixtos.* Departamento de Fitotecnia. Programa Nacional de Investigación en Olericultura. Universidad Autónoma Chapingo (Boletín Técnico Núm. 2).

Sahagún, C. J. (2007). *Estadística Descriptiva y Probabilidad: Una Perspectiva Biológica* (2ª ed.). Universidad Autónoma Chapingo.

Smith W., G. (1951). *Dissertation notes on Canadian Sugar Factories.* Ltd. Taber.

Tirado E., G., y Tirado G., D. N. (2017). *Tratado de Estadística Experimental.* Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente.

iThenticate Página 240 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

14. Importancia de los parámetros genéticos en papa

Claudia Saavedra Guevara*
Delfina de Jesús Pérez López**§
Dora María Sangerman-Jarquín***
Andrés González Huerta****
José Ramón Pascual Franco Martínez*****
Laura Stephanie Flores Carrera******

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.14

Resumen

La hibridación es un proceso de mejoramiento genético para generar variedades con mayor potencial de rendimiento en el cultivo de la papa y el éxito depende de la elección de los progenitores mediante la estimación de parámetros genéticos como la heterosis (heterosis media, heterobeltiosis y heterobeltiosis específica), la heredabilidad (en sentido amplio y estrecho), la aptitud combinatoria (general y específica), y la respuesta a la selección entre otros, en este artículo se habla de cada uno, estableciendo las fórmulas para su determinación y algunos ejemplos de cómo se han utilizado en los últimos 70 años en este cultivo. Los parámetros más utilizados son la aptitud combinatoria general y específica debido a que ambos permiten

§ Autor para correspondencia: djperezl@uaemex.mx
* Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de Asignatura de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5519-6125
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690
*** Doctora en Ciencias. Editora en jefa de la *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-1182
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
***** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203
****** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8518-9636

iThenticate Página 243 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

establecer el tipo de acción génica que está presente en el carácter evaluado, con la finalidad de establecer los criterios a seguir en el programa de mejoramiento y para hacer predicciones sobre el comportamiento de las cruzas tanto muestreadas como no muestreadas.

Palabras clave: Solanum tuberosum *L., aptitud combinatoria, heterosis.*

Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L.), es parcialmente alógama y tiene un número básico de cromosomas de $2n = 2x = 24$. Hay 235 especies: siete son cultivables y 228 son silvestres (Hawkes, 1990); 180 producen tubérculos; las subespecies de importancia económica son *S. tuberosum* y *S. andigenum* pero sólo la primera es extensamente cultivada (Ross, 1986); por su número de cromosomas hay especies diploides ($2n = 2x = 24$), triploides ($3n = 3x = 36$), tetraploides ($4n = 4x = 48$), pentaploides ($5n = 5x = 60$) y hexaploides ($6n = 6x = 72$) (Howard, 1970). Por el nivel poliploide que presenta esta especie ha sido difícil incorporar de genes del tipo diploide al tetraploide y porque presenta herencia tetrasómica.

El mejoramiento genético en papa por hibridación inicio desde 1959, cuando se identificaron progenitores sobresalientes usando diseños de apareamiento, que son planes cruzamiento entre individuos seleccionados, utilizados para estimar parámetros genéticos en éstos y en sus progenies sobre la naturaleza de los genes involucrados en la herencia de los caracteres bajo consideración (Nduwumuremyi et al., 2013).

Los parámetros genéticos son la varianza genética aditiva (σ^2_A), la varianza de dominancia (σ^2_D), la varianza epistática (σ^2_I), el grado promedio de dominancia ($\sigma_D{}^2 / \sigma_A{}^2$), la interacción genotipo por ambiente (G × A), la correlación genotípica entre variables cuantitativas, la heredabilidad (Dudley y Moll, 1969), los coeficientes de variación genotípica y aditiva, la respuesta a la selección, la aptitud combinatoria general y específica y la heterosis. La información proveniente de los componentes de varianza genética y heredabilidad son esenciales para hacer inferencias sobre la

iThenticate Página 243 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 244 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

respuesta a la selección (Nduwumuremyi et al., 2013; Fasahat et al., 2016; Awata et al., 2018).

Los diseños de apareamiento más usados en un programa de fitomejoramiento son la cruza dialélica (Griffing, 1956), el diseño factorial III de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1952) y los propuestos por Hayman (1954) y Jinks (1954). El cruzamiento dialélico es útil para la evaluación de los componentes genéticos en los progenitores y para calcular la capacidad reproductiva en sus cruzas (Baker, 1978). Estos proveen una oportunidad para seleccionar padres basados en una mayor aptitud combinatoria general (*ACG*) y cruzas con mejor aptitud combinatoria específica (ACE). Estos son los dos parámetros genéticos principales del análisis de cruzas dialélicas; la *ACG* es el comportamiento promedio de un progenitor en una serie de cruzas y la *ACE* es la desviación de determinadas cruzas con relación al comportamiento promedio de los progenitores que intervienen en el cruzamiento (Sprague y Tatum, 1942). Desde un punto de vista genético la *ACG*; es el resultado de la acción genética aditiva, mientras que la *ACE* depende de la dominancia y la epistasis.

Las cruzas dialélicas son poco usados en papa por la dificultad que se presenta generar todas las combinaciones posibles con n progenitores. La información que proporciona la aptitud combinatoria general (*ACG*) y especifica (*ACE*) es útil en el análisis e interpretación de la estructura genética de las especies tetraploides (Mendoza y Haynes, 1974). Plaisted et al. (1962) concluyeron que la *ACE* es la más importante cuando se desea explicar la variabilidad existente en el rendimiento de tubérculo.

El apareamiento entre progenitores tetraploides con buena aptitud combinatoria general (*ACG*) ha resultado ser la estrategia más apropiada y la más utilizada hasta ahora. Los resultados publicados por Golmirzale y Mendoza (1985) y Mendoza (1983) muestran la factibilidad de trabajar exitosamente con esta metodología. En papas se ha observado que la *ACE* es casi tan grande como la *ACG* (Gopal, 2015; Terres et al., 2017; Dedahr et al., 2020) y en este contexto, se hablará sobre el uso de ambos parámetros genéticos en papa.

iThenticate Página 244 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 245 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Parámetros genéticos

En un diseño de apareamientos tienen que ser elegidos los padres, después sus progenies son evaluadas y los genotipos superiores son seleccionados, por lo que es necesario conocer los aspectos agronómicos y la estructura genética de la especie a través de la estimación de los efectos y varianzas de aptitud combinatoria, las covarianzas, la heredabilidad, la heterosis, la respuesta a la selección, los coeficientes de correlación genética, la identificación de progenitores y cruzas simples sobresalientes, y la predicción de híbridos de mayor producción y calidad; a todos estos estimadores son denominados parámetros genéticos los cuales dan información sobre los tipos de acción génica (Nduwumuremyi et al., 2013; Fasahat et al., 2016; Awata et al., 2018; Bonierbale et al., 2020). Así, es pertinente estimar periódicamente los parámetros genéticos de la población a fin de diseñar estrategias alternativas para aumentar el avance genético (Hallauer y Miranda, 1981).

Los diseños genéticos más usados en papa son las cruzas dialélicas (Griffing, 1956), los diseños I y II de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1952) y los métodos propuestos por Hayman (1954) y Jinks (1954). Killick y Malcolmson (1973), Hirut et al. (2017), Tung et al. (2018), y Namugga et al. (2020) utilizaron los diseños I y II de Carolina del Norte para evaluar la resistencia al tizón tardío (*Phythoptora infestans* [Mont.] de Bary). Rowe (1969) también uso ambos diseños para estudiar la variación cuantitativa en papas diploides. Los dialélicos parciales también se han usado en papas (Tai, 1976; Killick, 1977; Muhinyuza et al., 2016); este propuesto por Kempthorne y Curnow (1961), permite el análisis genético en papas y otras especies en características cuantitativas, particularmente cuando se incluyan cruzar entre subespecies, o razas contrastantes.

La papa cultivada tetraploide, *Solanum tuberosum* ssp. *tuberosum*, frecuentemente presenta alta heterocigocidad y la acción génica no aditiva es importante en muchas características de importancia económica, pero presenta una base genética estrecha (Tai, 1976; Dehdar et al., 2020). Los primeros trabajos realizados por selección para adaptación de clones y la pandemia ocasionada por tizón tardío en el siglo XIX generó una dismi-

iThenticate Página 245 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 246 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

nución en la variabilidad genética del germoplasma existente, lo que evidenció, aún la base genética estrecha que hay en esta especie. Posteriormente se incorporaron genes del grupo andigena, pero los clones obtenidos no estaban adaptados a fotoperiodo largo y no presentaban buena calidad.

En 1959, Simmonds inicio un experimento en selección en masa para crear el grupo tuberosum mediante selección de clones del grupo andigena, logrando una adaptación a días largos; otros trabajos similares con el mismo propósito fueron hechos por Plaisted et al. (1962). A partir de esto se inició la formación de híbridos de tuberosum por andigena; se han generado cruzas diploides ($2x - 2x$) (Rowe 1969; Mendiburu y Peloquin, 1971), tetraploides ($4x - 4x$) (Mendoza y Haynes, 1974) y tetraploides con diploides ($4x - 2x$) (Rowe, 1969). Rowe reportó que las familias tetraploides superaron en rendimiento a las familias diploides. Pocos estudios se han realizados a nivel tetraploide, ya que las papas sufren depresión endogámica, esto reduce el rendimiento. También hay heterosis al utilizar padres con características superiores contrastantes ya que es una especie altamente heterocigótica y las interacciones intra e inter *locus* son importantes para incrementar el potencial del rendimiento: incrementando la heterocigocidad se incrementa la heterosis (Mendoza y Haynes, 1974).

Heterosis

La heterosis es un indicador de la diversidad genética *per se* de los progenitores y de la expresión génica que rige a un carácter; se debe a la presencia de genes dominantes heterocigotos en condición favorable, a la sobredominancia causada por un heterocigoto superior o por ambos progenitores, cuando hay efectos epistáticos, o debido a genes pleiotrópicos (Kuruvadi, 1991).

Gardner y Eberhart (1966) y Gardner (1967) propusieron un modelo que divide a la heterosis en tres efectos: (a) en la heterosis se comparan las características de la generación F1 con el promedio de ambos progenitores, (b) la heterobeltiosis, cuando se compara la F1 con el promedio del mejor progenitor, y (c) en la heterosis útil o neta se compara la *F*1 con la variedad comercial más usada en la región.

iThenticate Página 246 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 247 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$Heterosis = \left[\frac{F_1 - (P1 + P2/2)}{P1 + P2/2}\right] \times 100, \text{ donde: } F_1 = \textit{promedio de la cruza;}$$

$P_1 = \textit{promedio del progenitor } 1$, $P_2 = \textit{promedio del progenitor } 2$

$$Heterobeltosis = \left[\frac{F_1 - Mp}{Mp}\right] \times 100, \text{ donde: } MP = \textit{promedio del mejor progenitor}$$

$$Heterosis\ útil = \left[\frac{F_1 - MVC}{MVC}\right] \times 100, \text{ donde: } MVC = \textit{variedad comercial más usada en la región}$$

Tarn y Tai (1977) generaron híbridos con los grupos tuberosum (*T*) y andigena (*A*) en apareamiento *TT*, *AA*, *TA*, y *AT*; *TA* y *AT* superaron a *TT* en rendimiento y la heterosis media fue de 21.4%. Estos valores fueron contrastantes a los obtenidos por Glendinning (1969) (13%) y lo reportado por Cubillos y Plaisted (1976) (15%). Gopal et al. (2000) cruzaron *TA* y obtuvieron progenies más vigorosas, de mayor rendimiento y diámetro de tubérculo y también se incrementó, mayor heterosis y heterobeltiosis. Andrade et al. (2016) estimaron la heterosis para resistencia a *P. infestans* en 15 cruzas mediante el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (AUDPC) y reportaron una heterosis negativa significativa por lo que hubo resistencia al tizón tardío. Manivel et al. (2010) reportaron heterosis media negativa para rendimiento de tubérculo (−2.89) y peso promedio de tubérculos (−23.50) y heterosis positiva para número de tubérculos (27.80%) y materia seca (0.59%). Los efectos heteróticos negativos debido a la depresión endogámica en rendimiento de tubérculo y otros caracteres son comunes dentro del grupo tuberosum.

Aptitud Combinatoria General (ACG) y Específica (ACE)

Sprague y Tatum (1942) introdujeron los conceptos de aptitud combinatoria general (ACG) y aptitud combinatoria específica (ACE) para distinguir

iThenticate Página 247 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 248 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

entre el desempeño promedio de los padres en las cruzas y la desviación causada con relación a las cruzas individuales (Bradshaw y Mackay, 1994).

Frecuentemente los padres son elegidos debido a su comportamiento *per se* pero teóricamente no es seguro en cultivos que se multiplican clonalmente, como la papa, la cual es altamente heterocigota y presenta niveles de ploidía por lo que la segregación genética es altamente impredecible. Para estimar la aptitud combinatoria (AC) se recomienda utilizar a la cruza de prueba (aunque es laboriosa y requiere de tiempo) así como una reducción en el nivel poliploide (Gopal et al., 2008). En papas tetraploides se recomienda el cruzamiento entre probadores sobresalientes para determinar cuál produce progenie deseable con mayor frecuencia; este método reduce el número de cruzamientos requeridos para estimar la *ACG*. El análisis línea por probador usado por Plaisted et al. (1962) y Gopal et al. (2008) sigue un patrón muy al que genera el diseño II de Carolina del Norte. Con este se pueden seleccionar los mejores progenitores para iniciar el proceso de cruzamientos por medio de los diseños de apareamiento (Gopal, 2015); también se ha usado método 3 de Griffing en papas (Vesali et al., 2020); otra técnica usada son las policruzas generadas con 6 o 7 líneas o variedades. Sin embargo, la divergencia genética basada en caracteres morfológicos es un parámetro indirecto de efectividad moderada en la selección de padres para producir progenies de mayor rendimiento y heterosis, y este es el que ha tenido más éxito en la práctica (Gopal y Minocha, 1997).

Los análisis de aptitud combinatoria determinan la contribución genética de los padres en caracteres cuantitativos como materia seca, rendimiento y los componentes del rendimiento (Mendoza y Hynes, 1974). La *AC* es útil para identificar a las mejores combinaciones en cruzas, tanto para explotar la heterosis como en la transmisión de características hereditarias (Bukreyeva et al., 2014; Gopal, 2015). La *AC* se divide en aptitud combinatoria general (*ACG*) y aptitud combinatoria específica (*ACE*): estás miden, efectos aditivos y no aditivos, respectivamente. Griffing (1956), integrando los conceptos de Hayman (1954), Jinks (1954) y Kempthorne (1956), propuso cuatro modelos de cruzamiento para estimar *ACG* y *ACE*. El primero comprende *p* autofecundaciones, y todas sus cruzas directas y recíprocas; el segundo, incluye *p* autofecundaciones y todas las cruzas directas; el ter-

iThenticate Página 248 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 249 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

cero incluye todos las cruzas directas y recíprocas, y el cuarto a todas las cruzas directas.

En el método 2 de Griffing (1956), modelo I, o de efectos fijos, la *ACG* y *ACE* se estima como:

$$x_{ijk} = \mu + g_i + g_j + b_k + s_{ij} + e_{ijk}$$

Donde: x_{ijk} es el valor observado en la cruza entre los padres *i*, *j*; μ es la media poblacional; g_i, g_j es el efecto de *ACG* originado por los padres *i*, *j*; s_{ij} es la es la *ACE* de la cruza originada con los padres *i*, *j*; b_k es el efecto causado por el késimo bloque; e_{ijk} es el error experimental o residual del modelo.

La importancia relativa de los efectos de *ACG* y *ACE* para cada característica cuantitativa se determina con base en el cociente (*ACG*)/*ACE*2C-$M_{ACG}/(2CM_{ACG} + 2CM_{ACE})$; cuando la proporción *ACG*/*ACE* es mayor que 0.5 los efectos aditivos son más importantes que los efectos no aditivos. Cuando la proporción es menor a 0.5 el efecto dominante es más importante que en el aditivo (Baker, 1978). En la expresión anterior, CM son cuadrados medios de un análisis de varianza.

Sandford (1960) encontró que la aptitud combinatoria específica (*ACE*) fue dos veces más grande que la aptitud combinatoria general (*ACG*). Plaisted et al. (1962) determinaron que la aptitud combinatoria específica (*ACE*) fue cuatro veces más grande que la *ACG* en rendimiento de tubérculo. Resultados similares se observaron en Killick y Malcolmson (1973) quienes estudiaron la resistencia al tizón tardío y encontraron que los efectos de *ACE* fueron superiores a los de la *ACG*; Tai (1976) y Terres et al. (2017) reportaron que la *ACG* para peso promedio del tubérculo, gravedad específica, así como la comercialización fueron altamente significativos. En *ACE* lo fue en rendimiento total y para mercado, así como el número total de tubérculos. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Killick (1977) quien concluyo la *ACE* fue altamente significativa para rendimiento (Vesali et al., 2020), número de tubérculos, peso promedio del tubérculo, porcentaje de agrietamiento de tubérculo, textura, ennegrecimiento y gravedad especifica. Dehdar et al. (2020) y Terres et al. (2017) reportaron valores significativos

iThenticate Página 249 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 250 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

para *ACG* en la forma, puntiagudez, cutícula y tamaño del tubérculo, así como en longitud del estolón y tubérculos por planta.

Bradshaw et al. (1995), Muhinyuza et al. (2016) Hirut et al. (2017), Gastelo et al. (2019) y Namugga et al. (2020) reportaron que la acción genética aditiva fue predominante sobre la no aditiva en rendimiento y resistencia a tizón tardío, lo que permitirá el uso de alguna técnica de selección. Manivel et al. (2010) encontraron que las varianzas de *ACG* y *ACE* fueron igualmente importantes en rendimiento de tubérculo, tubérculos por planta, peso promedio de los tubérculos y materia seca, este último uno de los caracteres más importantes para calidad industrial (Tai, 1976; Killick, 1977). Muhumuza et al. (2020) reportaron que en materia seca los efectos genéticos aditivos (ACG) fueron más importantes.

Componentes de varianza y heredabilidad

Los componentes fundamentales de la variación en la descripción mendeliana de una variable cuantitativa fueron introducidos por Fisher en 1918, al establecer que varianza fenotípica = $\sigma^2_G + \sigma^2_E + \sigma^2_{IGE}$,dónde de la: σ^2_G = varianza genética; σ^2_E = varianza ambiental; σ^2_{IGE} = varianza de la interacción genotipo ambiente.

Wright (1921) dividió la varianza genética (σ^2_G) en varianza genética aditiva (σ^2_A), y varianza genética debida a desviaciones del modelo aditivo (dominancia o sobredominancia) y varianza de interacción de genes de *loci* diferentes (epstasis). Es decir $\sigma^2_G = \sigma^2_A + \sigma^2_D + \sigma^2_I$.

La heredabilidad es el grado en que los progenitores trasmiten sus características a sus hijos. Aunque bajo cierto enfoque esto es cierto, en general, en un programa de mejoramiento genético, la heredabilidad se usa para definir el grado de parecido entre individuos o familias basado en una característica en particular y además para analizar las causas genéticas y ambientales de ese parecido (Jacquard, 1983), o para predecir el avance genético que se espera alcanzar al seleccionar progenitores en una o más poblaciones (Reyes, 1985).

La heredabilidad, como fue definida por Lush (1948), se divide en dos tipos: en sentido amplio (H^2), que es la porción de la varianza genética total

iThenticate Página 250 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 251 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

con relación a la varianza fenotípica (σ^2_G/σ^2_F) y se expresa en porcentaje, y en sentido estricto (H^2) se define como la proporción de las varianzas genética aditiva sobre la fenotípica (σ^2_A/σ^2_F) (Nyquist, 1991).

La heredabilidad en sentido amplio, también conocida como el grado de determinación genética, expresa la proporción en la cual los fenotipos de los individuos están determinados por sus genotipos, es decir, es la proporción de la varianza fenotípica explicada por factores genéticos (Falconer y Mackay, 1986) y está relacionada con la respuesta a la selección entre individuos o familias. Estos estimadores pueden variar, dependiendo del diseño experimental y de la unidad de selección, entre otros.

A partir del análisis de varianza correspondiente a un diseño completamente al azar o bloques completos al azar, es posible obtener estimaciones de heredabilidad en sentido amplio. Esta se estima con las esperanzas matemáticas de los cuadrados medios del análisis de varianza, según las fórmulas siguientes.

$$E(CM_v) = \sigma^2_e + \sigma^2_g \; E(CM_e) = \sigma^2_e$$

Donde: $E(CM_v)$ es el valor esperado del cuadrado medio entre variedades; $E(CM_e)$ es el valor esperado de los cuadrados medios del error experimental.

Además $\sigma^2_g = (CM_v - CM_e)/r \; \sigma^2_e = CM_e$

$$\sigma^2_f = (\sigma^2_g + \sigma^2_e)/r$$

$$(H^2) = (\sigma^2_g)/(\sigma^2_f)\ 100$$

Los componentes de varianza se evalúan en términos de respuesta a la selección, pero el empleo del método de momentos, calculado con funciones lineales de estos componentes permite calcular variabilidad genética (H^2) (Holland et al., 2003). Pérez et al. (2007) observaron que la heredabilidad varió de 61.8 a 95.8% en cada localidad en altura de planta, número de tallos por planta, número y peso de tubérculo por planta, y diámetro y longitud de tubérculo, pero en el análisis combinado se observó que en general la varianza de la *IGA* fue mayor que la varianza genética o del error, por lo que los valores de H^2 variaron entre 3.7 y 67.7%; esto indica que la varianza de la *IGA* reducirá la respuesta a la selección. Thompson et al.

iThenticate Página 251 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 252 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(1983) estimaron valores de H^2 entre 61 y 64% para número de tubérculos y para rendimiento; Javier et al. (1974) observaron valores de H^2 entre 92.9 a 95.5% para número de tallos, número y peso de tubérculos. Namugga et al. (2018) encontrando que H^2 para peso promedio del tubérculo fue de 70% y para días a floración de 78%.

Dehdar et al. (2020) estimaron 76% de H^2 para rendimiento, 84% en apariencia de cutícula del tubérculo, 77% para forma del tubérculo, 60% para profundidad de ojo, 49% para número de tallos, 65% para longitud del estolón, 79% para materia seca del tubérculo, 78% para altura del tallo, 75% para tamaño del tubérculo, 80% para número de tubérculos por planta y 76% para uniformidad en el tamaño del tubérculo. La heredabilidad es considerada alta si está >60% (Jibrin et al., 2016) por lo que estas características serán recomendables para seleccionar genotipos sobresalientes de papa. Paget et al. (2014) estimaron los valores H^2 0.25 a 0.60 para rendimiento y calidad de tubérculo. Muhumuza et al. (2020) encontraron que en porcentaje de materia seca H^2 fue de 50.6%, en azúcares reductores H^2 fue de 77.8% y en rendimiento total H^2 fue de 29.5%.

Avance genético

Dehdar et al. (2020) encontraron que el avance genético como porcentaje de la media, fue alto (escala: bajo de 0-10%, moderado 10-20% y alto >20%) para caracteres como rendimiento del tubérculo, forma del tubérculo, tamaño del tubérculo, número de tubérculos por planta y uniformidad del tubérculo. Este fue considerado moderado para apariencia de la piel del tubérculo, profundidad de ojos y número de tallos. En términos generales, un alto valor de estos caracteres sugiere que estos están gobernados por genes aditivos y que la selección sería efectiva para mejorarlos.

Conclusiones

La estimación de parámetros genéticos en papa mediante diseños de apareamiento resulta complicada por la herencia tetrasómica que presenta la

iThenticate Página 252 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 253 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

especie ya que existen problemas de autoincompatibilidad, así como las relaciones con la estructura genética de los órganos reproductores que son muy débiles, y hay poca producción y reducida viabilidad de polen en cultivares tetraploides. Sin embargo, se podrían obtener progenies usando cruzas dialélicas, policruzas, cruzas de prueba o línea por probador quizás mucho más rápido y fácil. La determinación del tipo de acción génica del rendimiento y sus principales componentes nos permite tener una idea clara que técnica de mejoramiento es la adecuada y la más eficiente.

Referencias

Andrade, A. J., Capezio, S. B., y Huarte, M. A. (2016). Caracterización de progenitores de papa en base a aptitud combinatoria y heterosis para la búsqueda de resistencia a Phytophthora infestans. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Uncuyo, 48*(1), 9-20.

Awata, L. A. 0., Tongona, P., Danquah, E., Efie, B. E. y Marchelo-Dragga, P. W. (2018). Common mating designs in agricultural research and their reliability in estimation of genetic parameters. *Journal of Agriculture and Veterinary Science, 11*(7), 16-36.

Baker, R. J. (1978). Issues in diallel analysis. *Crop Science, 18*(4), 533-536.

Bonierbale, M., Amoro, W., y De Jong, W. (2020). Potato Breeding. En H. Campos y O. Ortiz (Eds.), *The Potato Crop*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-560

Bradshaw, J. E., y Mackay, G. R. (1994). Breeding Strategies for Clonally Propagated Potatoes. En *Potato Genetics* (pp. 467-497). CAB International.

Bradshaw, J. E., Stewart, H. E., Wastie, R. L., Dale, M. F. B., y Phillips, M. S. (1995). Use of seedling progeny tests for genetical studies as part of a potato (Solanum tuberosum subsp, tuberosum) breeding programme. *Theoretical Applied Genetics, 90*, 899-905.

Bukreyeva, N. I., Belousov, A. A., y Sivolap, Y. M. (2014). Allelic compositions at polymorphic gene loci in maize inbred and hybrid lines and their associations with leves of heterosis. *Cytology and Genetics, 48*(2), 76-84.

Comstock, R. E., y Robinson, H. F. (1952). Estimation of average dominance of genes. *Heterosis, 2*, 494-516.

Cubillos, A. G. y Plaisted. R. L. (1976). Heterosis for yield in hybrids between S. tuberosum ssp. tuberosum and S. tuberosum L. ssp. andigena. *American of Potato Journal, 53,* 145-150.

Dehdar, B., Amiri, S., Panahi, B., y Mohammadi, R. (2020). Combining ability analysis of tuber yield and related traits in potatoes. *Genetika, 52*(1), 215-228.

iThenticate Página 253 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 254 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Dudley, J. W., y Moll, R. H. (1969). Interpretation and use of estimates of heritability and genetic variance in plant breeding. *Crop Science, 9*(3), 257-262.

Falconer, D. S., y Mackay, T. F. C. (1986). *Introduction to Quantitative Genetics* (4ª ed.). Pearson Prentice Hall, Harlow.

Fasahat, P., Rajabi, A., Rad, J. M., y Derera, J. (2016). Principles and utilization of combining ability in plant breeding. *Biometrics & Biostatistics International Journal, 4*(1), 1-22.

Fisher, R. A. (1918). The correlations between relatives and the supposition of mendelian inheritance. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh 52*: 399-433.

Gardner, C. O., y Eberhart, S. A. (1966). Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics, 22*, 439-452.

Gardner, C. O. (1967). Simplified methods for estimating constants and computing sums of squares for a diallel cross analysis. *Fitotecnia Latinoamericana, 4*(2), 1-12.

Gastelo, M., Díaz, L., Quispe, K., y Bonierbale, M. (2019). Parental Value for Tuber Yield in Potato Under High Temperature Environments in Climate Change Conditions. *Open Agriculture, 4*, 630-640.

Glendinning, D. R. (1969). The performance of progenies obtained by crossing groups andigena and tuberosum, of Solanum tuberosum L. *European Potato Journal,* (12), 13-12.

Golmirzaie, A. M., y Mendoza, H. A. (1985). Identification of Parental Lines for Development of TPS population. *American of Potate Journal, 62,* 427-428.

Gopal, J., y Minocha, J. L. (1997). Genetic Divergence for cross prediction in potato. *Euphytica, 93*, 269-275.

Gopal, J., Chahal, G. S., y Minocha, J. L. (2000). Progeny mean, heterosis and heterobeltiosis in Solanum tuberosum x tuberosum and S. tuberosum x andigena families under a short day sub-tropic environment. *Potato Research, 43*, 61-70.

Gopal, J.; Kumar, V. y Luthra, S. K. (2008). Top-cross vs. poly-cross as alternative to testcross for estimating the general combining ability in potato. *Plant Breeding, 127*, 441-445.

Gopal, J. (2015). Challenges and Way-forward in Selection of Superior Parents, Crosses and Clones in Potato Breeding. *American of Potato Research, 58*, 165-188.

Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences, 9,* 463-493.

Hawkes, J. G. (1990). *The potato. Evolution biodiversity and genetic resource*s. Belhaven Press.

Hallauer, A. R., y Miranda, F. J. B. (1981). *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Iowa State University Press.

Hayman, B. I. (1954). The theory and analysis of diallel cross. *Genetics, 39*(6), 789-809.

Hirut, B., Shimelis, H., Fentahun, M., Bonierbale, M., Gastelo, M., y Asfaw, A. (2017). Combining ability of highland tropic adapted potato for tuber yield and yield components under drought. *PloS ONE,* (7), 1-22.

Holland, J. B., Nyquist, W. E., y Cervantes, M. C. T. (2003). Estimating and interpreting heritability for plant breeding. *Plant Breeding Reviews, 22*, 9-112.

iThenticate Página 254 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 255 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Howard, H.W. (1970). *Genetics of the Potato Solanum tuberosum L*. Logos Press.

Javier, T. G., Molina, G. J. D., y Casas, D. E. (1974). Correlaciones genéticas e índices de selección en la genotecnia de la papa *(Solanum tuberosum L.)*. *Agrociencia, 16*, 21-37.

Jibrin, M. S., Echekwu, C. A., Abdullahi, U. S., y Hamisu (2016). Phenotypic and genotypic variance and heritability estimates for oil content and other agronomic traits in groundnut *(Arachis hypogaea L.)*. *Environmental Science Pollution Research, 3*, 29-32.

Jinks, J. L. (1954). The analysis of continuous variation in a diallel cross in nicotiana rustic varieties. *Genetics, 39*(1), 767-788.

Kempthorne, O. (1956). The theory of the diallel cross. *Journal Paper,* (5), 29-51.

Kempthorne, O., y Curnow, R. N. (1961). The partial diallel cross. *Biometrics, 17*(2), 229-250.

Killick, R, J. (1977). Genetic analysis of several traits in potatoes by means of a diallel cross. *Annals of Applied Biology, 86*(2), 279-289.

Killick, R. J., y Malcolmson, J. F. (1973). Inheritance in potatoes of field resistance to late blight (Phytophthora infestans). *Physiological Plant Pathology, 3*, 121-131.

Kuruvadi, S. (1991). Diallel analysis and heterosis for yield and associated characters in durum wheat under upland condition. *Turrialba, 41*, 335-338.

Lush, J. L. (1948). *The genetics of populations. Mimeographed notes.* Iowa State University.

Manivel, P., Pandey, S. K., Singh, S. V., y Kumar, D. (2010). Heterosis and combining ability for tuber dry matter and yield in potato (Solanum tuberosum L.) over two clonal generations under short-day sub-tropic conditions. *Electronic Journal of Plant Breeding, 1*(3), 287-296.

Mendiburu, A., y Peloquin, S. J. (1971). High yielding tetraploids from 4x-2x and 2x-2x matings. *American Potate Journal, (Abstract) 48*(8), 300.

Mendoza, H. A., y Haynes, F. L. (1974). Genetic basis of heterosis for yield in the autotetraploid potato. *Theoretical and Applied Genetics 45*, 21-25.

Mendoza, H. A. (1983). Selection of uniform progenies to use TPS in commercial potato production. En *Report 16 of Planning Conference on Present and Future Strategies for Potato Breeding and Improvement* (pp. 87-97). International Potato Center.

Muhumuza, E., Edema, R., Namugga, P. y Barekye, A. (2020). Combining ability analysis of dry matter content, reducing sugars and yield of potato *(Solanum tuberosum L.)* genotypes in Uganda. *Journal of Scientific Agriculture, 4*, 01-08.

Muhinyuza, J.B., Shimelis, H., Melis, R., Sibiya, J., y Nzaramba, M.N. (2016). Combining ability analysis of yield and late blight [Phytophthora infestans (Mont.) de Bary] resistance of potato germplasm in Rwanda. *Australian Journal of Crop Science, 10*(6), 799-807.

Namugga, P., Sibiya, J., Melis, R., y Barekye, A. (2018). Combining ability analysis of earliness and yield of potato (Solanum tuberosum L.) genotypes in Uganda. *Euphytica, 214*(116), 1-9.

Namugga, P., Sibiya, J., Melis, R., y Barekye, A. (2020). Combining ability analysis of yield and resistence to late blight disease caused by Phytophthora infestans in Uganda. *Australian Journal of Crop Science, 14*(10), 1637-1644.

iThenticate Página 255 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 256 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Nduwumuremyi, A., Tongoona, P., y Habimana, S. (2013). Mating designs: helpful tool for quantitative plant breeding analysis. *Journals in Plant Breeding & Genetics, 1*(03), 117-129.

Nyquist, W. E. (1991). Estimation of heritability and prediction of selection response in plant populations. *Critical Reviews in Plant Sciences,10*, 235-322.

Paget, M. F., Alspach, P. A, Genet, R. A., y Apiolaza, L. A. (2014). Genetic variance models for the evaluation of resistance to powdery scab (*Spongospora subterranea f. sp. subterranea)* from long-term potato breeding trials. *Euphytica 197*, 369-385. https://doi.org/10.1007/s10681-014-1073-9

Pérez, L. D. J., Vázquez, G. L. M., Sahagún, C. J., y Rivera, P. A. (2007). Variabilidad y caracterización de diez variedades de papa en tres localidades del estado de México. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 13*(1), 13-19.

Plaisted, R. L., Sanford, L., Federer, W. T., y Kehr, A. E. (1962). Specific and general combining ability for yield in potatoes. *American Potato Journal, 39*, 185-197.

Reyes, C. P. (1985). *Fitogenética Básica y Aplicada.* AGT-Editores.

Ross, H. (1986). *Potato Breeding. Problems and Perspectives. In Advances in Plant Breeding. Supplement*. Paul Parey Verlag, Berlin, pp: 11−18.

Rowe, P. R. (1969). Quantitative variation in diploid potatoes. Am. Potato J. 46: 15−17.

Sandford, L. L. (1960). C*omparative evaluation of clones as testers for yield, specific gravity and tuber appearance in the potato.* [Tesis, Iowa State University.]

Sprague, G. F., y Tatum, L. A. (1942). General versus specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of American Society Agronomy, 34*(10), 923-832.

Tai, G. C. C. (1976). Estimation of general and specific combining abilities in potato. *Canadian Journal Genetic Cytology, 18*, 463-470.

Tarn, T. R., y Tai G. C. C. (1977). Heterosis and variation of yield Components in F1 hybrids Between Group Tuberosum and Group Andigena Potatoes. *Crop Science, 15*(1), 517-521.

Terres, L. R., Lenz, E.A., Rocha, D., Cerioli, M., y Da Silva P. A. (2017). Combining ability of potato parents for tuber appearance and tuber yield component traits. *Crop Breeding and Applied Biotechnology, 17*, 99-106.

Thompson, P. G., Mendoza H. A., y Plaisted, R. L. (1983). Estimation of Genetic parameters for characters related to potato propagation by true seed (TPS) in an andigena population. *American Potato Journal, 60*, 393-401.

Tung, P. X., Zaag, P. V., Li, C., y Tang, W. (2018). Combining ability for foliar resistance to late blight [Phytophthora infestans (Mont.) de Bary] of potato cultivars with different levels of resistance. *American Journal of Potato Research, 95*, 670-678.

Vesali, M. R., Baradaran, R., Hassanpanah, D., y Seghatolelami, M. J. (2020). Generating genetic diversity through diallel crosses of promising potato cultivars (Solanum tuberosum L.) and studying cultivar hybrids under water deficit stress. *Revista de Agricultura Neotropical, l7*(2), 49-56.

Wright, S. (1921) Systems of Matting. I. The Biometric relation between parent and offspring. *Genetics, 6*, 111-123.

iThenticate Página 256 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 258 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

15. Mejoramiento y diversidad genética en haba

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.15

Delfina de Jesús Pérez López*§
Andrés González Huerta**
José Francisco Ramírez Dávila***
Martín Rubí Arriaga****
Laura Stephanie Flores Carrera*****
Maria Teresa Oliveros González******

Resumen

En *Vicia faba* L. es importante generar variabilidad genética a través de la hibridación, mutagénesis y marcadores moleculares para seleccionar los mejores genotipos mediante, la estimación de parámetros genéticos como es la respuesta a la selección, la aptitud combinatoria general, aptitud combinatoria específica, la heredabidad y la heterosis que permiten establecer el tipo de acción génica que está presente en el carácter evaluado. En la región de centro del Valle de México donde se cultiva esta especie, el productor ha seleccionado su propia semilla de generación en generación y es la que sigue usando en la actualidad. En este documento se describe las técnicas de mejoramiento genético más usadas y el grado de diversidad

§ Autor para correspondencia: djperezl@uaemex.mx
* Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690
** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
*** Doctor en Fisiología y Biología Animal por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8625-4655
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017
***** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8518-9636
****** Maestra en Ciencias en Biotecnología Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7991-3292

iThenticate Página 258 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 259 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

genética disponible en los bancos de germoplasma para ser usado en fitomejoramiento.

Palabras clave: Vicia faba *L., diversidad genética, banco de germoplasma, hibridación.*

Introducción

Vicia faba L. ($2n = 14$) constituye una fuente importante de proteína (24-37%) en la dieta de población de escasos recursos (Warsame et al., 2020; Pérez et al., 2014; Vioque et al., 2012). Sin embargo existe poca información sobre las diversas colectas existentes en la región centro de México, por lo que es fundamental contar con un germoplasma disponible y tener caracterizado las colectas existentes para realizar mejoramiento genético. A nivel mundial existen bancos importantes que conservan el germoplasma existente, muchos de ellos cuentan con información de las características morfológicas y agronómicas para identificar fuentes de variación genética pero estas colectas no están adaptado para México. El mejoramiento genético en haba depende de la naturaleza y magnitud de la variabilidad genética disponible (Arab et al., 2018; Tadele et al., 2021) y de las interacciones involucradas en la herencia de caracteres, como la hibridación, la aptitud combinatoria general y la aptitud combinatoria específica, la heredabilidad (Abo-Hegazy, 2022; Amjad y Alghamdi, 2023) y de la respuesta a la selección (Tadele et al., 2022), por lo que el uso de especies silvestres en el proceso de hibridación, en la técnica demutaganésis inducida, así como la caracterización molecular y mapeo genético permite incorporar variabilidad genética disponible en estas especies.

Variabilidad genética

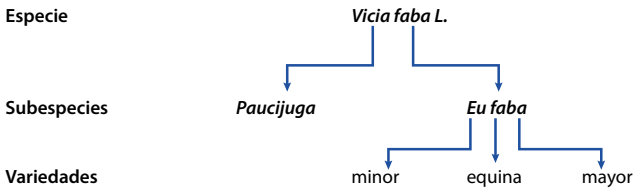
Existe amplia variabilidad genética en la especie por lo que se subdividen en dos subespecies muchos investigadores refieren a cuatro variedades botánicas: *V. faba paucijuga*, *V. faba mayor*, *V. faba equina* y *V. faba minor*.

iThenticate Página 259 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 260 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Estas distinciones en especies, subespecies, y variedades botánicas están basadas en diferencias en peso, forma y tamaño de la semilla (Bond et al., 1985, figura 15.1).

Figura 15.1. *Subespecies y variedades botánicas de haba según Cubero (1974)*



Fuente: Elaborado a partir de Cubero (1974).

De acuerdo a la clasificación realizada por Cubero (1974), en México se tienen identificados dos grupos botánicos de haba la *mayor* y *minor*. Estos dos grupos están diferenciados por sus colores los cuales son: amarillo, zimarrona o blanca, roja o morada y moteada o parraleña y por el tamaño de la semilla (Díaz et al., 2006; Pérez et al., 2014).

A pesar de la publicación de numerosos estudios genéticos y citogenéticos se conoce poco sobre el origen y la domesticación de haba. Cubero (1974) considera cuatros centros de origen: (a) Europa, (b) Norte de África y España, (c) a lo largo del Nilo y Etiopía, y (d) de Mesopotamia a la India. Sin embargo, Ladizinsky (1975) considera el centro de Asia y de acuerdo con Maxted (1995) considera el suroeste de Europa y suroeste de Asia.

Zohary (1972) considera que el antepasado común de *Vicia faba* L. fue *Vicia galilea*, esto permitió predecir el lugar de origen; las evidencias encontradas indican que las primeras descripciones de haba fueron encontradas en China (100 a. C.) y Japón (700 años d. C.). Por otro lado el grupo *Paucijuga*, actualmente presente desde Afganistán a la India, es la forma primitiva considerada como más cercana al extinguido progenitor silvestre (Zohary y Hopf, 2000). Sin embargo, no se ha cruzado la especie silvestre con la especie cultivada, por lo que no se conoce su ancestro común. Debido principalmente a que especies como *V. narbonensis, V. galilea, V. johannis* tienen diferente número de cromosomas (Raina y Rees, 1983).

iThenticate Página 260 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 261 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Hibridación

La hibridación es un método de mejoramiento genético que utiliza la polinización cruzada entre padres genéticamente diferentes. La hibridación es una forma de generar variabilidad genética. Bond realizó en 1966 los primeros cruzamientos en haba de invierno y logró una heterosis de 23% con respecto al mejor progenitor. Por otro lado Ebmeyer y Stelling (1994) incrementaron la heterosis hasta 70% para rendimiento de grano en cruzas de líneas endogámicas provenientes de diferentes cultivares, Sin embargo la Aptitud Combinatoria General (ACG) fue mayor que la Aptitud Combinatoria Específica (ACE) en las diferentes cruzas de haba. En otros estudios la ACG y la ACE no hubo diferencias entre las combinaciones híbridas, es decir, mostraron el mismo comportamiento (Ghareeb y Fares, 2016). Esto indica que se está a favor de la formación de variedades sintéticas (Maalouf et al., 1999). Sin embargo, después de considerar el alto grado de autofertilización que ocurre en el cultivo, los híbridos son los más apropiado para mejorar el rendimiento y su estabilidad por el efecto heterótico en el número de ramas por planta, número de vainas por planta y peso de 100 semillas (Duc, 1997; Bond et al., 1994).

Heredabilidad

La heredabilidad es uno de los componentes fundamentales de la variación en la descripción mendeliana de una variable cuantitativa, se usa para definir el grado de parecido entre individuos o familias basado en una característica en particular y además para analizar las causas genéticas y ambientales de ese parecido (Jacquard, 1983), o para predecir el avance genético que se espera alcanzar al seleccionar progenitores en una o más poblaciones (Reyes, 1985). La heredabilidad en sentido amplio (H^2) también conocida como el grado de determinación genética, es la proporción de la varianza genética total (δ_g^2) con relación a la varianza fenotípica (δ_F^2) $H = (\delta_g^2 / \delta_F^2) \times 100$ (Falconer, 1986) y la heredabilidad en sentido estrecho (h^2) se define como la proporción de la varianza genética aditiva (δ_A^2) sobre la varianza fenotípica

iThenticate Página 261 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 262 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(δ_F^2), (Lush, 1948; Holland et al., 2003). La heredabilidad de muchos caracteres cuando están controlados por líneas distintas pueden mostrar el valor más alto que otros cultivos, pero el rendimiento depende del componente ambiental (A) y de la interacción genotipo por ambiente (IGA).

La selección es el primer paso e incluye la selección de genotipos deseables. Para que la selección sea efectiva debe existir variación genética en la población, el carácter deseado debe ser altamente heredable y tener un valor económico de interés (Zamudio y Guerra, 2002). La presión de selección a lo largo de su periodo de cultivo la especie ha tenido un largo proceso de selección natural y selección hecha por el hombre y por lo tanto se han liberado cultivares adaptados a ambientes específicos. La presión de la selección (P) es limitada por la necesidad de controlar la polinización en las generaciones de selección y por las fuentes disponibles. (Bond, 1987; Bond y Poulsen, 1983).

Annicchiarico y Iannucci (2008) concluyeron que en ausencia de interacción genotipo por ambiente significativa las características de precocidad, duración de la floración, número de tallos fértiles por planta y altura de la primera vaina pueden ser usados para la identificación de material adaptado en las primeras etapas de selección, independientemente de los ambientes de prueba.

1 Las variedades nativas o criollas en haba son una mezcla de poblaciones que tienen un gran número de genes hereditarios diferentes debido a su diversidad genotípica y que están adaptadas al cambio de la condición ambiental en su hábitat (Kuckuck et al., 1991). Esta variación genética disponible 1 no ha sido explotada totalmente, ya que existe un rango considerable de variación existe entre y dentro de poblaciones (Lawes et al., 1983). En mejoramiento genético las variedades criollas son una fuente excelente de genes para mejorar el rendimiento de grano (Suso et al., 1993). El grado y patrón de variación genética determina el nivel de mejoramiento que es posible alcanzar y como puede ser logrado.

Poco es conocido acerca de los componentes genéticos que influyen en la expresión fenotípica en habas de invierno, aunque la tolerancia al frío es controlada por grandes efectos aditivos bajo condiciones controladas (Duc y Petitjean, 1995; Sallam et al., 2015).

iThenticate Página 262 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 263 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Como *Vicia faba* L. es parcialmente alogama y de polinización libre, puede comportarse como completamente endogámica o completamente de polinización cruzada con niveles significativos 4 a 60% (Suso et al., 2001; Suso et al., 2010; Hu et al., 2011), por lo tanto la heterosis estimada puede enmascar el verdadero valor del genotipo. Link et al. (2010) describieron ambos efectos maternos y de sobredominancia están presentes en la generación F1 para habas tolerantes al frío. La diversidad alélica, el tamaño de la población, la organización *multi-locus*, la taza de cruzamiento, la intensidad de selección, la heterocigocidad de individuos dentro de la población en un tiempo podría esperarse para cualquier efecto de respuesta positiva de selección en habas de invierno (Allard, 1996; Falconer y Mackay, 1996). Mientras mayor sea la varianza genética y el control ejercido por los genes, mayor será la disponibilidad de obtener un mejoramiento de estos.

Fuentes de variación genética

Se consideran como fuentes de variación genética a los bancos de germoplasmas, las mutaciones inducidas y la biología molecular. Los bancos de germoplasma resguardan la fuente de variabilidad genética requerida para los mejoradores de plantas para el desarrollo de cultivares que permitan al agricultor superar las limitaciones naturales a fin de obtener mayores beneficios en su actividad, así como evitar la pérdida de la erosión genética de la especie (Beeching et al., 1994; Martin, 2002) esto se llama conservación *ex situ*.

Los estudios de la diversidad genética dentro de estos bancos de genes son una de las herramientas que ayudan a tener un control más efectivo sobre la erosión genética (Yadav et al., 2017). Además de la conservación los bancos tienen funciones como documentar, caracterizar y evaluar la variabilidad genética que permiten la incorporación de individuos a programas de mejoramiento genético, ya sea por sus características promisorias o por su susceptibilidad a condiciones bióticas o abióticas, facilitando la incorporación de genes y el establecimiento de la mejor estrategia reproductiva así como la multiplicación y distribución del germoplasma (Graur y Wen-Hsiung, 2000). El número y tamaño de las colecciones en *Vicia faba*

iThenticate Página 263 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 264 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

L. en los bancos de germoplasma, se ha incrementado sustancialmente durante los últimos 10 años.

La más grande colección está en el Centro Internacional de Investigación para la Agricultura en Zona Áridas (ICARDA) en Alepo, Siria (Robertson, 1985), en donde reportan 15 386, de las cuales 7 316 son de especies cultivadas, 2 940 son silvestres, 181 son de tipo silvestre, y 4 949 son desconocidas (Upadhyaya et al., 2011); 840 líneas están registradas y publicadas en un catálogo (Robertson El-Sherbeeny, 1988). Estas colectas están organizadas por país y origen geográfico, pero existen otras colecciones en Bari, Italia, Braunschweig y Gatersleben, en Alemania; este último banco tiene colectas de acuerdo al país de origen al tamaño de semilla (Witcome, 1984). El germoplasma de Egipto combina la precocidad y el mayor rendimiento con el tamaño medio de la semilla. Las colectas de Iraq y Siria combinan el tamaño grande de la semilla y las vainas largas con el mayor rendimiento de semilla. Los países con el tamaño más grande de semilla y las vainas más largas corresponden a España, Iraq, Siria y Turquía (Van de Wouw et al., 2001). Actualmente, China cuenta con colecciones de reciente creación. En general, colecciones de bancos de germoplasma muy pequeños y que algunos mejoradores han acumulado sus propias reservas de diversidad genética. La conservación de la semilla en los bancos de germoplasma se realiza a través de la manipulación de la temperatura y humedad que pueden mantener por largos años la viabilidad de la semilla. Duc et al. (2010) reportó un total de colectas que existen en el mundo, y menciona que a nivel mundial existen 38 360 accesiones, en donde Europa tiene 18 076 colectas que representa 50% del material existente.

La conservación *ex situ* se realiza en varios centros de investigación los más importantes son Australian Temperate Field Crop Collection (ATFC), en Horsham, Australia, con 1 410 colectas; el Instituto del Germoplasma, Bari Italy, con 1 876; el Western Regional Plant Introduction Station (WRPIS) del Sistema Nacional de Germoplasma de Plantas de los Estados Unidos con 575 colectas; el International Centre for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), en Siria, con 9 000 colectas; el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), en Madrid, España, con 1 665 colectas; el Institut Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung (IPK), en Gatersleben, Alemania, con 1 920 colectas; el Instituto Nacional de Investigación

iThenticate Página 264 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 265 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Agrícola (INRA), en Dijon Francia, con 1 900; el Vavilov Reseach Institute of Plant Industry (VIR), en St. Petersburg, Russia, con 1871 colectas; el Plant Breeding and Acclimatization Institute (PBAI) en, Radzikow, y el Institute of Plant Genetics (IPG), en Poznan, Polonia, con 2 114 colectas; el Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS), en Beijig China, con 5 200; el Department of Primary Industries (DPI), en Victoria, Australia, con 2 445 colectas, y el National Bureau of Plant Genetic Resources (NBPGR), en India, que cuanta actualmente con 1 316 colectas y un banco de recursos fitogenéticos de plantas a nivel nacional, que está considerado un repositorio de los recursos de la PGR (Van de Wouw et al., 2001; Duc et al., 2010; Yaday et al., 2017).

Mutagénesis artificial

Mantener el germoplasma de *Vicia faba* L. causa problemas debido a la heterogeneidad de muchas colecciones por la polinización cruzada que existe en la especie. Un rango limitado de variación para algunas características y la reducida introducción de nueva variación se ha utilizado la mutágenesis artificial. Bond y Poulsen (1983) trabajaron sobre esta técnica a partir de 1997 en características de contenido de proteína, habito de la planta y precocidad a la madurez. Algunos de estos mutantes pueden contribuir a mejorar el rendimiento (Ismail et al., 1976; Filippet y De Pace 1986). Un interés especial son los mutantes de hábito indeterminado (Sjodin 1971 y Nagi, 1978). En México, la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del estado de México inició en 1985 un trabajo sobre irradiación con cobalto 60 con el fin de obtener la dosis letal media y seleccionar posibles mutante en cuanto a precocidad, porte bajo, productividad y resistencia a enfermedades en haba. Se concluyó que la dosis letal media de esta especie se encuentra en el rango de 1 a 4 krad y se obtuvieron seis líneas avanzadas con potencial de rendimiento (Pérez, 1999; Pérez y González, 2003).

Los avances obtenidos en las últimas décadas en el desarrollo de la genética molecular y evolutiva, así como en la tecnología informática, ha creado una nueva plataforma en las ciencias biológicas, la biotecnología, que

iThenticate Página 265 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 266 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

combinada con la informática, abre un camino para lograr ganancias en la productividad asociada al uso de los recursos genéticos (Roca, 2002). La aplicación de la biotecnología en *Vicia faba L.* fue referida por Van Rheenen et al. (1987).

Importancia de la diversidad genética

El estudio de la diversidad genética se basa en el grado de la similitud entre individuos lo que permite la formación de grupos homogéneos que comparten un patrón o una estructura de diversidad particular. Se pude definir como el grado en el cual el material hereditario diferencia internamente a una colección de plantas. El material hereditario pude diferenciarse en el nivel de las secuencias del ADN (alelos) y en el nivel de las combinaciones de alelos (genotipos) (Avise, 2004).

Para medir la diversidad genética, se han empleado dos enfoques básicos el agrupamiento basado en los datos del pedigrí y el basado en marcadores genéticos. La clasificación con datos de pedigrí se basan en el grado de co-ascendencia de dos individuos o la probabilidad de que un alelo de un *locus* en un individuo sea idéntico por descendencia a otro alelo del mismo *locus* pero de otro individuo, se cuantifica generalmente a través del coeficiente de parentesco definido por Kempthorne (1969). Sin embargo este enfoque tiene la limitación que requiere que el pedigrí de material estudiado sea conocido. Para el agrupamiento basado en marcadores genéticos se han empleado diferentes tipos de marcadores los agromorfológicos y los moleculares (Gouingaea et al., 2015).

Marcadores moleculares

En los últimos años, el empleo de marcadores producto de la utilización de técnicas bioquímicas y moleculares, ha permitido complementar la información obtenida utilizando caracteres agromorfológicos. Dentro de esas técnicas se encuentran los metabolitos secundarios, proteínas, marcadores de ADN y secuencias de ADNA a través del uso de marcadores moleculares

iThenticate Página 266 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 267 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

es posible estimar la diversidad genética neutral. Su evaluación es más compleja que los caracteres morfológicos pero la influencia ambiental es menor y permiten hacer comparaciones entre individuos de una misma especie, entre especies, establecer relaciones de paternidad y parentesco, relaciones fitogenéticas y analizar procesos de migración y deriva genética en la población. Los marcadores moleculares pueden ser clasificados según el tipo de molécula utilizada y la técnica en los basados en el análisis de proteínas, análisis isoenzimático, polimorfismo posicional de péptidos y los basados en el análisis del ADN. De estos los más popularizados son los marcadores de ADN y que permiten la recolección de gran cantidad de información genética (Avise, 2004).

2 Los diferentes tipos de marcadores se distinguen por su capacidad de detectar poliforfismos en loci únicos o múltiples y son de tipo dominante o co-dominante (Avise, 2004; Garoia et al., 2007). Los marcadores moleculares de ADN se dividen en tres categorías básicas; la primera corresponde a técnicas que no necesariamente se basan en la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR), por ejemplo los marcadores de Polimorfismo de la Longitud de los Fragmentos de Restricción (RFLP), los de Polimorfismo en la Longitud de los Fragmentos Amplificados (AFLP), los de Número Variable de Repeticiones en Tandem (VNTR); la segunda son técnicas que utilizan iniciadores arbitrarios o semiarbitrarios, por ejemplo, iniciadores PCR múltiples arbitrarios como los de Amplificación Aleatoria de ADN Polimórfico (RAPD); la tercera son técnicas que utilizan la PCR con sitio específico de amplificación, por ejemplo los de Secuencias Simples Repetidas (SSR), los de intersecuencia simple repetida (ISSR) y los de Polimorfismo de un Solo Nucleótido (SNP) (Karp et al., 1997; Govindaraj et al., 2015).

Dentro de los marcadores más conocidos se encuentran los RFLP que es el primer marcador de ADN utilizado para hacer estudios de genética poblacional y es el más usado para caracterizar y evaluar la heredabilidad genética existente en los bancos de germoplasma; los AFLP que es una técnica que detecta múltiples loci polimórficos y es útil para generar huellas genéticas y mapeo, así también se ha usado en la caracterización de germoplasma; los RAPD que son en esencia la misma metodología de la PCR solo que en el análisis RAPD el iniciador se usa para amplificar secuencias al azar de un patrón complejo de ADN (Phillips et al., 1995), los microsatélites o Se-

iThenticate Página 267 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 268 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

cuencia Simples Repetidas (SSR) que son utilizados fundamentalmente para estudios de variación genética intra e interespecífica; los de Intersecuencias Simples Repetidas (ISSR) que es una técnica relativamente nueva que genera un gran número de bandas polimórficas, es fácil de montar, altamente repetible y existen primers universales para plantas (Culley y Wolfe, 2001). A diferencia de los marcadores de ADN, la utilización de los marcadores proteicos está limitada por su reducido número que no cubre toda la extensión del genoma, por sus interacciones o modificaciones postranscripcionales y por su diferente expresión en distintos tejidos (Avise, 2004). En el caso de las secuencias de ADN aunque su utilización se ha incrementado considerablemente por la resolución de la técnica, su uso sigue siendo restringido ya que son muy pocas las especies a las que se les ha descrito en el genoma (Hunter et al., 2004).

La aplicación de los marcadores de ADN a la evaluación de germoplasma ha facilitado la identificación de duplicados en los bancos, la clasificación de los materiales, el cálculo de la distancia genética entre entradas, la identificación de su origen geográfico y la determinación de puntos de máxima variabilidad. Esta información facilita el manejo de las colecciones de germoplasma ya que permite tanto elegir parentales donde buscar nuevos alelos para ampliar la base genética de sus materiales y como una explotación más adecuada de la heterosis (Lee, 1995; Avise, 2004).

En haba la diversidad genética fue observada entre 7 líneas endogámicas de cultivares élites recientes provenientes de Asia, Europa y Norte de África usando los marcadores AFLP (Zeid et al., 2003), y para investigar la relación entre la similitud genética de 18 líneas de haba de Europa y su comportamiento híbrido y de heterosis (Zeid et al., 2004). Por su parte, Liu y Hou (2010), usando la misma técnica en dos bancos de germoplasma de haba, encontraron que la estructura genética de uno de ellos se dividió en siete grupos, lo que permitió conocer que de las 149 poblaciones 40 de estas representan más de 80% de la información genética del cultivo en la región que evaluaron, material que podría usarse con fines de mejoramiento genético. Gresta et al. (2009) utilizando marcadores AFLP en cinco colectas de haba mostraron 346 bandas de las cuales 60% mostraron polimorfismo. Gong et al. (2010), usaron 11 marcadores SSR con una secuencia inicial etiquetada (EST), para evaluar la diversidad genética

iThenticate Página 268 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 269 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de 29 cultivares de China y Europa; los resultados indicaron que sólo 8.36% mostraron variabilidad genética. La información polimórfica revelo que las habas de china tienen una línea genética base y que además las fuentes adicionales de accesiones genéticas podrían incrementar la variabilidad genética de la especie. Wang et al., 2012, analizaron molecularmente 802 cultivares de diferentes regiones de China (538) Asia (91) Europa (107) y África (70). Los resultados mostraron 209 bandas polimórficas. Las colectas del Norte de China mostraron alta diversidad genética, mientras que las accesiones de Europa fueron genéticamente más cerradas que las de África. Basados en los datos de ISSR los resultados de la agrupación de las accesiones de Asia, Europa y África estuvo asociada a su origen geográfico y su hábitat ecológico.

Abdel-Razzak et al. (2012) utilizando marcadores ISSR encontraron importantes diferencias en 10 cultivares de Egipto; los resultados mostraron 398 bandas polimórficas que permitieron agrupar las colectas de acuerdo con las características genéticas, el origen geográfico y el tipo de suelo. Otro tipo de primers para el análisis de la diversidad genética es el de Polimorfismo de Secuencias Específicas Amplificadas (SSAP), los cuales revelaron alto polimorfismo en nueve poblaciones de haba de Túnez; la diversidad genética fue más alta dentro que entre las poblaciones, indicando un cruzamiento en las poblaciones estudiadas, así mismo los valores de las distancias genéticas mostraron que el 15.6 por ciento del total de la variación se detectó dentro de las poblaciones. El análisis de pares de grupos no ponderados y promedios aritméticos (UPGMA) permitieron agrupar a las poblaciones en tres grupos (Ouji et al., 2012).

Se realizó un trabajo con 39 colectas de haba de la región Toluca Atlacomulco para estudiar la diversidad genética usando Intersecuencias Simples Repetidas (ISSR),los resultados indicaron que las 142 bandas formadas, 134 fueron polimórficas. Las distancias genéticas variaron entre 0.38 y 0.83 y los seis grupos formados en el dendograma con UPGMA indicaron alta variabilidad genética a nivel de ADN entre los genotipos (Salazar et al., 2015).

El análisis de diversidad genética dependerá de tipo de datos usados podrán generarse clasificaciones entre otras, usando información basada en datos de pedigrí (si es conocido), marcadores agromorfológicos utilizando caracteres cualitativos o cuantitativos y mercadores moleculares. En cual-

iThenticate Página 269 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 270 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

quier caso, es posible esperar clasificaciones disimiles porque cada tipo de descriptor reflejar aspectos diferentes de la diversidad genética asociados al tipo de medición y a la resolución del marcador. Las divergencias entre los análisis basados en datos agromorfológicos y los basados en datos moleculares se sustentan en que los cambios agromorfológicos no siembre está asociados a variaciones moleculares, ya que responden a reglas y presiones evolutivas diferentes, estas incongruencias han originado polémicas respecto a que tipo de datos pueden proveer de información adecuada para el análisis de la diversidad genética. Por lo tanto, estudios que incorporen descriptores morfológicos y marcadores moleculares proveen una mejor descripción e interpretación de la diversidad genética de los individuos (Wilson et al., 1974; Hillis y Wiens, 2000; Demey et al., 2003).

Independientemente del marcador utilizado, la estructura de la diversidad se puede representar adecuadamente en un modelo jerárquico, y si la información sobre los individuos es suficiente, ser posible representarla usando técnicas de agrupamiento o clasificación (van Hintum, 1995). La literatura muestra que las técnicas más utilizadas para la caracterización agromorfológica, basada en variables cuantitativas, son el análisis de componentes principales y los dendogramas, sobre matrices de distancias euclídeas. Para la caracterización usando marcadores tanto dominantes como co-dominantes, la técnica de clasificación mayormente utilizada es el árbol generado por el algoritmo Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean (UPGMA), calculado sobre matrices de similaridad empleando los coeficientes de Jaccard o Dice.

Marcadores agromorfológicos

La descripción morfológica de órganos vegetativos y reproductivos y caracteres agronómicos (descripción fenotípica) ha sido de gran utilidad para la caracterización y evaluación de recursos genéticos (Yahia et al., 2012; Pérez et al., 2015; Salazar et al., 2015). Adicionalmente se consideran datos sobre susceptibilidad a factores de estrés, patógenos y enfermedades. Estos marcadores agromorfológicos pueden ser definidos como atributos de las plantas fácilmente cuantificables e identificables, los cuales pueden o no ser al-

iThenticate Página 270 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 271 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

tamente heredables y estar controlados por uno o dos pares de genes, lo que permite una discriminación rápida de fenotipos (Lowe et al., 1996). No obstante, presentan limitaciones que dificultan su medición y restringen la información genética recuperable, como son los efectos pleitrópicos, desconocimiento de su base genética, tipo de herencia y su alta susceptibilidad a la influencia del medio ambiente como es el caso de los caracteres de interés agronómico (Pan et al., 2004).

Este último aspecto conocido como la variación adaptativa es cuantificada a través de ensayos regionales donde se evalúa la respuesta de distintos genotipos creciendo en las mismas condiciones, con lo que se minimiza la influencia ambiente; a la vez, el ensayo se repite en diferentes localidades para determinar la variación de un mismo genotipo en distintos ambientes (IGA) (Annicchiarico, 1997; Flores et al., 2016). Estos ensayos se establecen para recoger información sobre parámetros genéticos como la heredabilidad. Pérez et al. (2014) obtuvieron heredabilidades en sentido amplio de 51 a 90% (Alan y Geren, 2007) o los coeficientes de variación genética aditiva, su aplicabilidad es sólo en cultivos de importancia económica por lo cual conseguir información para otras especies no comerciales es poco probable (Primack y Kang, 1989).

Conclusiones

El mejoramiento genético uso de la variabilidad genética disponible en haba ha sido de gran utilidad para la caracterización y evaluación de material colectado, disponible en bancos de germoplasma y se complementa con el uso de marcadores moleculares, lo que ayuda a tener una idea clara del grado de variabilidad existente en *Vicia faba* L.

iThenticate Página 271 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 272 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Abdel-Razzak, H. S., Alfrmawy, Ibrahim, H. M., y El-Hanafy, A. (2012). Genetic diversity in faba bean (Vicia faba L.) using inter-simple sequence repeat (ISSR) markers and protein analysis. *Life Science Journal, 9*(2).

Abo-Hegazy, S. R. E. (2022). Genetic variability, heritability and path coefficient analyses of some agronomic traits in faba bean (Vicia faba L.). *Asian Journal of Plan Sciences. 21*(3), 469-477.

Alan, O., y Gere, H. (2007). Evaluation of heritability and correlation for seed yield and yield components in faba bean (Vicia faba L.). *Journal of Agronomy, 6*(3), 484-487.

Allard, R. W. (1996). Genetic Basis of the Evolution of Adaptedness in Plants. *Euphytica. 92,* 1-11. https://doi.org/10.1007/BF00022822

Amjad, D., y Alghamdi, S. S. (2023). Agro-morphological characterization of Vicia faba L. Accessions in the Kingdom of Saudi Arabia. *World Academy of Science, Engineering and TechnologyInternational Journal of Agricultural and Biosystems Engineering, 17*(11), 105-114.

Annicchiarico, P. (1997). Joint regression vs AMMI analysis of genotype – environment interactions for cereals in Italy. *Euphytica, 94,* 53-62.

Annicchiarico, P., y Iannucci, A. (2008). Breeding Strategy for Faba bean in Southern Europe based on cultivar responses across climatically contrasting environments. *Crop Science, 48*(3), 983-991.

Arab, S. A., El-Sayed, A. F., y Mohamed, M. K. A. (2018). Genetic diversity in some faba bean landraces using morphological characters and yield components. *Journal Plant Production, 9*(12), 975-980.

Avise, J. C. (2004). *Molecular Markers, Natural History and Evolution*(2ª ed.). Sinauer Associates.

Beeching, J. R., Marmey, P., Hunghes, M. A., y Charrier, A. (1994). *Evaluation of molecular approaches for determining genetic diversity in Cassava germplasm, In: Proceeding of the second international Sientific Meeting* (pp. 22-26). The Cassava Biotechnology Network.

Bond, D. A. (1966). Yield and components of yield in diallel crosses between inbred lines of winter beans. *The Journal of Agricultural Science, 67,* 325-336.

Bond, D. A. (1987). Recent Developments in Breeding Fied Beans (Vicia faba L.). *Plant Breeding, 90*(1), 1-26.

Bond, D. A., y Polusen, M. H. (1983). Pollination. En P. D. Hebblethwaite (Ed.), *The Faba Bean* (pp. 77-101). Butterworth.

Bond, D. A., Jellis, G. J., Rowland, G. G., Le Guen, J., Robertson, L. D., Khalil, S. A., y Li-Juan, L. (1994). Present status and future strategy in breeding faba beans (Vicia faba L.) for resistance to biotic and abiotic stresses. En F. J. Muehlbauer y W. J. Kaiser (Eds.), *Expanding the Production and Use of Cool Season Food Legumes* (pp. 596-616). Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture.

Cubero, J. I. 1974. On the evolution of Vicia faba L. Theor. Appl. Genet. 45: 47-51

iThenticate Página 272 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 273 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Culley, M. T., y Wolfe, A. D. (2001). Population Genetic structure of the cleistogamous plant species Viola pubescens Aiton (Violaceae), as indicated by allozyme and ISSR molecular markers. *Heredity, 86,* 545-556.

Demey, J. R., Zambrano, A., Fuenmayor, Y., y Segovia, F. (2003). Relación entre caracterizaciones molecular y morfológica en una colección de Yuca. *Interciencia, 28*(12), 1-7.

Díaz, B. M., Delgado, A. A., Herrera, C. B. E., y Sandoval, C. E. (2006). Germplasm of faba bean (Vicia faba L.) in México. En *International Workshop on Faba bean Breeding and Agronomy* (pp. 188-190). Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera.

Duc, G., y Petitjean, F. (1995). Study on the inheritance of freezing tolerance in Vicia faba L. En *AEP Conference. Copenhagen (*pp. 130-131).

Duc, G. (1997). Faba bean (Vicia faba L.). *Field Crops Research, 53*(1-3), 99-109.

Duc, G., Bao, S., Baum, M., Redden, B., Sadiki, M., Suso, M. J., Vishniakova, M., y Zong, X. (2010). Diversity maintenance anf use of Vicia faba L. genetic resources. *Field Crops Research, 115*(3), 270-278.

Ebmeyer, E., y Stelling D. (1994). Genetic structure of three open pollinated varieties in faba beans, Vicia faba L. *Plant Breeding, 112,* 17-23.

Filippetti, A., y De Pace, C. (1986). Improvement of seed yield in Vicia faba L. by using experimental mutagenesis. II. Comparison of gamma radiation and ethyl-methane-sulphonate in production of morphological mutants. *Euphytica, 35,* 49-59.

Falconer, D. S. (1986). *Introducción a la Genética Cuantitativa.* CECSA.

Falconer, D. S., y Mackay, T. F. C. (1996). *Introduction to quantitative genetics* (4ª ed.). Longman.

Flores, C. L. S., Pérez, L. D. J., González, H. A., Rubí, A. M., Balbuena, M. A., y Gutiérrez, R. F. (2016). Estabilidad del rendimiento de 36 cultivares de haba colectadas en el estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 7*(8), 1905-1917.

Ghareeb, Z. E., y Fares, W. M. (2016). Modified model for assessment of maternal effects in firts generation of faba vean. *Annals of Agricultural Science, 61*(1), 77-85.

Govindaraj, M., Vetriventhan, M., y Srinivansan, M. (2015). Importance Genetic Diversity Assessment in Crop Plants and Its Recent Avances: An Overview of Its Analytical Perspectives. *Genetics. Research International,* (1), 1-14.

Garoia, F., Guarniero, I., Grifoni, D., Marzola, S., y Tinti, F. (2007). Comparative analysis of AFL (Ps and SSRs efficiency in resolving population genetic structure of Mediterranean Solea vulgaris. *Molecular Ecology, 16*(7), 1377-1387.

Graur, D., y Wen-Hsiung, R. I. (2000). *Fundamentals of Molecular Evolution.* Sinauer Associates Inc.

Gresta, F., Avola, G., Albertini, E., Raggi, L., y Abbate, V. (2009). A study of variability in Sicilia faba bean landrace "Larga di Leonforte". *Genetic Resources and Crop Evolution, 57,* 523-531. https://doi.org/10.1007/s10722-009-9490-7

Gong, Y. M., Xu S C., Mao, W. H., Li Z Y., Zhang, G. W., y Ding J. (2011). Genetic diversity analysis of faba bean (Vicia faba L.) based on EST-SSR markers. *Agricultural Sciences In China, 10*(6), 838-844.

Hillis, D. M., y Moritz, C. (1990). Molecular versus morphology in sistematics. En J. J.

iThenticate Página 273 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 274 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Wiens (Ed.), *Phylogenetic analysis of morphological data* (pp. 1-19). Smithsonian Institution Press.

Hillis, D. M., y Wiens, J. J. (2000). Molecules versus morphology in systematic. En J. J. Wiens (Ed.), *Phylogenetic analysis of morphological data* (pp. 1-19). Smithsonian Institution Prees.

Holland, J. B., Nyquist, W. E., y Cervantes M. C. T. (2003). Estimating and interpreting heritability for plant breeding: An update. *Plant Breeding Reviews, 22*(1), 9-112.

Hunter, B. F., Hirh, A. E., Wall, D. P., y Eisen, M. B. (2004). Coevolution of gene expression among interacting proteins. *Proceeding National Academy of Science of USA, 101* (24), 9033-9038.

Ismail, M. A., Heakel, M. Y., y Fayed, A. (1987). Improvement of yield through induced mutagenesis in broad beans. *Indian Journal Genetic and Plant Breed, 36,* 347-350.

Jacquard, A. 1983. Heredability: One word, three concepts. Biometrics. 39: 465-477.

Karp, A., Kresovich, S., Bhat, K., Ayad, W., y Hodgkin T. (1997). *Molecular tools in plant genetic resources conservation: a guide to the technologies.* International Plant Genetic Resources Institute.

Kempthorne, O. (1969). *An introduction to genetic statistics.* The Iowa University Prees.

Kuckuck, H., Kobabe, G., y Wenzel, G. (1991). *Fundamental of Plant Breeding*. Springer-Verlag.

Ladizinsky, G. (1975a). On the origin of the broan bean, Vicia faba L. *Israel Journal Botany, 24,* 80-88.

Lee, M. (1975). DNA Markers and plant breeding programs. *Avances in Agronomy 55,* 265-341.

Liu, J., y Hou, W. (2010). Genetic diversity of faba bean germplasm in Qinghai and core germplasm identified based on AFLP analysis. *Legume Genomics and Genetics, 1*(1), 1-6.

Lawes, D. A., Bond, D. A., y Poulsen, M. H. (1983). Classification origin breeding methods and objectives En P. D. Hebblethwaite (Ed.), *The Faba bean (Vicia faba L.). A basis for improvement* (pp. 23-87). Butterworths.

Lowe, A. J., Hanotte O., y Guarino, L. (1983). Standardization of molecular genetic technique for the characterization of germplasm collection the case of random amplified polymorphic DNA (RAPD). *Plant Genetic Resources Newsletter, 107,* 50-54.

Lowe, A.J., Hanotte, O. H., y Guarino, L. (1996). Standardization of molecular genetic techniques for the characterization of germplasm collections: The case of random amplified polymorphic DNA (RAPD). *Plant Genetic Resources Newsletter, 107,* 50-54.

Lush, J. L. (1948). *The genetics of populations.* Mimeographed notes. Iowa State Univertsity.

Maalof, F. S., Suso, M, J., y Moreno, M. T. (1999). Choice of Methods and indices for identifying the best parentals for synthetytic varieties in faba bean. *Agronomie, 19*(8), 705-712.

Martin, A. 2002. Los marcadores genéticos en la Mejora Vegetal, En F. Nuez, J. M. Carrillo y R. Lozano (Eds.), *Genómica y Mejora Vegetal* (pp. 37-64). Mundi-Prensa.

iThenticate Página 274 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 275 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Maxted, N. (1995). *An ecogeographical study of Vicia subgenus Vicia.* International Plant Genetic Resourse Institute.

Nagl, K. (1978). Breeding value of radio-induced mutants of Vicia faba var. minor. En *Seed Protein Improvement in Grain Legumes* (pp. 234-252).

Ouji, A., El bok S., Syed, N. H., Abdellaoui, R., Rouaissi, M., Flavell, A. J., y El Gazzah, M. (2012). Genetic diversity of faba bean (Vicia faba L.) populations revealed by sequence specific amplified polymorphism (SSAP) markers. *African Journal of Biotechnology, 11*(9), 2162-2168.

Pan, Y, B., Burner, D. M., Legendre, B. L., Grisham, M. P., y White, W. H. (2004). An assessment of the genetic diversity within a collection of Saccharum spontaneum L with RAPD-PCR. *Genetic Resources and Crop Evolution, 51*(1), 895-903.

Pérez, L. D. J. (1999). Proyecto Mutagénos Fisicos en Fitomejoramiento. En E*l Mensajero Agrícola. Sección Académica. Boletin Informativo.* Facultad de Ciencias Agrícolas-de la UAEM.

Pérez, L. D. J., y González, H. A. (2003). *Cultivo y Mejoramiento de haba*. UAEM.

Pérez, L. D. J., González, H. A., Franco, M. O., Rubí, A. M., Ramírez, D. J. F., Castañeda, V. A., y Aquino, M. J. G. (2014). Aplicación de métodos multivariados para identificar cultivares sobresalientes de haba para el estado de México, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5*(2), 264-279

Pérez, L. D. J., González, H. A., Rubí, A. M., Franco, M. O., Franco, M. J. R. P., y Padilla, L. A. (2015). Análisis de 35 cultivares de haba por su producción de vaina verde y otros componentes del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6*(7), 1601-1613.

Phillips W., Rodríguez, H., y Fritz P. (1995). *Marcadores de ADN: Teoría, aplicaciones y protocolos de trabajo con ejemplos de investigaciones en cacao (Theobroma cacao).* Serie técnica. Informe técnico No. 252 CATIE.

Powell, W. (1992). Plant genomes, gene markers and linkage maps. En J. P. Moss (Ed.), *Biotechnology and crop improvement in Asia. Patancheru, India* (pp. 297-322). International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics.

Primack, R. B., y Kang, H. (1989). Measuring Fitness and Natural Selection in Wild. Plant Population. *Annual Review of Ecology and sistematics, 20,* 367-396.

Rania, S. N., y Rees, H. (1983). DNA variation between and within chromosome complements of Vicia species. *Heredity, 51*(1), 335-346.

Reyes, C. P. (1985). *Fitogenética Básica y Aplicada.* AGT- Editor.

Robertson, L. D. (1985). Faba bean germplasm collection, maintenance, evolution and use. En M. C. Saxena y S. Varma (Eds.), *Faba Beans, Kabuli, Chickpeas and Lentils in the 1980´s* (pp. 35-54). Proc. ICARDA Workshop.

Robertson, L. D., y El-Sherbeeny, M. (1988). *Faba Bean Germplasm Catalog: Pure Line Collection.* ICARDA.

Roca, W. (2002). *Biotecnología moderna, plantas transgénicas y agrodiversidad: oportunidades y desafíos.* Presentación en la ALAP, Quito (pp. 3-7).

Salazar, L M. E., Pérez, L. D. J., González, H. A., Vázquez, G. L. M., y Valadez, M. E. (2015).

iThenticate Página 275 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 276 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Genetic variability analysis of faba bean accessions using Inter-Simple Sequence Repeat ISSR markers. *Chilean Journal of Agricultural Research, 75*(1), 122-130.

Sallam, A., Martsch, R., y Moursi, Y. S. (2015). Genetic variation in morpho-physiological traits associated with frost tolerance in faba bean (Vicia faba L.). *Euphytica, 205,* 395-408. https://doi.org/10.1007/s10681-015−1395-2

Sjodin, J. (1971). Induced morphological variation in Vicia faba L. *Hereditas, 67,* 155-180.

Suso, M. J.; Moreno, M.T., y Cubero, J. I. (1993). New isozyme markers in Vicia faba: inheritance and linkage. *Plant Breeding, 40,* 105-111.

Suso, M. J., Pierre, J., y Moreno, M. T. (2001). Variation in outcrossing levels in faba bean cultivars: Role of ecological factors. *Journal of Agricultural Science, 136,* 399-405.

Suso, M. J., y Maalouf, F. (2010). Direct and correlated responses to upward and downward selection for outcrossing in Vicia faba. *Field Crops Research, 116,* 116-126.

Tadele, M., Mohamed, W., y Jarso M. (2021). Variation in genetic variability and heritability of agronomic traits in Faba bean (Vicia faba L.) genotypes under soil acidity stress evaluated with and without lime in Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research, 17*(2), 355-364.

Tadele, M., Mohamed, W., y Jarso M. (2022). Genetic Diversity of Elite Faba Bean (Vicia faba L.) Genotypes Based on Agronomic Traits and Soil Acidity Stress Indices. *American Journal of Bioscience and Bioengineering, 10*(1), 1-9.

Tanksley, S. (1983). Molecular markers in plant breeding. *Plant molecular Biology Reporter, 1,* 3-8.

Upadhyaya, H. D., Dwivedi, S.L., Ambrose, M., Ellis, N., Berger, J. Smykal, P., Debouck, D., Duc, G., Dumet, D., Flavell, A., Sharma, S. K., Mallikarjunna, N., Gowda, C. L. L. (2011). Legume genetic resources: Management, Diversity assesmentand utilization in crop improvement. *Euphytica, 180,* 27- 47.

Van- Hintum, T. J. (1995). *Hierarchical approaches to the analysis of genetic diversity in crop plants.* Core collections of plant genetic resources.

Van Rheenen, H. A., Bond, D. A., Erskine, W., y Sharma, B. (1987). Future Breeding Strategies. En *Proc. International Conference. Grain Legume Res.,* Spokane, USA.

Van de Wouw, M., Enneking, D., Robertson, L. D., y Maxted, N. (2001). Vetches (Vicia faba L.). En N. Maxted y S. J. Bennett (Eds.), *Plant Genetic Resources of Legumes in the Mediterranean* (pp.132-157). Kluwer.

Vioque, J., Alaiz, M., y Girón, C. J. (2012). Nutritional and functional properties of Vicia faba protein isolates and related fractions. *Food Chemistry, 132*(1), 67-72.

Wang, H. F., Zong, X. X., Guang, J. P., Yang T., Sun X L., Ma. Y., y Redden R. (2012). Genetic diversity and relationship of global faba bean (Vicia faba L.) germplasm revealed by ISSR markers. *Theorerical and Applied Genetics, 124,* 789-797.

Warsame, A. O., Michael, N., O´Sullivan, D. M., y Tosi, P. (2020). Identification and Quantification of Major Faba Bean Seed Proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemestry, 68*(32), 8535-8544.

Witcome, J. R. (1984). Genetic resources of faba beans. En J. R. Witcome y W. Erskine

iThenticate Página 276 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 277 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

(Eds.). *Gentic Resources and their explotation Chickpeas, Faba Beans and Lentils* (pp. 145-162).

Yaday, S. K., Verna, N., Singh, A. K., Singh, N., Rana, S. C., Ranga, S. S., y Kumart, K. (2017). Diversity and development in faba beam. *Legume Research, 40* (4), 618-624.

Yahia, Y., Guetat, A., Elfalleh, W., Ferchichi, A., Yahia, H., y Loumerem, M. (2012). Analysis of agromorphological diversity of southern Tunisia faba bean *(Vicia fabaL.)* germplasm. *African Journal of Biotechnology, 11* (56), 11913-11924.

Zamudio, F., y Guerra, F. (2002). *Especies forestales de rápido crecimiento con énfasis en el género Populus.* Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Forestal.

Zeid, M., Schon, C. C., y Link, W. (2003). Genetic diversity in recent elite faba bean lines using AFLP markers. *Theoretical and Applied Genetics, 107*(7), 1304-13014.

Zeid, M., Schon, C. C., y Link, W. (2004). Hybrid performance and AFLP-based genetic similarity in faba bean. *Euphytica, 139*, 207-216.

Zohary, D. (1972). The wild progenitor and the place or origin of the cultivated lentil: Lens culinaris. *Economic Botany, 26*, 326-332.

Zohary, D., y Hopf, M. (2000). *Domestication of plants in Old World.*

iThenticate Página 277 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 278 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

16. Aplicación de descriptores varietales en *Vicia faba* L. en la caracterización de cultivares

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.16

María Teresa Oliveros González*
Delfina de Jesús Pérez López**§
Andrés González Huerta***
Dora María Sangerman-Jarquín****
José Francisco Ramírez Dávila*****
Agustín Navarro-Bravo******

Resumen

La importancia en la caracterización de especies vegetales de relevancia económica es conocer la variabilidad genética disponible para ser usada en programas de mejoramiento genético. Los descriptores varietales se usan en la identificación de características fenotípicas, sin embargo, muchos de ellos no se visualizan gráficamente, lo que no ayuda a la caracterización, por lo que el objetivo del presente trabajo fue realizar una guía gráfica de doce descriptores de la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV) en el cultivo de haba, lo que facilitará el registro de caracteres agromorfológicos en campo.

§ Autor para correspondencia: djperezl@uaemex.mx
* Maestra en Ciencias en Biotecnología Agrícola por la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7991-3292
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690
*** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
**** Doctora en Ciencias. Editora en jefa de la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9658-1182
***** Doctor en Fisiología y Biología Animal por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8625-4655
****** Doctor en Ciencias. Editor en jefe de la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.

iThenticate Página 278 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 279 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Introducción

Vicia faba L., es una especie diploide ($2n = 12$) parcialmente alógama, es la tercera leguminosa de grano más importante después de la soya (*Glycine max* L.) y el chícharo (*Pisum sativum* L.) (Carrillo et al., 2020; Sharan et al., 2021). La caracterización agromorfológica es importante para describir cultivares de haba como una etapa previa a su mejoramiento genético (Khamassi, 2021). En México esta leguminosa es importante en los Valles Altos de la Mesa Central, que comprenden a los estados de Tlaxcala, Puebla, Michoacán, Guanajuato, Veracruz y Estado de México (Jordán et al., 2019).

Las guías de descripción varietal son documentos básicos técnicos, elaborados con base en estándares nacionales o internacionales por lo que existen diferentes referencias, entre las más usadas están en la UPOV y el International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR).

Los estudios de variabilidad basada en rasgos agromorfológicos son una herramienta fundamental en los esquemas de mejoramiento genético, conservación eficiente de germoplasma y en la producción de semilla (Pearce et al., 2000; Cordeiro et al., 2003). Dichos rasgos son utilizados para diferenciar las cultivares, y estos ilustran en forma gráfica la variabilidad fenotípica que existe en una colecta. El principal objetivo de este trabajo es facilitar el uso y la aplicación de los descriptores gráficos para identificar variedades de haba. Este material gráfico puede ser usado por productores, investigadores y estudiantes con propósitos de investigación, producción y comercialización, y al estar basado en normas internacionales su uso se puede extender a cualquier región donde se siembre esta leguminosa.

El contenido en tanino de la testa corresponde con la mancha de melanina de la quilla de la flor. Es necesario mantener ambos caracteres ya que las observaciones se efectúan en épocas y momentos muy diferentes. El contenido en tanino puede evaluarse extrayendo una pieza de la testa de la semilla y colocando una a dos gotas del reactivo en su superficie interna. Transcurridos uno o dos minutos aparecerá un color rosa vivo en presencia de taninos. Reactivos: A = 50% de etanol; B = 1% de vainillina en concentrado HC1, los reactivos A y B se mezclan en una proporción de 1:1 para su utilización. A los fines de este ensayo, *concentrado* se define como

iThenticate Página 279 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 280 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

1

la gama que va de 33 a 37% del peso por el volumen. Las semillas que presentan un color gris amarillento inmediatamente después de la cosecha se convertirán en marrones con el paso del tiempo si contienen tanino (UPOV, 2020).

DESCRIPCIÓN VARIETAL

Semilla: tanino

CARACTERES DE LA SEMILLA

	Clasificación	
Nota UPOV	1	9
Color	Ausente	Presente

Ausente

Presente

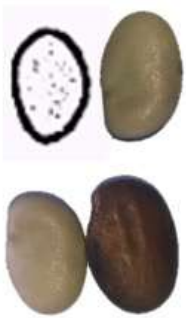
iThenticate Página 280 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

CARACTERES DE LA SEMILLA

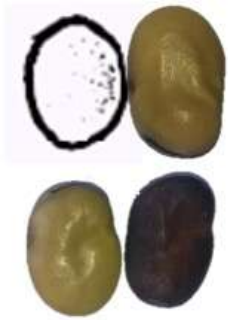
Semilla: forma de la sección media longitudinal

	Clasificación					
	Elíptica	Elíptica ancha	Circular	Oblonga	Rectangular	Ovalada
Nota guía México	1	2	3	4	5	6
Forma						

Elíptica

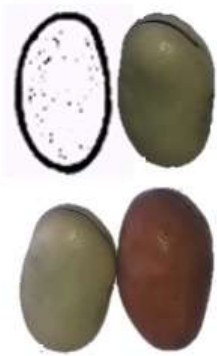


Elíptica ancha

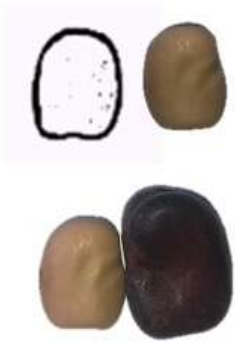


Circular

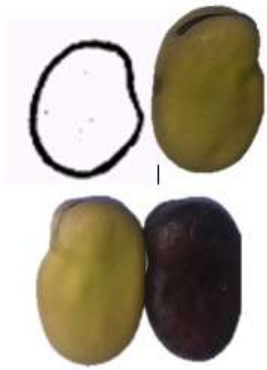
Oblonga



Retangular



Ovalada



1

CARACTERES DE LA SEMILLA

Semilla: tamaño

	Clasificación		
	Pequeña	Mediana	Grande
Nota propuesta del autor	1	2	3
Tamaño (largo)	1-1.5 mm	1.5-2 mm	2-2.5 mm

Pequeña

Mediana

CARACTERES DEL TALLO

Tallo: pigmentación antociánica

	Clasificación	
	Ausente	Presente
Nota UPOV	1	9
Color		

Ausente

Presente

1

CARACTERES DEL FOLLAJE

Follaje: tono grisáseo del color verde

	Clasificación	
	Ausente	Presente
Nota UPOV	1	9
Color		

Ausente

Presente

iThenticate Página 285 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

1

CARACTERES DEL FOLLAJE

Follaje: intensidad del color verde

	Clasificación		
	Claro	Medio	Oscuro
Nota UPOV	3	5	7
Color			

Claro

Medio

Oscuro

iThenticate Página 285 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 286 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

1

CARACTERES DE LA FLOR

Estandarte: mancha de melanina

	Clasificación	
	Ausente	Presente
Nota UPOV	1	9
Color		

Ausente

Presente

(A)

(B)

1

(A) Mancha color pardo o negro que aparece en la parte exterior basal o media del estandarte, su presencia puede ser sólo como manchas de costado,

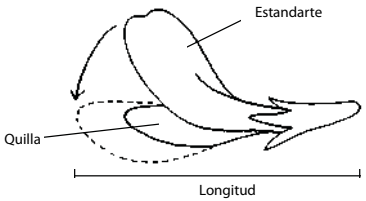
(B) o bien, una mancha central grande que se extiende del centro a las orillas del estandarte, como se observa en la imagen.

iThenticate Página 286 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 287 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

CARACTERES DE LA FLOR

Estandarte: pigmentación antociánica



Clasificación		
Claro	Ausente	Presente
Nota UPOV	1	9
Color		

Presente

Ausente

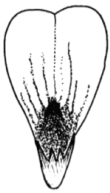
1 Esta pigmentación se identifica con facilidad, ya que aparece en el exterior del estandarte mediante una mancha de color rojizo claro, rosa o morado. En algunos casos pueden aparecer ambas manchas, la de melanina y la antociánica.

iThenticate Página 287 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

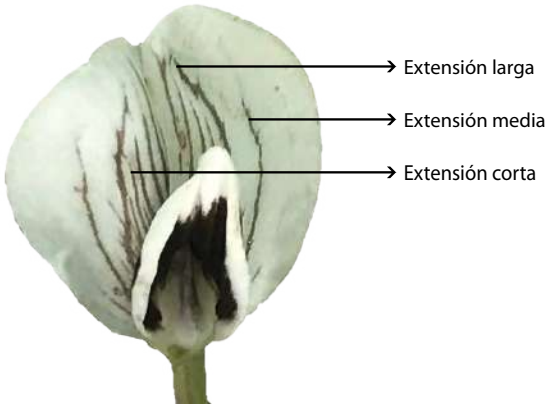
iThenticate Página 288 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

CARACTERES DE LA FLOR

Estandarte: extensión de la pigmentación antociánica

	Clasificación		
	Corta	Media	Larga
Nota UPOV	3	5	7
Forma			

Nivel de altura máxima de líneas en:



1 La extensión de pigmento en el estandarte se hace notar como líneas que extienden de la base hasta la punta de este pétalo, la largura de estas líneas determina la extensión, siendo la extensión más larga aquellas líneas que lleguen desde la base del estandarte hasta la punta de este.

Las observaciones se efectuarán en la cara interna del estandarte (UPOV).

iThenticate Página 288 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

CARACTERES DE LA FLOR

Quilla: color de la mancha de melanina

	Clasificación		
	Amarillo verdoso	Marrón	Negro
Nota UPOV	1	2	3
Color			

Marrón

Negro

1 Considerando la estructura de la flor, una vez que se identificó el estandarte (pétalo más largo y este es la capa exterior) y si se remueve se localizará la quilla, esta estructura floral tiene una mancha de color, la cual es de melanina y puede variar en tonos, como se indica arriba. En las imágenes no se muestra el color amarillo verdoso, debido a que no se observaron con variedades que contengan ese carácter.

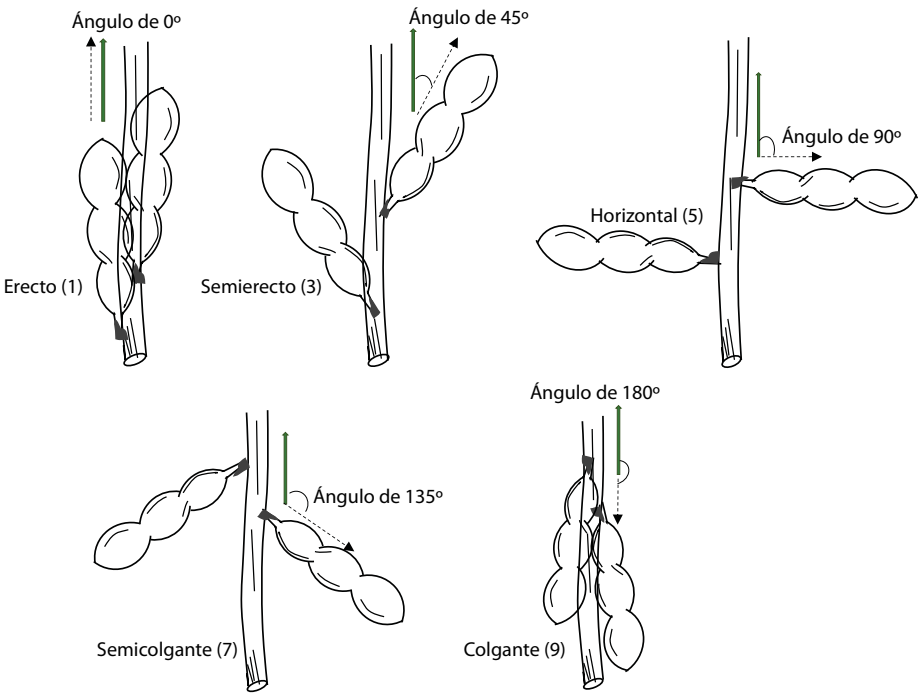
Para diferenciar con claridad se recomienda verificar el color a contraluz, lo que favorece la diferenciación de tonos de una manera más clara y evidente.

iThenticate Página 290 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

CARACTERES DE LA VAINA

Vaina: porte

	Clasificación				
	Erecto	Semierecto	Horizontal	Semicolgante	Colgante
Nota UPOV	1	3	5	7	9



1 El porte de la vaina representa el ángulo de inclinación en el que crece y se posiciona la vaina en función a un eje vertical, en este caso en relación con el tallo principal.

iThenticate Página 290 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

CARACTERES DE LA VAINA

Vaina: porte

Tipo	Individual	En planta
Erecto		
Semierecto		
Horizontal		
Semicolgante		
Colgante		

CARACTERES DE LA VAINA

Vaina: grado de curvatura en estado de vaina verde

	Clasificación			
	Ausencia o muy débil	Débil	Media	Fuerte
Nota UPOV	1	3	5	7
Forma				

Ausente o muy débil Débil Mediana Fuerte

iThenticate Página 293 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Discusión

En los últimos años el haba (*Vicia faba* L.) ha enfrentado muchos problemas, como la no disponibilidad de variedades mejoradas, la no adopción de una mejor tecnología de producción, daños causados por plagas de insectos y la inestabilidad del rendimiento debido a la interacción cultivar por ambiente (Gresta et al., 2010), siendo éstas las principales razones de su declive Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés, 2008) con un potencial de rendimiento bajo en sus variedades. La mejora genética sólo es posible si se caracteriza y se evalúa cuidadosamente las accesiones disponibles considerando sus parámetros genéticos orientados a incrementar su rendimiento (Giorgio, 2001). Este fondo genético único es la herramienta más importante para la mejora de los cultivos (Nadal, 2003; Terzopoulos et al., 2008).

Los antecedentes que existen sobre este tópico sugieren que sólo se dispone de formas cultivadas, pero sus ancestros silvestres no se han descubierto quizás porque se han extinguido; esto podría deberse a que las habas tienen un genoma complejo, muestran un porcentaje relativamente alto de polinización cruzada, así como problemas de estabilidad que dificultan significativamente su mejora genética en todo el mundo. La variabilidad morfológica de las especies se basa en gran medida en diferencias en los rasgos morfológicos, como la forma, el tamaño de la semilla, el color del hilo de la semilla, el color de la flor y el número de tallos por planta, que son importantes para la mejora genética (Metayer, 2004).

Por la limitada diversidad genética que existe en *V. faba*, resulta crucial centrarse en sus aspectos agromorfológicos. Este enfoque podría permitir la selección de genotipos realmente superiores. En el contexto anterior, los estudios que ayudan a la caracterización son: (a) seleccionar e identificar cultivares de alto rendimiento adecuados al propósito de su cultivo, (b) establecer una colección central para su futura conservación y utilización en todo el mundo, y (c) evaluar la variabilidad genética de las accesiones (Amjad et al., 2023).

iThenticate Página 293 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 294 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Conclusiones

En el mejoramiento genético es importante la caracterización agromorfológica para diferenciar fenóticamente diferentes accesiones, genotipos o cultivares, como una etapa previa también a su caracterización molecular, por lo que disponer de una guía técnica de descripción varietal gráfica es importante en la generación de una nueva variedad para que sea registrada ante el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS).

Referencias

Amjad, Z., y Salem S., A. (2023). Agro-Morphological Characterization of Vicia faba L. Accessions in the Kingdom of Saudi Arabia. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering, 17*(11), 105-114.

Carrillo, P. E., Vidal, A., y Kreplak J. (2020). Development of new genetic resources for faba bean (Vicia faba L.) breeding through the discovery of gene-based SNP markers and the construction of a high-density consensus map. *Scientific Reports, 10*(6790), 1-14.

Cordeiro, G. M., Pan, Y. B., y Henry, R. J. (2003). Sugarcane microsatellites for the assessment of genetic diversity in sugarcane germplasm. *Plant Science, 165*(1), 181-189.

Cubero, J. I. (1984). Taxonomy, distribution, and evolution of the faba bean and its wild relatives. En *Advances in Agricultural Biotechnology. Genetics resources and their exploitation-chikpeas. Faba bean and lentils-Martinus-Nijhoff/Junk* (pp. 131-144). Publishers for ICARDA and IBPGR.

De Giorgio, D., y Polignano, G. (2001). Evaluating the biodiversity of almond cultivars from a germplasm collection field in Southern Italy. *Sustaining the Global Farm, 56*, 305-311.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2008). *FAOSTAT*. www.fao.org/ag/statist.asp

Gresta, F., Avola, G., Albertini, E., Raggi, L., y Abbate, V. (2010). A study of variability in the Sicilian faba bean landrace 'Larga di Leonforte'. *Genetic Resources and Crop Evolution, 57*(4), 523-531.

Jordán, A. B., Díaz, R. R., Ocampo, F. I., Jacinto, H. C., Salvador, E. E. A. A., y Pérez, R. E. (2019). Características relacionadas con el consumo de haba consideradas por las amas de casa de la región productora de Puebla y Tlaxcala, México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, 29*(54), 6.

iThenticate Página 294 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 295 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Metayer, N. (2004). *Vicia faba breeding for sustainable agriculture in Europe-identification of regional priorities and definition of target genotypes* (p. 5). GIE Févérole.

Nadal, S., Suso, M., y Moreno, M. (2003). Management of Vicia faba genetic resources: changes associated to the selfing process in the major, equina and minor groups. *Genetic Resources and Crop Evolution, 50*(2), 183-192.

Pearce, S. R., Harrison, G.; Li, D., Heslop-Harrison, J. S., Kumar, A., y Flavell, A. (2000). The Ty1-copia group retrotransposon in Vicia species: copy number, sequence heterogeneity and chromosome localization. *Molecular Genetics and Genomics, 250*(3), 305-315.

Sharan, S., Zanghelini, G., y Zotzeletal, J. (2021). Genetic Variability of Tunisian Faba Beans (Vicia faba L.) Based on Seeds' Morphophysical Properties as Assessed by Statistical Analysis, *Journal of Food Quality,* 2021(9493607), 1-10.

Sharan, S., Zanghelini, G., y Zotzel, J. (2021). Favabean (Vicia faba L.) for food applications: from seed to ingredient processing and its effect on functional properties, antinutritional factors, flavor, and color. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 20*(1), 401-428.

Terzopoulos, P. y Bebeli, P. (2008). Genetic diversity analysis of Mediterranean faba bean (Vicia faba L) with ISSR markers. *Field Crops Research, 108*(1), 39-44.

Unión para la Protección de la Obtenciones Vegetales. (2007). *Directrices para la ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad de haba* (Vicia faba L.). https://www.upov.int/edocs/tgdocs/es/tg206.pdf

iThenticate Página 295 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Sección III

ESTADÍSTICA APLICADA A LA AGRICULTURA

iThenticate Página 298 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895
comunicacion-cientifica.com

17. Modelos estadísticos y cálculo de suma de cuadrados con dos metodologías en experimentos monofactoriales balanceados, sin y con submuestreo

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.017

Andrés González Huerta*§
Delfina de Jesús Pérez López**
Jesús Hernández Ávila***
J. Ramón Pascual Franco Martínez****
Martín Rubí Arriaga*****
Artemio Balbuena Melgarejo******

Resumen

Estudiantes, profesores, investigadores, divulgadores en ciencia y tecnología, así como extensionistas, entre otros usuarios, frecuentemente enfrentan el dilema de elegir un modelo estadístico para generar un análisis de varianza y una comparación de medias de tratamientos en un ensayo y, en consecuencia, para aplicar un paquete estadístico. En este estudio se homologan los correspondientes a los diseños experimentales balanceados completamente al azar, bloques completos al azar y cuadro latino, empleando dos metodologías para calcular sumas de cuadrados, sin y con submuestreo dentro de las unidades experimentales. Las fórmulas que se presentan en este estudio fueron construidas utilizando un método abreviado que ha sido

§ Autor para correspondencia: agonzalezh@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597
** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1621-5690
*** Doctor en Gobierno y Administración Pública. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4544-9250
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2139-6203
***** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017
****** Maestro en Fitomejoramiento por la Universidad Autónoma del Estado de México.

iThenticate Página 298 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 299 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

presentado y analizado en otras publicaciones por el autor para correspondencia, de tal forma que es más fácil definir las formas cuadráticas o matriciales a partir de la metodología de mínimos cuadrados. Las formas cuadráticas o matriciales también son de gran utilidad para generar análisis bivariados como correlación y regresión lineal simple y múltiple o análisis multivariados, entre otros. Para mostrar dichos procedimientos se utilizan datos del rendimiento de grano por planta registrados en cuatro cultivares de maíz sembrados en 2010 y aleatorizados en el área experimental en un diseño en cuadro latino. Con relación a las formas cuadráticas o matriciales podría utilizarse una calculadora de matrices que se encuentra disponible gratuitamente en la internet.

Palabras clave: *diseños completamente al azar, bloques completos al azar y cuadro latino, formas cuadráticas o matriciales.*

Introducción

El cálculo de sumas de cuadrados (SC) en un análisis de varianza (Anava) es importante como un prerrequisito para la obtención de los cuadrados medios, que es una extensión de la clásica fórmula de la varianza cuando se consideran más factores de clasificación en los modelos estadísticos (González et al., 2008; González et al., 2010); éstos son utilizados para realizar pruebas de hipótesis con una distribución de F, sin o con la aplicación de software, como InfoStat e InfoGen (Balzarini et al., 2008; Rienzo et al., 2008; Balzarini et al., 2016). La relación entre los modelos estadísticos y las esperanzas matemáticas de los cuadrados medios es muy estrecha y éstos contribuyen a la estimación de los efectos o varianzas que son estimables cuando se usan variantes fijas, aleatorias o mixtas. Los cuadrados medios son varianzas promedio en las diferentes fuentes de variación que son de interés para los usuarios en una Anava (Sahagún, 1991; Freund y Wilson, 1993, Sahagún, 1998; Restrepo 2007a y 2007b).

La variabilidad total relacionada con cualquier característica cuantitativa de interés para el usuario es dividida en cada uno de los componentes del modelo estadístico (Martínez, 1988; Sistema para Análisis Estadístico

iThenticate Página 299 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 300 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

[SAS, por sus siglas en inglés], 1988; Sahagún, 1991 y 1998). Los programas de mejoramiento genético, producción de semillas, generación, validación, aplicación y transferencia de tecnología a campos de productores, entre otras modalidades que se emplean en la agronomía, dependen de la precisión con la que se estimen dichos efectos o varianzas (González et al., 2019; Jasso et al., 2022; Pérez et al., 2022; González et al., 2023).

En el diseño y análisis de un experimento balanceado o de una serie de ensayos de este tipo, las SC también se pueden calcular utilizando formas cuadráticas o expresiones matriciales, sin y con submuestreo dentro de las unidades experimentales, como lo mostraron Gomez y Gomez (1984), Martínez (1988), Zamudio y Alvarado (1996), y González et al. (2023), entre otros. La precisión con la que se controle la variabilidad aleatoria presente dentro y entre las unidades experimentales que reciben el mismo o diferentes tratamientos es fundamental para disminuir los errores muestrales y experimentales (Martínez, 1988; Piepho et al., 2003; Hansen et al., 2006).

En experimentos monofactoriales balanceados con submuestreo, Zamudio y Alvarado (1996) desarrollaron la teoría matricial para la generación de un Anava para los tres diseños experimentales previamente mencionados, así como una serie de códigos para analizarlos con el Sistema para Análisis Estadístico (SAS); Gomez y Gomez (1984) y Freund y Wilson (1993) mostraron los procedimientos algebraicos para obtener un Anava en un diseño de bloques completos al azar; Martínez (1988) analizó los efectos entre tratamientos que son medibles con un diseño completamente al azar; Hansen et al. (2003) mostraron otro enfoque para el análisis estadístico de este tipo de experimentos y González et al. (2023) describieron la metodología de mínimos cuadrados para analizarlos, individualmente o en una sola corrida, cada uno o los tres diseños experimentales de referencia y, adicionalmente, presentaron las expresiones matriciales para obtener las *SC* en un diseño en cuadro Latino. Con datos de floración masculina registrada en maíz (*Zea mays* L.), ellos aplicaron InfoStat para validar los cálculos manuales, los cuales también se pueden generar con InfoGen y SAS, entre otros paquetes estadísticos.

En el contexto anterior, el objetivo principal del presente estudio fue homologar los modelos estadísticos correspondientes a los tres diseños experimentales con las metodologías de mínimos cuadrados y formas cuadrá-

iThenticate Página 300 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 301 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ticas o matriciales para calcular SC, sin y con submuestreo, como un prerrequisito para aplicar software y para extender los análisis al caso de experimentos factoriales con *n* variables cuantitativas registrando *s* observaciones dentro de cada unidad experimental, como lo han sugerido Sánchez (1988) y Zamudio y Alvarado (1996), entre otros investigadores, como etapa previa para la aplicación de metodologías multivariadas, como análisis de componentes principales y dendogramas o clúster.

Materiales y Métodos

Material genético

En este estudio fueron considerados los datos de la producción de grano (variable *x*, *g* planta^{-1}) que se muestran en la tabla 17.1, registrados en cuatro cultivares de maíz, en cuatro repeticiones por cultivar. Estos son parte de un ensayo conducido en 2010 en un terreno de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizado en El Cerrillo Piedras Blancas, Municipio de Toluca, Estado de México, México. Los materiales son: Cóndor (T1), Ixtlahuaca (T2), Cacahuacintle (T3), y Palomero Toluqueño (T4). González et al. (2023) usaron datos de este ensayo correspondientes a floración masculina, para mostrar una parte del procedimiento que es considerado en el presente estudio.

Diseños experimentales considerados

La asignación de los tratamientos a las unidades experimentales, en un ensayo monofactorial, se hizo considerando un diseño en cuadro Latino (*DCL*); el análisis de los datos se puede realizar con éste o con los diseños completamente al azar (*DCA*) y bloques completos al azar (*DBCA*), con y sin submuestreo dentro de las unidades experimentales. El objetivo principal en el año 2010 fue estimar la eficiencia de estos tres diseños experimentales, pero los datos no fueron publicados.

iThenticate Página 301 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 302 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 17.1. *Datos de rendimiento de grano por planta (g) registrados en cuatro variedades de maíz evaluadas en 2010 en El Cerrillo Piedras Blancas, Estado de México*

Hileras (i)	*Muestra (l)*	*Columnas (j)*				*Subtotal*
		1	*2*	*3*	*4*	
	1	140	210	86	160	
1	2	152 (3)	190 (1)	92 (4)	180 (2)	
	3	138	201	100	172	
Subtotal		430	601	278	512	1821
Media		143.33	200.33	92.66	170.66	606.98
	1	192	156	186	96	
2	2	200 (2)	162 (3)	203 (1)	104 (4)	
	3	189	149	210	100	
Subtotal		581	467	599	300	1947
Media		193.66	155.66	199.66	100	648.98
	1	83	170	160	203	
3	2	96 (4)	161 (2)	150 (3)	216 (1)	
	3	90	153	171	228	
Subtotal		269	484	481	647	1881
Media		89.66	161.33	160.33	215.66	626.98
	1	204	96	165	186	
4	2	230 (1)	81 (4)	179 (2)	171 (3)	
	3	216	109	153	160	
Subtotal		650	286	497	517	1950
Media		216.66	95.33	165.66	172.33	649.98
Total		1930	1838	1855	1976	7599
Media		643.31	612.65	618.31	658.65	2532.92

Nota: Los tratamientos se indican entre paréntesis: T1 = Cóndor = 832.31; T2 = Ixtlahuaca = 691.31; T3 = Cacahuacintle = 631.65; T4 = Palomero = 377.65.

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Tamaño de las unidades experimentales y de las submuestras

20

Cada unidad experimental (UE) constó de tres surcos de 6.0 m de longitud, con separación entre hileras de 0.80 m; el área de cada UE fue de 14.4 m^2, pero fueron eliminados 0.50 en ambos extremos de cada unidad experimental y sólo se utilizó el surco central para el registro de datos. Para faci-

iThenticate Página 302 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 303 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

litar los cálculos manuales se utilizará un tamaño muestral dentro de cada UE de sólo tres datos ($s = 3$).

Metodologías usadas

En este estudio son consideradas las técnicas de mínimos cuadrados y formas cuadráticas; para homologar ambas se presentan sus expresiones matriciales para cada uno de los tres diseños experimentales, sin y con submuestreo dentro de las unidades experimentales. La simbología es similar a la que presentaron González et al. (2023) cuando analizaron el número de días transcurridos desde la siembra hasta la dehiscencia de polen en variedades de maíz.

Simbología empleada

Cada una de las variables de clasificación que se muestran en los tres diseños experimentales, sin y con submuestreo, serán identificadas con los subíndices *i*, *j*, *k*, *l*; estos tendrán correspondencia directa con hileras (*H*), columnas (*C*), tratamientos (*T*) y submuestras (*S*), cuyos niveles serán *h*, *c*, *t* y *s*, respectivamente. La variable respuesta *X*, representará la producción de grano por planta, medida en gramos. Las formas cuadráticas o matriciales se expresarán de la misma manera como lo hicieron González et al. (2023); en estas *Y*' es la matriz transpuesta de *Y*, la cual contiene todos los datos o un subconjunto de ellos, dependiendo de la fuente de variación (*FV*) que sea calculada, capturados siempre en el mismo orden: 1 hasta *ht*; 1 hasta *h*; 1 hasta *c*; 1 hasta *t*; 1 hasta *s*. Además, *J* es una matriz de 1's (unos), cuyas dimensiones también dependen de si se aplica o no submuestreo; sin submuestreo, como $ht = 16$ datos (cuando se usan medias aritméticas por UE), sus dimensiones son 16 hileras y 16 columnas (16×16), pero con submuestreo, como $hts = 48$, ésta está conformada por 48 hileras y 48 columnas (48×48). Por ejemplo, para diferenciar la simbología anterior de la que se muestra en el resto del manuscrito, $Y'_{i\cdot}$ o $Y'_{\cdot k}$ serán las matrices transpuestas de $Y_{i\cdot}$ o $Y_{\cdot k}$, construidas con los totales de

iThenticate Página 303 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 304 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

hileras y tratamientos, respectivamente, siempre en el orden de H_1, H_2, H_3,…, H_h y T_1, T_2, T_3,…, T_t.

Software recomendable

Para verificar las sumas de cuadrados que serán presentados en la sección de Resultados podría utilizarse la versión 2016 del paquete estadístico InfoGen (http://www.info-gen.com.ar), liberado en su versión comercial y estudiantil por la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, a través de su Facultad de Ciencias Agropecuarias. Las salidas también se pueden obtener con InfoStat (https://www.Infostat.com.ar) y SAS (https://www.sas.com), entre otros softwares. Se sugiere consultar a González et al. (2023) para sugerencias acerca de cómo elaborar bases de datos y como generar un análisis de varianza y una comparación de medias de tratamientos aplicando la prueba de Tukey en los tres diseños experimentales de referencia, con y sin submuestreo dentro de las unidades experimentales, cuando se aplican estos tres paquetes estadísticos. En Zamudio y Alvarado (1996) se pueden consultar los códigos para SAS aplicando otros enfoques al mismo propósito.

Modelos estadísticos

La construcción de los modelos que a continuación se presentan se hizo con base en las guías descritas en Sahagún (1998), Piepho et al. (2003) y Restrepo (2007a, y 2007b), entre otros. La característica idéntica que comparten todos es que la interacción entre repeticiones y tratamientos determina el error experimental o el residual del modelo cuando no se aplica submuestreo. Con submuestreo, se define que el error conjunto está formado por el error muestral y el experimental. Adicionalmente, se asume que en un diseño en cuadro latino no existe interacción entre las hileras, las columnas y los tratamientos.

(a) Sin submuestreo
Para un *DCA*: $x_{ik} = \mu + \tau_k + \varepsilon_{ik}$

iThenticate Página 304 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 305 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Para un *DBCA*: $X_{ik} = \mu + H_i + \tau_k + \varepsilon_{ik}$
Para un *DCL*: $X_{ijk} = \mu + H_i + C_j + \tau_k + \varepsilon_{ijk}$

(b) Con submuestreo
Para un *DCA*: $X_{ikl} = \mu + \tau_k + \beta_{kl} + \varepsilon_{ikl}$
Para un *DBCA*: $X_{ikl} = \mu + H_i + \tau_k + \beta_{kl} + \varepsilon_{ikl}$
Para un *DCL*: $X_{ijkl} = \mu + H_i + C_j + \tau_k + \beta_{kl} + \varepsilon_{ijkl}$

Donde: X es la variable respuesta; μ es la media general; H_i es el efecto asociado a la i-ésima hilera; C_j es la contribución de la j-ésima columna; τ_k es el efecto originado por el k-ésimo tratamiento; β_{kl} es el error muestral; ε_{ikl} es el residual del modelo o error experimental.

En Zamudio y Alvarado (1996) se describen también los modelos anteriores, excepto para el *DCL*.

Resultados

Análisis sin muestreo

En éste solamente serán considerados los 16 datos que se muestran como medias aritméticas en la tabla 17.1. En un diseño en cuadro latino el número de hileras (h), columnas (c), y tratamientos (t) es igual. Así, $h = c = t$. Cuando se consideren los diseños de Bloques Completos al Azar y Completamente al Azar se asumirá que $h = r$, donde r es el número de repeticiones en cada tratamiento, pero también existe la opción de $c = r$. Así: en el denominador de las fórmulas que serán presentadas a continuación podría utilizarse indistintamente $ht = ct = rt = t^2$, o bien, $hts = cts = rts = t^2s$, para sin y con submuestreo.

DCA

$$\textbf{SC Total} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik})^2}{ht}$$

Donde:

iThenticate Página 305 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik}$ = 143.33 + 200.33 + 92.66 +, … ,+ 172.33 = 2532.92

SC Total = $(143.33^2 + 200.33^2 + 92.66^2 +, \dots, + 172.33^2) - \frac{(2532.92)^2}{4(4)}$

= 429436.1138 – 400980.2329 = 28455.881

SC Total = Y'Y – $\left(\frac{1}{ht}\right)$Y'JY

$$= [143.33\ 200.33\ 92.66\ \dots\ 172.33]\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\dots\\172.33\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{16}\right)[143.33\ 200.33\ 92.66\ \dots\ 172.33]$$

$$\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\dots\\172.33\end{bmatrix} = 429436.1138 - 400980.2331 = 28455.8807$$

SC T = $\frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k}^2}{h} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik})^2}{ht}$

= $\frac{(832.31^2+691.31^2+631.65^2+377.65^2)}{4} - \frac{(2532.92)^2}{4(4)}$ = 428062.6743 – 400980.2329 = 27082.44

SC T = $\left(\frac{1}{h}\right) Y'_{.k} Y_{.k} - \left(\frac{1}{ht}\right)$Y'JY

$$= \left(\frac{1}{4}\right)[832.31\ 691.31\ 631.65\ 377.65]\begin{bmatrix}832.31\\691.31\\631.65\\377.65\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{16}\right)[143.33\ 200.33\ 92.66\ \dots$$

$$172.33]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\dots\\172.33\end{bmatrix} = 428062.6743 - 400980.2329 = 27082.44$$

SC Error = SC Total – SC T = 28455.881 – 27082.44 = 1373.441

Para verificación:

SC Error = $\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik}^2 - \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k}^2}{h}$ = 429436.1138 − 428062.6743 = 1373.4395

SC Error = Y'Y - $\left(\frac{1}{h}\right) Y'_{.k} Y_{.k}$ = $[143.33\ 200.33\ 92.66\ \dots\ 172.33]\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\dots\\172.33\end{bmatrix}$ –

$$\left(\frac{1}{4}\right)[832.31\ 691.31\ 631.65\ 377.65]\begin{bmatrix}832.31\\691.31\\631.65\\377.65\end{bmatrix} = 429436.1138 - 428062.6743 = 1373.4395$$

DBCA

SC Total $= \sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik})^2}{ht}$

SC Total $= (143.33^2 + 200.33^2 + 92.66^2 +, \ldots, +172.33^2) - \frac{(2532.92)^2}{4(4)}$

$= 429436.1138 - 400980.2329 = 28455.881$

SC Total $= Y'Y - \left(\frac{1}{ht}\right)Y'JY$

$$= [143.33\ 200.33\ 92.66 \ldots 172.33]\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{16}\right)[143.33\ 200.33\ 92.66 \ldots$$

$$172.33]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} = 429436.1138 - 400980.2331 = 28455.8807$$

SC H $= \frac{\sum_{i=1}^{h} Y_{i.}^2}{t} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik})^2}{ht}$

$= \frac{(606.98^2+648.98^2+626.98^2+649.98^2)}{4} - \frac{(2532.92)^2}{4(4)} = 401294.4204 - 400980.2329 = 314.1875$

SC H $= \left(\frac{1}{t}\right)Y_{i.}'Y_{i.} - \left(\frac{1}{ht}\right)Y'JY$

$$= \left(\frac{1}{4}\right)[606.98\ 648.98\ 626.98\ 650.00]\begin{bmatrix}606.98\\648.98\\626.98\\650.00\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{16}\right)[143.33\ 200.33\ 92.66 \ldots$$

$$172.33]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} = 401294.4204 - 400980.2329 = 314.1875$$

SC T $= \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k}^2}{h} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik})^2}{ht} = \frac{(832.31^2+691.31^2+631.65^2+377.65^2)}{4} - \frac{(2532.92)^2}{4(4)}$

$= 428062.6743 - 400980.2329 = 27082.44$

iThenticate Página 308 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$\textbf{SC T} = \left(\frac{1}{h}\right) Y'_{.k} Y_{.k} - \left(\frac{1}{ht}\right) \text{Y'JY}$$

$$= \left(\frac{1}{4}\right) [832.33\ 691.33\ 631.66\ 377.66] \begin{bmatrix} 832.33 \\ 691.33 \\ 631.66 \\ 377.66 \end{bmatrix} - \left(\frac{1}{16}\right)[143.33\ 200.33\ 92.66\ \ldots$$

$$172.33] \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 143.33 \\ 200.33 \\ 92.66 \\ \ldots \\ 172.33 \end{bmatrix} = 428062.6743 - 400980.2329 = 27082.44$$

SC Error = SC Total – SC H – SC T = 28455.881 – 314.1875 – 27082.4414 = 1059.2521

Para verificación:

$$\textbf{SC Error} = \sum_{i=1}^{h} \sum_{k=1}^{t} Y_{ik}^2 - \frac{\sum_{i=1}^{h} Y_{i.}^2}{t} - \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k}^2}{h} + \frac{(\sum_{i=1}^{h} \sum_{k=1}^{t} Y_{ik})^2}{ht}$$

$$= 429436.1138 - 401294.4204 - 428062.6743 + 400980.2329 = 1059.252$$

$$\textbf{SC Error} = \text{Y'Y} - \left(\frac{1}{t}\right) Y'_{i.} Y_{i.} - \left(\frac{1}{h}\right) Y'_{.k} Y_{.k} + \left(\frac{1}{ht}\right) \text{Y'JY}$$

$$= 429436.1138 - 401294.4204 - 428062.6743 + 400980.2329 = 1059.252$$

DCL

En esta y en la modalidad de submuestreo, en el denominador de las fórmulas para calcular las *SC*, *h* o *c*, pero no ambos, será considerado nulo.

$$\textbf{SC Total} = \sum_{i=1}^{h} \sum_{j=1}^{c} \sum_{k=1}^{t} Y_{ijk}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{h} \sum_{j=1}^{c} \sum_{k=1}^{t} Y_{ijk})^2}{ht}$$

$$\textbf{SC Total} = (143.33^2 + 200.33^2 + 92.66^2 +, \ldots, +172.33^2) - \frac{(2532.92)^2}{4(4)}$$

$$= 429436.1138 - 400980.2329 = 28455.881$$

$$\textbf{SC Total} = \text{Y'Y-} \left(\frac{1}{ht}\right) \text{Y'JY}$$

$$= [143.33\ 200.33\ 92.66\ \ldots\ 172.33] \begin{bmatrix} 143.33 \\ 200.33 \\ 92.66 \\ \ldots \\ 172.33 \end{bmatrix} - \left(\frac{1}{16}\right)[143.33\ 200.33\ 92.66\ \ldots$$

iThenticate Página 308 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$172.33\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} = 429436.1138 - 400980.2331 = 28455.8807$$

$$\textbf{SC H} = \frac{\sum_{i=1}^{h} Y_{i..}^2}{t} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t} Y_{ijk})^2}{ht}$$

$$= \frac{(606.98^2+648.98^2+626.98^2+649.98^2)}{4} - \frac{(2532.92)^2}{4(4)} = 401294.4204 - 400980.2329 = 314.1875$$

$$\textbf{SC H} = \left(\frac{1}{t}\right) Y'_{i..}Y_{i..} - \left(\frac{1}{ht}\right)\text{Y'JY}$$

$$= \left(\frac{1}{4}\right)[606.98\ 648.98\ 626.98\ 650.00]\begin{bmatrix}606.98\\648.98\\626.98\\650.00\end{bmatrix} - (\tfrac{1}{16})[143.33\ 200.33\ 92.66\ \ldots$$

$$172.33\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} = 401294.4204 - 400980.2329 = 314.1875$$

$$\textbf{SC C} = \frac{\sum_{j=1}^{c} Y_{.j.}^2}{t} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t} Y_{ijk})^2}{ht}$$

$$\frac{(643.31^2+612.65^2+618.31^2+658.65^2)}{4} - \frac{(2532.92)^2}{4(4)} = 401328.7143 - 400980.2329 = 348.4814$$

$$\textbf{SC C} = \left(\frac{1}{t}\right) Y'_{.j.}Y_{.j.} - \left(\frac{1}{ht}\right)\text{Y'JY}$$

$$= \left(\frac{1}{4}\right)[643.31\ 612.65\ 618.31\ 658.65]\begin{bmatrix}643.31\\612.65\\618.31\\658.65\end{bmatrix} - (\tfrac{1}{16})[143.33\ 200.33\ 92.66\ \ldots$$

$$172.33\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} = 401328.7143 - 400980.2329 = 348.4814$$

$$\textbf{SC T} = \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{..k}^2}{h} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t} Y_{ijk})^2}{ht}$$

$$= \frac{(832.31^2+691.31^2+631.65^2+377.65^2)}{4} - \frac{(2532.92)^2}{4(4)} = 428062.6743 - 400980.2329 = 27082.44$$

$$\textbf{SC T} = \left(\frac{1}{h}\right) Y'_{..k}Y_{..k} - \left(\frac{1}{ht}\right)\text{Y'JY}$$

$$= \left(\frac{1}{4}\right)[832.31\ 691.31\ 631.65\ 377.65]\begin{bmatrix}832.31\\691.31\\631.65\\377.65\end{bmatrix} - (\tfrac{1}{16})[143.33\ 200.33\ 92.66\ \ldots$$

$$172.33\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}143.33\\200.33\\92.66\\\ldots\\172.33\end{bmatrix} = 428062.6743 - 400980.2329 = 27082.44$$

iThenticate Página 310 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

SC Error = SC Total – SC H – SC C – SC T = 28455.881-314.1875 – 348.4814 – 27082.4414 = 710.7706

Para verificación:

$$\textbf{SC Error} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t} Y_{ijk}^2 - \frac{\sum_{i=1}^{h} Y_{i..}^2}{t} - \frac{\sum_{j=1}^{c} Y_{.j.}^2}{t} - \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{..k}^2}{h} + 2\,FC$$

= 429436.1138 – 401294.4204 – 401328.7143 – 428062.6743 + 2(400980.2329) = 710.7706

Para verificación:

$$\textbf{SC Error} = Y'Y - \left(\frac{1}{t}\right) Y_{i..}'Y_{i..} - \left(\frac{1}{t}\right) Y_{.j.}'Y_{.j.} - \left(\frac{1}{h}\right) Y_{..k}'Y_{..k} + \left(\frac{2}{ht}\right) Y'JY$$

= 429436.1138 – 401294.4204 - 401328.7143 – 428062.6743 + 2(400980.2329) = 710.7706

Análisis con submuestreo

DCA

Nota: la suma de los *hts* datos que son considerados en la tabla 17.1 es:

$$\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl} = \textbf{140 + 152 + 138 +,...,+ 160 = 7599}$$

$$\textbf{SC Total} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl})^2}{hts}$$

$$= (140^2 + 152^2 + 138^2 +, \ldots, + 160^2) - \frac{(140 + 152 + 138 +, \ldots, + 160)^2}{4(4)(3)} = 1291663$$

– 1203016.688 = 88646.3125

$$\textbf{SC Total} = Y'Y - \left(\frac{1}{hts}\right) Y'JY$$

$$= [140\ 152\ 138\ \ldots\ 160] \begin{bmatrix} 140 \\ 152 \\ 138 \\ \ldots \\ 160 \end{bmatrix} - \left(\frac{1}{48}\right)[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160] \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 140 \\ 152 \\ 138 \\ \ldots \\ 160 \end{bmatrix}$$

= 1291663 – 1203016.668 = 88646.3125

$$\textbf{SC T} = \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k.}^2}{hs} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl})^2}{hts} = \frac{(2497^2+2074^2+1895^2+1133^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)} = 1284266.533$$

– 1203016.688 = 81249.895

$$\textbf{SC T} = \left(\frac{1}{hs}\right) Y_{.k.}'Y_{.k.} - \left(\frac{1}{hts}\right) Y'JY$$

iThenticate Página 310 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 311 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$= [140\ 152\ 138\ \dots\ 160]\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\dots\\160\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{48}\right)[140\ 152\ 138\ \dots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\dots\\160\end{bmatrix}$$

$$= 1291663 - 1203016.668 = 88646.3125$$

$$\textbf{SC T} = \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k}^2}{hs} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl})^2}{hts} = \frac{(2497^2+2074^2+1895^2+1133^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)} = 1284266.533$$

$$- 1203016.688 = 81249.895$$

$$\textbf{SC T} = \left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{.k.} Y_{.k.} - \left(\frac{1}{hts}\right) \text{Y'JY}$$

$$= \left(\frac{1}{4(3)}\right)[2497\ 2074\ 1895\ 1133]\begin{bmatrix}2497\\2074\\1895\\1133\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{48}\right)[140\ 152\ 138\ \dots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\dots\\160\end{bmatrix}$$

$$= 1284266.583 - 1203016.688 = 81249.895$$

$$\textbf{SC Error Conjunto (EC)} = \text{SC Total} - \text{SC T} = 88646.3125 - 81249.895 = 7396.4171$$

$$\textbf{SC EC} = \text{Y'Y} - \left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{.k.} Y_{.k.}$$

$$= [140\ 152\ 138\ \dots\ 160]\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\dots\\160\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{4(3)}\right)[2497\ 2074\ 1895\ 1133]\begin{bmatrix}2497\\2074\\1895\\1133\end{bmatrix} = 1291663$$

$$- 1284266.583 = 7396.417$$

González et al. (2023) definieron la *SC EC* como:

$$SC\,EC = SC\,EM + SC\,EE$$

Donde: *SC EM* es la suma de cuadrados del error muestral y *SC EE* es la suma de cuadrados del error experimental. Adicionalmente, para calcular la *SC EM* debe elaborarse la tabla 17.2.

Tabla 17.2. *Valores para calcular SC EM o SC H*T*

Hileras (i)	*Tratamientos (k)*				*Suma*
	T1	*T2*	*T3*	*T4*	
1	601	512	430	278	1 821
2	599	581	467	300	1 947
3	647	484	481	269	1 881
4	650	497	517	286	1 950
Suma	2 497	2 074	1 895	1 133	7 599

Fuente: elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

iThenticate Página 311 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 312 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$\textbf{SC EM} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl}^2 - \frac{\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t} Y_{ik.}^2}{s}$$

$$= (140^2 + 152^2 + 138^2 +, \ldots, +160^2) - \frac{(601^2+512^2+430^2 +,\ldots,+286^2)}{3}$$

$$= 1291663\text{-}1288387 = 3276$$

$$\textbf{SC EM} = \text{Y'Y} - \left(\frac{1}{s}\right) Y'_{ik.} Y_{ik.} = [140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\ldots\\160\end{bmatrix}$$

$$- \left(\frac{1}{3}\right)[601\ 512\ 430\ \ldots\ 286]\begin{bmatrix}601\\512\\430\\\ldots\\286\end{bmatrix} = 1291663 - 1288387 = 3276$$

Así: **SC EE** = SC EC – SC EM = 7396.4171 – 3276.0 = 4120.417

$$\textbf{SC EE} = \left(\frac{1}{s}\right) Y'_{ik.} Y_{ik.} - \left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{.k.} Y_{.k.} = 1288387 - 1284266.583 = 4120.417$$

DBCA

Para homologar la simbología en este diseño, repeticiones (r) será equivalente a hileras (h).

$$\textbf{SC Total} = \sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl})^2}{hts}$$

$$= (140^2 + 152^2 + 138^2 +, \ldots, +160^2) - \frac{(140+152+138+,\ldots,160)^2}{4(4)(3)} = 1291663 - 1203016.688$$

$$= 88646.3125$$

$$\textbf{SC Total} = \text{Y'Y} - \left(\frac{1}{hts}\right)\text{Y'JY}$$

$$= [140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\ldots\\160\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{48}\right)[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\\ldots\\160\end{bmatrix} = 1291663$$

$$- 1203016.668 = 88646.3125$$

$$\textbf{SC H} = \frac{\sum_{i=1}^{h} Y_{i..}^2}{ts} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl})^2}{hts}$$

$$= \frac{(1821^2+1947^2+1881^2+1950^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)} = 1203959.25 - 1203016.688 = 942.562$$

$$\textbf{SC H} = \left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{i..} Y_{i..} - \left(\frac{1}{hts}\right)\text{Y'JY}$$

iThenticate Página 312 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 313 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$= \left(\frac{1}{4(3)}\right)[1821\ 1947\ 1881\ 1950]\begin{bmatrix}1821\\1947\\1881\\1950\end{bmatrix} - (\tfrac{1}{48})[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix}$$

$= 1203959.25 - 1203016.688 = 942.562$

SC T $= \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{.k}^2}{hs} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ikl})^2}{hts}$

$= \frac{(2497^2+2074^2+1895^2+1133^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)} = 1284266.533 - 1203016.688 = 81249.895$

SC T $= \left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{.k.} Y_{.k.} - \left(\frac{1}{hts}\right)$Y'JY

$$= \left(\frac{1}{4(3)}\right)[2497\ 2074\ 1895\ 1133]\begin{bmatrix}2497\\2074\\1895\\1133\end{bmatrix} - (\tfrac{1}{48})[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix}$$

$= 1284266.583 - 1203016.688 = 81249.895$

SC EC = SC Total – SC H – SC T = 88646.3125 – 942.562 – 81249.895 = 6453.855

$$\textbf{SC EC} = \text{Y'Y} - \left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{i..} Y_{i..} - \left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{.k.} Y_{.k.} + (\tfrac{1}{hts}) Y'JY = [140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix}$$

$$- \left(\frac{1}{4(3)}\right)[1821\ 1947\ 1881\ 1950]\begin{bmatrix}1821\\1947\\1881\\1950\end{bmatrix} - \left(\frac{1}{4(3)}\right)[2497\ 2074\ 1895\ 1133]\begin{bmatrix}2497\\2074\\1895\\1133\end{bmatrix}$$

$$+ (\tfrac{1}{48})[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix} = 1291663 - 1203959.25 - 1284266.583$$

$+ 1203016.688 = 6453.855$

Al considerar el *DCA* se calculó: $SC\ EM = 3\,276.0$

Por lo tanto: $SC\ EE = SC\ EC - SC\ EM = 6453.855 - 3276.0 = 3177.855$

SC EE $= \left(\frac{1}{s}\right) Y'_{ik.} Y_{ik.} - \left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{i..} Y_{i..} - \left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{.k.} Y_{.k.} + (\tfrac{1}{hts}) Y'JY$

$= 1288387 - 1203959.25 - 1284266.583 + 1203016.688 = 3177.855$

DCL

SC Total $= \sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ijkl}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ijkl})^2}{hts}$

iThenticate Página 313 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 314 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

$$160\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix}$$

= 1291663 – 1203016.688 = 88646.3125

SC H $= \frac{\sum_{i=1}^{h} Y_{i...}^2}{ts} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ijkl})^2}{hts}$

$= \frac{(1821^2+1947^2+1881^2+1950^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)}$ = 1203959.25 – 1203016.688 = 942.562

SC H $= \left(\frac{1}{ts}\right) Y_{i..}' Y_{i..} - \left(\frac{1}{hts}\right)$Y'JY

$= \left(\frac{1}{4(3)}\right)[1821\ 1947\ 1881\ 1950]\begin{bmatrix}1821\\1947\\1881\\1950\end{bmatrix} - (\frac{1}{48})[140\ \ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix} =$

1203959.25 - 1203016.688 = 942.562

SC C $= \frac{\sum_{j=1}^{c} Y_{.j.}^2}{ts} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ijkl})^2}{hts}$

$\frac{(1930^2+1838^2+1855^2+1976^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)}$ = 1204062.083-1203016.688 = 1045.395

SC C $= \left(\frac{1}{ts}\right) Y_{.j.}' Y_{.j.} - \left(\frac{1}{hts}\right)$Y'JY

$= \left(\frac{1}{4(3)}\right)[1930\ 1838\ 1855\ 1976]\begin{bmatrix}1930\\1838\\1855\\1976\end{bmatrix} - (\frac{1}{48})[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix}$

= 1204062.083-1203016.688 = 1045.395

SC T $= \frac{\sum_{k=1}^{t} Y_{..k.}^2}{hs} - \frac{(\sum_{i=1}^{h}\sum_{j=1}^{c}\sum_{k=1}^{t}\sum_{l=1}^{s} Y_{ijkl})^2}{hts}$

$= \frac{(2497^2+2074^2+1895^2+1133^2)}{4(3)} - \frac{(7599)^2}{4(4)(3)}$ = 1284266.533 – 1203016.688 = 81249.895

SC T $= \left(\frac{1}{hs}\right) Y_{..k.}' Y_{..k.} - \left(\frac{1}{hts}\right)$Y'JY

$= \left(\frac{1}{4(3)}\right)[2497\ 2074\ 1895\ 1133]\begin{bmatrix}2497\\2074\\1895\\1133\end{bmatrix} - (\frac{1}{48})[140\ 152\ 138\ \ldots\ 160]$

$\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}140\\152\\138\\ \ldots\\160\end{bmatrix}$

= 1284266.583 – 1203016.688 = 81249.895

SC EC = SC Total – SC H – SC C – SC T = 88646.3125 – 942.562 – 1045.395 – 81249.895 = 5408.4605

iThenticate Página 314 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 315 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

SC EC = Y'Y – $\left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{i...}Y_{i...}$ – $\left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{j..}Y_{j..}$ – $\left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{..k.}Y_{..k.}$ + $\left(\frac{2}{hts)}\right) Y'JY$

= 1291663 - 1203959.25 – 1204062.083 – 1284266.583 + 2(1203016.688) = 5408.46

SC EE = SC EC – SC EM = 5408.4605 – 3276.0 = 2132.46

SC EE = $\left(\frac{1}{s}\right) Y'_{i.k.}Y_{i.k.}$ - $\left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{i...}Y_{i...}$ – $\left(\frac{1}{ts}\right) Y'_{j..}Y_{j..}$ – $\left(\frac{1}{hs}\right) Y'_{..k.}Y_{..k.}$ + $(\frac{2}{hts})Y'JY$

= 1288387 - 1203959.25 - 1204062.083 -1284266.583 + 2(1203016.688) = 2132.46

Referencias

Balzarini, M., G., González, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A., y Robledo, C. W. (2008). *Manual del Usuario de InfoStat*. Brujas.

Balzarini, M., G., Di Rienzo, J. A. (2016). *InfoGen*. FCA. http://www.info-Gen.com.ar

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2008). *InfoStat, versión 2008*. Grupo InfoStat/FCA.

Freund, R. J., y Wilson, W. J. (1993). *Statistical Methods (*pp. 440-452). Academic Press, Inc.

Gomez, K., A., y Gomez, A. A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research*. (2ª ed.). John Wiley & Sons.

González, H., A., Vázquez, G., L., Sahagún, C., J., y Rodríguez, P., J. E. (2008). Diversidad fenotípica de variedades e híbridos de maíz en el Valle Toluca-Atlacomulco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana, 31*(1), 67-76.

González, A., Pérez, D. J., Sahagún, J., Franco, O., Morales, E. J., Rubí, M., Gutiérrez, F., y Balbuena, A. (2010). Aplicación y comparación de métodos univariados para evaluar la estabilidad de maíces del Valle Toluca-Atlacomulco, México. *Revista Agronomía Costarricense, 34*(2), 129-143.

González, H. A., Pérez, L. D. J., Rubí, M., Gutiérrez, F., Franco, J. R. P., y Padilla, L., A. (2019). InfoStat, InfoGen y SAS para contrastes mutuamente ortogonales en experimentos en bloques completos al azar en parcelas subdivididas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10*(6), 1417-1431.

González, H., A., Pérez, L. D. J., Balbuena, M. A., Franco, M. J. R., Gutiérrez, R. F., Rodríguez, G. J. A. (2023). Submuestreo balanceado en experimentos monofactoriales usando InfoStat y InfoGen: validación con SAS. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14*(2), 235-249.

Hansen, M. J., Beard Jr., T. D., y Hayes, D. B. (2006). Sampling and Experimental Design. Chapter 3. In: Analysis and interpretation of freshwater fisheries data (2007). Christopher S. Guy y Michel L. Brown (Eds.), *American Fisheries Society*. https://doi.org/10.47866/9781888569773

Jasso, B. G., González, H. A., Pérez, L. D. J., Franco, M. J. R. P., Rubí, A. M., y Mejía, C. J. (2022). Uso de Opstat para validar resultados en un dialélico parcial con ocho líneas de maíz evaluadas en un ambiente. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13*(1), 41-52.

Martínez, G. A. (1988). *Diseños Experimentales. Métodos y Elementos de Teoría*. Trillas.

iThenticate Página 315 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 316 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Pérez, L. D., Jasso, B. G., Saavedra, G. C., Franco, M. J. R. P., Ramírez, D. J. F., y González, H. A. (2022). Uso de artificios en Opstat para analizar series de experimentos en dialélico parcial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13*(2), 273-287.

Piepho, H.P., Büchse, A., Emrich. K. (2003). A Hitchhiker's Guide to mixed models for randomized experiments. J. *Agronomy & Crop Science ,189,* 310-322.

Restrepo, L. F. (2007a). Diagramas de estructuras en el análisis de varianza. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 20*(2), 202-208.

Restrepo, B. L. F. (2007b). La esperanza del cuadrado medio. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 20*(2),193-201.

Sahagún, C. J. (1991). Utilidad del Análisis de Varianza en el estudio de la interacción entre genotipos y ambientes. *Xilonen, 1*(1), 21-32.

Sahagún, C. J. (1998). Construcción y análisis de los modelos fijos, aleatorios y mixtos. Departamento de Fitotecnia. Programa Nacional de Investigación en Olericultura. Universidad Autónoma Chapingo. *Boletín Técnico,* (3).

Sánchez, G. J. J. (1995). El Análisis Biplot en Clasificación. *Revista Fitotecnia Mexicana 18*(2), 188-203.

Statistical Analysis System (SAS). (1998). *SAS/STAT Users Guide. Release 6.03.* SAS Institute.

Zamudio, S. F. J., Alvarado, S. A. A. (1996). *Análisis de diseños experimentales con igual número de submuestras.* División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

iThenticate Página 316 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

18. Comportamiento espacial de las poblaciones de trips en el cultivo de aguacate en México utilizando el método del SADIE

Agustin David Acosta Guadarrama*
José Francisco Ramírez Dávila**§
Dulce Karen Figueroa Figueroa***
Martín Rubí Arriaga****
Andrés González Huerta*****

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.299.18

Resumen

México es el principal productor de aguacate en el mundo, este producto es de gran importancia ya que genera ingresos económicos importantes al país, sin embargo, el cultivo se ve afectado por diversas plagas que afectan su buen desarrollo. Una de las principales plagas que afectan el desarrollo y que causan pérdidas económicas considerables son los trips, estos se alimentan del fruto pequeño formando crestas o protuberancias que son más visibles conforme el fruto va creciendo y por lo tanto el fruto pierde valor económico. Para poder realizar un mejor manejo del trips dentro de las huertas de aguacate es importante conocer la distribución espacial del insecto dentro de la parcela. Este trabajo realizado en el año 2020, tuvo por objetivo determinar la distribución espacial de las poblaciones de trips en el cultivo de aguacate utilizando el método de Análisis Espacial por Índices

§ Autor para correspondencia: jframirezd@uaemex.mx
* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor de asignatura de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5301-077X
** Doctor en Fisiología y Biología Animal por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8625-4655
*** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1482-5295
**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7547-5017
***** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6055-7597

iThenticate Página 319 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de Distancia (SADIE, por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron que las poblaciones de trips se encontraron distribuidos en forma agregada en más de un centro de agregación, con la prueba de Cramer Von Mises y el índice I_m se encontró que existe estabilidad espacio temporal a corto plazo de las poblaciones de trips, además se obtuvieron mapas de infestación de la plaga utilizando el programa Surfer 9.

Palabras clave: *SADIE, trips, estabilidad espacial, mapas.*

Introducción

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es una de las frutas más importantes en México por el valor económico que aporta, la producción nacional se calcula en 1 889 353.51 t, lo cual hace que México sea el principal productor de aguacate en el mundo. La producción nacional de aguacate sigue mostrando una tendencia al alza en lo que se refiere a la superficie cultivada y volumen de producción, en dicha producción prevalece principalmente la variedad Hass. Los principales estados productores de aguacate en México son: Michoacán, Jalisco y el Estado de México (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2019).

El cultivo de aguacate se ve afectado por diversas plagas de afectan su buen desarrollo, entre las principales se encuentran barrenadores de rama y semilla, ácaros y trips, estos últimos han tomado gran importancia ya que estos insectos se alimentan del fruto pequeño y forman crestas o protuberancias sobre el pericarpio y estas son más visibles cuando el fruto madura (Fisher y Davenport, 1989; González et al., 2000). Las densidades de este insecto van en incremento y el control químico ha sido poco eficiente ya que el insecto ha generado resistencia a ciertos productos, esto debido al mal manejo de la plaga y a que se realizan aplicaciones generalizadas dentro de las huertas de aguacate.

El monitoreo de las poblaciones de trips dentro del cultivo de aguacate es un procedimiento muy importante en el manejo de este problema, ya que con ello se puede tener un panorama de cómo se encuentra distribuido dentro de las parcelas de estudio. Para poder utilizar adecuadamente la

iThenticate Página 319 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 320 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

información derivada del monitoreo, es necesario establecer puntos de muestreo que generen datos fehacientes, con los cuales se podrá visualizar el comportamiento espacial de los trips.

Uno de los métodos más utilizados dentro de la geoestadística es el SADIE, desarrollada por el doctor Joe N. Perry. Esta metodología incorpora un modelo biológico para la dispersión de individuos de un origen, en el que a cada individuo se le asigna un territorio dinámico.

Materiales y métodos

Para la realización de este estudio se establecieron dos parcelas comerciales de aguacate de la variedad Hass, en el Municipio de Coatepec Harinas. Cada parcela tuvo una superficie de 4 ha que, divididas en cuadrantes de 20 × 20 m, se obtuvo un total de 100 cuadrantes por parcela. Utilizando el método de muestreo por cuadrantes, se seleccionaron 40 cuadrantes al azar y por cada uno se tomaron en cuenta tres árboles para un total de 120 árboles por parcela. En cada parcela se realizaron muestreos quincenales en los cuales se contaban el número de trips capturados en las trampas amarillas. Cada árbol muestreado fue etiquetado y georeferenciado para obtener sus coordenadas.

Las trampas amarillas consisten en vasos de plástico del número 8, marca Jaguar de 10 cm de alto, 4.5 cm de diámetro en la base y 7.5 cm de diámetro en el borde superior y de color amarillo; de acuerdo con lo sugerido por González et al. (1998) a cada vaso se le puso un gancho en la base y un adherente (manteca vegetal) en la superficie externa. Se colocaron 4 trampas en los árboles en cada punto cardinal, las cuales eran revisadas cada 15 días para hacer el conteo de trips capturados y después se volvían a colocar.

Estadística espacial

Análisis Espacial por Índices de Distancia (SADIE)

Perry y Hewitt (1991) desarrollaron un índice que utilizaba los datos colectados dentro de una cuadrícula ya preestablecida antes del muestreo, deter-

iThenticate Página 320 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 321 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

minando que era un índice biológicamente más descriptivo e informativo de la distribución espacial de las poblaciones de insectos que el índice de dispersión, el cual depende directamente de la abundancia de la población. En el presente trabajo se utilizaron el índice basado en la distancia para la regularidad I_a y el índice J_a, basado en la distancia del agrupamiento Perry (1995a y 1995b) para establecer el modelo de distribución de las poblaciones de trips en el cultivo de aguacate.

Estimación de los Índices I_a y J_a

Con los datos obtenidos en los muestreos realizado se calcularon los índices de agregación I_a y J_a, al conocer la posición bidimensional de cada unidad de muestreo y su conteo en cada muestreo se calcula la distancia en la cual los insectos pueden haberse movido de una unidad a otra. Se dice que una muestra es agregada si I_a es mayor a 1 (I_a>1), la muestra es aleatoria si I_a es igual a 1 (I_a=1), y la muestra es regular si I_a es menor a 1 (I_a<1), con un número total de 2 000 aleatorizaciones son suficientes para calcular los índices correspondientes.

El agrupamiento se representa con el término C, lo cual indica el valor mínimo de la distancia total de los individuos pueden moverse para agruparse en una unidad. Q_a es la probabilidad para el agrupamiento, C para los datos que comprenden un agrupamiento individual, un valor pequeño de C denotaría un patrón espacial agregado, contrario a esto, un valor alto indicaría un patrón espacial regular. La hipótesis nula de aleatoriedad puede ser rechazada si Q_a<0.025 (en favor de la alternativa de agregación) o si Q_a>0.975 (en favor de la alternativa de regularidad), por consiguiente, si la distancia media para el agrupamiento para muestras aleatorias se denota como F_a, entonces el índice de agregación J_a, se define como $J_a=F_a / C$. Como en el caso del índice I_a, valores de Ja>1 usualmente indican una muestra agregada, J_a=1 representan datos espacialmente aleatorios y J_a<1 muestras regulares. De esta manera, los valores del índice J_a sirven para corroborar los resultados obtenidos con el índice I_a. Además, este índice se utiliza para conocer entre patrones espaciales donde hay un único agrupamiento importante para el cual sus valores son significativamente mayores que la unidad, y en donde hay

iThenticate Página 321 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 322 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

dos o más agrupamientos para los cuales su valor no es significativamente diferente de la unidad o incluso menor que ella. Para determinar la significación con respecto a la unidad se utiliza su probabilidad respectiva (Q_a) (Perry, 1998). Los valores de I_a y Ja para conteos aleatorios no están correlacionados, por lo que se pueden utilizar también 2000 aleatorizaciones para obtener sus respectivos valores. En este trabajo para determinar los valores y las probabilidades de ambos índices fue el SADIE 1.22.

Elaboración de mapas

Con los datos obtenidos en campo se realiza una interpolación de valores utilizando la técnica del *krigeado* ordinario, utilizando el programa Surfer 9 (Surface Mapping System), el cual permite la estimación insesgada de valores asociados a puntos que no fueron muestreados, las estimaciones obtenidas fueron representadas en forma de mapas para cada fecha de muestreo, una vez obtenidos estos mapas se determina el porcentaje de infestación en cada una de las parcelas de estudio.

Estabilidad espacial y temporal

Para establecer la estabilidad espacio temporal se compararon los mapas elaborados previamente y utilizando el índice de asociación del SADIE (I_m) (Perry y Klukowsky, 1997) en el cual se considera que si $I_m>0$, es indicativo de que existe una asociación o una estabilidad espacio temporal entre los mapas. La determinación de la estabilidad espacio temporal se realiza mediante el programa SADIE 1.22.

Resultados y discusión

Parcela 1

Se puede observar en la tabla 18.1 que en el caso del índice I_a el valor se situó entre 1.42 y 1.77. En todos los casos el índice I_a fue significativamente superior

iThenticate Página 322 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 323 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

a 1, lo que indica una distribución espacial agregada de los trips dentro de la parcela. En cuanto al índice J_a el valor mínimo fue de 1.10 a 1.28 el más alto. En todos los casos de las fechas de muestreo el índice J_a fue superior a 1, pero un ningún caso de forma significativa; sin embargo, remarca la agregación detectada por el índice I_a, además el índice J_a indica la cantidad de centros de agregación presentes en cada muestreo, como estos valores no fueron significativamente diferentes a la unidad el resultado fue que las poblaciones de trips se distribuyeron en la parcela en más de un centro de agregación.

Tabla 18.1. *Valor de los índices I_a y J_a y sus respectivas probabilidades P_a y Q_a en poblaciones de trips en la parcela uno en el año 2020*

Mes	*Muestreos*	I_a	P_a	J_a	Q_a
Febrero	Muestreo 1	1.48	0.008s	1.12	0.129ns
	Muestreo 2	1.77	0.010s	1.15	0.276ns
Marzo	Muestreo 1	1.51	0.014s	1.28	0.205ns
	Muestreo 2	1.70	0.007s	1.21	0.341ns
Abril	Muestreo 1	1.49	0.010s	1.16	0.187ns
	Muestreo 2	1.56	0.012s	1.13	0.261ns
Mayo	Muestreo 1	1.64	0.009s	1.26	0.289ns
	Muestreo 2	1.70	0.015s	1.17	0.190ns
Junio	Muestreo 1	1.63	0.012s	1.24	0.184ns
	Muestreo 2	1.44	0.008s	1.10	0.322ns
Julio	Muestreo 1	1.48	0.011s	1.28	0.260ns
	Muestreo 2	1.76	0.017s	1.14	0.279ns
Agosto	Muestreo 1	1.55	0.012s	1.19	0.261ns
	Muestreo 2	1.42	0.010s	1.23	0.175ns
Septiembre	Muestreo 1	1.51	0.013s	1.20	0.203ns
	Muestreo 2	1.73	0.009s	1.12	0.125ns
Octubre	Muestreo 1	1.46	0.013s	1.15	0.329ns
	Muestreo 2	1.60	0.008s	1.13	0.233ns
Noviembre	Muestreo 1	1.69	0.011s	1.26	0.152ns
	Muestreo 2	1.72	0.010s	1.24	0.199ns
Diciembre	Muestreo 1	1.66	0.008s	1.15	0.255ns
	Muestreo 2	1.44	0.010s	1.27	0.152ns

Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

iThenticate Página 323 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 324 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Parcela 2

Se puede observar que en el caso del índice I_a el valor se situó entre 1.40 y 1.77. En todos los casos el índice I_a tuvo un valor superior a 1 (tabla 18.2) lo que sugiere una distribución en agregados de las poblaciones de trips. En el caso del índice J_a los valores se situaron entre 1.10 y 1.28, el valor de este índice fue superior a la unidad en todos los casos, pero no de manera significativa, aun así, reafirma que la plaga se distribuye en forma agregada, González et al (2024) encontró misma distribución en picudo del agave. Además, gracias a los valores del índice J_a se logró establecer que existen

Tabla 18.2. *Valor de los índices I_a y J_a y sus respectivas probabilidades P_a y Q_a en poblaciones de trips en la parcela dos para el año 2020*

Mes	*Muestreos*	I_a	P_a	J_a	Q_a
Febrero	Muestreo 1	1.51	0.011s	1.19	0.267ns
	Muestreo 2	1.72	0.008s	1.12	0.208ns
Marzo	Muestreo 1	1.40	0.010s	1.27	0.311ns
	Muestreo 2	1.77	0.012s	1.10	0.127ns
Abril	Muestreo 1	1.49	0.014s	1.17	0.190ns
	Muestreo 2	1.57	0.016s	1.25	0.288ns
Mayo	Muestreo 1	1.62	0.010s	1.22	0.209ns
	Muestreo 2	1.48	0.012s	1.13	0.119ns
Junio	Muestreo 1	1.75	0.007s	1.17	0.261ns
	Muestreo 2	1.56	0.009s	1.28	0.254ns
Julio	Muestreo 1	1.59	0.010s	1.11	0.322ns
	Muestreo 2	1.69	0.014s	1.16	0.277ns
Agosto	Muestreo 1	1.70	0.011s	1.23	0.128ns
	Muestreo 2	1.48	0.015s	1.20	0.193ns
Septiembre	Muestreo 1	1.67	0.006s	1.14	0.167ns
	Muestreo 2	1.60	0.015s	1.24	0.281ns
Octubre	Muestreo 1	1.54	0.010s	1.11	0.270ns
	Muestreo 2	1.69	0.013s	1.13	0.129ns
Noviembre	Muestreo 1	1.42	0.007s	1.19	0.168ns
	Muestreo 2	1.73	0.011s	1.28	0.195ns
Diciembre	Muestreo 1	1.50	0.014s	1.17	0.266ns
	Muestreo 2	1.59	0.010s	1.12	0.201ns

Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

iThenticate Página 324 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 325 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

varios centros de agregación, ya que en todos los muestreos el valor del índice J_a no fue significativamente superior a la unidad (tabla 18.2).

Se puede observar que en todos los casos el índice I_a fue significativamente superior a la unidad en las dos parcelas, lo que determina la presencia de una agregación en la población de trips en todos los muestreos. Este tipo de distribución ha sido detectada en trabajos como los realizados por Perry et al. (1998) sobre huevos de pulgones, el trabajo de Winder et al. (1999) realizado sobre las poblaciones de huevos de *S. avenae* y el de Fernández et al. (2000) en los huevos de *N. brevicollis*. Conocer la distribución espacial de los problemas fitosanitarios de los cultivos ayuda a elaborar planes de manejo integrado, lo que conlleva a ahorros económicos para los productores y la disminución del impacto que causan los agroquímicos en los ecosistemas (González-Dávila et al., 2024).

Con respecto al índice J_a se observó que para las dos parcelas no fue significativamente superior a la unidad lo que nos indicó que los trips se encuentran distribuidos en varios focos de agregación dentro de las dos parcelas estos resultados concuerdan con lo reportado Korie et al. (2000) quienes trabajaron con escarabajos en avena de invierno en el Reino Unido y Holland et al. (2000) quienes trabajaron con la distribución espacial de artrópodos benéficos en trigo de invierno. A este respecto, Blackshaw y Vernon (2008) determinaron la distribución espacial de *Agriotes lineatus* y *Agriotes obscurus*, en dos sitios distintos en Canadá, mediante la técnica del SADIE donde encontraron que ambas especies se distribuyen de manera agregada. Ramírez et al., (2010), realizaron un estudio de la distribución espacial de las larvas del mosquito verde (*Jacobiasca lybica*), donde los valores J_a, establecieron la cantidad de centros de agregación. En cuanto a este dato, el valor J_a no fue significativamente mayor a uno, lo que permitió determinar que la distribución espacial del insecto se concentró en diferentes centros de agregación así como Solares et al., (2011) demostró que las poblaciones de este insecto se encontraban distribuidas en varios centros de agregación.

iThenticate Página 325 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 326 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Cálculo de la superficie infestada con base en los mapas

Es importante conocer si la infestación de la plaga era general en las parcelas de estudio. Para ello es importante conocer qué zonas están infestadas y el porcentaje que representan en el conjunto total. Ello va a determinar la cantidad de ahorro económico y de aplicación de medidas de control. Con ese objetivo, se procedió a establecer el porcentaje de superficie infestada y no infestada en cada uno de los mapas elaborados para cada muestreo de trips.

Parcela 1

Los resultados de la superficie infestada para esta parcela se detallan en la tabla 18.3. Se observa el porcentaje de infestación en la parcela uno en lo

Tabla 18.3. *Porcentaje de superficie infestada y no infestada de la parcela uno para el año 2020*

Muestreos	*% infestado*	*% no infestado*
Febrero 1	100	0
Febrero 2	100	0
Marzo 1	100	0
Marzo 2	100	0
Abril 1	100	0
Abril 2	100	0
Mayo 1	100	0
Mayo 2	100	0
Junio 1	90	10
Junio 2	100	0
Julio 1	100	0
Julio 2	100	0
Agosto 1	100	0
Agosto 2	100	0
Septiembre 1	100	0
Septiembre 2	100	0
Octubre 1	100	0
Octubre 2	100	0
Noviembre 1	78	22
Noviembre 2	60	40
Diciembre 1	100	0
Diciembre 2	100	0

Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

iThenticate Página 326 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 327 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

que se refiere al año 2017, esta nos refleja que en la mayor parte de los meses tenemos infestación en casi toda la parcela, el mes con menor infestación es noviembre con 78% para el primer muestreo y 60% para el segundo muestreo.

Parcela 2

Se observar que en esta parcela la mayoría de los meses presentan infestación a 100%, sólo el mes de noviembre presenta una ligera reducción en los dos muestreos (tabla 18.4). Esto lo podemos corroborar con los mapas de densidad de trips donde se observa que la mayor parte de los meses la plaga se ubica en toda la parcela. Estos indicativos podrían confundirnos, no porque se presente infestación en toda la parcela se tendría un serio proble-

Tabla 18.4. *Porcentaje de superficie infestada y no infestada de la parcela dos para el año 2020*

Muestreos	*% infestado*	*% no infestado*
Febrero 1	100	0
Febrero 2	100	0
Marzo 1	100	0
Marzo 2	100	0
Abril 1	100	0
Abril 2	100	0
Mayo 1	100	0
Mayo 2	100	0
Junio 1	90	10
Junio 2	100	0
Julio 1	100	0
Julio 2	100	0
Agosto 1	100	0
Agosto 2	100	0
Septiembre 1	100	0
Septiembre 2	100	0
Octubre 1	100	0
Octubre 2	100	0
Noviembre 1	95	5
Noviembre 2	86	14
Diciembre 1	100	0
Diciembre 2	100	0

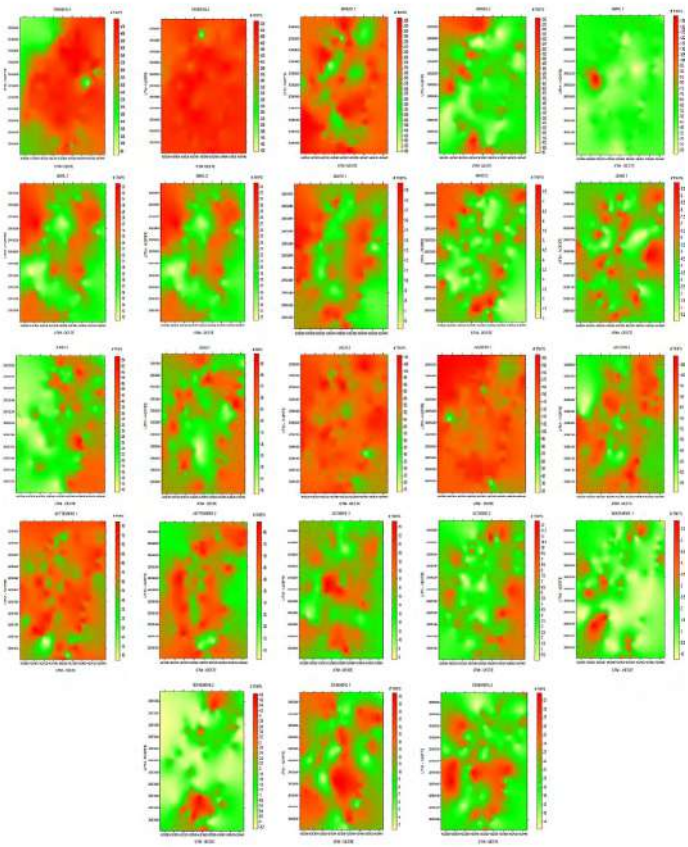
Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

iThenticate Página 327 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 328 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

ma, sino que tenemos que poner especial atención en las densidades poblacionales de la plaga ya que en ciertos meses tenemos poblaciones muy bajas, aunque si existe presencia.

Figura 18.1. *Mapas de la densidad poblacional de trips correspondiente a la parcela 1*



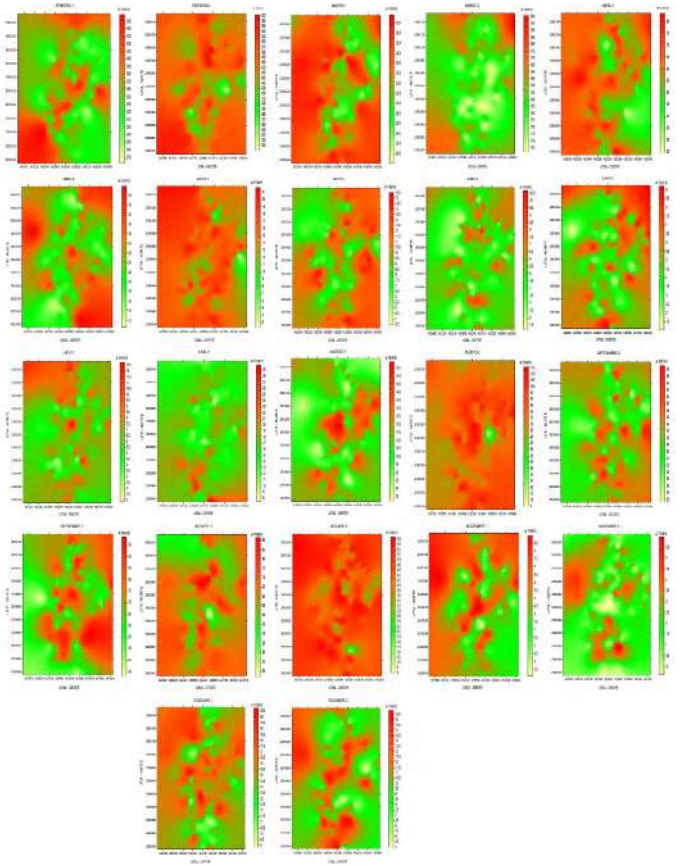
Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

Los mapas permitieron identificar las áreas de infestación, encontrando que el trips se distribuyó en 100% de la parcela, sin embargo, hay áreas en las que se encuentran poblaciones más altas, esto concuerda con Jiménez et al. (2008) quienes determinaron la distribución espacial y mapeo de Curculio elephas Gyllenhal en Quercus ilex Linneo, ellos elaboraron cuatro mapas de densidad, uno por cada año, utilizando el método de la distancia inversa como

iThenticate Página 328 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 329 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Figura 18.2. *Mapas de la densidad poblacional de trips correspondiente a la parcela dos*



Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

interpolador del programa Surfer 7; estos mapas indican que el insecto se localizó por toda la parcela con una distribución espacial agregada. Contrario a estos resultados Quiñones-Valdez et al. (2015) encontra ron que las poblaciones de trips en el cultivo del gladiolo no infestaron 100% de la parcela y estos se encontraban en forma agregada en puntos específicos de infestación, Esquivel y Jasso (2014) realizaron un estudio de distribución espacial y mapeo de gusano soldado en seis localidades en el estado de México en maíz y encontraron que en ninguna de las localidades se presentó un área de infestación de 100% y el porcentaje máximo alcanzado fue de 94%, Jiménez et al. (2013) reportaron que las poblaciones de *F. occidentalis* en tomate de cáscara no se

iThenticate Página 329 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 330 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

distribuyen en la totalidad de las parcelas. Ramírez et al. (2013) encontraron que los mapas de infestación de *B. cockerelli Sulc* sobre papa reflejaron una estructura agregada del insecto el cual no invadió 100% de la superficie de la parcela, permitiendo identificar áreas libres de infestación.

Estabilidad espacio temporal

La comparación entre fechas de muestreo de los diferentes mapas obtenidos en cada una de las parcelas nos da indicios de la dinámica espacio-temporal del insecto. Más concretamente, de la posibilidad de encontrar una estabilidad numérica en el espacio y el tiempo que puede abrir las puertas para la utilización de las técnicas de la agricultura de precisión en este insecto.

Parcela 1

En la tabla 18.5 se muestran los resultados de la comparación de los mapas de trips entre las fechas de muestreo, utilizando la prueba estadística bivariable de Cramér-von Mises. Otra comparación entre los diferentes mapas utilizada fue el índice I_m del SADIE; si los valores de este índice son mayores a 0, esto indica que no existe diferencia significativa entre los mapas comparados.

Se puede observar en la tabla 18.5 que los valores del índice I_m fueron mayores que 0 en todas las comparaciones, con estos resultados se determinó que es posible detectar una estabilidad espacio-temporal a corto plazo de las poblaciones de trips en los muestreos realizados. Dicha estabilidad obtenida en las comparaciones realizadas en los muestreos indica la fuerte asociación de los patrones espaciales que existió de un muestreo con otro, lo que sugiere que se careció de la formación de nuevos focos de infección de la plaga dentro de la parcela o fueron de menor importancia respecto a los puntos de infección ya establecidos.

iThenticate Página 330 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 331 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tabla 18.5. *Comparación de mapas (Krigeado) con la prueba bivariable de Cramér-von Mises (Ψ)para la parcela uno año 2020*

Mapas comparados	*ψ*	*Valor de p*	*Diferencia (5%)*	I_m
Febrero 1 vs Febrero 2	0.38	0.61	No significativo	2.61
Febrero 2 vs Marzo 1	0.47	0.63	No significativo	1.23
Marzo 1 vs. Marzo 2	0.84	0.45	No significativo	0.67
Marzo 2 vs. Abril 1	0.56	0.38	No significativo	1.74
Abril 1 vs. Abril 2	0.91	0.52	No significativo	0.89
Abril 2 vs. Mayo 1	0.72	0.49	No significativo	2.37
Mayo 1 vs. Mayo 2	0.61	0.54	No significativo	1.06
Mayo 2 vs. Junio 1	0.78	0.59	No significativo	2.27
Junio 1 vs. Junio 2	0.88	0.39	No significativo	0.58
Junio 2 vs. Julio 1	0.77	0.51	No significativo	1.46
Julio 1 vs. Julio 2	0.62	0.47	No significativo	2.33
Julio 2 vs. Agosto 1	0.48	0.60	No significativo	1.55
Agosto 1 vs. Agosto 2	0.59	0.44	No significativo	3.19
Agosto 2 vs. Septiembre 1	0.35	0.38	No significativo	0.74
Septiembre 1 vs. Septiembre 2	0.57	0.62	No significativo	2.81
Septiembre 2 vs Octubre 1	0.69	0.46	No significativo	1.37
Octubre 1 vs. Octubre 2	0.71	0.39	No significativo	0.63
Octubre 2 vs. Noviembre 1	0.82	0.42	No significativo	1.64
Noviembre 1 vs. Noviembre 2	0.85	0.43	No significativo	3.27
Noviembre 2 vs. Diciembre 1	0.76	0.54	No significativo	0.92
Diciembre 1 vs. Diciembre 2	0.43	0.58	No significativo	1.48

Nota: Valores de I_m>0 indican asociación espacial.

Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

Parcela 2

En la tabla 18.6 se muestran los resultados de la comparación de los mapas de trips entre las fechas de muestreo, utilizando la prueba estadística bivariable de Cramér-von Mises. Para llevar a cabo la comparación entre los diferentes mapas se utilizó el índice I_m del SADIE; si los valores de este índice son mayores que 0, esto indica que no existe diferencia significativa entre los mapas comparados, lo que nos indica que existe una estabilidad espacial.

En los resultados de la comparación de los mapas de trips entre fechas

iThenticate Página 331 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 332 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de muestreo (tabla 18.6), se halló que para todas las comparaciones el índice I_m se tuvieron valores mayores a 0, con esto se determinó que no hay una diferencia significativa, por lo tanto, es posible determinar que existe una estabilidad espacio-temporal de las poblaciones de trips en la parcela dos.

Los valores del I_m del SADIE fueron mayores que 0, indicando que existió diferencia significativa o asociación espacial entre los mapas comparados de trips, por lo que fue posible detectar una estabilidad espacio temporal a corto plazo de las poblaciones del insecto entre las fechas comparadas de cada una de las parcelas.

Tabla 18.6. *Comparación de mapas (Krigeado) con la prueba bivariable de Cramér-von Mises (Ψ).para la parcela dos en el año 2020*

Mapas comparados	*ψ*	*Valor de p*	*Diferencia (5%)*	I_m
Febrero 1 vs Febrero 2	0.44	0.86	No significativo	0.94
Febrero 2 vs Marzo 1	0.53	0.41	No significativo	1.28
Marzo 1 vs. Marzo 2	0.59	0.61	No significativo	3.50
Marzo 2 vs. Abril 1	0.76	0.49	No significativo	2.17
Abril 1 vs. Abril 2	0.68	0.58	No significativo	3.78
Abril 2 vs. Mayo 1	0.81	0.52	No significativo	2.44
Mayo 1 vs. Mayo 2	0.79	0.59	No significativo	3.36
Mayo 2 vs. Junio 1	0.52	0.44	No significativo	3.03
Junio 1 vs. Junio 2	0.73	0.45	No significativo	0.37
Junio 2 vs. Julio 1	0.61	0.39	No significativo	0.63
Julio 1 vs. Julio 2	0.47	0.62	No significativo	1.68
Julio 2 vs. Agosto 1	0.37	0.42	No significativo	0.48
Agosto 1 vs. Agosto 2	0.46	0.57	No significativo	2.87
Agosto 2 vs. Septiembre 1	0.71	0.54	No significativo	2.33
Septiembre 1 vs. Septiembre 2	0.57	0.48	No significativo	1.72
Septiembre 2 vs Octubre 1	0.80	0.53	No significativo	2.25
Octubre 1 vs. Octubre 2	0.63	0.60	No significativo	1.47
Octubre 2 vs. Noviembre 1	0.85	0.41	No significativo	2.99
Noviembre 1 vs. Noviembre 2	0.74	0.47	No significativo	2.64
Noviembre 2 vs. Diciembre 1	0.89	0.56	No significativo	1.90
Diciembre 1 vs. Diciembre 2	0.70	0.46	No significativo	0.72

Nota: Valores de I_m>0 indican asociación espacial.
Fuente: Elaboración propia con base en Acosta Guadarrama (2020).

iThenticate Página 332 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 333 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Los resultados con la prueba estadística bivariable de Cramér-von Mises, indican diferencia no significativa en la estabilidad espacial y temporal de corto plazo entre las fechas de muestreo para las dos parcelas, es decir, existió estabilidad espacial y temporal en las poblaciones de trips en las dos parcelas en cada muestreo analizado. Resultados similares fueron obtenidos por Ferguson et al. (2003) los cuales encontraron que las distribuciones de los adultos y larvas de *Ceutorhynchus assimilis* estaban asociados espacialmente, lo que indicó que existían una estabilidad espacio temporal. Ramírez y Porcayo (2008), encontraron valores de la prueba bivariable de Cramér-von Mises, tanto significativos como no significativos de la distribución espacial de huevecillos de *Jacobiasca lybica* en viñedos de regadío, lo cual indica que existe y no existe estabilidad espacio temporal en dicha distribución según la densidad de las poblaciones de la plaga. Solares et al. (2011) determinaron la estabilidad espacial de trips (*Insecta: Thysanoptera*), en dos huertas comerciales de aguacate en el estado de Michoacán, en sus 10 comparaciones hechas, por lo que pudo detectar una estabilidad espacio temporal a corto plazo del insecto entre las fechas comparadas.

Conclusiones

El método del SADIE demostró ser eficaz para establecer el comportamiento espacial de las poblaciones de trips en el cultivo de aguacate. Los análisis con SADIE presentaron un patrón espacial agregado con las poblaciones distribuidas en varios centros de agregación dentro de las parcelas de estudio.

Los índices I_a, J_a e I_m demostraron ser eficientes en la determinación de la estructura espacial de las poblaciones de trips en las huertas de aguacate.

Utilizando el krigeado se lograron establecer mapas de distribución espacial de los trips en el cultivo de aguacate en el municipio de Coatepec Harinas. Estado de México, lo que ayuda a establecer mejores métodos de control dirigidos.

Se logró detectar estabilidad espacial y temporal en las poblaciones de la plaga, lo que implica dar un mejor manejo al cultivo y determinar la zona de influencia de los trips.

iThenticate Página 333 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 334 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Referencias

Blackshaw, R. P., y Vernon R. S. (2007). Spatial relationships between two Agriotes click-beetle species and wireworms in agricultural fields. *Agricultural and Forest Entomology, 10*(11). https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2007.00351.x

Esquivel, H. V., y Jasso G. Y. (2014). Distribución espacial y mapeo de gusano soldado en seis localidades del Estado de México, en el año 2011. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5*(6), 923-935. https://doi.org/10.29312/remexca.v5i6.879

Ferguson, W., Klukowski, Z., Walczak, B., Perry, J., Mugglestone, M., Clark, S., y Williams, I. (2003). The spatio-temporal distribution of adult Ceutorhynvhus assimilis in a crop of winter oilseed rape in relation to the distribution of their larvae and that of the parasitoid Trichomalus perfectus. *Entomologia Experimentalis et Applicata, 95*, 161-171. https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2000.00654.x

Fernández, A., Griffiths. J., y Thomas, G. (2000). Density, Distribution and dispersal of the carabid beetle nebriabrevicollis in two adjacent cereal fields. *Annals of Applied Biology, 137,* 89-97. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00040.x

Fisher, J. B. (1989). Structure and development of surface deformations on avocado fruits. *HortScience, 24*(5), 841-844. http://www.avocadosource.com/Journals/HortScience/HortSci_1989_24_PG_841-844.pdf

González-Dávila, L., Lara-Vázquez, F., Ramírez-Dávila, J. F., y Figueroa-Figueroa, D. K. (2024). Spatial Analysis Of Brown Spider Mite *(Oligonychus punicae Hirst)* Damage In Avocado Using Spatial Analysis By Distance Indices (SADIE). *Agrociencia, 59*(7), 1-14. https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i6.3054

González, M., Ramírez, J. F., Acosta, A. D., y Figueroa, D. K. (2024). Distribución espacial de las poblaciones del picudo del agave Scyphophorus acupunctatus (Coleoptera: Dryophthoridae) en el Estado de México, México. *Revista Colombiana De Entomología, 50*(2). https://doi.org/10.25100/socolen.v50i2.13108

González, H., Sosa, C., González, M., y Valle de La Paz, A. (1998). Selección del color de trampas adhesivas para muestreo de trips en el cultivo de aguacate (Persea americana Mill.). En *Avances de investigación, 1997* (pp. 209-210). Instituto de Fitosanidad, Colegio de Postgraduados.

González, H. H., Johansen, R., Gasca, L., Equihua, A., Salinas, A., Estrada, E., Duran, F., y Valle, A. (2000). Plagas del aguacate. En D. Téliz (Cood.), *El Aguacate y su Manejo Integrado* (pp. 177-186). Ediciones Mundi Prensa.

Holland, M., Winder, L., y Perry, J. (2000). The impact of dimethoate on spatial distribution of beneficial arthropods in winter wheat. *Annals of Applied Biology, 136*, 93-105. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00013.x

Jiménez, A., López, M., González-Andújar J., Ocete, M., y Soria, F. (2008). Distribución espacial y mapeo de Curculio elephas Gyllenhal en encina (Quercus ilex L.). *Agrociencia, XII*(1), 35-43. https://doi.org/10.31285/AGRO.12.743

Jiménez, R. A., Ramírez, J. F., Sánchez, J. R., Salgado, S. M. L., y Laguna, A. (2013). Modelización espacial de Frankliniella occidentalis (Thysanoptera: Thripidae) en tomate

iThenticate Página 334 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 335 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de cáscara por medio de técnicas geoestadísticas. *Revista Colombiana de Entomología, 39*(2), 183-192. http://www.scielo.org.co/pdf/rcen/v39n2/v39n2a01.pdf

Korie, S., Perry, J. N., Mugglestone, M. A., Clark, S. J., Thomas, C. F. G., y Mohamad Roff, N. N. (2000). Spatiotemporal associations in beetle and virus count data. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics, 5*(2), 214-219. https://doi.org/10.2307/1400532

Perry, J. (1995a). Spatial aspects of animal and plant distribution in patchy farmland habitats. En D. M. Glen, M. A. Greaves, H. M. Anderson (Eds.), *Ecology and Integrated Farming Systems* (pp. 221-242). Chichester.

Perry, J. (1995b). Spatial Analysis by distance indices. *Journal of Animal Ecology, 64,* 303-314. https://doi.org/10.2307/5892

Perry, J. N. (1998). Measures of Spatial Pattern and Spatial Association for counts of insects. *Population and Community Ecology for Insect. Management and Conservation* (pp. 21-33). (Eds. B. y J. Baumgartner, P. Brandmayar y B. F. J. Manly).

Perry, J. N., y Hewitt, M. (1991). A new index of aggregation for animal counts. *Biometrics, 47,* 1505-1518. https://doi.org/10.2307/2532402

Perry, J., Bell, E., Smith, R., y Woiwod, I. (1996). SADIE. Software to measure and model spatial pat- tern. *Aspects of Applied Biology, 46,* 95-102.

Perry, N., y Klukowsky, Z. (1997). Spatial distributions of counts at the edges of sample areas. En *VI Conferencia de la sociedad de biometría. Córdoba, España* (pp. 103-108).

Quiñones, R., Sánchez, J., Pedraza, A., Castañeda, A., Gutierrez, A., y. Ramírez, J. F. (2015). Análisis espacial de Thrips spp. (Thysanoptera) en el cultivo de gladiolo en la región sureste del Estado de México. Southwestern. *Entomologist, 40,* 397-408. https://doi.org/10.3958/059.040.0213

Ramírez, J. F., Porcayo, E., y Sánchez, J. R. (2013). Modelización de la distribución espacial de Bactericera cockerelli Sulc. (Hemiptera: Triozidae) en Solanum tuberosum L. (Solanales: Solanaceae). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, 45*(2), 13-27. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837655026

Ramírez, J. F., y Porcayo, E. (2008). Distribución espacial de las ninfas de Jacobiasca lybica (Hemíptera: Cicadellidae) en un viñedo de Andalucía, España. *Revista Colombiana de Entomología, 34,* 169-175. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-04882008000200006

Ramírez, J. F., Porcayo, E., y. Mejía, O. (2010). Comportamiento espacial de larvas de Jacobiasca lybica (Hemiptera: Cicadellidae) en Andalucía, España modelización y mapeo. *Avances en Investigación Agropecuaria.* https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83715746004

Samper, F., y Carrera, J. (1996). *Geoestadística: Aplicaciones a la Hidrología subterránea* (2ª ed.). Centro Internacional de Métodos en Ingeniería.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola.* Sagarpa. www.siap.gob.mx (consulta: 25 de febrero 2023)

Solares, V., Ramírez, J. F., y Sánchez, J. R. (2011). Distribución espacial de trips (Insecta: Thysanoptera) en el cultivo de aguacate (Persea americana Mill.). *Boletín del Museo*

iThenticate Página 335 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

iThenticate Página 336 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

de Entomología de la Universidad del Valle, 12(2), 1-12. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/68718/ARTICULOROBERTO2.pdf?sequence=1

Winder, L., Perry, J., y Holland, J. (1999). The spatial and temporal distribution of the grain aphid Sitobionavenae in winter wheat. *Entomología Experimentaliset Applicata, 93*, 227-290.

iThenticate Página 336 de 338 - Engrega de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:587672895

Tópicos selectos para diseñar y aplicar tecnología agropecuaria, de Martín Rubí Arriaga, Andrés González Huerta, Gaspar Estrada Campuzano y Néstor Ponce García (coordinadores), publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se terminó de imprimir en abril de 2026, Litográfica Ingramex, S. A. de C. V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 20 ejemplares impresos y en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML.