



Agraria

Nueva Epoca

Año III, Vol. 3, Números 1, 2, y 3 Enero-Diciembre de 2006 · Buenavista, Saltillo, Coah., México

Editorial

Crecimiento de la Población e Innovación Tecnológica

Pág. 5

***Efecto de las Cepas de Azospirillum sp. sobre Altura,
Biomasa y Contenido de N en Genotipos de Maíz Forrajero***

Pág. 18

***Uso de Rizobacterias para el Control de Hongos Fitopatógenos
y Promoción de Crecimiento en Plantas***

Pág. 24

Comité Editorial

Dr. Miguel A. Capó Arteaga
Editor en Jefe

Dr. Jesús Valdés Reyna
Editor Ejecutivo

Editores Técnicos

Dr. José L. Puente Manríquez
Fitomejoramiento, Unidad Laguna

Dr. Raúl Rodríguez García
Riego y Drenaje

Dr. Jesús M. Fuentes Rodríguez
Producción Animal

DIRECTORIO

Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo
Rector

Ing. Lorenzo Castro Gómez
Secretario General

Raul Villegas Vizcaíno
Director General Académico

M. C. Alfredo Sánchez López
Director de Investigación

Dr. Alfredo de la Rosa Loera
Subdirector de Programación y Evaluación

M. C. José A. Nájera Castro
Subdirector de Operación de Proyectos

Diseño y Formación

Miguel A. Estrada Villarreal

Colaboradores

M. C. Ricardo Cuéllar Flores

M. C. José H. Rancaño Arrijoja

Dr. Adalberto Benavides Mendoza

UNIDAD LAGUNA

Dr. Armando Espinoza Banda
Subdirector de Investigación

M. C. Francisca Sánchez Bernal
Area de Programación, Operación y Evaluación Científica

Ing. Enrique L. Hernández Torres
Area de Operación Programas y Proyectos de Investigación

Agraria -Nueva Epoca- es una publicación científica, cuatrimestral, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con domicilio conocido en Buenavista, Saltillo, Coah., México y se imprime en sus Talleres Gráficos.

Tiraje digital (PDF) para su distribución en medios múltiples.

http://www.uaaan.mx/DirInv/portal_agraria/portal.htm · email: agraria_ne@uaaan.mx

Tel (844) 411-02-00, Ext. 2404 · Fax 411-02-11

Agraria -Nueva Epoca- está indexada en Latindex (Directorio de publicaciones Científicas seriadas de América Latina, el Caribe, España y Portugal), <http://www.latindex.org/larga.php?opcion=1&folio=15150> según folio 1550 de fecha 07-03-2006.



Centéotl, deidad azteca de la agricultura, es una advocación de Chicomecóatl, diosa del maíz. La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en su afán de rescatar los valores del pasado histórico de México, la ha adoptado como logotipo de su revista científica, como símbolo que evoca y reafirma nuestras raíces culturales

NUESTRA PORTADA

Rizobacteria en los nódulos de una raíz.

Normas Editoriales

Tipo de materiales para publicación

La revista **Agraria -Nueva Epoca-** acepta, para su publicación, materiales en español e inglés, sobre temas relacionados con las ciencias agrícolas, pecuarias y forestales, incluyendo las áreas de ingeniería, agroindustria y socioeconómicas. Todo material deberá venir acompañado de la solicitud correspondiente.

Estos materiales pueden ser artículos científicos, notas de investigación o ensayos.

Los materiales que se envíen para su publicación deberán ceñirse a las normas que, para tal efecto establezca **Agraria -Nueva Epoca-** y estarán sujetos a revisión y arbitraje por el Comité Editorial de la revista -o por quienes éste designe-, como requisito previo a su publicación.

No se aceptan trabajos ya publicados, o que estén sometidos a consideración en otros medios científicos de difusión.

Es de desear que la realización de la investigación, cuyos materiales sean enviados para su publicación, no exceda de 4 años anteriores a la fecha de su remisión.

Formato

El respeto a las siguientes indicaciones respecto al formato solicitado facilitará grandemente nuestro trabajo de edición.

Textos

Los textos, con todos sus anexos, deberán enviarse empaquetados (nosotros preferimos WinZip), sin contraseñas de seguridad, por correo electrónico, escritos en un procesador de textos de uso común (preferimos Word), en formato tamaño carta (21.57 x 27.94 cm), sin sangría, y a renglón seguido, con márgenes de 2.5 cm por lado. Agradeceremos evitar nombres de archivo excesivamente largos o con espacios en blanco. Los textos se redactarán en un tipo formal conocido ttf (True Type Font) tales como Arial, Times New Roman o similares, de 12 puntos. Las notas se escribirán en 9 puntos.

Todos los renglones, incluidos los encabezados, se iniciarán, invariablemente, a partir del margen izquierdo, sin sangría.

Todos los encabezados, independientemente de su orden, se escribirán en altas y bajas, y negrillas.

Los párrafos se escribirán sin pasar renglón entre ellos; para separarlos, a fin de hacer el texto fácil de leer y corregir, se utilizará el formato automático de párrafo del procesador, para darles un espaciado posterior de 6 puntos.

Las palabras no se separarán, en ningún caso, por sílabas. Es conveniente desactivar el comando automático de inserción de guiones (*hyphenation*) de su procesador.

El material no deberá exceder de 520 líneas para artículos científicos y ensayos, y de 200 líneas para una nota científica, incluidos cuadros y figuras.

Las unidades que se empleen serán las del Sistema Internacional de Unidades (<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/unidades/unidades/unidades.htm>)

Las páginas, al igual que los cuadros y las figuras, se numerarán progresivamente con números arábigos.

Cuadros y figuras. Los cuadros y las figuras contendrán sólo la información esencial y en ningún caso repetirán los datos que se presenten en el texto, o en otra forma. Cuadros y figuras deben ser claros, simples, concisos e ilustrativos.

Los cuadros no excederán, en ningún caso, los márgenes de impresión arriba mencionados y deberán presentarse en el cuerpo del texto, con el formato correspondiente, con las columnas separadas por tabulaciones, sin espacios a mano, y en la posición en que se espera que aparezcan, con el número de orden correspondiente.

En los cuadros se empleará sólo el número de cifras significativas necesarias para destacar el punto que se desee.

Los cuadros se realizarán en formato básico con tres líneas horizontales continuas: al inicio del cuadro, al inicio del cuerpo del cuadro (no en el encabezamiento) y al final. El campo y el encabezamiento de las columnas se pueden dividir a conveniencia del autor. No se deben añadir líneas verticales. Los encabezamientos, de columnas y líneas, se escribirán con minúsculas, excepto la primera letra de la oración. Las unidades se colocan debajo de la segunda línea horizontal, como en el ejemplo que se proporciona.

Las figuras tampoco excederán, en ningún caso, los márgenes de impresión establecidos. La posición que vaya a ocupar cada figura, deberá estar indicada en el texto con negrillas, en renglón aparte, con el número correspondiente.

Cada figura se enviará en archivo por separado, en formato tif (compresión LZW), o jpg, con el tamaño exacto en que se pretende que aparezca en la publicación, en una resolución no inferior a 150 pixeles por pulgada, con el número que le corresponda (p. ej: fig01.jpg).

Los puntos experimentales deberán marcarse visiblemente. Para dividir los ejes, se escogerán intervalos constantes para cada uno. Los mosaicos fotográficos deberán entregarse montados en un solo archivo gráfico (tif, o jpg), totalmente terminados. El aumento de las microfotografías debe indicarse en la leyenda.

En archivo por separado se enviará un listado de las figuras incluidas en el material enviado, con el número de orden y el pie de grabado correspondientes (p. ej.: listafigs.doc)

Las figuras pueden ser fotos a color o en tonos de gris -según sea su original-, gráficas (de preferencia a color), ilustraciones, dibujos, o grabados (de preferencia a color).

Los cuadros deberán redactarse en el mismo procesador de textos y formato señalado arriba.

Las ecuaciones, si las hubiera, se insertarán en el texto con un editor de ecuaciones compatible con su procesador.

Notas de pie de página

Sólo se podrán utilizar, cuando sean absolutamente indispensables, para identificar información adicional y se numerarán progresivamente en el texto. Los asteriscos se reservarán para indicar significancia a 5% (*) y 1% (**), respectivamente. En el pie de grabado -o de cuadro- se incluirán las notas o llamadas que sean pertinentes, y serán señaladas con números arábigos.

Citas bibliográficas

Las citas bibliográficas deberán ser de literatura reciente, relevante y sólo las exclusivamente necesarias para sustentar los planteamientos hechos.

Más detalles en http://www.uaaan.mx/DirInv/Convoc/conv_web/normas.htm, o http://www.uaaan.mx/DirInv/porta1_agraria/porta1.htm

Contenido

Normas Editoriales / <i>Instructions for authors</i>	2
Convocatoria/ <i>Paper call</i>	4
Editorial / <i>Editorial</i>	
Crecimiento de la Población, e Innovación Tecnológica	5
Artículos / <i>Articles</i>	
Comparación de dos Métodos para la Predicción del Comportamiento de Híbridos de Maíz	6
<i>Comparison of two Methods for Behavior Prediction of Maize Hybrids</i> Rosa Guerrero Chávez, Froylán Rincón Sánchez, Humberto de León Castillo, Humberto Reyes Valdés	
Análisis Línea x Probador: Estrategia para Selección de Progenitores de Alto Rendimiento en Chile Jalapeño (<i>Capsicum annuum</i> L.)	9
<i>Line x Tester Analysis: Strategy for Selecting High Yielding Jalapeño Pepper Parents (Capsicum annuum L.)</i> José Ángel García Sandoval, Gaspar Martínez Zambrano, Manuel Lujan Favela, Moisés Ramírez Meraz, Alfonso López Benítez	
Efecto de la Inoculación de Cepas de <i>Azospirillum</i> sp. sobre Altura, Biomasa y Contenido de Nitrógeno en Genotipos de Maíz Forrajero	18
<i>Effects of Azospirillum sp. Strains Inoculation on Height, Biomass, and Nitrogen Content in Forage Maize Genotypes</i> Rosalinda Mendoza Villarreal, Sergio Rodríguez Herrera, Marco Aurelio Puente Flores Arnoldo Oyervidez.	
Uso de Rizobacterias para el Control de Hongos Fitopatógenos y Promoción de Crecimiento en Plantas	24
<i>Use of Rhizobacteria for controlling Phytopathogen Fungi and Plant Growth Promotion</i> Catalina Chávez Betancourt, Víctor Olalde Portugal, Abiel Sánchez Arizpe, Emilio Padrón Corral, Alberto Flores Olivas	
Aplicación del Análisis de Senderos en Estudios Biológicos	32
<i>Application of Path Analysis in Biological Studies</i> Adalberto Benavides-Mendoza, Homero Ramírez, Valentín Robledo-Torres, José Hernández-Dávila	
Análisis de Datos Multivariados: Análisis General	42
<i>Multivariate Data Analysis: General Analysis</i> Jessica Fernández-Garza y José Antonio Díaz-García	

CONVOCATORIA

La Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

CONVOCA

a los investigadores, nacionales y extranjeros, interesados en publicar artículos científicos, a enviar sus contribuciones a la revista **Agraria -Nueva Epoca-**, bajo las siguientes bases:

Los trabajos recibidos se someterán al proceso de revisión descrito en las *Normas Editoriales* de la Revista.

Se recibirán contribuciones inéditas de todos los interesados, nacionales o extranjeros, en español o inglés.

Los artículos deberán versar sobre temas de contenido agrícola, pecuario, forestal, y socioeconómico del entorno regional, nacional e internacional.

Las modalidades de publicación son las siguientes:

Artículo científico

Es el resultado de un trabajo de investigación en el cual se aplicó, de forma rigurosa, el método científico, estudiando el efecto que tienen diferentes tratamientos sobre la respuesta medible de un sistema, como metodología para comprobar o rechazar una hipótesis claramente establecida en el trabajo.

Los artículos científicos que se envíen deberán constar de las siguientes partes: Título, Título en inglés, Autor(es), Institución(es) de adscripción y datos de localización del autor responsable (domicilio, teléfono, fax, e-mail), Abstract, que es la traducción al inglés del Resumen, incluidas las palabras clave; Resumen, que incluirá al pie las palabras clave hasta un máximo de seis, Introducción, Materiales y métodos, Resultados y discusión, Conclusiones, Literatura citada, Agradecimientos.

Ensayo científico

Consiste en el análisis crítico de una recopilación actualizada de artículos científicos, informes de investigación, o materiales similares, en los que el autor o autores aportan su opinión personal sobre un tema, estableciendo conclusiones respecto al estado actual del conocimiento sobre el mismo.

Partes de que consta el Ensayo: Título, Título en inglés, Autor(es), Institución(es) de adscripción y datos de localización del autor responsable (domicilio, teléfono, fax, e-mail), Abstract, que es la versión al inglés del Resumen, incluye las palabras clave, Resumen, incluidas las palabras clave hasta un máximo de siete, Introducción, Desarrollo del tema, con los subtítulos que se estimen convenientes, Discusión, cuando proceda, Conclusiones, Literatura citada.

Nota de investigación

Son materiales basados en trabajos experimentales que, sin perjuicio del método y rigor científicos, presentan aspectos metodológicos innovadores o resultados que, por su carácter novedoso, el autor considera de interés publicar antes de finalizar su investigación.

La nota, aunque de menor extensión, cubre todos los aspectos relevantes del proceso de investigación. Su estructura es similar a la del artículo científico, y trata cada uno de sus apartados, con menor profundidad y detalle, aunque no tiene que incluir los encabezados.

La excepción a lo anterior son el Abstract, que se omite, y la Literatura citada, apartado que deberá incluirse expresamente.

De ser necesario, podrán incluirse -también- algún cuadro o ilustración, cuando resulten relevantes para la mejor comprensión de la nota.

Los trabajos a publicar deberán hacerse llegar en versión electrónica, acompañados de una solicitud, de conformidad con las especificaciones marcadas en las Normas Editoriales arriba mencionadas, a la siguiente dirección electrónica: agraria_ne@uaaan.mx, con atención a:

Editor en Jefe de la Revista Agraria -Nueva Epoca-

Dirección de Investigación, UAAAN, Domicilio conocido, Buenavista,

Saltillo, Coahuila, México. CP. 25315

Para mayor información respecto a esta Convocatoria visite http://www.uaaan.mx/DirInv/portal_agraria/portal.htm para consultas diríjase al Editor en Jefe: agraria_ne@uaaan.mx.

Editorial

Crecimiento de la Población, e Innovación Tecnológica

Un tema recurrente en nuestros días, destacado por los estudiosos de la población humana, es el gran crecimiento que ha mostrado ésta después de la primera mitad del siglo pasado. Para los profesionistas involucrados en las áreas de producción de alimentos, y de la administración de ecosistemas, el fenómeno es relevante ya que muestra la magnitud del compromiso ineludible de la investigación científica con la sociedad, especialmente en lo que concierne a la agricultura, la ganadería, y otras actividades económicas afines a éstas.

Lo anterior, sumado al cambio climático, manifiesto ya desde finales del siglo pasado, así como a los continuos incrementos en los costos de insumos tales como energéticos fósiles, fertilizantes, y energía eléctrica, muestran un entorno con gran cantidad de desafíos para las formas de producción desarrolladas durante la revolución verde y que han permitido, por un lado, lograr la alimentación de una población en constante aumento pero, por el otro, lo han hecho con un alto costo para el medio ambiente.

Como siempre, parte de la solución a los problemas del campo, proviene de la capacidad de generar y aplicar el nuevo conocimiento. La innovación parte, casi invariablemente, de una base de conocimiento previamente establecida.

Entre sus varias funciones las universidades deben contar con esta capacidad de generación y aplicación del conocimiento que, al transferirse al sistema productivo, lleve a los productores del campo a la posibilidad de mejorar sus procesos, y a incrementar sus rendimientos y, consecuentemente sus beneficios y los de los consumidores tanto de nivel intermedio como final.

En este volumen de la revista Agraria –Nueva Época– se muestra con claridad la capacidad institucional para abordar, de manera multidisciplinaria, el estudio, la aplicación, y las propuestas para mejorar el potencial de los sistemas productivos. Los temas abordados exhiben una rica variedad de enfoques: genética, suelos, microbiología y modelos matemáticos que, bien aplicados, retornan a su origen como una opción de mayor eficiencia en el uso de insumos, una mayor productividad, y un menor impacto ambiental.

Comparación de dos Métodos para la Predicción del Comportamiento de Híbridos de Maíz

Rosa Guerrero Chávez^{1*}, Froylán Rincón Sánchez², Humberto de León Castillo², Humberto Reyes Valdés²

¹Asociación de Usuarios de Riego La Piedad A.C., La Piedad Mich., México. C.P. 36910. Tel. 01(352)5920647. E-mail: guerrerochr@yahoo.com.mx (*Autor responsable). ²Departamento de Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, C.P.25315, Saltillo, Coah., México.

Abstract

In the programs of genetic melioration of plants, predicting the yields in hybrids plays an important role, since in this way it is possible to know the best combinations the parents for its formation. The objective of this work was to compare the B method of Jenkins (PR₁) with the one obtained through the sum of general combinatory aptitudes of the parents (PR₂) for the prediction of simple, double, and triple hybrids of maize (*Zea mays* L.). Correlation between the predicted values and the yields obtained in the per se evaluation of crosses was analyzed with the purpose of determining which of both methods makes a more accurate prediction. The results showed that the correlation between the evaluated, and the predicted values, with the B method of Jenkins were not significant in double and triple crosses with values of $r = 0.263$ and 0.097 respectively. Nevertheless, the correlation between the evaluated, and the predicted ones by means of the method of the sum of the general combinatory aptitude of the parents registered a significant ($P \leq 0.01$) of $r = 0.534$ ** for simple crosses, and a significant ($P \leq 0.05$) values of $r = 0.528$ * and 0.838 * for doubles and triple crosses respectively. It may be concluded that the method of the sum of the general combinatory aptitudes of the parents is a better predicting method for yields than the method B of Jenkins.

Key words: *Zea mays* L., yield prediction, B of Jenkins, general combining ability.

Resumen

En los programas de mejoramiento genético de plantas, la predicción de rendimiento en híbridos juega un papel importante, ya que así se puede conocer las mejores combinaciones de los progenitores para su formación. El objetivo de este trabajo fue comparar el método B de Jenkins (PR₁) con el obtenido a través de la suma de las aptitudes combinatorias generales de los progenitores (PR₂) para la predicción de híbridos simples, triples y dobles de maíz (*Zea mays* L.). Se analizó la correlación entre los valores predichos y el rendimiento obtenido en la evaluación *per se* de las cruzas; esto con el fin de determinar cual de ambos métodos realiza predicciones con mayor precisión. Los resultados mostraron que la correlación entre lo evaluado y lo predicho con el método B de Jenkins no fue significativa en cruzas triples y dobles con valores de $r = 0.263$ y 0.097 respectivamente. Sin embargo, la correlación entre lo evaluado y lo predicho con el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores registró valores significativos ($P \leq 0.01$) de $r = 0.534$ ** en cruzas simples y significativos ($P \leq 0.05$) con valores de $r = 0.528$ * y 0.838 * para cruzas triples y dobles respectivamente. Se concluye que el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores es un mejor predictor de rendimiento que el método B de Jenkins.

Palabras claves: *Zea mays* L., predicción de rendimiento, B de Jenkins, aptitud combinatoria general.

Introducción

La predicción del rendimiento de híbridos en los programas de mejoramiento genético de plantas, es muy importante para conocer las mejores combinaciones de los progenitores para su formación. Existen métodos que permiten al mejorador de maíz predecir el comportamiento

de las mejores combinaciones híbridas sin efectuar y probar literalmente miles de cruzas indeseables. Sin embargo, las combinaciones híbridas predichas deberán probarse exhaustivamente bajo condiciones de campo antes de la producción comercial (Jugenheimer, 1990).

En los resultados de diversas investigaciones se ha obtenido una alta correlación entre los datos de predicción de rendimiento con los datos obtenidos directamente de evaluaciones prácticas de campo. Esto justifica el empleo de la predicción por medio de computadoras para una rápida identificación de aquellos híbridos pronosticados como los de más rendimiento y sólo estos se forman directamente en el campo (Robles, 1987).

Jenkins (1934) propuso cuatro métodos para predecir el comportamiento de híbridos de cruce doble, de donde destaca el método B, el cual está basado en el promedio de las cuatro cruces simples que no son progenitoras directas de la cruce doble, con una correlación de 0.76 entre lo estimado bajo dicho método y el obtenido en la evaluación *per se* de las cruces dobles. El método B de Jenkins tiene una base genética más firme y proporciona información sobre el desempeño de las tres posibles combinaciones de cruce doble que incluyan cuatro líneas puras (Jugenheimer, 1990). No obstante lo anterior, en este trabajo se planteó la hipótesis de que la mejor predicción de híbridos simples, triples y dobles, se obtiene a partir de las sumas de las aptitudes combinatorias generales de los progenitores (Griffing, 1956), por lo que el objetivo de este estudio fue comparar el método B de Jenkins con el obtenido a través de la suma de las aptitudes combinatorias generales de los progenitores para la predicción de híbridos simples, triples y dobles.

Materiales y Métodos

El material genético consistió de 78 cruces simples, 21 cruces dobles y 25 cruces triples procedentes de una población enana desarrollada por el Instituto Mexicano del Maíz-UAAAN. Los híbridos simples y dobles fueron formados a partir de las cruces posibles entre 13 líneas y siete cruces simples respectivamente, bajo el modelo IV de Griffing (Griffing, 1956). Los híbridos triples fueron obtenidos a través del apareamiento de cinco líneas y cinco cruces simples en un Diseño II de Carolina del Norte (Comstock y Robinson, 1948).

Las cruces simples, triples y dobles fueron formadas en Tepalcingo, Mor., México, en el ciclo agrícola OI-1999/2000 y la evaluación de éstas se realizó en las localidades de Juventino Rosas y Pénjamo, Gto., México, durante el ciclo PV-2001. Cada material experimental se sembró en un surco de 5 m depositando dos semillas por golpe y a una distancia entre surcos de 0.75 m. Las prácticas culturales fueron realizadas de acuerdo al paquete tecnológico perteneciente a cada localidad.

La predicción del rendimiento de los tres tipos de cruces se realizó a través de dos metodologías: B de Jenkins (1934) para cruces triples y dobles (PR_2) y el método de

la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruces simples, triples y dobles (Griffing, 1956).

La variable evaluada fue rendimiento al 15 % de humedad y ajustado por covarianza con respecto al número de plantas cosechadas por parcela experimental.

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones por localidad. Se analizó de manera individual y combinado bajo la metodología de modelos mixtos (Stroup, 1989) con el uso del paquete estadístico SAS (SAS, 1996).

Para determinar el método más eficiente de predicción de rendimiento se analizaron las correlaciones entre los valores obtenidos de la evaluación *per se* de las cruces y los valores predichos en cada uno de los dos métodos bajo estudio.

Resultados y Discusión

Predicción de híbridos de cruce simple

La predicción de híbridos de cruce simple fue realizada en 78 cruces con base a la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores. Estos valores fueron correlacionados con sus respectivos valores observados. Se encontró una correlación significativa ($P < 0.01$) con un valor de $r = 0.534^{**}$, lo que indica una relación positiva entre los valores calculados y los observados en la evaluación *per se* de las cruces simples.

Predicción de híbridos de cruce triple

Se encontró una correlación significativa ($P < 0.05$) de $r = 0.528^*$ entre el valor observado y el predicho bajo el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (Cuadro 1), en tanto que para el método B de Jenkins no se encontró una relación lineal ($r = 0.263$).

Datos similares fueron reportados por Quemé (1989), quien al realizar la comparación entre la predicción bajo el método B de Jenkins y los valores observados para rendimiento en diferentes localidades encontró coeficientes de correlación entre 0 y 0.79, lo que sugiere que el método B de Jenkins no es el indicado para la predicción de híbridos triples.

Salmeron (1984), obtuvo correlaciones no significativas con valores de $r = -0.05$ y 0.12 entre lo predicho con el método B de Jenkins y lo observado en las localidades de Ursulo Galván, Ver., México y Río Bravo, Tamps., México, respectivamente, y solamente en la localidad de Iguala, Gro., México la correlación fue significativa ($P < 0.01$) con valores de $r = 0.29^{**}$, por lo que en general concluyó que no existe concordancia entre lo predicho bajo este método y lo observado.

Cuadro 1. Correlación entre el rendimiento observado y el predicho bajo los métodos B de Jenkins (PR_1) y el evaluado a través de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruza triples.

	Predicción por PR_1		Valor Observado	
Predicción por PR_2	0.731	**	0.528	*
Predicción por PR_1			0.263	

*, ** Significativo al nivel 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente.

Predicción de híbridos de cruz a doble

La correlación entre los valores de predicción del método B de Jenkins (PR_1) y los valores observados fue de $r = 0.097$, la cual es casi nula y por lo tanto no significativa, sin embargo, para el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) se obtuvo una correlación altamente significativa ($Pd > 0.05$) con un valor de $r = 0.83$ (Cuadro 2).

Quemé (1989) estimó en diferentes localidades correlaciones para rendimiento entre lo predicho con el método B de Jenkins y los valores reales observados de cruza dobles resultando valores desde 0.39 hasta 0.60, lo que constata la baja relación existente entre éstos y por lo tanto una eficiencia relativa de baja magnitud para la predicción de híbridos dobles.

Salmeron (1984) estimó en cruza dobles la correlación entre lo predicho bajo el método B de Jenkins y los valores reales observados en las localidades de Iguala Gro., Río Bravo Tamps., México y Ursulo Galván Ver., México y obtuvo valores no significativos en las dos primeras ($r = 0.01$ y 0.19 respectivamente) y significativas en la última ($r = 0.26^*$). Sin embargo, se llegó a la conclusión de que la falta de concordancia entre estos valores probablemente se debía al efecto de la interacción Genotipo – Ambiente.

Cuadro 2. Correlación entre el rendimiento real observado y el predicho bajo los métodos B de Jenkins (PR_1) y el calculado a través de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores (PR_2) en cruza dobles.

	Predicción por PR_1	Observado Valor
Predicción por PR_2	0.326	0.830 *
Predicción por PR_1		0.097

* Significativo al nivel 0.05 de probabilidad.

Conclusiones

La predicción de rendimiento bajo el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores tuvo una correlación significativa en híbridos simples. En cruza triples y dobles, la predicción mediante el método B de Jenkins (PR_1) mostró correlaciones no significativas. No obstante, el método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores presentó correlaciones significativas para cruza triples y dobles respectivamente. El método de la suma de la aptitud combinatoria general de los progenitores es el mejor predictor de cruza simples, dobles y triples a comparación del método B de Jenkins.

Literatura Citada

Comstock, R., E. and H.F. Robinson. 1948. The components of genetic variance in populations of biparental progenies and their use in estimating the average degree of dominance. *Biometrics* 4: 254 – 266.

Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Division of Plant Industry, CSIRO, Canberra, A.C.T. Aust. J. Biol. Sci.* 9: 463 – 493.

Jenkins, M., T. 1934. Methods of estimating the performance of double crosses in corn. *J. Amer. Soc. Agron.* 26: 199 – 204.

Jugenheimer, R., W. 1990. Maíz variedades mejoradas. Métodos de cultivo y producción de semillas. Versión española por R. Piña G. Ed. Limusa. México. 834 p.

Quemé, D., J.L. 1989. Predicción y evaluación de cruza dobles y de tres líneas de maíz (*Zea mays* L.) en la zona baja de Guatemala. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 113 p.

Robles, S., R. 1987. Terminología Genética y Fitogenética. Trillas. México. 163 p.

Salmeron, E., J. 1984. Rendimiento predicho y observado de las mejores cruza triples y dobles de maíz (*Zea mays* L.) en el trópico húmedo. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo. Coah., México. 63 p.

SAS. 1996. SAS/STAT user's guide: 6.11th ed. Vol. 2. SAS Inst. Cary, N. C. 956 p.

Stroup, W. 1989. Predictable functions and prediction space in the mixed model procedure. pp: 39- 48, in: applications of mixed models in agriculture and related disciplines, Southern Cooperative Series, Bulletin No. 343. Louisiana Agricultural Experiment Station. Baton Rouge. Louisiana, USA.

Análisis Línea x Probador: Estrategia para Selección de Progenitores de Alto Rendimiento en Chile Jalapeño (*Capsicum annuum* L.)

José Ángel García Sandoval^{1*}, Gaspar Martínez Zambrano², Manuel Lujan Favela³, Moisés Ramírez Meraz⁴, Alfonso López Benítez²

¹Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Chetumal. Avenida Tumben Cuxtal #29, Colonia Tumben, Cuxtal. 77026, Chetumal, Quintana Roo, México. E-mail: jagarciasandoval@yahoo.com (*Autor responsable). ²Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista. 25315. Saltillo, Coah., México. ³Campo Experimental Delicias. ⁴Campo Experimental Sur de Tamaulipas.

Abstract

Mexico's international trade agreements have caused important changes in the tendencies of the agricultural markets, and in cultures like that of jalapeno pepper its effect is on the quality standards of the fruit, tendencies that at its time have exhibited a backlog in the generation in the generation of competitive genotypes, both in productivity and quality, fact that constitutes the main problem to solve in the melioration of pepper. The objectives of this assay were: a) to determine the type of genic action of the yield in a group of parents of jalapeno pepper, to define and to make more efficient the profiting of these advantages in the melioration, and b) to detect the best lines and testers on an ACG basis, as well as the best crosses on the basis of ACE and heterosis for the formation of varieties of free pollination or jalapeno pepper hybrids. The 40 lines were crossed by hand with 3 testers, obtaining 120 mixed ones. The evaluation was carried out during the spring-summer agricultural cycle 2004 and 2005 at the CEDEL experimental station in Delicias, Chih., Mexico, and the CESTAM in Tampico, Tamps., Mexico. The experimental parcel consisted of a row of plants of 3 ms of length, at a distance of 30 cm among plants, distributed in a completely randomized block design with three replications. The genetic effects were estimated using the line x tester design. The obtained results indicate that the yield of jalapeno pepper is mainly influenced by the additive effects of the genes. A differential behavior was observed between the lines, the testers and the mixed ones with respect to test environments, having observed a better behavior in the temperate one of Delicias, than in the tropical one of Tampico, since the shown heterosis was higher by 76%. The best mixed ones for Delicias are 4x3, 10x3, 30x3, and 33x3; and for Tampico 27x3, 28x3, 33x1, and 38x1.

Key Words: jalapeno pepper, ACG, ACE, heterosis, mixed ones.

Resumen

Los acuerdos de comercio internacional que tiene México han propiciado importantes cambios en la tendencia del mercado de productos agrícolas y, en cultivos como el chile jalapeño, su efecto es en los estándares de la calidad del fruto, las que a su vez han exhibido el rezago en la generación de genotipos competitivos en productividad y calidad, lo que constituye el principal problema a resolver del mejoramiento de chile. Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: a) Determinar el tipo de acción génica del rendimiento en un grupo de progenitores de chile jalapeño para definir y eficientar su aprovechamiento en el mejoramiento, y b) detectar las mejores líneas y probadores en base a ACG así como las mejores cruza en base a ACE y heterosis para la formación de variedades de polinización libre o híbridos de chile jalapeño. Las 40 líneas se cruzaron con 3 probadores en forma manual, logrando formar 120 mestizos en total. La evaluación se llevó a cabo durante los ciclos agrícola primavera-verano 2004 y 2005 en los campos experimentales CEDEL en Delicias, Chih., México y el CESTAM en Tampico, Tamps., México. La parcela experimental consistió de una hilera de plantas de 3 m de largo y una distancia de 30 cm entre planta y planta, distribuidas en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Los efectos genéticos se estimaron utilizando el diseño Línea x Probador. Los resultados obtenidos indican que el rendimiento del chile jalapeño está mayormente influenciado por efectos aditivos de los genes. Se observó comportamiento diferencial entre las líneas, los probadores y los mestizos con respecto a los ambientes de prueba, teniendo mejor comportamiento en el ambiente templado de Delicias que en el ambiente tropical de Tampico, ya que la heterosis manifestada fue superior en un 76%. Los mejores mestizos para Delicias son 4x3, 10x3, 30x3 y 33x3 y para Tampico los 27x3, 28x3, 33x1, 35x1 y 38x1.

Palabras clave: Chile jalapeño, ACG, ACE, heterosis, mestizos.

Introducción

México junto con otros países de Centro y Sudamérica es considerado como uno de los centros de origen del chile, básicamente del *Capsicum annuum*. Esta especie también es considerada como la más amplia y de mayor diversificación en el mundo (Pozo, 1984).

En nuestro país existe una vasta diversidad de tipos de chile, de los cuales sobresalen por su preferencia, rentabilidad y superficie los chiles jalapeño, guajillo, ancho, serrano, y habanero, entre otros, con una superficie anual que fluctúa entre 140 a 170,000 ha (ASERCA, 1998).

El chile jalapeño es de los más consumidos, tanto en fresco como procesado, durante todo el año, ya que el cultivo se adapta muy bien a la diversidad de ambientes que existen en el país. Su cultivo rebasa las 45,000 ha por año y lo hace ser, dentro de la amplia riqueza de tipos y especies de chile, el de mayor interés e importancia, incluso es de las especies de mayor aceptación y crecimiento en Estados Unidos. Los estados mexicanos productores son Chihuahua con 12,000 ha, Veracruz con 6,000 ha, Campeche con 3,600 ha y Quintana Roo con 3,500 ha promedio anual (ASERCA, 1998).

La apertura comercial en México ha dado un giro importante a las tendencias del mercado agrícola. En algunos cultivos como el chile jalapeño, el cambio en los estándares de la calidad del fruto es una situación dinámica que ha impuesto algunas modas en el mercado, y que han exhibido el rezago en la generación de genotipos competitivos, lo que constituye el principal problema actual del mejoramiento del chile.

Para enfrentar este problema, es necesario hacer más eficientes los programas de mejoramiento, en lo referente a la generación de híbridos competitivos en productividad y con la calidad comercial demandada. Para ello es primordial disponer de una amplia base de progenitores caracterizados, fenotípica y genéticamente, para responder en forma efectiva y rápida a cualquier cambio que experimente la dinámica del mercado del chile.

El diseño línea x probador es un método de análisis de efectos genéticos sencillo y versátil que permite el manejo de un mayor número de progenitores y proporciona información relevante sobre los efectos genéticos aditivos y no aditivos (Kempthorne, 1957). Además, origina información genética específica tanto de las líneas como de los probadores y, sobre todo, no limita el número de entradas. Este diseño no es tan popular como los dialélicos II y IV de Griffing (1956), específicamente en chile jalapeño no se encontró referencia de su uso pero se ha empleado como una excelente opción para generar información genética en otros cultivos (Narro *et al.*, 2003;

Joshi *et al.*, 2002; Senthil y Ganesan, 2002; Singh y Kumar, 2004; Ahmed *et al.*, 2003; Upadhya y Cabello, 2000).

Los términos de aptitud combinatoria fueron definidos por Sprague y Tatum (1942), refiriéndose a la aptitud combinatoria general (ACG) como el comportamiento promedio de una línea en todas sus combinaciones híbridas y a la aptitud combinatoria específica (ACE) como aquellos casos particulares en los que cierta combinación híbrida se comporta relativamente mejor, o peor, que las líneas involucradas en la cruce.

El conocimiento de la ACG y ACE es prerequisite indispensable para la selección de progenitores con mejores perspectivas en caracteres hortícolas deseables. Griffing (1956), Falconer (1981) y Vencovsky y Barriga (1992) mencionan que a través de la relación ACE/ACG indicador del grado promedio de dominancia, se puede obtener una aproximación sobre la forma en que se hereda el carácter en estudio, asimismo, puede ser un indicativo para elegir el método de mejoramiento a seguir.

Explorar y aprovechar el vigor híbrido en cultivos tradicionales de México como el chile, ubicado como una planta de polinización facultativa (Odland y Porter, 1941; Franceschetti, 1971; Pozo, 1983), debe ser algo rutinario en cualquier programa de mejoramiento, pues se ha demostrado la existencia de heterosis con potencial de uso como en las especies alógamas. En este sentido, Chain (1987) reporta para *Capsicum annuum* una heterosis importante sobre el progenitor medio y mejor progenitor o heterobeltiosis, en rendimiento por planta de 34.91 y 9.36 %, respectivamente, así como para algunos componentes del rendimiento como número de frutos por planta (49.87 % y 31.37 %) y longitud de fruto (22.69 % y 15.21 %). En tanto, Singh (1987) reporta, para chile picoso un incremento de 101 a 235 % del rendimiento de fruto verde y de 74.45 a 137 % del rendimiento de fruto rojo sobre el progenitor estándar.

Por lo anterior, se realizó la presente investigación con los siguientes objetivos: a) determinar el tipo de acción génica del rendimiento en un grupo de progenitores de chile jalapeño para definir y eficientar su aprovechamiento en el mejoramiento, y b) detectar las mejores líneas y probadores en base a ACG así como las mejores cruces en base a ACE y heterosis para la formación de variedades de polinización libre o híbridos de chile jalapeño.

Materiales y Métodos

La investigación se llevó a cabo durante los ciclos agrícolas PV- 2004 y 2005 en las localidades de Delicias, Chih., México, en colaboración con el campo experimental Delicias (CEDEL) localizado en el km 2 de la carretera Delicias-Rosales y en Tamaulipas, en colaboración con el

campo experimental Sur de Tamaulipas (CESTAM), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

El material germoplásmico consistió de 40 líneas y 3 probadores. Cada línea y probador fueron sembrados en macetas y crecidas en invernadero, obteniendo 3 plantas por línea o probador para realizar los diferentes cruzamientos programados. La formación de los mestizos, producto del cruzamiento de los probadores con las líneas, se realizó en invernadero en el CEDEL durante 2004. Los cruzamientos fueron en forma manual y en promedio se obtuvieron de 3 a 5 frutos por cruza, en total se lograron formar 120 mestizos.

Previo al establecimiento de los mestizos en campo, las plántulas fueron crecidas en invernadero, en charolas de poliestireno con un manejo nutricional especializado para este tipo de chile (CESTAM, 2000). La parcela de evaluación para cada mestizo y padres fue una hilera de plantas de 3 m de largo y una distancia de 30 cm entre planta y planta. En promedio cada parcela constó de 10 a 12 plantas. El manejo agronómico del cultivo fue en base al paquete tecnológico sugerido por el INIFAP en las localidades de estudio (CESTAM, 2000). Se tomaron datos de rendimiento de fruto en dos cortes.

Para estimar los efectos genéticos se recurrió al diseño línea x probador bajo el modelo propuesto por Singh y Chaudhary (1977). El diseño experimental empleado fue bloques completos al azar con tres repeticiones. Los resultados se compararon mediante análisis de variación.

Considerando los cuadrados medios de aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) en términos de las covarianzas de medios hermanos (CovMH) y hermanos completos (CovHC), respectivamente, se estimaron varianzas genéticas aditiva (σ_A^2) y dominante (σ_D^2).

La ACG es igual a la covarianza de MH e igual a la varianza para líneas, probadores y el promedio de ambos, en tanto, σ_A^2 es igual a 4 veces la varianza de ACG cuando el coeficiente de endogamia (F) tiene un valor de F=0 o bien dos veces cuando el valor de F=1; en esta investigación se considero un valor de F=1 para la estimación de los parámetros genéticos anteriormente indicados. Para

σ_D^2 corresponde directamente el valor de la ACE (Singh y Chaudhary, 1977). Las expresiones empleadas fueron, de acuerdo con Singh y Chaudhary (1977). Una vez determinados los componentes de la varianza genética se

estimó la heredabilidad estrecha (h^2), como: $h^2 = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_P^2}$. La

varianza fenotípica (σ_P^2) se estimó como:

$$\sigma_P^2 = \sigma_A^2 + \sigma_D^2 + \sigma_E^2$$

La heterosis fue determinada mediante las expresiones para progenitor medio (PM) y mejor progenitor (MP) tomadas de Reyes (1985). La prueba de significancia de ACG y ACE se realizó con la fórmula propuesta por Singh y Chaudhary (1977).

La prueba de significancia de la heterosis del progenitor medio (PM) y mejor progenitor (MP) se realizó mediante una t, para lo que se recurrió a las expresiones utilizadas por Acevedo y Monteverde (1998) y Delgado y Layrisse (1992).

Toda la información se analizó con el paquete estadístico SAS versión 8.0 (SAS, 1999). La rutina en lenguaje SAS para el diseño línea x probador fue de acuerdo a Bartolomé y Gregorio (2000), que da seguimiento paso a paso al procedimiento de cálculo presentado por a Singh y Chaudhary (1977).

Resultados y Discusión

Análisis de varianza

El análisis de varianza para el diseño experimental se presenta en el Cuadro 1, en el que se incluye también el análisis del diseño Línea x Probador. Al fraccionar la fuente de mestizos en líneas (L), probadores (P) e interacción entre ellos (LxP), se encontraron diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre líneas y probadores en las dos localidades y en el análisis combinado. Aunque en la localidad de Tampico se aprecian diferencias altamente significativas de la interacción LxP, con base a la magnitud de los cuadrados medios es posible decir, que el rendimiento se atribuyó preferentemente a los efectos de las líneas y probadores, más que a su interacción. Tomando en cuenta el análisis combinado, se confirma lo anterior ya que muestra la misma tendencia de la contribución relativa a favor de probadores y líneas. En lo que se refiere a la interacción de los mestizos con el ambiente, la varianza del rendimiento es mayormente explicada por las diferencias altamente significativas de Loc x Probador y Loc x Línea, que por la interacción de ambos con el ambiente; sin embargo, la magnitud del cuadrado medio de Loc x Probador señala que los probadores responden diferencialmente al efecto de los ambientes de prueba, en mayor intensidad que las líneas.

Componentes genéticos de la varianza

La interpretación de los efectos de ACG de líneas y probadores y la de ACE de la interacción entre ellos en términos de efectos genéticos a partir de covarianzas de parientes y estas en componentes aditivo y dominante de la varianza genética, se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Grados de libertad (GL) y Cuadrados Medios (CM) del análisis de varianza del rendimiento de chile jalapeño en dos localidades y combinado. INIFAP-CEDEL-CESTAM-UAAAN. 2006.

FV	Delicias		Tampico		Combinado	
	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Loc					1	23671.590**
Mestizos	109	177.005	119	17.715**	119	60.892**
Línea	38	307.346**	39	34.782**	39	79.407**
Probador	2	946.033**	2	45.838**	2	560.959**
Línea x Probador	69	83.506	78	8.460**	78	37.672
LocxMestizos					119	61.146**
LocxLínea					39	98.687**
LocxProbador					2	228.973**
LocxLíneaxProbador					78	36.612
Error	302	96.240	119	1.638	218	41.790

** Significativo al 0.01 de probabilidad.

Cuadro 2. Componentes genéticos del rendimiento de chile jalapeño evaluado en Delicias, Tampico y combinado. CEDEL-CESTAM-INIFAP- UAAAN. 2006.

Parámetros genéticos	Delicias	Tampico	Combinado
ACG _{líneas}	24.871	4.387	-2.214
ACG _{probadores}	7.188	0.467	1.780
ACG _{prom}	0.432	0.068	0.110
ACE	-4.245	3.411	-0.170
σ_A^2 líneas	49.742	8.774	-4.428
σ_A^2 probadores	14.375	0.634	3.560
σ_A^2 prom.	0.863	0.136	0.221
σ_D^2	-4.245	3.411	-0.170
\bar{D} líneas	0	0.624	0
\bar{D} probadores	0	2.319	0
\bar{D} promedio	0	5.000	0
h^2 Líneas	0.351	0.635	-0.084
h^2 Probadores	0.135	0.156	0.004
h^2 promedio	0.009	0.026	0.067

$s^2_{A\text{líneas}}$, $s^2_{A\text{probadores}}$, $s^2_{A\text{prom}}$ = varianza aditiva de líneas, probadores y promedio de líneas y probadores, respectivamente. s^2_D =varianza de dominancia. $\bar{D}_{\text{Líneas}}$, $\bar{D}_{\text{probadores}}$, $\bar{D}_{\text{promedio}}$ = grado promedio de dominancia con base en varianzas aditivas de líneas, probadores y el promedio de ellos, respectivamente. $h^2_{\text{Líneas}}$, $h^2_{\text{Probadores}}$, h^2_{promedio} =heredabilidad con base en varianzas aditivas de líneas, probadores y el promedio de ellos, respectivamente.

Se puede deducir que el rendimiento de los mestizos en la localidad Delicias se debió mayormente a efectos de los genes aditivos, resultados que coinciden con Patel *et al.* (1998).

En la localidad Tampico se aprecian resultados contradictorios con los obtenidos en la localidad de Delicias, sobre todo para la varianza de dominancia, ya que de expresarse en forma negativa en Delicias (-4.245) pasó a tener una expresión positiva (3.411) en Tampico. Al estimar las varianzas genéticas y el grado de dominancia en la localidad de Tampico, con la varianza aditiva de los probadores y el promedio de ambos progenitores, se aprecia que el rendimiento fue mayormente influenciado por la actividad de genes no aditivos ($\bar{D} > 1$), estos resultados son parecidos a los de Ahmed *et al.* (1998), mientras que al estimarlos con la varianza de las líneas, la expresión del grado de dominancia del rendimiento cambió, siendo ahora mayormente atribuida a genes de acción aditiva ($\bar{D} > 1$). En la localidad Delicias, en cambio, dado que la estimación de la varianza de dominancia resultó negativa, teóricamente igual a cero (Dudley y Moll, 1969; Castillo y Nevado, 1980), la interpretación es que el grado de dominancia fue inexistente ($\bar{D} = 0$) y el rendimiento fue una función de los efectos solamente del tipo aditivo.

Por otra parte, los resultados del análisis combinado señalaron a la ACG de probadores como la fuente de mayor contribución al rendimiento, ya que superó a los valores de ACG de líneas y a la ACE. Considerando las varianzas genéticas aditivas promedio de ambos tipos de progenitores y la de probadores, se puede deducir que los genes aditivos estuvieron más estrechamente relacionados que los no aditivos con la expresión del rendimiento de chile jalapeño. Sin embargo, tomando en cuenta la estimación de varianza aditiva de las líneas, la situación fue muy diferente a los otros componentes, ya que los valores negativos de las varianzas aditivas y no aditivas no permitieron determinar con precisión la acción de los genes que están vinculados a la expresión del rendimiento.

Heredabilidad

El valor de la h^2 estimado con datos promedio de σ^2_A de los dos progenitores en las dos localidades, permitió comprobar que el rendimiento es de los caracteres más difíciles de fijar (Hallauer y Miranda, 1981), pues su expresión generalmente es de herencia cuantitativa o poligénica, por lo tanto, altamente influenciada por el ambiente.

Cuadro 3. Rendimiento y efectos de Aptitud Combinatoria General (ACG) para líneas progenitoras de chile jalapeño. INIFAP-CEDEL-CESTAM- UAAAN.2006.

Líneas	Delicias		Tampico		Combinado	
	t h ⁻¹	ACG	t h ⁻¹	ACG	t h ⁻¹	ACG
1	25.62	-3.70	14.21	-2.25**	21.74	-0.99
2	24.17	-5.15	15.50	-0.95	24.14	-0.97
3	30.98	1.67	16.87	0.41	26.23	3.68
4	33.75	4.44	17.72	1.26*	22.77	0.89
5	23.69	-5.62	19.17	2.72**	26.54	2.82
6	40.36	11.04**	17.10	0.64	22.52	0.91
7	28.96	-0.35	15.61	-0.85	22.91	-0.71
8	37.44	8.13*	15.05	-1.41**	22.14	2.02
9	31.70	2.38	16.00	-0.46	22.70	3.13
10	24.45	-4.86	16.41	-0.05	19.85	-1.27
11	23.27	-6.04	10.67	-5.79**	27.90	-0.28
12	28.62	-0.70	13.64	-2.82**	21.08	-3.65
13	36.40	7.09*	20.89	4.43**	22.45	4.58*
14	28.32	-0.99	15.96	-0.50	20.91	-0.90
15	28.04	-1.28	15.29	-1.17*	26.37	-0.64
16	17.73	-11.58**	12.13	-4.33**	28.00	1.06
17	18.23	-11.08**	15.92	-0.54	24.31	4.49*
18	18.83	-10.48**	18.93	2.47**	27.10	4.58*
19	19.58	-9.73**	15.24	-1.22*	22.78	-0.63
20	25.08	-4.23	19.57	3.11**	25.43	2.96
21	25.78	-3.53	15.90	-0.56	27.99	-0.51
22	21.19	-8.12*	16.03	-0.43	25.39	-2.50
23	32.20	2.89	17.66	1.21*	22.42	5.72**
24	18.59	-10.73**	20.10	3.65**	24.47	0.73
25	31.28	1.97	15.28	-1.18*	21.43	-1.67
26	31.21	1.90	13.47	-2.99**	20.98	-3.56
27	35.16	5.85	20.59	4.13**	22.47	-1.98
28	33.00	3.68	20.80	4.34**	19.89	-4.29*
29	35.80	6.49*	15.43	-1.03	29.13	-0.95
30	35.92	6.61*	17.84	1.38**	19.13	-1.98
31	33.57	4.26	16.26	-0.20	26.87	2.96
32	31.99	2.68	14.09	-2.37**	25.09	-2.84
33	28.47	-0.84*	20.74	4.28**	23.13	1.98
34	32.06	2.75	17.46	1.00	19.77	1.68
35	36.94	7.63*	17.01	0.55	24.33	3.46
36	36.99	7.68*	13.71	-2.74**	20.57	-2.47
37	31.12	1.81	16.87	0.41	19.85	-3.56
38	29.45	0.14	16.92	0.46	20.45	-2.44
39	36.51	7.20*	17.09	0.63	21.44	-2.33
40	-	-	13.20	-3.26**	-	-

*, ** Significativamente diferente de cero al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

La magnitud de h^2 mejoró notablemente al ser estimada considerando la varianza aditiva de cada tipo de progenitor, particularmente con líneas, donde los valores alcanzaron la mayor expresión, en las dos localidades. Según Robinson *et al.* (1951) la heredabilidad del rendimiento en líneas fue intermedia en Delicias y alta en Tampico, similar a lo encontrado por Takur (1987). Esto significa que poseen gran cantidad de genes favorables del tipo aditivo, y por lo tanto, factibles de mejorar a través de métodos de mejoramiento como pedigrí, selección masal y selección recurrente tal como sugieren Pozo y Ramírez (2000), Ahmed *et al.* (1998), Patel *et al.* (1998), Joshi (1990) y Martínez *et al.* (2005).

Aptitud combinatoria de progenitores y mestizos

En el Cuadro 3 se presentan las estimaciones de ACG de las líneas progenitoras evaluadas en las dos localidades y combinando ambos experimentos. En Delicias el 46.15 % de las 39 líneas tuvieron ACG negativa con valores fluctuando de -0.35 a -11.58. El 53.85 % restante manifestó una ACG positiva variando su magnitud de 0.14 a 11.04. De este último grupo sobresale la línea 6 (11.04) ya que fue la única con efectos positivos altamente significativos ($P < 0.01$); así como las líneas 8 (8.13), 36 (7.68), 35 (7.63), 39 (7.20), 13 (7.09), 30 (6.61) y 29 (6.49) con efectos significativos ($P < 0.05$) y valores elevados de ACG. Estas líneas coincidieron con los mejores rendimientos y, por lo tanto, pueden considerarse candidatas a ser excelentes progenitoras para la formación de variedades sintéticas como reservorios de genes aditivos o bien para mejorar el rendimiento por los métodos convencionales como selección masal, recurrente o pedigrí.

La asociación entre el rendimiento de las líneas y los efectos de ACG en la localidad de Delicias, mostró un coeficiente de correlación de $r=0.99$, lo que explica que las líneas con mayor o menor valor de ACG corresponde al mayor o menor rendimiento.

En el mismo Cuadro 3 se muestran los valores de ACG de la evaluación de las líneas en Tampico, en donde el 55 % resultaron con ACG negativa, esto significa que quedan descartadas como líneas para mejoramiento de este carácter aprovechando los efectos de genes aditivos. Del grupo con ACG positiva (45 %) sobresalen las líneas 13 (4.431), 24 (3.644), 27 (4.129), 28 (4.340) y 33 (4.284) con los valores más elevados y significativamente diferentes de cero ($P < 0.01$), dichas líneas corresponden a las más productivas de esta localidad. Al igual que en la localidad anterior, el rendimiento y el valor de ACG expresaron una estrecha relación al presentar un coeficiente de correlación igual a la unidad ($r=1$).

Es importante notar que el comportamiento productivo y genético (ACG) de las líneas fue diferente entre las dos

localidades, ya que de todas las líneas sólo la 13 y la 30 coincidieron en ambas localidades. La caída del rendimiento en la localidad de Tampico en relación a la localidad de Delicias era de esperarse, ya que los genotipos fueron desarrollados en ambiente templado que predomina en la región de Delicias. Sin embargo, fue clara la idea de su evaluación en ambiente contrastante a fin de seleccionar aquellos progenitores que formen híbridos competitivos específicos o para ambos ambientes. Lo anterior queda explicado por los resultados mostrados en el ANVA combinado del Cuadro 1, ya que marca diferencias altamente significativas entre localidades de prueba y localidades x líneas. Los valores de ACG combinados de líneas (Cuadro 3) indican que el 40 % de ellas poseen ACG positiva, del cual destacan por su alta diferencia significativa ($P < 0.01$) las líneas 23 (5.716), luego con efectos significativos ($P < 0.01$) las líneas 13 (4.584), 18 (4.576) y 17 (4.486).

ACG de Probadores

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de la ACG de los probadores en ambas localidades y el combinado. Se observó que de los 3 probadores solamente la número uno manifestó una ACG positiva y significativamente diferente ($P < 0.01$); en cambio los otros 2 expresaron una ACG negativa. Esto significa que el probador número uno puede ser un excelente probador para identificar líneas para la formación de sintéticos o bien para mejorar hacia mayor

rendimiento mediante métodos convencionales mencionados anteriormente, indistintamente del ambiente de prueba.

ACE de Mestizos

En el Cuadro 5 se muestran los efectos de ACE de los mejores 5 mestizos de cada probador en las dos localidades y combinado. En Delicias se detectaron al 54.54 % con valores negativos de ACE cuyos datos, no mostrados, fluctuaron entre -0.21 a -9.27 y el 45.46 % restante con ACE positiva. Cabe resaltar que ningún mestizo mostró efectos significativos en la localidad de Delicias. Los mejores valores de ACE del probador uno fueron con las líneas 8, 10, 15, 41 y 42; con el probador dos las líneas, 17, 23, 30, 32 y 34; y en el caso del probador tres, las mejores líneas fueron 13, 22, 28, 31 y 36.

En la localidad de Tampico, de la totalidad de los mestizos el 52 % tuvieron un valor de ACE negativo y el 48 % restante una ACE positiva (datos no mostrados). Los mayores valores de ACE logrados con el probador uno fueron con las líneas 31, 33, 35, 36 y 38; en el probador 2 con 3, 15, 21, 32 y 37 y en el probador 3 con 8, 26, 27, 28 y 29. En este caso en particular ninguna línea se repitió con los 3 probadores.

Las estimaciones de ACE, tomando en cuenta el análisis combinado de ambas localidades, indican que del total de mestizos evaluados el 52.66 % presentaron valores positivos, el restante 47.34 % negativos (datos no

Cuadro 5. Efectos de Aptitud Combinatoria Específica (ACE) para mestizos sobresalientes de chile jalapeño. CEDEL-INIFAP- UAAAN.2006.

Delicias			Tampico			Combinado		
Mestizo	(t h ⁻¹)	ACE	Mestizo	(t h ⁻¹)	ACE	Mestizo	(t h ⁻¹)	ACE
8x1	32.44	5.44	31x1	20.15	3.06 **	6x1	30.02	3.67
10x1	39.82	7.55	33x1	25.19	3.62 **	19x1	28.25	3.45
15x1	37.29	5.37	35x1	20.93	3.09 *	25x1	26.96	3.19
41x1	38.48	5.72	36x1	15.88	1.34	38x1	27.43	4.43
42x1	45.80	5.98	38x1	20.80	3.05 **	39x1	25.93	2.82
17x2	35.12	9.04	3x2	19.42	2.72 **	3x2	30.38	4.23
23x2	31.96	9.13	15x2	17.84	2.72 **	21x2	26.17	4.21
30x2	39.38	6.46	21x2	18.50	2.76 **	24x2	28.49	5.29
32x2	40.65	7.09	32x2	16.32	2.40 **	31x2	24.31	4.81
34x2	39.38	8.05	37x2	18.70	2.00 *	40x2	23.80	4.85
13x3	30.21	6.70	8x3	17.63	3.24 **	10x3	26.74	5.65
22x3	25.42	6.78	26x3	15.52	2.71 **	27x3	24.06	3.68
28x3	38.27	7.94	27x3	22.91	2.98 **	28x3	21.15	3.08
31x3	36.90	4.85	28x3	22.58	2.44 **	29x3	24.26	2.85
36x3	34.46	6.94	29x3	17.79	3.02 **	39x3	22.79	2.76

*, ** Significativamente diferente de cero al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

mostrados). Es importante mencionar que ningún mestizo tuvo diferencias significativas de ACE. Sin embargo, de grupo de interés se puede señalar aquellas con mayor ACE como la 6, 19, 25, 38, y 39 con el probador 1; la 3, 21, 24, 40 y 31, con el probador 2 y finalmente las líneas 10, 27, 28, 29, y 39 con el probador 3.

Es importante indicar que los mejores rendimientos no necesariamente se relacionan con las líneas seleccionadas por el valor alto de ACE, pero vale la pena señalar que genéticamente existe el potencial para combinar mejor y por ende para explotar el vigor híbrido de tales progenitores.

El comportamiento *per se* y los valores de ACE de cada mestizo no guardan una alta asociación, ya que de acuerdo al análisis de correlación los coeficientes fueron 0.57, 0.56 y 0.62 en las localidades de Delicias, Tampico y combinado, respectivamente. Esta correlación permite explicar porqué se observan valores altos, bajos e incluso negativos con un rendimiento alto o bajo; asimismo, que el rendimiento expresado por los mestizos no es indicador de buena ACE.

Heterosis del rendimiento

La estimación de la heterosis de los mejores mestizos o híbridos F_1 evaluados en la localidad Delicias, se muestra en el Cuadro 6. Los mestizos que expresaron heterosis del promedio de los padres, superior a 100 % fueron 4x3, 10x3, 28x3, 30x1, 30x3, 32x1 y 33x3, de éstos, solamente 4x3, 10x3, 33x3, y 30x3 generaron una heterosis respecto al mejor padre, o heterobeltiosis, también superior a 100 %, resultados que concuerdan con lo reportado para *Capsicum* por Singh (1987), Chain (1987) y Takur (1987). Llama la atención que en la mayoría de las combinaciones se encontró el progenitor 3 con ACG negativa; asimismo, que sólo el mestizo 28x3 presentó una ACE positiva (Cuadro 6).

No se observó tendencia alguna que indicara que el valor de la heterosis pudiera ser de utilidad para elegir los mejores progenitores a falta de valores significativos de ACE, ya que su grado de asociación fue bajo ($r=0.50$) indicando que la heterosis se dio principalmente por efectos aditivos más que por efectos de dominancia.

Estos resultados difieren con lo consignado por De Fatima *et al.* (2002) donde la heterosis expresada por los híbridos de frijol fue coherente con la ACE ($r = 0.71$). Falconer (1981) estableció que la heterosis puede originarse de la dominancia de los genes, la diferencia en frecuencias génicas de los progenitores o de la diversidad genética entre ellos.

En la localidad de Tampico (Cuadro 7), del total de mestizos evaluados el 49.17 % produjeron heterosis positiva y el 50.83 % restante heterosis negativa. La heterosis positiva fluctuó de 0.29 % hasta 32 % en las combinaciones 19x1 y 33x1, respectivamente. Los 5 mestizos que

generaron la heterosis más alta fueron 27x3, 28x3, 33x1, 35x1 y 38x1. En este caso están involucrados, consistentemente, los probadores 1 y 3 cuyos valores de ACG fueron positivo y negativo, respectivamente. Con relación a la ACE las combinaciones con mayor heterosis coincidieron con valores positivos y altamente significativos. Aún cuando los mejores mestizos señalan una alta asociación entre ambas variables, al considerar todos los mestizos esta aparente correlación se redujo a 0.31, es decir muy baja y similar a la encontrada en la localidad de Delicias, confirmando que la heterosis estuvo dada principalmente por efectos aditivos más que por efectos de dominancia.

Cuadro 6. Rendimiento de los mestizos más sobresalientes, de su mejor progenitor (MP), el promedio de sus progenitores (PM), heterosis con respecto a su progenitor medio (PM) y a su mejor progenitor (MP). CEDEL-INIFAP- UAAAN. 2006.

Cruza	Rendimiento (t h ⁻¹)			Heterosis (%)	
	Mestizo	PM	MP	PM	MP
4x1	35.51	21.56	26.25	64.66*	35.25
4x3	35.65	15.43	16.88	131.05**	11.30*
5x1	32.44	17.68	26.25	83.49*	23.57
6x1	43.45	26.30	26.36	65.19*	64.86
8x1	42.65	28.60	30.95	49.11*	37.79
10x3	30.21	14.17	14.35	113.23*	110.60*
25x3	38.27	22.93	31.88	66.90*	20.07
28x3	36.90	17.78	21.58	107.53**	71.03
29x2	40.65	24.76	25.92	64.18*	56.83
30x1	43.66	19.84	26.25	120.09**	66.31*
30x3	33.10	13.71	13.99	141.47**	136.60*
31x2	39.38	24.99	26.37	57.59*	49.32
32x1	34.82	17.26	20.54	101.72*	69.57
33x3	34.46	15.57	17.15	121.37**	101.00*
35x3	37.74	22.99	31.99	64.14*	17.95
36x1	43.36	29.14	32.02	48.82*	35.41
39x1	45.80	26.18	26.25	74.98**	74.48*
39x3	35.02	20.04	26.10	74.70*	34.16

*, ** Significativamente diferente de cero al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

Al comparar ambas localidades es muy notoria la diferencia productiva de los mestizos, ya que mientras en Delicias las heterosis máximas del PM y la del MP superaron el 100 %, en Tampico apenas rebasó el 32 %. De todos los mestizos evaluados sólo el conformado por la línea 28 y el probador 1 coincidió productivamente en ambos ambientes. Cabe hacer mención que los ambientes son contrastantes, por lo tanto, es posible que las diferencias productivas tan marcadas sean por interacción genotipo-ambiente a favor del ambiente templado, ya que superó

en 76.55 % a los híbridos de Tampico. Considerando los progenitores, se observó, de igual manera, una diferencia notable pues la media de los progenitores líneas y probadores superaron en 57.84 % y 27.52 % a las líneas y probadores de Tampico, respectivamente. Las diferencias señaladas entre los mestizos y los progenitores fueron corroboradas en el análisis combinado, ya que el ANVA del Cuadro 1 presenta diferencias significativas ($P < 0.01$), primeramente entre ambientes, luego entre ambiente x líneas, ambiente x probadores y ambiente x mestizos.

Cuadro 7. Rendimiento de los mestizos más sobresalientes, de su mejor progenitor (MP), el promedio de sus progenitores (PM), heterosis con respecto a su progenitor medio (PM) y a su mejor progenitor (MP). CESTAM-INIFAP- UAAAN. 2006.

Cruza	Rendimiento (t h ⁻¹)			Heterosis (%)	
	Mestizo	PM	MP	PM	MP
3x2	19.42	16.58	16.87	17.14*	15.12*
5x2	19.93	17.73	19.17	12.43*	3.97
8x3	17.63	15.42	15.80	14.31*	11.60
13x1	21.49	19.09	20.89	12.60*	2.89
18x1	20.44	18.11	18.93	12.91*	8.01
20x2	20.18	17.93	19.57	12.53*	3.10
21x2	18.50	16.10	16.29	14.93*	13.56
24x1	20.95	18.69	20.10	12.08*	4.23
24x2	21.12	18.20	20.10	16.09**	5.08
27x1	21.79	18.94	20.59	15.09**	5.86
27x3	22.91	18.19	20.59	25.95**	11.30
28x1	21.65	19.04	20.80	13.71*	4.10
28x3	22.58	18.30	20.80	23.40**	8.57
29x3	17.79	15.61	15.80	13.92*	12.58
31x1	20.15	16.77	17.29	20.15**	16.59*
33x1	25.19	19.01	20.74	32.48**	21.44**
35x1	20.93	17.15	17.29	22.04**	21.06**
38x1	20.80	17.10	17.29	21.61**	20.33**

*, ** Significativamente diferente de cero al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente.

Conclusiones

El diseño genético Línea x Probador es una buena estrategia para discriminar progenitores y obtener descriptores genéticos confiables. Los valores de ACG y ACE permitieron diferenciar genéticamente las líneas progenitoras de chile jalapeño e identificar, con ello, su mejor estrategia de mejoramiento y aprovechamiento potencial en cada ambiente de prueba. El rendimiento del chile jalapeño es mayormente influenciado por efectos aditivos de los genes. Las líneas, probadores, y mestizos respondieron diferencialmente a los ambientes de prueba, siendo más favorable el ambiente templado de Delicias que el ambiente tropical de Tampico. El chile jalapeño expresó valores significativos de heterosis con respecto

al PM (141.47%) y MP (136.59%). Los mejores mestizos en Delicias fueron 33x3, 10x3, 4x3, y 30x3 y en Tampico los mestizos 27x3, 28x3, 33x1, 35x1 y 38x1.

Literatura Citada

- Acevedo, B. M. A. y P. E. J. Monterverde. 1998. Heterosis y heredabilidad en una población indehiscente de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) de tipo africano. Rev. Fac. Agron. (Maracay) 24: 1-23.
- Ahmed, N., M. Hurra, S. A. Wani and S. H. Khan. 2003. Gene Action and Combining Ability for Fruit Yield and its Component Characters in Sweet Pepper. 22: 55-58. In: Capsicum and Eggplant Newsletter. Turin, Italy.
- Ahmed, N., F. A. Shah, G. H. Zargar and S. A. Wani. 1998. Line x Tester Analysis for the study of combining ability in hot pepper (*Capsicum annum* L.). 17: 38-41. In: Capsicum and Eggplant Newsletter. Turin, Italy.
- ASERCA. Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria. 1998. El chile verde y su trascendencia cultural. Claridades Agropecuarias, 56, 3-17.
- Bartolome, V. I. and G. B. Gregorio. 2000. An Interactive Macro Program for Line x Tester analysis. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines. (<http://www.cgiar.org/irri>).
- Castillo, M. A. y B. M. Nevado. 1980. El método de análisis de varianza y probabilidad de obtener estimaciones negativas de componentes de varianza. Agrociencia 40: 145-180.
- CESTAM. 2002. Paquetes Tecnológicos para la Producción Agrícola en el Sur de Tamaulipas. Documento Técnico para Productores. Campo Experimental Sur de Tamaulipas CIRNE-INIFAP. 53 p.
- Chain, M. 1987. A study of hybrid vigour in chillie (*Capsicum annum* L.). 6: 47-48. In: Capsicum and Eggplant Newsletter. Turin, Italy.
- De Fátima M. C., S. J. Bosco, N. G. E. De Sousa and R. M. A. Patto. 2002. Choice of common bean parents based on combining ability estimates. Genet. Mol. Biol. 25(2): 179-183.
- Delgado, N, y A. Layrisse. 1992. Análisis del cruzamiento dialélico de seis variedades indehiscentes y dos dehiscentes de ajonjolí (*Sesamum indicum* L.) *Agronomía Trop.* 42: 191-209.
- Dudley, J. W. and R. H. Moll. 1969. Interpretation and use of estimates of heritability and genetic variances in plant breeding. Crop Sci. 9: 257-262.
- Franceschetti, U. 1971. Natural cross pollination in pepper (*Capsicum annum* L.). pp: 346-353. In: Proceeding of the Eucarpia Meeting on Genetic and Breeding of Capsicum. Turin, Italy.

- Falconer, D. S. 1981. Introducción a la Genética Cuantitativa. C. E. C. S. A., México D. F., México. 457 p.
- Griffing, B. 1956. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Aust. J. Biol. Sci.* 9:463-493.
- Hallauer, A. R., and J. B. Miranda. 1981. Quantitative Genetics in Maize Breeding. Iowa State Univ. Press. Ames, Ia. 468 p.
- Joshi, S. 1990. Genetics of six quantitative traits in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Capsicum and Eggplant Newsletter* 8-9: 26-27.
- Joshi, V. N., R. B. Dubey and S. Marker. 2002. Combining ability for polygenic traits in early maturing hybrids of maize (*Zea mays* L.). *Indian J. Genet.* 62: 312-315.
- Kempthorne, O. 1957. An Introduction to Genetic Statistics, John Wiley and Sons, New York. pp: 458-471.
- Martínez, Z., G., J. R. A. Dorantes G., A. de la Rosa L., y O. Pozo C. 2005. Efectos genéticos y heterosis en la vida de anaquel del chile serrano. *Rev. Fitotec. Mex.* 28: 327-332.
- Narro, L., S. Pandey, J. Crossa, C. De León and F. Salazar. 2003. Using Line x Tester interaction for the formation of yellow maize synthetics tolerant to acid soils. *Crop Sci.* 43:1718-1728.
- Odland, M. L. and A. M. Porter. 1941. A study of natural crossing in pepper (*Capsicum frutescens* L.). *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 38: 585-588.
- Pozo, C., O. 1983. Estimates of natural cross-pollination in Serrano pepper (*Capsicum annuum* L.). 2: 106-108. *In: Capsicum and Eggplant Newsletter.* Turin, Italy.
- Pozo, C., O. 1984. Situación Actual del Cultivo de Chile en México. *In: J. A. Laborde C. y O. Pozo, C. (eds.) Presente y Pasado del Chile en México.* SARH-INIA. Publicación Especial No. 85. pp 18-25.
- Pozo, C., O. y M. Ramírez M. 2000. Centauro: Híbrido de chile serrano. Memoria XVIII Congreso Nacional de Fitogenética. p. 359.
- Patel, J. A., M. R. Shukla, K. M. Doshi, B. R. Patel and S. A. Patel. 1998. Combining analysis for green fruit yields & yields components in chilli (*Capsicum annuum* L.). 17:34-37. *In: Capsicum and Eggplant Newsletter* Turin, Italy.
- Robinson, P. 1963. Heritability; a second look. p. 609-614. *In: W. D. Hanson and H. F. Robinson (Ed.) Stat. Genetics and Plant Breeding* NAS-NRC.
- Reyes, C., P. 1985. Fitogenotecnia básica y aplicada. AGT Editor, S. A. México. 460 p.
- Senthil, K. P. and J. Ganesan. 2002. Line x Tester for combining ability in sesame (*Sesamum indicum* L.) Sesame and Sawflower Newsletter 17. Institute of Sustainable Agriculture (IAS). Córdoba, Spain.
- Singh, N. K. and A. Kumar. 2004. Combining ability analysis to identify suitable parents for heterotic rice hybrid breeding. *International Rice Research Notes.* Vol 29 :21-22.
- SAS Institute Inc. 1999. SAS Institute Inc, version 8.0. Cary, NC., USA.
- Singh, S. 1987. Results of the combined ability studies in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). 6: 49-50. *In: Capsicum and Eggplant Newsletter,* Turin, Italy.
- Singh, K. R and D. B. Chaudhary. 1977. Biometrical Methods in Quantitative Genetic Analysis. Kalyani Publishers, Ludhiana New Delhi. 288 p.
- Takur, P. C. 1987. Gene Action, an index for heterosis breeding in sweet pepper. 6: 41-42. *In: Capsicum and Eggplant Newsletter,* Turin, Italy.
- Upadhya, M. H. and R. Cabello. CIP Program Report 1999–2000. Lima, Peru. pp:197-206.
- Vencovsky, R., y P. Barriga. 1992. Genética Biométrica no Fitomelhoramento. Sociedade Brasileira de Genética, Ribeirao Preto, Sao Paulo, Brasil. 496 p.
-

Efecto de la Inoculación de Cepas de *Azospirillum* sp. sobre Altura, Biomasa y Contenido de Nitrógeno en Genotipos de Maíz Forrajero

Rosalinda Mendoza Villarreal^{1*}, Sergio Rodríguez Herrera¹, Marco Aurelio Puente Flores² Arnoldo Oyervidez².

¹Departamento de Ciencias Básicas, ²Departamento de Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista. 25315. Saltillo, Coah., México. E-mail: rosalingdamendoza@hotmail.com (*Autor responsable).

Abstract

Forage maize is the main food in the diet of ruminants thus, it is necessary that it has both a nutritious quality, and a high yield; for this reasons it demands a chemical fertilization, as it is traditionally done. Nevertheless, for the time being there exist alternative s of organic fertilization like the biological one; for instance, bacteria of the *Azotobacter* and *Azospirillum* genera, and fungi like *mycorrhizae*. The objectives of this assay were: a) to isolate and to identify strains of *Azospirillum* sp. of three localities and b) to evaluate the effect of the inoculation of seed in two elite lines of forage maize with strains of *Azospirillum* sp. in height and N content in plant. Seed of 2 elite lines of forage maize was used, the CML-384 selected under low conditions of content of N and CML-321 with a normal content of N. The evaluated variables were: height of plant, fresh weight, and dry weight of foliage and root, and N content. An experimental completely randomized design was used. The statistical analysis was performed with the help of the SAS software. Forty strains of *Azospirillum* sp., from three localities: Torreón Coah., Celaya Gto., and Buenavista Coah. Were obtained and isolated, and it was shown that the best strains were numbers 4 and 21, since it is possible to associate them to different types of lines generating an increase in the content of N.

Key words: *Azospirillum*, fertilization, forage, *Zea mays* L.

Resumen

El maíz forrajero es el alimento principal de la dieta de rumiantes por lo cual es necesario que tenga calidad nutritiva y alto rendimiento; para esto se requiere de fertilización química, como se hace tradicionalmente. Sin embargo, actualmente existen alternativas de fertilización orgánica como la biológica, por ejemplo, las bacterias de los géneros *Azotobacter* y *Azospirillum* además de hongos como micorrizas. Los objetivos de este estudio fueron: a) aislar e identificar cepas de *Azospirillum* sp. de tres localidades y b) evaluar el efecto de la inoculación de semilla en dos líneas élite de maíz forrajero con cepas de *Azospirillum* sp. en la altura y contenido de N en planta. Se utilizó semilla de 2 líneas élite de maíz forrajero, la CML-384 seleccionada en condiciones de bajo contenido de N y CML-321 con N normal. Las variables evaluadas fueron: altura de planta, peso fresco y peso seco de follaje y raíz y contenido de N. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial AXB, líneas y cepas, con 2 y 42 niveles respectivamente. Se logró el aislamiento y la identificación de 40 cepas de *Azospirillum* sp. de tres localidades: Torreón Coah., Celaya Gto. y Buenavista Coah. y se demostró que las mejores cepas fueron la 4 y la 21 ya que se pueden asociar a diferentes tipos de líneas provocando un incremento en el contenido de N.

Palabras clave: *Azospirillum*, fertilización, forraje, *Zea maíz* L.

Introducción

La producción de forrajes y granos requiere del manejo de estrategias en los sistemas tradicionales para la alimentación animal, sobre todo para los productores de carne o pie de cría que demandan forraje todo el año para el mantenimiento y producción de los animales.

Anteriormente el maíz forrajero se seleccionaba por el contenido de materia seca sin interesar la calidad nutritiva (Núñez *et al.*, 1999; Peña *et al.*, 2002). Sin embargo, algunos híbridos actualmente utilizados presentan rendimiento de grano y proporción de materia seca altos,

siendo el maíz forrajero la fuente de energía en la alimentación del ganado productor de leche.

Entre los insumos que requiere el cultivo se encuentran los fertilizantes con su respectivo costo, sin embargo para obtener un maíz forrajero de alta calidad es necesario utilizar dosis altas de fertilizantes químicos, que aumentan los costos de producción y pueden contaminar el suelo y los mantos freáticos, dicha contaminación puede afectar a cultivos posteriores y al consumidor.

Una alternativa para disminuir la fertilización química es la biofertilización con microorganismos, los cuales fijan N atmosférico (Bashan *et al.*, 1996) como se ha demostrado con rizobacterias como *Azospirillum* sp y *Pseudomonas ferruginosa* por separado y, en conjunto, en trigo (*Genus triticum*), y lo transforman en formas asimilables para las plantas, éstas a su vez proporcionan la fuente de C para los microorganismos llevando a cabo una asociación favorable para ambos organismos. Las bacterias del género *Azospirillum* han sido aisladas de la superficie de la raíz de una amplia variedad de plantas y de su rizosfera, incluyendo cereales como maíz, trigo, sorgo, arroz, avena, pastos forrajeros, algunas especies de henequén y plantas cactáceas (Michiels *et al.*, 1989). De las especies más estudiadas en maíz se encuentra el *A. brasilense* que crece a una temperatura entre 35 y 37 °C, un pH óptimo entre 5.8 a 6.5 y utiliza ácidos orgánicos para su crecimiento (Eory *et al.*, 1995). Además produce sideróforos y fitohormonas como giberelinas, citocininas y auxinas a partir del triptófano, por lo que se le clasifica como una bacteria promotora del crecimiento vegetal, de aquí su importancia agrícola (Lucangeli y Bottini, 1997).

Mendoza (1986) ha demostrado que cepas de *Azospirillum* sp. provocan cambios sobre el rendimiento y calidad de grano de maíz Lucio Blanco AN-361, comparando estos efectos con los de fertilización química bajo condiciones de invernadero y campo, concluyó que los mejores efectos en la fenología del cultivo (emergencia, floración, altura de planta y madurez fisiológica) fueron aquellos en los que se aplicó *Azospirillum* sp y *Azospirillum brasilense*.

Con la aplicación a la semilla, como formulaciones comerciales, se ha favorecido el amacollamiento, altura de planta, longitud de raíces, peso seco y número de granos Cracogna *et al.* (2003). Canto- Martin *et al.* (2004) inocularon semilla de chile habanero, encontrando una disminución en el tiempo de germinación y un incremento en el número de raíces a una concentración de 1 y 3x 10⁷ UFC mL⁻¹ además Kalpulnik (1996), encontró que existe una asociación no simbiótica en la zona de elongación de la raíz a concentración de 10⁶ a 10⁷ UFC mL⁻¹ incrementándose las raíces laterales favoreciendo la

absorción de agua y nutrientes.

Por lo anterior, los objetivos de este estudio fueron: a) aislar e identificar cepas de *Azospirillum* sp. de tres localidades y b) evaluar el efecto de la inoculación de semilla en dos líneas élite de maíz forrajero con cepas de *Azospirillum* sp. en la altura y contenido de N en planta.

Materiales y Métodos

Aislamiento de cepas e inoculación de semilla

Se colectaron plántulas de maíz y trigo con raíz, en cada localidad; Torreón, Coah.; Celaya, Gto. y Buenavista, Coah., México. De las raíces de las plántulas colectadas, se aislaron 300 cepas de *Azospirillum* sp en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por medio de una solución de NaCl al 0.85 %, se eliminaron las que no crecieron en medio NFb y rojo congo (Rodríguez-Cáseres, 1982), la tinción de Gram (-) y movilidad (+). Se clasificaron 40 cepas nativas como *Azospirillum*, además se utilizaron 4 cepas comerciales de *Azospirillum brasilense* como testigo (Cuadro 1). Una vez aisladas se colocaron dentro de un sustrato orgánico líquido, previamente disuelto con agua esterilizada, y se incubaron a 30 ± 1 °C por 72 h. Después se cuantificó la concentración de UFC mL⁻¹ por el método de dilución y se diluyó con agua esterilizada hasta obtener 10⁹ UFC mL⁻¹.

Se aplicó 1 mL de biofertilizante por gramo de semilla de maíz y se dejaron reposar por 2 h para que la semilla absorbiera la mayor cantidad de inóculo.

Cuadro 1. Cepas aisladas e identificadas como *Azospirillum* sp. de diferente origen.

Origen	Número de Cepas
Torreón, Coah.	1-17
Celaya, Gto.	18-26
Saltillo, Coah	31-40
Comercial	27-30

Desarrollo de plántulas de maíz

Se sembraron semillas de maíz, bajo condiciones de invernadero, inoculadas con la bacteria, en macetas de plástico, con suelo de bosque previamente esterilizado. Se utilizó semilla de 2 líneas élite de maíz forrajero, la Línea 1 seleccionada para N normal CML-321(Kikafunda *et al.*, 2001) y la Línea 2, seleccionada con bajo contenido de N CML-384 (Worku *et al.*, 2001). Una vez realizada la inoculación se sembraron 4 semillas en cada maceta. Se utilizaron 3 repeticiones por cepa y 2 líneas de maíz forrajero, con 240 macetas en total. Se tomaron lecturas de altura de planta (AP) cada semana durante un mes.

Posteriormente, las plántulas se retiraron del invernadero y se llevaron al laboratorio donde se separaron en raíz y follaje, y se pesaron en fresco en una balanza analítica. El peso se registró por separado, como peso fresco de raíz (PFR); y follaje (PFF). Después las plantas se secaron al sol durante 2 semanas para eliminar humedad, las muestras se volvieron a pesar y se registraron los datos como peso seco de raíz y follaje (PSR y PSF); finalmente se obtuvo la biomasa en cada tratamiento.

Determinación del contenido de N

Al mes de establecido el experimento se cortaron las plantas de cada tratamiento y repetición, se pesaron por separado la raíz y tallo en fresco, se colocaron en la estufa a 70 °C hasta eliminar el exceso de humedad, después se volvieron a pesar para obtener el peso seco de cada parte de la planta, cada muestra fue molida, y se determinó el contenido de N por el método de micro-Kjeldahl (AOAC, 1980).

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial AXB, líneas y cepas, con 2 y 42 niveles respectivamente. Los análisis se realizaron con ayuda del software estadístico SAS.

Resultados y Discusión

La línea CML-321, presentó mayor peso fresco y seco ($P \leq 0.01$), lo cual sugiere que el genotipo, fue la causa del incremento, sin embargo, la línea CML-384 fue seleccionada con bajo contenido de N (Cuadro 2). Lo anterior coincide con estudios realizados en Etiopía con

cepas nativas 22, 20 y 18 (procedentes de Celaya, Gto.) alcanzaron la mayor altura con respecto a los testigos comerciales ($P \leq 0.05$), sin embargo, la Línea CML-384 presentó baja altura (Cuadro 3). Algo similar ocurrió con la Cepa 17 procedente de Torreón, Coah., ya que en la línea 1 provocó una mayor altura y en la línea 2 baja altura ($P \leq 0.05$). Esto puede deberse a la dificultad de las cepas para expresar su genotipo y asociarse a las raíces de las líneas en un ambiente distinto al de su origen.

Por otro lado, la Cepa 1, procedente de Torreón Coah., provocó mayor altura en las líneas 1 y 2 respectivamente, además de presentar alturas superiores para los testigos y las cepas comerciales en ambas líneas ($P \leq 0.05$). Esto puede deberse a que *Azospirillum* sp. tiene la capacidad de producir auxinas, citocininas y giberelinas en medios de cultivo, además de que el ácido indolacético producido por las bacterias puede modificar el contenido de fitohormonas de las plantas inoculadas conduciendo a su estimulación y crecimiento, como lo describen estudios anteriores (Bar y Okon, 1992; Lucangeli y Bottini, 1997).

Efecto de la Cepa

El Cuadro 4 muestra el contenido de N en plántulas de maíz. Las mejores cepas fueron la 25, 37, 4, 21 y 5; cada una de ellas presentó valores estadísticamente iguales que el testigo y las cepas comerciales ($P \leq 0.05$). En relación al testigo, las Cepas 25 y 37 presentaron una diferencia de 0.72 %. Lo cual indica una amplia diferencia para efectos de calidad de forraje. Las Cepas 4 y 5 provienen de Celaya Gto., la 21 y 25 de Torreón Coah., y la 37 de Buenavista Coah.

Cuadro 2. Peso fresco y peso seco de follaje y raíz de las líneas de maíz CML-321 y CML- 384, inoculadas a semilla con 40 cepas de *Azospirillum* sp.

Línea	PFF		PSF		PFR		PSR	
	Media		Línea	Media	Línea	Media	Línea	Media
CML-321	16.79a		CML-321	1.65a	CML-321	3.18a	CML-321	0.72a
CML-384	11.79b		CML-384	1.26b	CML-384	2.19b	CML-384	0.47b

Comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.01$); PFF = peso fresco de follaje; PSF = peso seco de follaje; PFR = peso fresco de raíz; PSR = peso seco de raíz.

líneas de maíz seleccionadas con bajo nivel de fertilización las cuáles tampoco respondieron al nivel de N (Worku *et al.*, 2001).

Efecto de la interacción entre la cepa y la línea en altura de planta

La interacción entre la cepa y la línea presentó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$). Las plántulas de la línea de maíz CML-321, cuya semilla fue inoculada con las

Estas cepas provienen de ambientes climatológicos distintos, sin embargo poseen características que hacen posible la fijación de N disponible en las líneas elite utilizadas.

Al igual que en este experimento, en estudios previos se ha demostrado que *Azospirillum* sp. aumenta el contenido de N, P, K y otros minerales en las plantas inoculadas. (Avivi y Feldman, 1982; Lin *et al.*, 1983; Murthy y Ladha, 1988; Pacovsky, 1985 y Caballero-Mellado *et al.*, 1992).

Cuadro 3. Altura de planta en plántulas de líneas de maíz élite CML- 321 y CML- 384, cuya semilla se inoculó con 40 cepas de Torreón (1-17), Celaya, Gto.(18- 26), Buenavista, Coah. (27-40), y cepas comerciales antes de la siembra.

Línea CML-321		Línea CML-384	
Cepa	Altura	Cepa	Altura
22	66.71a	1	63.98a
20	66.42a	2	63.72b
18	65.83a	3	63.51c
1	64.1a	4	62.77d
17	64.02a	5	61.39e
26	62.21a	6	59.63f
39	61.91a	7	59.5g
21	61.46a	8	59.38h
com28	61.39a	9	59.34h
37	61.06a	10	58.17h
com29	60.92a	11	57.49h
15	60.55a	12	56.67h
35	60.51a	13	56.65h
10	59.8a	14	56.56h
23	59.43a	15	56.32h
36	59.36a	16	55.64h
19	59.3a	17	55.14h
24	59.27a	18	55.02h
com30	59.24a	19	54.95h
7	58.87a	20	54.88h
9	58.63a	21	53.53h
16	58.17a	22	53.06h
2	58.13a	23	53.03h
4	57.83a	24	51.14h
33	56.39a	25	51.01h
Testigo 41	56.17 ^a	26	50.88h
31	54.95a	com27	50.63h
8	54.9a	com28	50.24h
32	54.27a	com29	49.45h
11	53.61a	com30	48.88h
6	53.5a	31	48.74h
38	53.42a	32	48.71h
12	51.62a	33	48.58h
34	51.53a	34	48.12h
3	50.8a	35	46.93h
com27	50.19a	36	46.17h
25	47.47a	37	45.81h
13	41.36a	38	45.31h
5	41.03a	39	43.25h
14	34.14b	40	41.91h
Testigo		42	39.48h

Comparación de medias de Tukey (P<0.05)

Cuadro 4. Contenido de N en plántulas de líneas de maíz élite CML- 321 y CML- 384, cuya semilla se inoculó con 40 cepas de Torreón (1-17), Celaya, Gto.(18- 26), Buenavista, Coah. (27-40) y cepas comerciales antes de la siembra.

Línea CML-321		Línea CML-384	
Cepa	N (%)	Cepa	N (%)
253.61a	22	3.12a	
373.61a	36	3.12a	
4	3.54a	7	3.11a
213.50a	18	3.10a	
5	3.46a	28 com	3.07a
203.44a	32	3.03a	
6	3.43a	23	3.02a
8	3.42a	2	3.01a
113.40a	16	2.98a	
403.35a	34	2.92a	
153.31a	38	2.92a	
143.28a	39	2.91a	
133.26a	41	2.89a	
243.26a	30 com	2.84a	
27com	3.25a	26	2.84a
9	3.25a	1	2.70a
3	3.23a	17	2.64a
103.18a	33	2.61a	
193.16a	29 com	2.56a	
123.14a	31	2.33b	
		35	2.25b

Comparación de medias de Tukey (Pd^{''} 0.05)

Efecto de la interacción entre la línea y la cepa en contenido de N

Para la línea CML-321 seleccionada con bajo contenido de N, la cepa 25 procedente de Celaya Gto., fue la mejor, ya que el contenido de N en plántulas fue 3.84%, además estadísticamente igual (Pd^{''} 0.05) que la cepa testigo, con un contenido normal del 2.62% de N y que la mejor de las cepas comerciales 3.33 % (Cuadro 5). La línea CML-384 presentó un contenido de N inferior al de la cepa 3 procedente de Torreón Coah., la cual presentó el mayor contenido 3.64 %. Algo similar ocurrió con las cepas 20, 24 (procedentes de Celaya Gto.), 8 y 6 (procedentes de Torreón Coah.). Lo cual indica que estas cepas son individuos especializados para asociarse con un tipo de línea en específico. Tanto la cepa 4 como la 21, lograron asociarse de manera similar con cada línea, lo cual puede deberse a que son razas que pueden asociarse a líneas con distintos genotipos.

Cuadro 5. Contenido de N en plántulas de líneas de maíz élite CML- 321 y CML- 384, cuya semilla se inoculó con 40 cepas de Torreón (1-17), Celaya, Gto. (18- 26), Buenavista, Coah. (27-40) y cepas comerciales antes de la siembra.

Línea CML-321		Línea CML-384	
Cepa	N (%)	Cepa	N (%)
25	3.84a	3	3.64a
8	3.68a	5	3.57a
20	3.65a	14	3.57a
4	3.64a	11	3.54a
21	3.59a	15	3.49a
6	3.56a	4	3.43a
24	3.54a	21	3.42a
36	3.42a	com27	3.38a
5	3.36a	25	3.37a
com28	3.33a	9	3.36a
13	3.3a	40	3.35a
19	3.29a	22	3.32a
11	3.26a	23	3.30a
17	3.24a	6	3.30a
37	3.22a	10	3.29a
18	3.19a	2	3.28a
7	3.17a	20	3.23a
9	3.15a	39	3.22a
16	3.15a	13	3.22a
12	3.14a	8	3.16a
15	3.13a	12	3.15a
com27	3.12a	Testigo 42	3.15a
32	3.12a	7	3.06a
10	3.06a	34	3.06a
38	3.06a	1	3.05a
35	2.35b	17	2.17a
33	2.34b	35	2.15a
com29	2.11c	31	2.13a
	2	37	2.01a
3	2.82a	32	2.95a
34	2.79a	33	2.93a
26	2.77a	26	2.91a
23	2.74a	com30	2.88a
2	2.74a	com28	2.82a
Testigo 41	2.62a	16	2.82a
39	2.6a	36	2.81a
31	2.52a	38	2.79a

Comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

Conclusiones

Se logró el aislamiento e identificación de 40 cepas de *Azospirillum* sp. de tres localidades: Torreón Coah., Celaya Gto. y Buenavista Coah. Las mejores cepas fueron la 4 y la 21 ya que se pueden asociar a diferentes tipos de líneas de maíz, provocando un incremento en el contenido de N.

Literatura Citada

- AOAC. 1980. Official methods of analytical chemistry. 13th edition. Washington, D.C. USA.
- Avivi, Y., and M. Feldman. 1982. The response of wheat to bacteria of the genus *Azospirillum*. Isr. J. Bot. 31:237-245.
- Bar, T., and Y. Okon. 1992. Tryptophan conversion to indole-3-acetic acid via indole-3-acetamide in *Azospirillum brasilense* Sp7. Can. J. Microbiol. 39:81-86.
- Bashan, Y.; G. Holguin; R. Ferrera-Cerrato. 1996. Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos I. *Azospirillum*. Terra 14 (2): 159-193.
- Caballero-Mellado, J., M. G. Carcaño-Montiel, and M. A. Mascarúa-Esparza. 1992. Field inoculation of wheat (*Triticum aestivum*) with *Azospirillum brasilense* under temperate climate. Symbiosis 13:243-253.
- Canto-Martín, J.C., Medina-Peralta S. y Morales Avelino. D. 2004. Efecto de la inoculación con *Azospirillum* sp. en plantas de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacquin). Tropic. Subtropic. Agroecosyst. 4: 21 – 27
- Cracogna, M. F., Iglesias M. C., Díaz I., Gonzáles N. y Carvajal M. L. 2003. Utilización de *Azospirillum* y bacterias solubilizadoras de fósforo en el cultivo de trigo. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Resumen: A-045
- Eory, V.J., Momo, F.R., Alvarez, M. 1995. Desarrollo y sobrevivencia de *Azospirillum* en la raíz y rizósfera del maíz a diferentes niveles de acidéz. Rev. Argent. Microbiol. 27(2):99-105.
- Kalpulnik, Y. 1996. Nonsymbiotic nitrogen-fixing soil microorganisms. In: Plant roots, the hidden half. Y. Waisel, A. Eshel and U. Kafkafi. Editors Marcel Dekker, Inc. New York. p. 757-767.
- Kikafunda, J., Kyetere, D.T., Bigirwa, G., Imanowa, I. and Nakayima, A. 2001. Response of maize varieties to nitrogen: selection for N-use efficiency in Uganda. Seventh eastern and southern Africa regional maize conference. p 233-240.
- Lucangeli, C. and Bottini, R. 1997. Effects of *Azospirillum* spp on endogenous gibberellins content and growth of maize (*Zea mays* L.) treated with uniconazole. Symbiosis 23(1):63-72.

- Michiels, K., Vanderleyen J, Gol A. V. 1989. *Azospirillum*-plant root associations: A review. Biol. Fert. Soils 8:356-368.
- Mendoza V. R. 1986. Respuesta del maíz (*Zea maíz* L) variedad Lucio Blanco (AN-361) a la inoculación de *Azospirillum lipoferum*, *Azospirillum brasilense* y *Azospirillum* sp. en Derramadero Coahuila. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. 81
- Murthy, M. G., and J. K. Ladha. 1988. Influence of *Azospirillum* inoculation on the mineral uptake and growth of rice under hydroponic conditions. Plant Soil 108:281-285.
- Núñez, H.G., E. F. Contreras G, R. Faz C y R Herrera. 1999. Selección de híbridos para obtener mayor rendimiento y alto valor energético en maíz para ensilaje. In: Componentes tecnológicos para la producción de ensilados de maíz y sorgo. SAGAR-INIFAP-CIRNOC-CELALA. 2-5
- Pacovsky, R. S., E. A. Paul and G. J. Bethlenfalvay. 1985. Nutrition of sorghum plants fertilized with nitrogen or inoculated with *Azospirillum brasilense*. Plant Soil 85:145-148.
- Peña, R. A., G. Núñez H y F. Gonzáles C. 2002. Potencial forrajero de poblaciones de maíz y relación entre atributos agronómicos con la calidad. Téc. Pecu. Mex. 40:215-228
- Rodríguez-Cáceres, E. 1982. Improved medium for isolation of *Azospirillum* spp. Appl. Environ. Microbiol. 44:990-991.
- Worku, M., Tuna, H., Abera, W., Wolde, L., Diallo, A., Afriyie, T. S., Guta, A. 2001. Developing low N tolerant maize varieties for mid altitude subhumid agro-ecology of Ethiopia. Seventh eastern and southern Africa regional maize conference. p197-201.
-

Uso de Rizobacterias para el Control de Hongos Fitopatógenos y Promoción de Crecimiento en Plantas

Catalina Chávez Betancourt¹, Víctor Olalde Portugal², Abiel Sánchez Arizpe¹, Emilio Padrón Corral³ y Alberto Flores Olivas¹.

¹Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista. 25315. Saltillo, Coah., México. E-mail: catalinitachb@hotmail.com (*Autor responsable). ²Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (Unidad Irapuato). 36500. Apto. Postal 629, Irapuato, Gto., México. ³Centro de Investigación de Matemáticas Aplicadas, Unidad Camporredondo s/n, Edificio "S". 25280. Saltillo, Coah., México.

Abstract

Two bacteria strains were isolated of apple and vanilla rizósfera and was denominated (LPM1) and (LPM2) respectively; they were identified as *Bacillus subtilis* using an on-line biological system and the polymerase chain reaction technique, using the primers G-849 5' GCATATCGGTGTTAGTCCCGTCC 3' and G-850 5' TCGCTAGTAATCGCGGATCAGC 3'. They were determined characteristic as time of generation in two means of cultivations, infusion potato agar (IPA) and infusion potato agar sucrose (IPAS), being observed bigger cellular growth in IPAS and the time of generation of each bacteria was shorter with 0.74 h in IPAS that in IPA, where its time was 1.18 h. Difference was observed in the sensibility to antibiotics on the part of the stumps. In the thin layer chromatography the bands were obtained that faced with *Fusarium* sp. they reached 39.42 inhibition percent. *B. subtilis* produced siderophore like an action mechanism to inhibit mushrooms phytophathogens. The two stumps LPM1 and LPM2 showed enzymatic activity as proteasas, amylasas and casein. The evaluation of antagonism *in vitro* against *Fusarium* sp., *Verticillium* sp., *Cephalosporium* sp. and *Dematophora* sp., I reach an average of 26.51 inhibition percent for both stumps, where LPM1 obtained bigger effect with 39.3 percent against *Verticillium* sp. Also, the *B. subtilis*, presented capacity to promote the sorghum development, reaching bigger longitude and weight radicular. LPM1 stimulated but the growth of Sorghum and bean, showing superior values in longitude, weight radicular and fresh weight, although he/she behaved statistically similar to the treatment with LPM2.

Key words: *Bacillus subtilis*, PCR, Rhizosphere

Resumen

Se aislaron dos bacterias de rizósfera de manzana y vainilla, denominadas (LPM1) y (LPM2) respectivamente, se identificaron como *Bacillus subtilis* usando un sistema biológico computarizado y la técnica de reacción en cadena de la polimerasa, utilizando los oligos G-849 5' GCATATCGGTGTTAGTCCCGTCC 3' y G-850 5' TCGCTAGTAATCGCGGATCAGC 3'. Se determinaron características como tiempo de generación en dos medios de cultivos, infusión papa agar (IPA), e infusión papa agar sacarosa (IPAS), observándose mayor crecimiento celular en IPAS y el tiempo de generación de cada bacteria fue más corto con 0.74 h en IPAS que en IPA, donde su tiempo fue 1.18 h. Se observó diferencia en la sensibilidad a antibióticos por parte de las cepas. En la cromatografía en capa fina se obtuvieron bandas que, enfrentadas con *Fusarium* sp. alcanzaron un 39.42 % de inhibición. *B. subtilis* produjo sideróforos como un mecanismo de acción para inhibir hongos fitopatógenos. Las dos cepas LPM1 y LPM2 mostraron actividad enzimática como proteasas, amilasas y caseína. La evaluación de antagonismo *in vitro* contra *Fusarium* sp., *Verticillium* sp., *Cephalosporium* sp. y *Dematophora* sp., alcanzó un promedio de 26.51 % de inhibición por ambas cepas, donde LPM1 obtuvo mayor efecto con 39.3 % contra *Verticillium* sp. Además, los *B. subtilis*, presentaron capacidad para promover el desarrollo de sorgo, alcanzando mayor grosor, longitud y peso radicular. LPM1 estimuló mas el crecimiento de sorgo y frijol, mostrando valores superiores en longitud, peso radicular y peso fresco, aunque se comportó estadísticamente similar al tratamiento con LPM2.

Palabras clave: *Bacillus subtilis*, PCR, rizosfera

Introducción

Las rizobacterias son bacterias benéficas del suelo, que al asociarse con las plantas les permite aumentar su crecimiento y desarrollo; esta estimulación en el crecimiento puede ser debido a la protección que ejercen contra otros organismos del suelo que causan enfermedades, o pueden incrementar el crecimiento por la producción de algún metabolito (Hernández *et al.*, 2003).

Debido a que la rizósfera ofrece la primera línea de defensa contra el ataque de patógenos, se considera que los microorganismos que crecen allí son excelentes para usarse en programas de control biológico, pues el amplio espectro de actividad antagonica de varios microorganismos contra patógenos de las plantas las hace que éstas sean buenos candidatos en el manejo integrado (Podile y Prakash, 1996).

Un gran número de diferentes bacterias de vida libre pueden ser consideradas como cepas de rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR, por sus siglas en inglés), dentro de éstas ha sido reportado que especies del género *Bacillus* y *Pseudomonas* promueven el crecimiento de plantas de diferentes cultivos, tales como trigo, maíz y canela (Abbass y Okon, 1993; Berge *et al.*, 1990; Hong *et al.*, 1991).

Entre los mecanismos de acción de las (PGPR) y de acuerdo a Kloepper *et al.* (1989), las bacterias promotoras de crecimiento pueden tener un impacto favorable sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas por dos vías diferentes: indirectas y directas (Bloemberg y Lugternberg, 2001); entre los mecanismos utilizados en la promoción indirecta se encuentran los relacionados con aspectos de control biológico (Hernández y Charlloux, 2001; Glick *et al.*, 1999a) son, secreción de sideróforos, síntesis de antibióticos, síntesis de cianidina, hidrólisis de ácido fusárico, síntesis de enzimas, tales como quitinasas y β -1,3-glucanasas, competencia por nutrientes; y entre los mecanismos de acción de las PGPR en la promoción directa del crecimiento de plantas están: Fijación de nitrógeno (Strenhoudt y Vanderleyden, 2000), incremento en la disponibilidad de minerales, síntesis del ácido indolacético, giberelinas y citocininas (Bari y Okin, 1993; Cassan *et al.*, 2001; García *et al.*, 2001), y regulación de niveles de etileno por acción de la enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato desaminasa (Shah *et al.*, 1998; Belimov *et al.*, 2002).

Es por todo esto que este trabajo tuvo como objetivo aislar, identificar, caracterizar y evaluar el efecto antagonico y promotor de crecimiento, de dos bacterias aisladas de rizósfera de vainilla y manzano contra cuatro hongos asociados a la pudrición radical del manzano.

Materiales y Métodos

Material biológico

Rizobacterias. Como cepas de referencia, se utilizaron las bacterias *Bacillus subtilis* Beb 8.0, *B. subtilis* Beb 13.0 y *Pseudomonas putida*, las cuales fueron proporcionadas por el laboratorio de Bioquímica Ecológica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) Unidad Irapuato-Guanajuato. Se estudiaron dos bacterias antagonicas aisladas de la rizósfera de manzano (LPM 1) y vainilla (LPM 2) en Coahuila y Veracruz, México respectivamente.

Hongos Fitopatógenos. Se realizaron aislamientos de algunos patógenos de raíces dañadas de árboles de manzano en el estado de Coahuila, México. Para lo cual, se tomaron fragmentos de raíces, y se lavaron y desinfectaron con hipoclorito de sodio. Cada fragmento de 1 cm se sembró en medio papa dextrosa agar (PDA). Cada aislado se identificó hasta género.

Con estos aislados se realizaron las pruebas de patogenicidad, para ello, se preparó un concentrado de esporas, colocando un explante de cada hongo de 5 mm de diámetro en un tubo de ensayo con 9 mL de agua destilada estéril; los tubos se agitaron durante 1 min en un agitador eléctrico (Vortex-Genie). Enseguida, con una micropipeta se tomó una alícuota de 1 mL de la suspensión conidial y se depositó en el hematocitómetro para realizar el conteo de esporas y ajustar a una concentración de 1×10^5 conidias/mL.

De esta suspensión se tomó 1 mL y se aplicó directamente a la raíz de árboles jóvenes de manzano de 1.20 m de altura; y se esperó a que se presentaran los primeros síntomas, para reaislar los hongos y corroborar los postulados de Koch.

Estudios de antagonismo *in vitro*. Se utilizaron los aislamientos de *Bacillus subtilis* Beb 8.0, *B. subtilis* Beb 13.0, *P. putida*, la cepa de vainilla (LPM 2) y cepa de manzano (LPM 1). En el centro de las placas con PDA, se sembró un explante de 5 mm de diámetro de cada uno de los hongos aislados; alrededor del explante, a una distancia de 30 mm, se sembraron por picadura cuatro puntos con cada una de las bacterias antagonicas. Las bacterias se incubaron a 25 °C durante siete días y al término de este tiempo se midió el diámetro del halo de inhibición.

Los datos se analizaron bajo un diseño completamente al azar y se realizó, además, una prueba de comparación de medias Tukey al 1% de significancia, con el programa estadístico de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Caracterización de rizobacterias

Para la caracterización de estas cepas, se realizaron diferentes pruebas para su identificación.

Antibiograma. Las bacterias se sembraron en matraces de 250 mL, con 50 mL de caldo de infusión de papa agar (IPA), se incubaron en agitación a 30 °C durante 24 h. Después de la incubación se tomaron 0.5 mL del inóculo y se colocaron en una caja petri con IPA, el inóculo se distribuyó homogéneamente en toda la caja. Después se colocaron equidistantes sensibilizadores de los siguientes antibióticos marca Bio-RAD. SA: Amikacina 30 mcg, Ampicilina 10 mcg, Cefalotina 30 mcg, Ceftriaxona 30 mcg, Cloranfenicol 30 mcg, Dicloxacilina 1 mcg, Enoxacina 10 mcg, Eritromicina 15 mcg, Gentamicina 10 mcg, Netilmicina 10 mcg, Penicilina 10 U y Timetoprin-Sulfametaxazol 25 mcg, dichas cajas se incubaron a una temperatura de 28 – 30 °C durante 24 h. Después de la incubación se midió el halo de inhibición del crecimiento bacteriano.

Determinación del crecimiento bacteriano. Las dos rizobacterias aisladas, de manzana (LPM1) y vainilla (LPM2), se cultivaron en matraces Erlenmeyer de 125 mL conteniendo 50 mL de medio infusión de papa, incubándolas en agitación a una temperatura de 30 °C durante 24 h; posteriormente en matraces de 125 mL, conteniendo 30 mL de medio IPA y medio IPAS, fueron inoculados con 1 mL de suspensiones celulares ajustadas a una densidad poblacional de 2.1×10^7 UFC/mL para *B. subtilis* LPM1 y de 1.8×10^7 UFC/mL para *B. subtilis* LPM2.

El crecimiento celular se determinó por turbidimetría a 535 nm, realizando las lecturas cada 2 h (tiempo 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) durante 12 h. Para cada una de las bacterias se estableció una relación densidad óptica (absorbancia a 535 nm), contra densidad poblacional (UFC/mL). La correlación densidad óptica se realizó colocando 1 mL del cultivo bacteriano en las celdas del espectrofotómetro para así medir su turbidez a 535 nm, esta medición se realizó para cada uno de los tiempos y bacterias. La determinación del número de UFC/mL se hizo utilizando el equipo Automated Spiral Plater, el cual siembra las bacterias en los medios IPA e IPAS en forma de espiral, se realizaron diluciones seriadas de cada uno de los tiempos y bacterias para posteriormente incubarlas a 30 °C durante 24 h para así realizar el conteo de colonias por mL. Se determinó el tiempo de generación.

Presencia de sideróforos. Se realizó sembrando las bacterias por picadura en cajas petri conteniendo medio de B de King, después se incubaron a 28 – 30 °C durante 24 h. Después de la incubación se agregó 1 mL del reactivo de Chrome azurol S 4 mM (CAS), dejando las cajas en

reposo durante 1 min, al término de este tiempo se observó el cambio de color azul a anaranjado, lo que indicó la presencia de sideróforos.

Caracterización del compuesto antagónico. De los cultivos bacterianos utilizados para determinar el crecimiento de las bacterias, una vez transcurrido el tiempo para alcanzar la fase estacionaria, se tomaron 30 mL de la suspensión y los sobrenadantes de estos cosechados por centrifugación se filtraron y al sobrenadante estéril se le adicionó etanol al 80 % (v/v) para concentrar la muestra hasta un volumen final de 5 mL por medio de un Rotovapor RE 111 (Buchii 461) a 60 °C. Este extracto concentrado del tiempo 12 h de cada una de las bacterias en los 2 medios se utilizó para realizarles cromatografía en capa fina en donde se aplicó en placas de 20 x 20 cm, cubiertas con una capa de sílice (Silica Gel 606, Merk) de 0.5 mm de espesor. Las placas fueron desarrolladas con etanol: agua (2:1 v/v) y mezcla de cloroformo: metanol: agua (65:25:4 v/v). Las bandas fueron visualizadas con luz UV y reveladas con ninhidrina al 2 %. Posteriormente se rasparon las bandas obtenidas y se diluyeron en etanol al 80 %, se mezclaron y se centrifugaron a 3.000 rpm durante 2 min recuperando el sobrenadante y eliminando la pastilla, este procedimiento se repitió tres veces para eliminar así los restos de la sílica gel, teniendo ya el sobrenadante, se concentraron las bandas en el rotavapor hasta obtener un volumen de aproximadamente 1,5 mL; este sobrenadante concentrado se utilizó para determinar la actividad antagónica utilizando la técnica de placa envenenada contra *Fusarium* sp.

Actividad enzimática. Para determinar la actividad enzimática de las bacterias se prepararon los siguientes medios: amilasas; el medio se preparó en dos partes A) 1 % de almidón se disolvió en 50 mL de regulador de fosfatos pH 6.8 50 mM en baño maría, B) 5 % de agarosa se disolvió en 50 mL de regulador de fosfatos pH 6.8 50 mM. Ya disueltas estas partes, se mezclaron y se vaciaron en las cajas petri, se dejó solidificar y se colocaron 10 µL del cultivo puro de 8 h de cada una de las bacterias, se incubaron por 2 h a 37 °C. Después de la incubación se colocaron las cajas en presencia de vapores de yodo. Proteasas: esta prueba también se prepara en dos partes; A) 1 % de gelatina disuelta en 50 mL de regulador de fosfatos pH 6.8 50 mM en baño de maría. B) 0.5 % de agarosa disuelta en 50 mL de regulador de fosfatos pH 6.8 50 mM, disueltas estas dos partes se mezclan y se vacían en cajas petri en capa delgada. Ya solidificadas, se colocaron 10 µL del cultivo puro de 0 h de cada una de las bacterias. Se incubaron 2 h a 37 °C, al término de este tiempo se le adicionó el colorante de Coomassie y se procedió a leer la prueba. Caseína: se preparó en dos partes, A) 0.25 % de caseína se disolvió en 50 mL de tris 50 mM pH 8.0, en baño maría, B) 0.5 % de agarosa se disolvieron

en tris 50 mM pH 8.0. Ya disueltas las partes se mezclaron y se vaciaron en las cajas petri, después de solidificar se colocaron 10 µL de las cepas bacterianas, se incubaron por 2 h a 37 °C y finalmente se les adicionó colorante de azul de Coomasie para leer la prueba.

Identificación de cepas bacterianas antagónicas. La identificación de las bacterias antagonistas aisladas de la rizósfera de vainilla (LPM 2) y raíz de manzano (LPM 1) se realizó mediante las pruebas bioquímicas para bacterias Gram positivas (+) que indica el sistema biológico computarizado Microlog System, Release 4.2, se sembraron las bacterias en medio BUG (medio de crecimiento universal Biolog) por estría y se incubaron a 30 °C durante 24 h, posteriormente se tomó una asada de la bacteria y se mezcló con el fluido de inoculación hasta obtener una turbidez estándar de 28 % T igual al control, las placas se inocularon con 150 µL de cada bacteria en cada uno de los pozos, los cuales son 95 fuentes de carbono diferentes, se incubaron a 30 °C durante 16 – 24 h, haciendo las lecturas de cada uno de estos tiempos. La identificación a nivel molecular se realizó mediante la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), sembrando las bacterias en cajas petri con medio LB por estría cruzada, incubándolas a 37 °C por no más de 18 h, al cabo de este tiempo se resuspendieron las colonias en 50 µL de agua ampollita, de este cultivo se inoculó un matraz de 125 mL con 10 mL de medio LB el cual se incubó a 37 °C en agitación por no más de 18 h; se tomaron alícuotas de 50 µL y se centrifugaron por 1 min a 12.000 rpm, se eliminó el sobrenadante y se adicionó 10 µL de agua de ampollita; estas alícuotas se congelaron a – 70 °C con hielo seco-etanol por 30 s e inmediatamente se pasaron a 65 °C por 30 s para descongelar, este procedimiento se repitió tres veces, se tomó una alícuota de 1 µL para la reacción de PCR para obtener un volumen total de 25 µL. 22 µL de Platinum Super Mix, 1 µL de aproximadamente 100 ng del oligo G-849 5' GCATATCGGTGTTAGTCCCGTCC 3' y 1 µL del oligo 2. G-850 5' TCGCTAGTAATCGCGGATCAGC 3' elaborados por la compañía Genosys, más 1 µL de la muestra. El programa utilizado en el termociclador fue: 1.94 °C por 8 min, 2.94 °C por 30 s, 3.50 °C por 30 s, 4. 72 °C 1 min, 5. ciclo 2 al 5, 8 veces., 6.94 °C, 30 s, 7.58 °C, 30 s, 8.72 °C 1min 45 s o 2 min, 9. ciclo 6 al 9, 22 veces, 10.72 °C por 8 min, 11.4 °C. Al término de la reacción se procedió a correr el producto del PCR en gel de agarosa al 2 %, se utilizó un control positivo *B. subtilis* PY.

Efecto de rizobacterias sobre el crecimiento vegetativo de frijol y sorgo. Se realizó en cámara bioclimática, en donde se desinfectaron las semillas de frijol y sorgo, las cuales se sembraron en macetas de 1 l, en suelo previamente esterilizado a 120 °C durante 15 min;

se evaluaron las 2 cepas (LPM1 y LPM2) y 1 testigo al cual sólo se le aplicó agua; las semillas se inocularon con 1 mL de la suspensión bacteriana a una concentración de 1×10^8 UFC mL⁻¹ y se incubaron a 26 °C, con periodos de luz constante. Las plantas de frijol se dejaron por 25 días y las de sorgo por 35 días. Al término de ese tiempo se evaluaron las siguientes variables: peso fresco de planta y raíz, peso seco de planta y raíz, altura de planta y longitud de raíz. Los datos se analizaron mediante el programa estadístico de la Universidad de Nuevo León utilizando un diseño completamente al azar y la prueba de comparación de medias de Tukey al 5 % de significancia.

Determinación de la actividad de la enzima ACC deaminasa. Las cepas bacterianas se dejaron crecer en medio líquido de infusión papa en condiciones de agitación a 120 rpm a 30 °C durante 18 h, posteriormente, una alícuota de este cultivo se sembró por estría abierta en medio sólido mínimo de sales DF (Dworkin y Foster, 1958), suplementado con 2 g de (NH₄)₂SO₄ o ACC 3mM como única fuente de nitrógeno. Se incubaron de 28 a 30 °C durante 5 días, después se evaluó la presencia de crecimiento.

Resultados y Discusión

Se aislaron cuatro hongos de tejido enfermo y se identificaron como *Fusarium* sp., *Verticillium* sp., *Cephalosporium* sp. y *Dematophora* sp., de acuerdo con las claves de identificación de Barnett y Hunter (1998), además los resultados de los postulados de Koch corroboraron que estos hongos son patógenos ya que en forma individual, cada uno de ellos causó lesiones y síntomas característicos de la pudrición de raíz del manzano.

Una alternativa al control de la enfermedad es la utilización de bacterias antagónicas para lo cual, se aislaron dos bacterias con potencial la LPM1 y LPM2. Como se mencionó en materiales y métodos, se comparó su efecto antagónico contra los agentes etiológicos antes mencionados y contrastando su efecto con algunas cepas reconocidas como buenas antagónicas *B. subtilis* Beb (8 y 13), *Pseudomonas putida*. Estas tres cepas de colección inhibieron 29.0, 28.3 y 9.54 % respectivamente, frente a los 4 hongos.

Por otra parte, las cepas LPM1 y LPM2, se comportaron estadísticamente iguales a los *B. subtilis* de referencia, obteniendo un 20.0 % y 25.6 % de inhibición micelial. La cepa LPM1 tuvo un efecto del 40 % de inhibición del crecimiento de *Verticillium* sp. Todos estos resultados concuerdan con lo reportado por Alcaraz *et al.* (1999), donde menciona a *Bacillus* spp. *in vitro* como un biocontrolador en potencia de hongos fitopatógenos como

Fusarium sp. Una actividad similar contra el alga *Phytophthora capsici* ha sido previamente reportada por Lagunas *et al.* (2001) con otras cepas de *Bacillus* sp, estos autores consignan que lograron inhibir el crecimiento micelial del patógeno en un 41 %.

A través del antibiograma como se muestra en la Cuadro 1, se confirma que fueron cepas diferentes. Adicional a esto, lo datos muestran la sensibilidad a gentamicina, antibiótico que se utiliza para el control de bacterias.

Cuadro 1. Sensibilidad y resistencia a antibióticos de *B. subtilis* LPM1 y LPM2

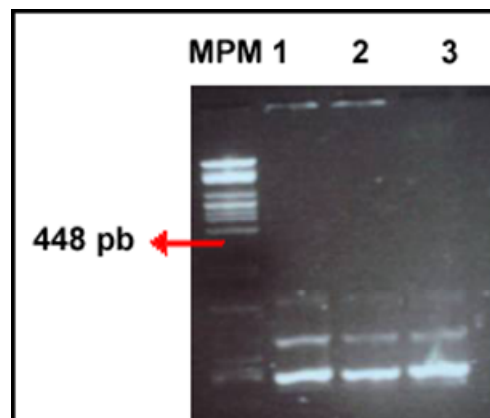
Antibióticos	Cepa LPM 1	Cepa LPM 2
Amikacina 30 mcg (AK)	+	+
Ampicilina 10 mcg (AM)	+	-
Cefalotina 30 mcg(CF)	+	+
Ceftriaxona 30 mcg (CRO)	+	+
Cloranfenicol 30 mcg (CL)	+	+
Dicloxacilina 1 mcg (DC)	-	-
Enoxacina 10 mcg (ENX)	+	+
Eritromicina 15 mcg (E)	+	+
Gentamicina 10 mcg (GE)	+	+
Netilmicina 30 mcg (NET)	+	+
Penicilina 10 U (PE)	-	-
Timetoprin-Sulfametaxasol 25 mcg (SXT)	+	+

(+) Sensible (Forma Halo) (-) Resistente (No forma halo o muy pequeño)

Las dos cepas se identificaron utilizando el Biolog System, dando 100 % de probabilidad de ser *B. subtilis* con una similitud de 0.67. Esto se confirmó con la amplificación de una secuencia específica, como se observa en la Figura 1. Donde una banda de 448 bp es igual que la cepa de *B. subtilis* utilizada de referencia.

Las dos cepas de *B. subtilis* se caracterizaron en cuanto al tiempo de generación en dos medios de cultivo. Se observó que los dos cultivos IPA y IPAS permiten el crecimiento de las dos cepas de *B. subtilis* (Cuadro 2). Sin embargo, el crecimiento es mejor en el medio que se le adicionó sacarosa, permitiendo un mayor número de células y reduciendo el tiempo de generación. Características que son importantes para el proceso de producción. Asimismo, al ser capaces de crecer y mantener tasas de crecimiento relativamente rápidas sin requerimientos nutricionales complejos, lo que permitirá un medio barato para la producción masiva. Esas

características junto con la capacidad de sobrevivir bajo condiciones ambientales adversas, son criterios considerados para obtener un antagonista ideal (Baker,



1987).

Figura 1. Amplificación de secuencias específicas de *B. subtilis* mediante la técnica de PCR. 1. Muestra de bacteria aislada de Vainilla 2. Muestra de bacteria aislada de Manzano 3. Control Positivo *Bacillus subtilis* PY.

Cuadro 2. Determinación del tiempo de generación de dos cepas de bacterias de rizósfera de manzana y vainilla, denominadas (LPM1) y (LPM2) respectivamente, identificadas como *Bacillus subtilis* en medios: infusión papa agar (IPA) e infusión papa agar sacarosa (IPAS).

Cepa	N (UFC mL ⁻¹)	TG (h)
LPM 1 (IPA)	3 x 10 ⁷	1.14
LPM 1 (IPAS)	1.5 x 10 ⁹	0.61
LPM 2 (IPA)	1.4 x 10 ⁷	1.23
LPM 2 (IPAS)	1.6 x 10 ⁹	0.87

N: Número final de células; TG: Tiempo de generación;

En cuanto a los mecanismos que se han reportado para describir el efecto inhibitorio hacia los hongos fitopatógenos por parte del género *Pseudomonas* y *Bacillus* están la producción de antibióticos, sideróforos, enzimas líticas y HCN, entre otros (Schroth y Hancock, 1981; Tapia *et al.*, 1990; Fravel, 1988).

En este sentido, las dos cepas de *B. subtilis* LPM1 y LPM2 producen sideróforos, lo cual puede ser considerado como parte de su mecanismo de inhibición hacia *Fusarium* sp, *Verticillium* sp, *Cephalosporium* sp y *Dematophora* sp debido a que los sideróforos son compuestos quelantes que atrapan el hierro del medio donde se encuentren, dejando una deficiencia de hierro para los patógenos; estos

resultados son similares a lo reportados (Schroth y Hancock, 1981) y (Tapia *et al.*, 1990).

Con la finalidad de hacer una identificación parcial del compuesto(s) responsable(s) de la actividad antagónica, se realizó la cromatografía en capa fina (TLC). A través de la cromatografía se lograron separar 4 bandas para *B. subtilis* LPM 2, y una banda en el extracto de la cepa LPM1. Estas bandas se eluyeron como se indica en materiales y métodos, y se enfrentaron a *Fusarium* sp. El Cuadro 3 muestra los valores Rf de cada una de las bandas, y también muestra el % de inhibición de cada una de las bandas. Se observó que la banda con un Rf de 0.895 que resultó positiva para ninhidrina y fue la que mostró una mayor actividad antagónica frente a *Fusarium* sp., lo que posiblemente indica que uno de los compuestos responsables de la actividad antifúngica se encuentra en compuestos que contienen grupo amino. Resultados anteriores, han mostrado que parte de la actividad antagónica es debida a polipéptidos, como la iturina A y micosubtilina (Besson *et al.*, 1987). Por otra parte, estos resultados también sugieren que existen otros componentes antagónicos cuya naturaleza no es peptídica.

Cuadro 3. Valores de Rf y porcentaje de inhibición vs *Fusarium* sp. de las bandas obtenidas por cromatografía del extracto concentrado de bacterias antagonistas.

Banda	Rf	Inhibición (%)
1 LPM2	0.980	28.3
2 LPM2	0.734	32.6
3 LPM2	0.698	35.7
4 LPM2	0.496	25.2
1 LPM1	0.895	39.4

Como se mencionó, la presencia de enzimas líticas es otro posible mecanismo de actividad antagónica. La actividad enzimática para la cepa LPM 2 solo resultó positiva para algunas proteasas que degradan caseína, mientras la cepa LPM1 sintetiza amilasas y proteasas. Estos resultados confirman la gran variedad de enzimas que producen los *B. subtilis* como amilasas, proteasas, lipasas y oxidasas (Ferreira *et al.*, 1991). Así mismo, se ha demostrado la capacidad de degradar y descomponer las sustancias tóxicas que han sido aplicadas al suelo.

Adicional a un mecanismo antagónico de las PGPRs también se ha demostrado su capacidad de estimular el desarrollo de la planta. En este sentido, las dos cepas incrementaron significativamente el desarrollo de las plantas. La cepa LPM 1 incremento del 30 % con respecto al testigo.

Por otra parte, el tratamiento con *B. subtilis* LPM 2

también obtuvo una diferencia estadísticamente significativa en longitud con respecto al testigo con un 21.2 % mas de longitud frente a éste, como los muestra la Figura 2. En cuanto al peso fresco de la planta las cepas LPM 1 y LPM 2 mostraron un mayor peso frente al testigo, 411 % y 135 % mas de peso fresco con respecto al testigo; resultados

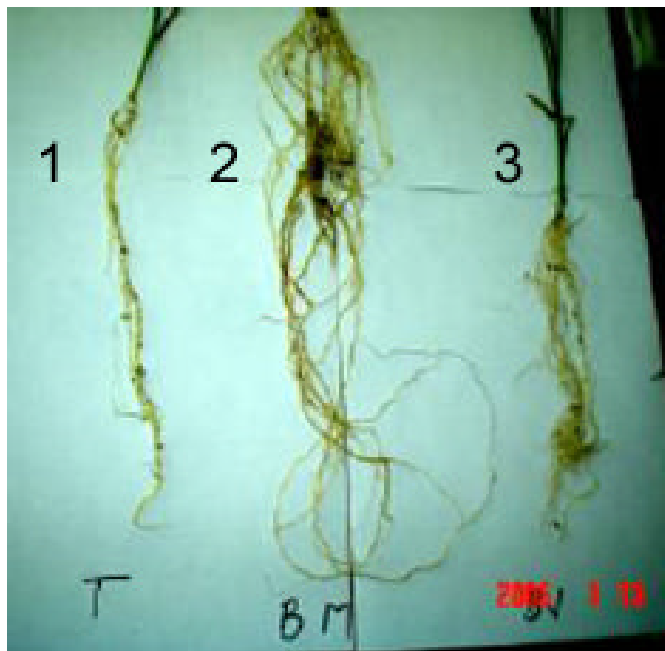


Figura 2. Longitud de raíz de sorgo tratadas con dos cepas de bacterias de rizósfera de manzana y vainilla, denominadas (LPM1) y (LPM2) respectivamente, identificadas como *Bacillus subtilis*. Tratamientos: 1. Testigo; 2. *B. subtilis* LPM 1; 3. *B. subtilis* LPM 2.

similares obtuvo Lagunas *et al.* (2001), en donde observaron un incremento en el volumen radical y peso de follaje de plantas de chile con aplicaciones semanales de *B. subtilis*.

En el caso de longitud de raíz, se obtuvo la misma promoción de crecimiento, observándose una tendencia de mayor longitud y peso por parte de las plantas que fueron tratadas con *B. subtilis* LPM 1 y LPM 2 respecto al testigo, obteniendo un 511.5 % y 126.4 %. Dashti *et al.* (1997) observaron un mayor crecimiento en el sistema radicular de plántulas de lechuga al realizar aplicaciones con *Bacillus*. Estos resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Pereira *et al.* (1988) y Kloepper *et al.* (1991), quienes mencionaron que las bacterias promotoras de crecimiento como *P. fluorescens* y *B. subtilis*, se caracterizan por incrementar el desarrollo radical, lo que repercute directamente en el rendimiento del cultivo, debido a que posiblemente existió un sinergismo entre el hospedante y los simbioses, lo que permitió la mejor absorción de elementos esenciales como el N y el P. Este incremento de desarrollo de la raíz se ha adjudicado al papel de la sustancias reguladoras de crecimiento como las auxinas y

la acción de la enzima ACC oxidasa, enzima que permite a la bacteria utilizar el ACC (ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico) como fuente de nitrógeno, y que al disminuir el ACC en la raíz, no se produce suficiente etileno para detener el crecimiento de ésta (Glick., 1995). Las dos cepas de *B. subtilis* LPM1 y LPM2, fueron capaces de sintetizar la enzima ACC desaminasa, la cual hidrolizó el ACC (Penrose y Glick, 2003).

Finalmente, el presente trabajo demostró que dos cepas nativas de *B. subtilis*, presentan los dos mecanismos de promoción del crecimiento de la planta, y que tienen el potencial de controlar a diferentes patógenos de raíz de manzano.

Conclusiones

Las cepas de *B. subtilis* (LPM1) y (LPM2) tuvieron la capacidad de inhibir el crecimiento micelial de *Fusarium* sp., *Verticillium* sp., *Cephalosporium* sp. y *Dematophora* sp., *in vitro*. *B. subtilis* fue capaz de crecer y aumentar el número de células, reduciendo el tiempo de generación, sin requerimientos nutricionales complejos. Los metabolitos responsables de la actividad de inhibición de las cepas de *B. subtilis* LPM1 y LPM2, son del grupo amino y otros cuya naturaleza no es peptídica, además de la producción de enzimas líticas como proteasas y amilasas. Las cepas de *B. subtilis* son promotoras de crecimiento de plantas, debido posiblemente a que fueron capaces de sintetizar la enzima ACC desaminasa. Uno de los mecanismos de acción de *B. subtilis* para inhibir el crecimiento de hongos fitopatógenos es la presencia de sideróforos.

Literatura Citada

Abbass, Z. and Y. OKon. 1993. Plant growth promotion by *Azotobacter paspali* in the rhizosphere. Soil Biochem. 25:1075-1083.

Alcaraz, F and B. Visitin Gy Garcia. 1999. Selección *in vitro* de *Bacillus* spp como biocontroladores de *Fusarium*. Rev. Argent. Fitopatol. 34(2).

Baker, R., Y. Elad and Y. Chet. 1984. The controlled experiment in the scientific method with special emphasis on biological control. Phytopathol. 74:1019-1021.

Baker; K. F. 1987. Evolving concepts of biological control of plant pathogens. Ann. Rev. Phytopathol. 25:67-85.

Bari, T and Y. Okin. 1993. Tryptophan conversion to indole-3-acetic acid via indole-3-acetamida in *Azospirillum brasilense* Sp7. Can. J. Microbiol. 39:81-86.

Barnett, H and B. Hunter. 1998. Illustrated genera of imperfect fungi. 3rd ed. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA. 218 p.

Belimov, A. A., V. I. Safronova and T. Mimur. 2002. Response of spring rape (*Brassica napus* var. *olifera*

L.) to inoculation with plant growth promoting rhizobacteria containing 1 aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase depends on nutrient status of the plant. Can. J. Microbiol. 48:189-199.

Berge, O., J. Fages, D. Mulard and J. Balandreau. 1990. Effects of inoculation with *Bacillus circulans* and *Azospirillum lipoferum* on crop-yield in field growth maize. Symbiosis 9:259-266.

Besoon, F., C. Chevanet and G. Michel. 1987. Influence of the culture medium on the production of iturin A by *Bacillus subtilis*. J. Gen. Microbiol. 133:767-772.

Bloemberg, G. V and B. J. J. Lugtenberg. 2001. Molecular basis of plant growth promotion and biocontrol by rhizobacteria. Curr. Opin. Plant Biol. 4:343-350.

Cassan, F., R. Bottini, G. Schneider and P. Piccoli. 2001. *Azospirillum brasilense* and *Azospirillum lipoferum* hydrolyz conjugates of GA₂₀ and metabolise that resultant aglycones to GA₁ in seedlings of rice dwarf mutants. Plant Physiol. 125:2053-2058.

Dashti, N., F. Zhang, R. Hynes and D. L. Smith. 1997. Plant and Soil. 188, 33.

Ferreira, J., F. N. Malthée and A. C. Thomas. 1991. Biological control of *Eutypa lata* on grapevine by a antagonistic strain of *Bacillus subtilis*. Phytopathol. 81:283-287.

Fravel, D. R. 1988. Role of antibiosis in the biocontrol of plant diseases. Ann. Rev. Phytopathol. 26:75-91.

Garcia de Salamone, I. E., R. K. Inés and L. M. Nelson. 2001. Cytokinin production by plant growth promoting rhizobacteria and selected mutants. Can J. Microbiol. 47:404-411.

Glick, B. R. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. Can. J. Microbiol. 41:109-117.

Glick, B. R., C. L. Patten, O. Holguin and D. M. Penrose. 1999a. Biocontrol Mechanism. Chapter 7. pp. 86-133. In: Biochemical and genetic mechanism used by plant growth promoting bacteria. Imperial Collage Press. Ontario, Canada.

Hernández, D. M y M. L. Charlloux. 2001. La nutrición mineral y la biofertilización en el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Temas Cien. Tecnol. 5:11-27.

Hernández, M. y A. Escalona. 2003. Microorganismos que benefician a las plantas: las bacterias PGPR. Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana. Veracruz. México. 16 (1).

Hong, Y., B. R. Glick and J. J. Pasternak. 1991. Plant-microbial interaction under gnotobiotic conditions: A scanning electron microscope study. Current Microbiol. 23:111-114.

- Kloepper, J.W. 1991. Plant growth-promoting rhizobacteria as biological control agents of soilborne diseases. pp. 142-52. In: J. Bay-Peterson (Ed.) The biological control of plant diseases. Food and Fertilizer Technological Center Taiwán.
- Kloepper, J.W., R. Lifshitz and R. Zablotowicz. 1989. Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. Trends Biotechnol. 7:39-49.
- Lagunas, L. J., Z. E. Mejia, O. S. Kawasoe y A. S. Ocampo. 2001. *Bacillus firmus* como agente de control biológico de *Phytophthora capsici* Leo. En jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Rev. Mex. Fitopatol. 19 (1): 57-65.
- Penrose, D. M and B. R. Glick. 2003. Methods for isolation and characterization ACC deaminase-containing plant growth-promoting rhizobacteria. Physiol. Plant. 118:10-15.
- Pereira, J., A. R. Cavalcante, V. A. Baldani and J. Dobereiner. 1988. Sorghum and rice inoculation with *Azospirillum* sp. Y *Herbaspirillum seropedicae* in field. Plant Soil. 110:269-274.
- Podile, A. R and A. P. Prakash. 1996. Lysis and biological control of *Aspergillus Niger* by *Bacillus subtilis* AF-1. Can J. Microbiol. 42:533-538.
- Schoroth, M. N and J. G. Hancock. 1981. Selected topics in biological control. Annu. Rev. Phytopathol. 35:453-476.
- Shah, S., J. Li, B. A. Moffatt and B. R. Glick. 1998. Isolation and characterization of ACC deaminase genes from two different plant growth promoting growth rhizobacteria. Can. J. Microbiol. 44:833-843.
- Strenhoudt, O and J. Vanderleyden. 2000. *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium closely associated with grasses; biochemical and ecological aspects. FEMS Microbiol. Rev. 24:487-506.
- Tapia-Hernández, A., M. A. Mascarua-Esparza and J. Caballero-Mellado. 1990. Production of bacteriocins and siderophore-like activity by *Azospirillum brasilense*. Microbios. 64:73-83.
-

Aplicación del Análisis de Senderos en Estudios Biológicos

Adalberto Benavides-Mendoza*, Homero Ramírez, Valentín Robledo-Torres, José Hernández-Dávila

Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, 25315, Saltillo, Coah., México. E-mail: abenmen@uaaan.mx (*Autor responsable).

Abstract

A revision of the theory of the paths analysis method is here presented, as a subsequent analysis of the correlation matrix, when a causal structural model is utilized. The differences with the non-causal regression models are discussed, as well as the advantages, and disadvantages, of path analysis. Some applications in ecological, agronomical, and plant breeding studies are revised.

Keywords: Causal models, correlation, regression, beta coefficients, path coefficient.

Resumen

Se presenta una revisión de la teoría del método de análisis de senderos, como un análisis posterior de la matriz de correlaciones, cuando se utiliza un enfoque causal de un modelo estructural o de factores. Se discuten las diferencias con los modelos no causales de regresión así como las ventajas y desventajas del método de senderos. Se revisan algunas aplicaciones en estudios ecológicos, agronómicos y de mejoramiento de plantas.

Palabras clave. Modelos causales, correlación, regresión, coeficientes beta, coeficientes de sendero.

Introducción

La construcción de matrices de correlación es común en estudios de sistemas biológicos. El análisis posterior de la matriz de correlaciones, utilizando modelos estructurales o de factores, permite profundizar en la clase de relaciones que se presentan entre las variables consideradas y en los efectos resultantes de dichas relaciones. El objetivo del presente trabajo es presentar una revisión de la teoría del método de análisis de senderos así como de algunas de las aplicaciones de dicha técnica de análisis en los estudios biológicos.

El análisis de senderos (*path analysis*) es una clase de modelo causal que combina las características de los modelos estructurales y de los de regresión múltiple. El análisis de senderos se utiliza ampliamente en las ciencias sociales, si bien la aplicación en las ciencias biológicas se ha extendido fuertemente, sobre todo en las áreas de Genética, Ecología y Fisiología.

Este trabajo tiene como objetivo revisar las bases teóricas que definen la extensión de aplicación del análisis de senderos y presenta algunos ejemplos de utilización en estudios de sistemas biológicos.

La Matriz de Varianza-covarianza y la Matriz de Correlaciones

Si partimos de una base de datos multivariada con k variables y n observaciones por variable, entonces tenemos una matriz de datos X de orden $(n \times k)$. Cuando esta matriz X contiene datos corregidos respecto a la media, esto es $(x - \bar{x})$ entonces la siguiente expresión es el estimador de la matriz de varianza-covarianza de orden $(k \times k)$:

$$S = (n-1)^{-1} X'X \quad (\text{ec. 1})$$

Por otro lado, si la matriz X contiene como elementos datos expresados en forma estandarizada, es decir $s^{-1}(x - \bar{x})$, entonces el producto siguiente:

$$R = (n-1)^{-1} X'X \quad (\text{ec. 2})$$

Es el estimador de la matriz de correlaciones de orden $(k \times k)$.

Los elementos de la matriz R son los coeficientes de correlación lineal simple entre cada par de variables. El coeficiente de correlación describe, en forma simétrica

(es decir, respecto a ambas variables) la asociación lineal presente entre las variables. Mientras mayor es la magnitud absoluta del coeficiente de correlación más grande será la asociación entre las variables (Li, 1975; Kendall y Stuart, 1976; Pindyck y Rubinfeld, 1981).

Los Modelos de Regresión Múltiple

Los modelos de regresión lineal múltiple son modelos lineales utilizados para describir matemáticamente la relación entre una variable Y , llamada variable de respuesta, y una serie de variables predictoras, X_1, X_2, \dots, X_k , cuyos valores pueden ser fijos o aleatorios. Se supone que el valor específico de la variable de respuesta puede predecirse con cierta aproximación a partir de los valores que toman las variables predictoras. En otras palabras, el modelo de regresión sirve como resumen de la variación observada en la variable de respuesta en función de las variables predictoras (Kendall y Stuart, 1976; Draper y Smith, 1981; Pedhazur, 1982).

Un modelo lineal como el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots + \beta_k X_k \quad (\text{ec. 3})$$

dice que el valor de la variable de respuesta es una función lineal de las variables predictoras. Los coeficientes β_j , $j=1, \dots, k$, son los llamados coeficientes de regresión parcial e indican la cantidad de cambio esperado en la variable de respuesta, Y , por unidad de cambio en la j -ésima variable predictor. Desde el punto de vista estadístico, cumpliendo ciertas suposiciones, el producto $\beta_j X_j$, $j=1, \dots, k$, es el mejor estimador del valor esperado de Y en función del valor de la variable X_j , manteniendo fijas las restantes variables predictoras (Draper y Smith, 1981). Cuando el modelo de la ecuación 3 utiliza variables estandarizadas entonces los coeficientes β_j , $j=1, \dots, k$, son los llamados coeficientes beta. La interpretación es la misma marcada para los coeficientes de regresión parcial excepto que las unidades son de desviación estándar. Estos coeficientes beta no son coeficientes de sendero a no ser que se asocien a un modelo estructural con vías causales.

Al contrario de lo que ocurre con el análisis de correlación en el de regresión la relación descrita no es simétrica, ya que implica un sentido de las variables predictoras hacia la de respuesta, expresando esta última como una función lineal de aquellas. Los valores $\hat{\beta}_j$ son obtenidos utilizando una técnica especial, llamada de cuadrados mínimos, con la cual se minimizan las diferencias entre los valores de Y realmente observados y los valores generados por una función lineal como la que aparece en la ecuación 3.

En su forma tradicional el análisis de regresión en ningún

momento pretende ser un modelo funcional de la situación que describe; simplemente puede ser un buen modelo en el sentido de minimizar los errores de predicción de Y con base en la información dada por las variables predictoras. Dicho de otra forma, *la orientación básica de los modelos de regresión es la predicción*. La extensión de su uso hacia la construcción de modelos funcionales o estructurales de la situación bajo análisis se debe realizar con las necesarias precauciones (Li, 1975; Draper y Smith, 1981; Chanter, 1981; Pindyck y Rubinfeld, 1981).

El funcionamiento del modelo clásico de regresión puede resumirse con el esquema que aparece en la Figura 1:

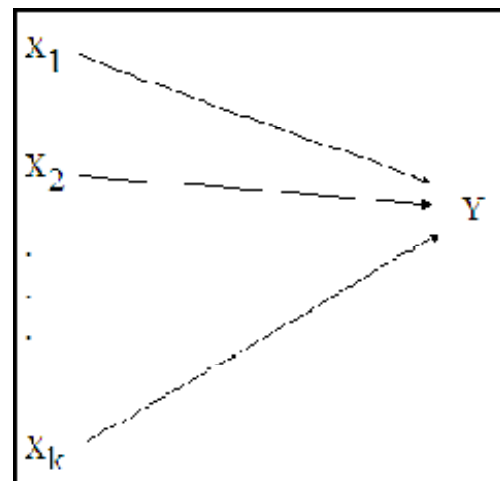


Figura 1. Esquema del modelo clásico de regresión lineal múltiple.

En donde se representa una variable aleatoria Y , cuyo valor depende o está condicionado por los valores tomados por las variables X_1, X_2, \dots, X_k . En el modelo clásico de regresión las variables predictoras son de valor fijo y no están correlacionadas entre sí (Draper y Smith, 1981; Chanter, 1981). El ejemplo más conocido de una situación lo constituye un diseño experimental con arreglo ortogonal (como un arreglo factorial). Una suposición muy importante en el modelo clásico de regresión, suposición generalmente no observada en estudios de sistemas bajo condiciones no controladas, es la ausencia de correlación entre las variables predictoras. Las propiedades óptimas de estimación basadas en el ajuste de cuadrados mínimos se obtienen bajo la situación de ortogonalidad (Hoerl y Kennard, 1970; Draper y Smith, 1981; Chanter, 1981; Stewart, 1987).

Análisis de Senderos

El método de análisis de senderos, llamado también método de senderos, o método de coeficientes de sendero, o de vías causales fue desarrollado originalmente por Wright (1921) para el análisis de sistemas cerrados de

variables unidas por relaciones causales. Específicamente, Wright (1921, 1934) desarrolló esta técnica como apoyo en la interpretación de los datos provenientes de sistemas que, por una u otra razón, eran difíciles de manipular experimentalmente.

Si bien el desarrollo principal del análisis de senderos corresponde a Wright (1921), aproximadamente en la misma época y de manera independiente, Ronald Aymer Fisher había desarrollado el concepto de factores de un coeficiente de correlación, concepto idéntico al de los coeficientes de sendero de Wright (Li, 1968).

Diferentes autores describieron y desarrollaron la teoría subyacente a dicho análisis y el lector interesado en los aspectos matemáticos formales es remitido a los trabajos de Kempthorne (1969), Li (1956, 1975), Turner y Stevens (1959) y Wright (1921, 1934, 1960). Otros trabajos con nivel matemático más accesible y con ejemplos específicos de aplicación son los de Asher (1983), Crespi (1990), Pedhazur (1982), Reyes (1992) y Reyes y Benavides (1993).

En su forma original, tal como es descrito por Wright (1921, 1934) la técnica de análisis de senderos tiene una orientación eminentemente biológica; de hecho el propósito primario del método fue eliminar hasta cierto punto los problemas surgidos al no cumplir los supuestos de los métodos estadísticos, como la regresión múltiple, en los estudios biológicos. Crespi (1990) realizó una excelente recapitulación de las diferencias entre los modelos causales con orientación puramente estadística (predictivos) y los que tienen orientación biológica (explicativos).

El análisis de senderos es una forma de análisis de regresión lineal estructurado con respecto a variables estandarizadas en un sistema cerrado formalmente completo (Wright, 1921; Li, 1975). El método de senderos no concierne tanto con la predicción como con la *proposición* de una interpretación plausible de las relaciones entre las variables estudiadas. En otras palabras, el análisis de senderos concierne con la construcción de una estructura causal compatible con los datos observados (Wright, 1921; Li, 1975; Pedhazur, 1982).

Lo anterior marca los límites de aplicación del análisis de senderos. Este no debe de aplicarse para construir modelos de relaciones entre variables a partir de series de datos, más bien es lo contrario, el análisis es aplicable *a posteriori* de la propuesta de una estructura causal entre variables para investigar la importancia de efectos causales directos, e indirecto, en un sistema de variables correlacionadas (Wright, 1921, 1934; Li, 1975; Crespi, 1990). Mitchell (1992, p. 123) comenta: "Briefly, path analysis allows one to partition the simple correlations among a set of variables according to a particular working

model about their causal relationships..."

Se hace obvio entonces el principal inconveniente del análisis de senderos: los resultados serán tan buenos como adecuado sea el modelo causal propuesto para el sistema bajo estudio. El uso de modelos inadecuados nos llevará a conclusiones erróneas (MacDonald, 1977; Mitchell, 1992; Dofing y Knight, 1992). Los errores no se referirán, en este caso, a las estimaciones de los coeficientes de un modelo, más bien se relacionarán con la lógica de la situación bajo análisis (véase como ejemplo el artículo de Dofing y Knight, 1992). El problema en este caso es que no se ha desarrollado un método sencillo para la comparación clara de diferentes modelos de un mismo sistema (llamados modelos en competencia) ya que, hasta ahora, no existe una forma directa y simple de cuantificar el acuerdo entre el diagrama causal (el modelo) y los datos sobre los que se trabaja (Pedhazur, 1982; Mitchell, 1992).

Kempthorne (1969), en el área de la genética, que fue en donde primeramente se aplicó el análisis de senderos, no recomendó el uso extensivo de esta clase de análisis dada la excesiva facilidad con que genera soluciones atractivas a partir de modelos erróneos. Para una interesante exposición acerca del uso indiscriminado del análisis de senderos en el área de las ciencias sociales véase Pedhazur (1982).

Como una manera de resolver la carencia de una prueba objetiva con la cual verificar el ajuste de la estructura causal propuesta a la estructura de covarianzas observada, Mitchell (1992) propuso extender la solución del análisis de senderos hacia la aplicación de modelos estructurales lineales LISREL. En un modelo LISREL la solución para los coeficientes de sendero se obtiene utilizando métodos de máxima verosimilitud, cuadrados mínimos u otros. Las soluciones se obtienen a partir de un conjunto de restricciones de identificación (representadas por el diagrama causal bajo consideración) basadas en la estructura de covarianzas del problema que se plantea. La gran ventaja de un modelo LISREL es que se dispone de una forma directa de verificar la bondad del ajuste de cada modelo en competencia respecto a la estructura observada de covarianzas; su principal desventaja es que son bastante más complicados si se comparan con la sencillez de la solución clásica de los coeficientes de sendero.

En cuanto a las suposiciones sobre las que se basa el análisis de senderos, éstas son expuestas de manera excelente en los trabajos de Wright (1921, 1934), Li (1956, 1975), Pedhazur (1982) y Asher (1983). Que tanto estas suposiciones son consideradas antes de realizar un análisis de senderos sobre un grupo de datos? La situación es la misma que se presenta para la regresión múltiple: buena

parte de los usuarios o bien no las consideran o las atienden solo en parte (vease nota de Kang, 1992).

Estructuras Causales

El modelo causal propuesto de acuerdo a cierta teoría de las relaciones entre las variables se puede trasladar de manera sucinta a un diagrama causal en donde, por medio de flechas indicativas uni- o bidireccionales, se indican las supuestas relaciones causales presentes entre las variables. El diagrama causal es traducido en forma matemática construyendo un sistema de ecuaciones lineales (que llevan o no restricciones) que refleja la estructura propuesta.

Considérese el diagrama causal de la Figura 2 que muestra un modelo de un sistema hipotético con relaciones causales:

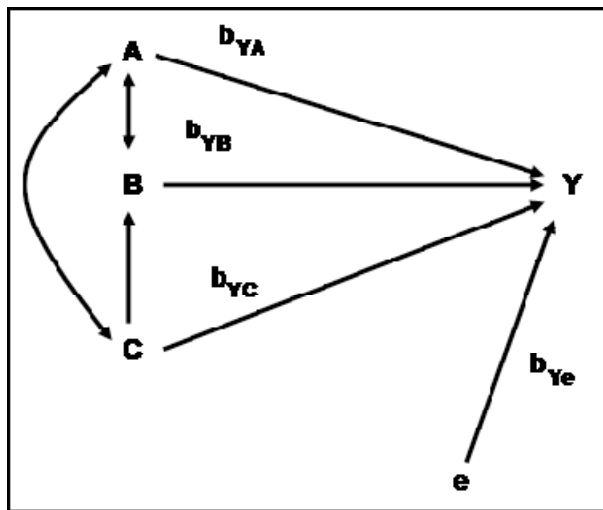


Figura 2. Diagrama causal de un sistema de variables hipotético.

Dicho diagrama muestra un arreglo de interacciones entre variables. La variable de respuesta, Y, se encuentra determinada por las variables predictoras (llamadas también variables básicas) A, B, C y por un efecto residual, e, que agrupa a todos aquellos factores diferentes a A, B y C y que tengan alguna influencia sobre Y. Las variables A, B y C se encuentran correlacionadas entre sí y con la variable Y. Por definición, el término residual no se correlaciona con las variables predictoras. La inclusión del término residual es el artificio con el cual el sistema se convierte en uno formalmente cerrado (Wright, 1921; Turner y Stevens, 1959; Kempthorne, 1969; Li, 1956, 1971; Pedhazur, 1982). El modelo presentado es de tipo recursivo es decir, el flujo causal propuesto para el sistema es unidireccional y queda fuera de consideración la causalidad recíproca. Se recomienda el texto de Asher (1983) para revisar su exposición acerca de modelos no recursivos.

Las variables predictoras y las de respuesta se encuentran enlazadas en una estructura causal correlativa que se supone es descrita por el modelo causal propuesto. El análisis de senderos permite fraccionar en factores la correlación observada entre las variables predictoras y la de respuesta obteniendo del valor total una serie de componentes que son, para el modelo analizado (Li, 1975; Pedhazur, 1982):

- a). Un efecto causal directo: b_{YA} , b_{YB} ó b_{YC} .
- b). Un efecto causal indirecto: b_{CB} .
- c). componentes no causales que son no analizables o espurias.
- d). un componente residual: b_{Ye} .

La partición del valor del coeficiente de correlación no implica que necesariamente aparezcan todas estas componentes, ya que su presencia o ausencia depende enteramente de la estructura causal especificada (Mitchell, 1992).

A partir del modelo causal anterior la partición de los coeficientes de correlación es descrita por el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{aligned}
 r_{AY} &= b_{YA} + r_{AB}b_{YB} + r_{AC}b_{YC} \\
 &\quad \text{directo} \quad \text{no analizable} \quad \text{no analizable} \\
 r_{BY} &= r_{BA}b_{YA} + b_{YB} + r_{CB}b_{YC} \quad (\text{ec. 4}) \\
 &\quad \text{no analizable} \quad \text{directo} \quad \text{espurio} \\
 r_{CY} &= r_{AC}b_{YA} + r_{BC}b_{YB} + b_{YC} \\
 &\quad \text{no analizable} \quad \text{indirecto} \quad \text{directo}
 \end{aligned}$$

La descomposición de los coeficientes de correlación genera una serie de componentes directos b_{YA} , b_{YB} y b_{YC} , cuyo valor numérico representa la magnitud o importancia del efecto causal directo de cada variable predictor sobre la variable de respuesta. A este componente directo se le llama coeficiente de sendero de la vía causal referida, que puede ser, como ejemplo, la vía $A \rightarrow Y$.

Se tienen posteriormente una serie de componentes bajo el rubro de no analizables. En este caso lo que ocurre es que se carece de la información suficiente a partir de la cual realizar, con la certidumbre necesaria, una posterior descomposición de estos componentes; es por ello que, a estos últimos, les asignamos únicamente magnitud y no una dirección causal precisa, tal como ocurre en el caso de la vía $A \leftrightarrow B$.

El componente indirecto surge como consecuencia de la acción de dos variables (una siendo causa y la otra efecto) sobre una tercera que resulta de la acción de las dos primeras. En nuestro ejemplo la magnitud y dirección causal representan el efecto que ejerce la variable C sobre la variable de respuesta, Y, a través de la variable predictor

B. En otras palabras, el producto $r_{BC}b_{YB}$ representa la parte de la correlación entre las variables C y Y que resulta de la acción de C sobre B.

El componente que llamamos espurio representa la parte “falsa” de la correlación entre dos variables que resulta del hecho de que ambas tienen una causa común. En nuestro ejemplo el componente espurio es resultado de que las variables B y Y tienen una causa común que es la variable C.

Por último, el efecto del componente residual se calcula por diferencia entre la unidad y el producto escalar $\mathbf{b}'\mathbf{R}_y$, operación que es equivalente a restarle a la unidad el coeficiente de determinación ($1-R^2$). Como fue explicado, este componente residual es el artificio matemático que permite que nuestro sistema causal sea un sistema cerrado.

Aplicaciones en Estudios Biológicos

A continuación aparecen, agrupados en áreas de estudio afines, una serie de trabajos en donde se aplicó el análisis de senderos. Para cada trabajo, ya sea de manera individual o para un conjunto de ellos, se anota una breve descripción del mismo. Los trabajos citados se refieren a las aplicaciones en ciencias biológicas como la Ecología, Fisiología, Agronomía, etc.

Aplicaciones en Fisiología y Ecología Vegetal

Farris y Lechowicz (1990). En este trabajo se relacionan una serie de caracteres morfológicos, fenológicos y fisiológicos con la capacidad reproductiva de *Xanthium strumarium* (Compositae). Se verificaron las vías causales que confluyen hacia la diferenciación y crecimiento de las estructuras reproductivas.

Leduc et al. (1992). Se estudió la distribución de especies en una comunidad forestal. Los autores proponen una metodología que, haciendo uso de análisis de senderos y pruebas parciales de Mantel, permite separar, desde el punto de vista matemático, la componente puramente espacial de aquella otra determinada por las condiciones ambientales como factores causales de la distribución observada de individuos de especies arbóreas.

Mitchell-Olds (1987). Aplicación del análisis de senderos en el estudio de la competencia intraespecífica. Se describen las ventajas del método de senderos sobre otra serie de técnicas de análisis de los datos. Es un reporte de calidad y se recomienda para consultar la aplicación del método de senderos en estudios ecológicos.

Schemske y Horvitz (1988). Trabajo en donde se describieron las interacciones entre ciertas especies de insectos y una especie vegetal, *Calathea ovandensis* (Marantaceae). De acuerdo a observaciones previas se conocía cierto efecto de los insectos sobre la producción

de flores y frutos. Se construyó un diagrama causal basado en esas observaciones y se analizaron una serie de datos utilizando análisis de senderos. Es un reporte cuya lectura es recomendable.

Sun (1989). Estudio acerca de la relación entre los niveles endógenos de poliaminas y el número y tasa de iniciación de raíces laterales en plántulas de manzano.

Wesser y Armbruster (1991). Un trabajo excelente acerca de la prueba de dos hipótesis en competencia respecto a la distribución observada de especies vegetales en comunidades específicas. Se aplicaron modelos causales y experimentación directa para verificar las consecuencias derivadas de cada modelo. Es un ejemplo del tratamiento de modelos en competencia.

Abrol (1990). Estudio del efecto de diferentes condiciones ambientales sobre la actividad de polinización por himenópteros en plantas de alfalfa.

Pantone et al. (1989). Se estudió la eficacia del nemátodo *Anguina ansinckiae* como agente para el biocontrol de la maleza *Amsinckia intermedia* en un experimento de competencia con plantas de trigo.

Shasha'a et al. (1973). Investigación sobre la relación entre la producción de semilla de *Allium cepa* L. y su interrelación con la actividad de insectos polinizadores y los componentes del rendimiento del cultivo.

Talukdar et al. (1991). Estudio de la dinámica poblacional de chicharritas (*Nephotettix* sp.) y el efecto que tiene sobre este proceso la aplicación de fertilizantes específicos a las plantas hospederas. Se estudiaron también las correlaciones entre los niveles de población de los depredadores y los de *Nephotettix* sp. para obtener, aplicando un análisis de senderos, el impacto relativo de cada tipo de depredador.

Aplicaciones en Selección Natural y Genética Poblacional

Crespi (1990). Trabajo acerca de la acción de la selección natural sobre sistemas genéticos correlacionados. Este artículo es un trabajo magnífico sobre modelaje matemático de la selección natural y su lectura es muy recomendable.

Jordan (1992). Se realizó un estudio acerca de la adaptación de ecotipos morfológicamente distintos de *Diodia teres* (Rubiaceae). Se aplicó un análisis de senderos a las observaciones considerando un diagrama causal en donde una serie de caracteres tienen influencia sobre la aptitud biológica de los individuos.

Mitchell-Olds y Bergelson (1990). Estudio sobre la variabilidad de una serie de caracteres cuantitativos en una población de *Impatiens capensis*. El análisis de senderos se aplicó para investigar los efectos directos y

los resultantes de las correlaciones de los caracteres sobre la aptitud biológica de los individuos. Este artículo es un trabajo notable de genética estadística aplicada a estudios evolutivos y su lectura es muy recomendable.

Pritts y Hancock (1985). Trabajo cuyo objetivo fue examinar la dinámica de la reproducción de una especie vegetal perenne. Se estudió la relación entre el reparto de fotosintatos a diferentes sitios de utilización reproductivos y la edad de los individuos.

Wright (1921); Li (1956). Aplicación de los coeficientes de sendero en estudios de genética poblacional. El trabajo de Li (1956) incluye datos históricos acerca del desarrollo teórico del análisis de senderos. El trabajo de Wright (1921) es el artículo original en donde se establecieron las bases del método. Estos reportes son de lectura obligada para los genetistas de poblaciones y mejoradores de plantas.

Aplicaciones en Nutrición Vegetal y Fertilidad de Suelos

Ferrari (1963). Descripción y comparación del análisis de senderos frente al modelo convencional de regresión múltiple. Se utilizó como ejemplo de aplicación un modelo causal que involucra variables que son causa y a su vez efecto de otras variables. Los datos utilizados provienen de una investigación realizada acerca del efecto de la fertilidad del suelo y otros factores sobre el contenido de Mg y K de plantas forrajeras. El estudio descrito es una investigación de campo con factores no controlados; su lectura es recomendable.

May et al. (1991). Estudio en relación a los diferentes factores fisiológicos y ambientales que influyen sobre la eficiencia de absorción y reparto interno de nitrógeno en la planta de trigo.

Prasad et al. (1990). Trabajo en donde se estudiaron los factores correlacionados con la transformación y la disponibilidad subsecuente de zinc en suelos calcáreos sometidos a diferentes tratamientos.

Zhang (1991). Estudio de las relaciones entre las diferentes fracciones de P en el suelo y su efecto sobre la disponibilidad de este elemento para las plantas.

Aplicaciones en Agronomía y Horticultura

Bowers et al. (1990). Estudio del efecto de una serie de variables ambientales, con énfasis en la precipitación pluvial, sobre la incidencia y transmisión del tizón causado por *Phytophthora capsici* en un cultivo de chile.

Karlsson et al. (1988). Este es un trabajo relacionado con la optimización de condiciones para la producción comercial de crisantemo (*Dendranthema grandiflora*

Tzvelev). Se realizó un análisis de crecimiento; el análisis de senderos fue utilizado para estudiar la influencia del tiempo de desarrollo, y de la ganancia relativa en peso seco durante cuatro fases del desarrollo de las plantas, sobre el tiempo de desarrollo e incremento en peso seco durante fases subsecuentes.

Sun et al. (1990). Análisis de un modelo causal que incluye como variable de respuesta la habilidad de llenado de frutos de *Solanum melongena* L. y como variables básicas a diferentes factores ambientales (como la temperatura y la humedad del aire) que son función de variaciones estacionales.

Aplicaciones en Mejoramiento Genético de Plantas

Mebrahtu et al. (1991). Estudio realizado para determinar el efecto del O₃ sobre el rendimiento y sus componentes en genotipos sensibles e insensibles de frijol. El sistema causal considerado consta de siete variables básicas y el rendimiento se semilla como variable de respuesta. La lectura de este reporte es sencilla y recomendable.

Autores varios. Modelos causales de la asociación de los componentes del rendimiento con el rendimiento mismo de diferentes cultivos. La idea básica en esta clase de estudios es ofrecer alternativas para la selección indirecta o para la selección multivariada en una especie de cultivo dada. Lo que se espera conseguir como resultado es optimizar las respuestas correlacionadas con la selección realizada para alto rendimiento, evitando que dichas respuestas sean indeseables y permitir, por otro lado, construir funciones multivariadas con las cuales obtener respuestas adecuadas en un conjunto de caracteres de importancia económica.

Entre los trabajos abajo mencionados el de Adams (1967) es un escrito clásico que establece la base genética y fisiológica de la respuesta compensatoria de los componentes del rendimiento. En cuanto a las respuestas correlacionadas los trabajos de Robinson et al. (1951), Kempthorne (1969), Duarte y Adams (1972) y Puri et al. (1982) establecieron la base teórica para su manejo en los programas de mejoramiento genético de plantas. Esta área de estudio de las ciencias biológicas es en la que se encuentra mayor cantidad de aplicaciones publicadas del análisis de senderos pero asimismo es en donde se encuentra la mayor cantidad de aplicaciones que no consideran de forma adecuada la estructura causal del sistema. Un listado no exhaustivo de autores que aplican el análisis de senderos en el mejoramiento genético de plantas es:

Abraham (1990); Adams (1967); Alam et al. (1988); Biradar et al. (1991); Castinerias y Rivero (1988); Dechev

(1990); Debnath y Khan (1991); Duarte y Adams (1972); Gill *et al.* (1990); Gravois y Helms (1992); Hondelmann y Strauss (1990); Kang *et al.* (1983); Khattra *et al.* (1990); Khorgade *et al.* (1990); Madalageri y Gopinath (1990); Mahajan y Nayeem (1989); Mani y Bahl (1990); Maurya y Sinha (1987); Ombakho y Tyagi (1989); Oseni *et al.* (1992); Parh *et al.* (1990); Patil y Deshmukh (1989); Patil *et al.* (1990); Prasad y Rao (1989); Puri *et al.* (1982); Ram y Hemaprabha (1992); Reddy y Jhansilakshmi (1991); Reddy y Lal (1987); Reddy y Nerkar (1990); Robbins y Moore (1991); Sahoo *et al.* (1990); Sandhu *et al.* (1991); Sarkar (1990); Shabana *et al.* (1990); Siefker y Hancock (1986); Singh y Labana (1990); Singh, G. *et al.* (1989); Singh, R. *et al.* (1989); Solanki *et al.* (1987); Srivastava *et al.* (1988); Tagore y Singh (1990); Verma y Jha (1990).

Conclusión

De lo visto arriba es apreciable la utilidad del análisis de senderos en los estudios biológicos. Es común encontrarse con trabajos experimentales en sistemas causales bien diseñados y con buena colecta de datos, pero analizados con modelos de regresión no aplicables a la situación, o bien con técnicas multivariadas más sofisticadas, como el análisis de componentes principales, o el de factores, que tampoco puedan ser las más adecuadas a la situación.

Por otro lado, con la posible excepción de los genetistas de plantas, las técnicas de análisis estructural se encuentran al parecer poco difundidas entre los investigadores dedicados a las ciencias biológicas. Por otro lado, tal como puede apreciarse en el listado de literatura de la parte anterior, buena parte de los trabajos incluidos se refieren a situaciones que requieren cierto enfoque holístico (como en los estudios ecológicos y evolutivos citados) para lograr la comprensión y después el control de las respuestas correlacionadas en los sistemas bajo estudio.

Como cualquier herramienta el análisis de senderos es útil si se aplica correctamente. Aunque en la revisión de aplicaciones no se marcaron calificaciones de bueno o malo, la calidad de dichos reportes es bastante variable. El error menos común es que el artículo presente errores en la estimación de los coeficientes del sistema causal; el más frecuente es que el sistema causal que supuestamente define la situación tenga una solución trivial o carezca de relación con la lógica o la realidad del problema.

Por otra parte, los trabajos de buena calidad involucraron un conocimiento teórico adecuado del comportamiento biológico y de las interrelaciones de las variables que se estudiaron (lo cual no es igual a conocer únicamente la

base de datos experimentales), además de una buena base de sentido común en combinación con el conocimiento de los métodos adecuados de análisis de los datos.

Literatura Citada

- Adams, M.W. 1967. Basis of yield component compensation in crop plants with special reference to the field bean, *Phaseolus vulgaris*. *Crop Sci.* 7:505-510.
- Abraham, M.J. 1990. Correlation, path and discriminant function analyses in groundnut grown on a phosphorus deficient acidic soil. *Crop Improv.* 17:34-37.
- Abrol, D.P. 1990. Pollination activity of alfalfa-pollinating subtropical bees *Megachile nana* and *Megachile flavipes* (Hymenoptera: Megachilidae). *Trop. Ecol.* 31:106-115.
- Alam, M.S., D.K. Parh and M.Z.I. Talukder. 1988. Correlation and path-coefficient analysis in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Bangladesh J. Agric.* 13:147-150.
- Asher, H.B. 1983. *Causal Modeling*. Sage Publications, Inc. Newbury Park, California. U.S.A.
- Biradar, B.D., J.V. Goud and S.S. Patil. 1991. A study on character association and path coefficient in cowpea. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 16:27-29.
- Bowers, J.H., R.M. Sonoda and D.J. Mitchell. 1990. Path coefficient analysis of the effect of rainfall variables on the epidemiology of phytophthora blight of pepper caused by *Phytophthora capsici*. *Phytopathology* 80:1439-1446.
- Castinerias, L. y N. Rivero. 1988. Análisis de correlación y de coeficientes de sendero para el rendimiento y sus componentes en el frijol común. *Cienc. Agric.* 0(34/35):77-81.
- Chanter, D.O. 1981. The use and misuse of linear regression methods in crop modelling. In: D.A. Rose and D.A. Charles-Edwards (Eds.). *Mathematics and Plant Physiology*. Academic Press, Inc. (London) Ltd. London, U.K. p. 253-267.
- Crespi, B.J. 1990. Measuring the effect of natural selection on phenotypic interaction systems. *Am. Nat.* 135:32-47.
- Crespi, B.J. and F.L. Bookstein. 1988. A path-analytic model for the measurement of selection on morphology. *Evolution* 43:18-28.
- Debnath, S.C. and M.F. Khan. 1991. Genotypic variation, covariation and path coefficient analysis in maize. *Pak. J. Sci. Ind. Res.* 34:391-394.
- Dechev, D. 1990. Path analysis of yield components in durum wheat. *Genet. Sel.* 23:213-216.

- Dofing, S.M. and C.W. Knight. 1992. Alternative model for path analysis of small-grain yield. *Crop Sci.* 32:487-489.
- Draper, N.R. and H. Smith. 1981. Applied regression analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York, U.S.A.
- Duarte, R.A. and M.W. Adams. 1972. A path coefficient analysis of some yield component interrelations in field bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Crop Sci.* 12:579-582.
- Farris, M.A. and M.J. Lechowicz. 1990. Functional interactions among traits that determine reproductive success in a native annual plant. *Ecology* 71:548-557.
- Ferrari, T.J. 1963. Causal soil-plant relationships and path coefficients. *Plant Soil* 13:81-96.
- Gill, K., T.H. Singh and G.S. Chahal. 1990. Path analysis of genotype-environment interactions in upland cotton. *Crop Improv.* 17:27-30.
- Gravois, K.A. and R.S. Helms. 1992. Path analysis of rice yield and yield components as affected by seeding rate. *Agron. J.* 84:1-4.
- Hoerl, A.E. and R.W. Kennard. 1970. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics* 12:55-67.
- Hondelmann, W. and D.D. Strauss. 1990. Path-coefficient analysis of seed yield components in *Euphorbia lathyris*. *Plant Breeding* 105:112-116.
- Jordan, N. 1992. Path analysis of local adaptation in two ecotypes of the annual plant *Diodia teres* Walt. (Rubiaceae). *Am. Nat.* 140:149-165.
- Kang, M.S. 1992. Letter to the editor. *Agron. J.* 84:917-918.
- Kang, M.S., J.D. Miller and P.Y.P. Tai. 1983. Genetic and phenotypic path analyses and heritability in sugarcane. *Crop Sci.* 23:643-647.
- Karlsson, M.G., M.P. Pritts and R.D. Heins. 1988. Path analysis of chrysanthemum growth and development. *HortScience* 233:372-375.
- Kempthorne, O. 1969. An Introduction to Genetic Statistics. The Iowa State University Press. Ames, Iowa. U.S.A.
- Kendall, M. and A. Stuart. 1976. The Advanced Theory of Statistics. Vol. 3. Charles-Griffin & Co. Ltd. London, U.K.
- Khattra, A.S., K.S. Nandpuri and J.C. Thakur. 1990. Correlation and path coefficient analysis in tomato. *J. Res. Punjab Agric. Univ.* 27:412-418.
- Khorgade, P.W., A.H. Nafade, M.N. Narkhede and S.K. Raut. 1990. Some selection criteria in green gram. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 15:179-182.
- Leduc, A., P. Drapeau, Y. Bergeron and P. Legendre. 1992. Study of spatial components of forest cover using partial Mantel test and path analysis. *Veg. Sci.* 3:69-78.
- Li, C.C. 1956. The concept of path coefficient and its impact on population genetics. *Biometrics* 12:191-210.
- Li, C.C. 1968. Fisher, Wright and path coefficients. *Biometrics* 24:471-483.
- Li, C.C. 1975. Path Analysis -A Primer. The Boxwood Press. Pacific Grove, California. U.S.A.
- MacDonald, K.I. 1977. Path analysis. In: C.A. O'Muircheartaigh and C. Payne (Eds.). *The Analysis of Survey Data* (Vol. 2). John Wiley & Sons, New York. U.S.A.
- Madalageri, B.B. and G. Gopinath. 1990. Correlation and path coefficient analysis for dry matter content in half-sib families of Bellary red onion (*Allium cepa* L.). *Mysore J. Agric. Sci.* 22:479-482.
- Mahajan, A.R. and K.A. Nayeem. 1989. Character association and path analysis for seedling vigor index in wheat species and triticale under different temperatures. *Seed Res.* 17:32-35.
- Mani, M. and P.N. Bahl. 1990. Components of productivity in contrasting types of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *J. Genet. Breed.* 44:163-168.
- Maurya, K.R. and R.P. Sinha. 1987. Path coefficient analysis in fenugreek (*Trigonella foenum graecum* L.). *Prog. Hortic.* 19:276-279.
- May, L., D.A. Van Sanford, C.T. MacKown and P.L. Cornelius. 1991. Genetic variation for nitrogen use in soft red x hard red winter wheat populations. *Crop Sci.* 31:626-630.
- Mebrahtu, T., W. Mersie and M. Rangappa. 1991. Path coefficient analysis of ozone effects on seed yield and seed yield components of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Hortic. Sci.* 66:59-66.
- Mitchell, R.J. 1992. Testing evolutionary and ecological hypotheses using path analysis and structural equation modelling. *Funct. Ecol.* 6:123-129.
- Mitchell-Olds, T. 1987. Analysis of local variation in plant size. *Ecology* 68:82-87.
- Mitchell-Olds, T. and J. Bergelson. 1990. Statistical genetics of an annual plant, *Impatiens capensis*. II. Natural selection. *Genetics* 124:417-421.
- Ombakho, G.A. and A.P. Tyagi. 1989. Correlation and path-coefficient analysis for yield and its components in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *East Afr. Agric. For. J.* 53:23-28.
- Oseni, T.O., D.D. Lenge and U.R. Pal. 1992. Correlation and path-coefficient analysis of yield attributes in diverse lines of cowpea (*Vigna unguiculata*). *Indian J. Agric. Sci.* 52:365-368.

- Pantone, D.J., W.A. Williams and A.R. Maggenti. 1989. An alternative approach for evaluating the efficacy of potential biocontrol agents of weeds: 2. Path analysis. *Weed Sci.* 37:778-783.
- Patil, H.S. and R.B. Deshmukh. 1989. Correlation and path analysis in black gram. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 14:310-312.
- Patil, H.S., B.N. Narkhede and D.R. Bapat. 1990. Association and path analysis in sorghum. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 15:18-19.
- Pedhazur, E.J. 1982. *Multiple Regression in Behavioral Research.* Holt, Rinehart and Winston, New York, U.S.A.
- Pindyck, R.S. and D.L. Rubinfeld. 1981. *Econometric Models and Economic Forecasts.* McGraw-Hill Book Co. Singapore. Singapore.
- Prasad, B., A.K. Metha and M.K. Sinha. 1990. Zinc fractions and availability of applied zinc in calcareous soil treated with organic materials. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 38:248-253.
- Prasad, M.B.N.V. and G.S.P. Rao. 1989. Genetic variability, correlations and path-coefficient analysis for some morphological and biochemical constituents of acid lime fruit. *Sci. Hortic.* 41:43-54.
- Pritts, M.P. and J.F. Hancock. 1985. Lifetime biomass partitioning and yield component relationships in the highbush blueberry, *Vaccinium corymbosum* L. (Ericaceae). *Amer. J. Bot.* 72:446-452.
- Puri, Y.P., C.O. Qualset and W.A. Williams. 1982. Evaluation of yield components as selection criteria in barley breeding. *Crop Sci.* 22:927-931.
- Ram, B. and G. Hemapraba. 1992. Character interrelationships in cultivar x species progenies in sugarcane. *Indian J. Genet. Plant Breed.* 51:89-95.
- Reddy, C.D.R. and K. Jhansilakshmi. 1991. Variability and path analysis of component characters in foxtail millet. *J. Maharashtra Agric. Univ.* 16:44-47.
- Reddy, C.D.R. and Y.S. Nerkar. 1990. Studies on correlations and path analysis in parental lines sensitive to iron chlorosis and F₁s (tolerant x sensitive) in rice (*Oryza sativa* L.) under upland irrigated conditions. *Crop Res. (HISAR)* 3:61-65.
- Reddy, M.L.N. and G. Lal. 1987. Genetic variability and path coefficient analysis in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under summer season. *Prog. Hortic.* 19:284-288.
- Reyes, M.H. 1992. Análisis de Senderos con el Paquete MATLAB. Laboratorio de Genética Biométrica. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México.
- Reyes, M.H. y A. Benavides. 1993. El Análisis de Senderos en la Investigación Agronómica. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Folleto de Divulgación Vol. III (4).
- Robbins, J. and P.P. Moore. 1991. Fruit morphology and fruit strength in a seedling population of red raspberry. *HortScience* 26:294-295.
- Robinson, H.F., F.E. Comstock and P. Harvey. 1951. Genotypic and phenotypic correlations in corn and their implications in selection. *Agron. J.* 43:282-287.
- Sahoo, S.C., S.N. Mishra and R.S. Mishra. 1990. Association of traits in segregating populations of chilli (*Cap-sicum annuum*). *Indian J. Agric. Sci.* 60:233-236.
- Sandhu, T.S., R.K. Gumber and R.S. Bhatia. 1991. Path analysis in chickpea. *J. Res. Punjab Agric. Univ.* 28:1-4.
- Sarkar, R.K. 1990. Correlation and path analysis of certain morphophysiological characters in soybean. *Indian J. Plant Physiol.* 33:83-84.
- Schemske, D.W. and C.C. Horvitz. 1988. Plant-animal interactions and fruit production in a neotropical herb: a path analysis. *Ecology* 69:1128-1137.
- Shabana, R., S.A. Shhries, A.F. Ibrahim and G. Geisler. 1990. Correlation and path coefficient analysis for some new released spring rapeseed cultivars grown under different competitive systems. *J. Agron. Crop Sci.* 165:138-143.
- Shasha'a, N.S., W.P. Nie and W.F. Campbell. 1973. Path-coefficient analysis of correlation between honey bee activity and seed yield in *Allium cepa* L. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 98:341-347.
- Siefker, J.H. and J.F. Hancock. 1986. Yield component interactions in cultivars of the highbush blueberry. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111:606-608.
- Singh, G., H.S. Brar, M.M. Verma and J.S. Shandu. 1989. Component analysis of seed yield in chickpea. *Crop Improv.* 16:145-149.
- Singh, R., B.S. Sukhija and J.S. Hundal. 1989. Correlation and path coefficient studies in carrot. *J. Res. Punjab Agric. Univ.* 26:581-584.
- Singh, S.B. and K.S. Labana. 1990. Correlation and path analysis in sunflower. *Crop Improv.* 17:49-53.
- Solanki, S.S., P.K. Saxena and I.C. Pandey. 1987. Path analysis of yield components in pea (*Pisum sativum* L.). *Prog. Hortic.* 19:268-270.
- Srivastava, H.M., B.L. Srivastava, M.P. Agarwal and D.V.K. Saxena. 1988. Components of recoverable sugar and path analysis in diploid varieties of sugar beet. *Indian J. Genet. Plant Breed.* 49:403-406.
- Stewart, G.W. 1987. Collinearity and least squares regression. *Statistical Science* 2:68-100.

- Sun, W.Q. 1989. Path analysis of relationship between the endogenous polyamines and lateral root initiation in apple seedlings. *Acta Phytophysiol. Sin.* 15:388-392.
- Sun, W.Q., D. Wang, Z. Wu and J. Zhi. 1990. Seasonal change of fruit setting in eggplants (*Solanum melongena* L.) caused by different climatic conditions. *Sci. Hortic.* 44:55-60.
- Tagore, K.R. and I.S. Singh. 1990. Character association and path analysis under two levels of management in chickpea. *Crop Improv.* 17:41-44.
- Talukdar, F.A., M. Shah Jahan and S. Ahmed. 1991. Effect of nitrogen and zinc on rice green leafhoppers, *Nephotettix* spp. and prey-predator relationship between leafhoppers and their predators. *Pak. J. Sci. Ind. Res.* 34:453-455.
- Turner, M.E. and C.D. Stevens. 1959. The regression analysis of causal paths. *Biometrics* 15:236-258.
- Verma, V.S. and V.B. Jha. 1990. Correlation and path analysis for quality traits in potato (*Solanum tuberosum* L.). *J. Indian Potato Assoc.* 17:169-172.
- Wesser, S.D. and W.S. Armbruster. 1991. Species distribution controls across a forest-steppe transition: a causal model and experimental test. *Ecol. Monographs.* 61:323-342.
- Wright, S. 1921. Correlation and causation. *J. Agric. Res.* 20:557-587.
- Wright, S. 1934. The method of path coefficients. *Annals of Mathematical Statistics* 5:161-215.
- Wright, S. 1960. Path coefficients and path regressions: alternative or complementary concepts? *Biometrics* 16:189-202.
- Zhang, W. 1991. Path analysis and relative availability of inorganic and organic phosphorus fractions in soils. *Acta Pedol. Sin.* 28:4177-425.
-

Análisis de Datos Multivariados: Análisis General

Jessica Fernández-Garza* y José Antonio Díaz-García

Departamento de Estadística y Cálculo, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista. 25315. Saltillo, Coah., México. Tel.: (844) 4 11 03 33, 4 11 03 34 Fax:(844) 4 11 02 28. E-mail: jadiaz@uaaan.mx (*Autor responsable).

Abstract

The objective of this essay was to study the ideas that serve as a basis for AG, and also serve to obtain both, the ACP and the ACS, like particular cases of it. Here are presented the algebraic ideas on which the General Analysis (AG) is based, since this conforms the theoretical base of some multivariate methods. It is mentioned under which circumstances the Principal Components Analysis (ACP) and the Simple Correspondence Analysis (ACS) are obtained as particular cases of the AG. An example is given for the case of the ACS.

Key words: Multivariate Analysis, Principal Components Analysis, Normalized Principal Components Analysis, Simple Correspondence Analysis, Singular value decomposition.

Resumen

El objetivo del presente ensayo fue estudiar las ideas en las que se fundamenta el AG y obtener el ACP y el ACS como casos particulares del mismo. Se presentan las ideas algebraicas en las que se fundamenta el Análisis General (AG), el cual conforma la base teórica de algunos métodos multivariados. Se menciona bajo que circunstancias el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis de Correspondencias Simple (ACS) se obtienen como casos particulares del AG. Se ejemplifica para el caso del ACS.

Palabras clave: Análisis Multivariado, Análisis de Componentes Principales, Análisis de Componentes Principales Normado, Análisis de Correspondencias Simple, Descomposición en valores singulares.

Introducción

Una de las líneas de investigación de mayor desarrollo del Análisis Multivariado, surgida en las últimas décadas, es el Análisis de Datos Multivariados. Sus métodos contribuyen a describir grandes y complicados conjuntos de datos multivariados, permitiendo obtener representaciones simplificadas que facilitan la interpretación.

En la actualidad existe una gran cantidad de métodos multivariados, cada uno de los cuales es estudiado por separado y en la mayoría de los casos sin una conexión entre ellos. Varios de estos métodos multivariados comparten un fundamento matemático en común que permite estudiarlos partiendo desde un mismo punto y no de forma aislada, como se ha hecho hasta ahora. Esta base teórica en común es conocida como el Análisis General y utiliza criterios de álgebra matricial que se basan en las ideas establecidas por Eckart y Young (1936), la descomposición en valores singulares de una matriz (SVD) y la aproximación por mínimos cuadrados de una matriz por otra de menor rango. Una detallada demostración sobre el teorema establecido por Eckart y Young puede ser

revisada en Johnson (1963).

En particular el Análisis de Componentes Principales y el Análisis de Correspondencias Simple pueden ser obtenidos a partir del AG. Una aplicación del AG para obtener el ACP, enfatizando el aspecto geométrico es presentada en Lebart (1984). Una excelente presentación del ACS, utilizando la SVD, es dada en Greenacre (1994).

El objetivo del presente ensayo fue estudiar las ideas en las que se fundamenta el AG y obtener el ACP y el ACS como casos particulares del mismo. Además se presenta como ejemplo la obtención del ACS, utilizando la clasificación de los 300 municipios más representativos de México, de acuerdo a su región geográfica y a su porcentaje destinado a obra pública, este último obtenido de las Finanzas públicas estatales y municipales de México (2001), INEGI.

Descomposición en valores singulares

El teorema de Eckart y Young establece que para cualquier matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ se pueden encontrar dos matrices ortogonales, $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ y $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, tal que

$$\mathbf{U}^t \mathbf{A} \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{\Delta}, \quad (1)$$

donde $\mathbf{D} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$, tal que $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_k > 0$.

Considerando la expresión (1), la matriz puede ser factorizada como el producto de tres matrices, esto es: $\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{\Delta} \mathbf{V}^t$. (2)

Esta factorización es conocida en la literatura como la descomposición en valores singulares, y se denota como SVD(\mathbf{A}).

Teorema 1. Sea $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ de rango $k \leq \min(m, n)$, entonces

$$\text{SVD}(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i u_i v_i^t = \mathbf{U}_1 \mathbf{D} \mathbf{V}_1^t, \quad (3)$$

donde $\mathbf{U}_1 \in \mathbb{R}^{m \times k}$ y $\mathbf{V}_1 \in \mathbb{R}^{n \times k}$, tales que $\mathbf{U}_1 \mathbf{U}_1^t = \mathbf{I}_k = \mathbf{V}_1 \mathbf{V}_1^t$, esto es, las columnas de \mathbf{U}_1 y \mathbf{V}_1 son ortonormales. Esta factorización es conocida como la parte no singular de la SVD.

Demostración. Sean u_i los eigenvectores ortonormales correspondientes a los eigenvalores no nulos α_i^2 , para $i = 1, 2, \dots, k$, de $\mathbf{A} \mathbf{A}^t$, recuerde que $r(\mathbf{A}) = r(\mathbf{A} \mathbf{A}^t)$. Además, sea $v_i = \alpha_i^{-1} \mathbf{A}^t u_i$. Entonces los v_i son ortonormales, pues:

$$v_i^t v_i = (\alpha_i^{-1} \mathbf{A}^t u_i)^t \alpha_i^{-1} \mathbf{A}^t u_i = \alpha_i^{-2} u_i^t \mathbf{A} \mathbf{A}^t u_i = \alpha_i^{-2} \alpha_i^2 = 1 \quad (4)$$

y

$$v_i^t v_j = (\alpha_i^{-1} \mathbf{A}^t u_i)^t \alpha_j^{-1} \mathbf{A}^t u_j = \alpha_i^{-1} \alpha_j^{-1} u_i^t \mathbf{A} \mathbf{A}^t u_j = \alpha_i^{-1} \alpha_j^{-1} \alpha_j^2 u_i^t u_j = 0 \quad (5)$$

Además, defina $\mathbf{U}_2 = (u_{k+1}, \dots, u_m)$ tal que $\mathbf{U} = (u_1, \dots, u_m)$ es un conjunto completo de vectores ortonormales, esto es

$$\mathbf{U} \mathbf{U}^t = u_1 u_1^t + \dots + u_m u_m^t = \mathbf{I}_m, \text{ entonces}$$

$$\mathbf{A} = (u_1 u_1^t + \dots + u_m u_m^t) \mathbf{A} \quad (6)$$

$$= (u_1 u_1^t + \dots + u_k u_k^t) \mathbf{A} \text{ pues } u_i^t \mathbf{A} = 0 \text{ para } i > k,$$

$$= u_1 u_1^t \mathbf{A} + \dots + u_k u_k^t \mathbf{A} = u_1 (\mathbf{A}^t u_1)^t + \dots + u_k (\mathbf{A}^t u_k)^t$$

$$= u_1 (\alpha_1 v_1)^t + \dots + u_k (\alpha_k v_k)^t = \sum_{i=1}^k \alpha_i u_i v_i^t = \mathbf{U}_1 \mathbf{D} \mathbf{V}_1^t$$

tomando $\mathbf{V}_1 = (v_1, v_2, \dots, v_k)$, $\mathbf{U}_1 = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ y $\mathbf{D} = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$.

Observación 1

i) La expresión (2), se obtiene considerando los siguientes conjuntos de vectores ortonormales

$$\mathbf{U}_2 = (u_{k+1}, \dots, u_m) \text{ y } \mathbf{V}_2 = (v_{k+1}, \dots, v_n) \text{ tales que las matrices } \mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \text{ y}$$

$$\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_m), \text{ son ortogonales.}$$

ii) A los vectores u_i y v_i se les conoce como vectores singulares por la izquierda y por la derecha, respectivamente. Los elementos de la diagonal principal de la matriz \mathbf{D} son conocidos como valores singulares de \mathbf{A} .

iii) Otro resultado, que se puede comprobar fácilmente, es que los vectores singulares por la izquierda son los eigenvectores de $\mathbf{A} \mathbf{A}^t$, mientras que los

eigenvectores de $\mathbf{A}^t\mathbf{A}$ son los vectores singulares por la derecha de \mathbf{A} , los valores singulares no nulos de \mathbf{A} son las raíces cuadradas positivas de los eigenvalores no nulos de ambas matrices, $\mathbf{A}\mathbf{A}^t$ y $\mathbf{A}^t\mathbf{A}$.

iv) Note que las coordenadas de los renglones de \mathbf{A} son los renglones de $\mathbf{H} = \mathbf{U}_1\mathbf{D}$, con respecto a la base \mathbf{V}_1 y las coordenadas de las columnas son las filas de la matriz $\mathbf{C} = \mathbf{V}_1\mathbf{D}$, con respecto a la base \mathbf{U}_1 .

Teorema 2. Sea como en el teorema 1 y sean $\Omega \in \mathbb{R}^{m \times m}$ y $\phi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrices definidas positivas, entonces \mathbf{A} se puede factorizar como

$$\mathbf{A} = \mathbf{N}\mathbf{D}\mathbf{M}^t = \sum_{i=1}^k \alpha_i n_i m_i^t, \quad (7)$$

donde $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{m \times k}$ y $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n \times k}$, sus columnas están ortornormalizadas con respecto a Ω y ϕ , respectivamente, esto es, $\mathbf{N}^t\Omega\mathbf{N} = \mathbf{M}^t\phi\mathbf{M} = \mathbf{I}_k$.

Teorema 3. Sea $\mathbf{A}_{[r]}$ de orden $m \times n$ de rango r , tal que $\mathbf{A}_{[r]} = \mathbf{U}_r\mathbf{D}_r\mathbf{V}_r^t = \sum_{i=1}^r \alpha_i u_i v_i^t$. Entonces $\mathbf{A}_{[r]}$ es la matriz de aproximación de mínimos cuadrados que minimiza la siguiente expresión.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a_{ij} - x_{ij})^2 = \text{tr}(\mathbf{A} - \mathbf{X})(\mathbf{A} - \mathbf{X})^t = \|\mathbf{A} - \mathbf{X}\|^2 \quad (8)$$

Demostración

$$\|\mathbf{A} - \mathbf{X}\|^2 = \text{tr}[\mathbf{U}\mathbf{U}^t(\mathbf{A} - \mathbf{X})\mathbf{V}\mathbf{V}^t(\mathbf{A} - \mathbf{X})^t] = \text{tr}(\Delta - \mathbf{G})(\Delta - \mathbf{G})^t \quad (9)$$

$$= \sum_{i=1}^k (\alpha_i - g_{ii})^2 + \sum_{1 \leq j \leq n, i \neq j} g_{ij}^2$$

Donde $\mathbf{G} = \mathbf{U}^t\mathbf{X}\mathbf{V}$. La sumatoria anterior será mínima si la matriz \mathbf{G} es diagonal. Note que $r(\mathbf{G}) = r(\mathbf{U}^t\mathbf{X}\mathbf{V}) = r(\mathbf{X}) = r$, entonces $(k-r)$ elementos de la diagonal principal de la matriz son ceros. Además si se cumple que para $i = 1, 2, \dots, r$ la expresión se minimiza. Luego la matriz de aproximación es:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{G}\mathbf{V}^t = \sum_{i=1}^r \alpha_i u_i v_i^t = \mathbf{A}_{[r]}. \quad \bullet$$

Observe que una medida de la calidad de la aproximación de \mathbf{A} por $\mathbf{A}_{[r]}$ se puede definir como:

Demostración. Esta es inmediata a partir del teorema 1, sólo defina $\mathbf{N} = \Omega^{-1/2}\mathbf{U}_1$ y $\mathbf{M} = \phi^{-1/2}\mathbf{V}_1$ y considere la SVD de la matriz $\Omega^{1/2}\mathbf{A}\phi^{1/2}$. •

En este caso, los elementos de la diagonal principal de \mathbf{D} son conocidos como los valores singulares generalizados de \mathbf{A} , a las columnas de la matriz \mathbf{N} se les llaman vectores singulares generalizados por la izquierda y son las bases ortonormales para las columnas de \mathbf{A} , de forma análoga, las columnas de \mathbf{M} se conocen como vectores singulares generalizados por la derecha y conforman una base ortonormal para las filas de \mathbf{A} .

Aproximación de una matriz por otra de menor rango

Si los últimos valores singulares de la matriz \mathbf{D} , $(k-r)$, son muy pequeños, de tal forma que puedan ser omitidos, entonces se obtiene la aproximación a la matriz \mathbf{A} con otra matriz, $\mathbf{A}_{[r]} = \mathbf{U}_r\mathbf{D}_r\mathbf{V}_r^t$, de menor rango, $(r < k)$, dicha aproximación es de mínimos cuadrados, ya que se minimizan las distancias al cuadrado entre los elementos de las dos matrices, como lo muestra el siguiente teorema:

$$\tau_r = \left[\frac{\sum_{i=1}^r \alpha_i^2}{\sum_{i=1}^k \alpha_i^2} \right] 100 \quad (10)$$

Finalmente se presenta una extensión del teorema 3, bajo las condiciones del teorema 2.

Teorema 4. La matriz de aproximación por mínimos cuadrados generalizados o ponderados es

$$\tilde{\mathbf{A}}_{[r]} = \sum_{i=1}^r \alpha_i n_i m_i^t = \mathbf{N}_r\mathbf{D}_r\mathbf{M}_r^t \quad (11)$$

Demostración. Similar a la demostración anterior, sólo defina \mathbf{y} y observe que .

$$\|\Omega^{-1/2}(\mathbf{A} - \mathbf{X})\phi^{-1/2}\|^2 = \|\Delta - \tilde{\mathbf{G}}\|^2.$$

Aplicación al ACP

Sea $\mathbf{X} = [x_{ij}]$ la matriz donde los renglones representan n individuos y las columnas son variables observadas,

$$j = 1, 2, \dots, m. \text{ Ahora defina la matriz } \mathbf{Y} = \left[\frac{x_{ij} - \bar{x}}{\sqrt{n}} \right],$$

donde $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{n}$. Observe que $\mathbf{Y}'\mathbf{Y} = \mathbf{S}$ es la matriz de varianzas y covarianzas. Si se descompone en valores singulares la matriz \mathbf{Y} se obtiene el ACP, donde los vectores singulares por la derecha son los coeficientes de las componentes y los valores singulares son sus desviaciones estándar.

Cuando se trabaja con variables estandarizadas, para eliminar así el efecto que podría causar el que las variables tengan unidades de medida muy diferentes, o el que alguna de ellas tenga varianza mayor que el resto, el ACP recibe el nombre de Análisis de Componentes Principales Normado (ACPN). Partiendo del AG el ACPN se obtiene

si se considera la SVD de la matriz,, $\tilde{\mathbf{Y}} = \left[\frac{y_{ij}}{s_j} \right]$, donde

s_j es la desviación estándar de la j -ésima variable, pues

$$\tilde{\mathbf{Y}}'\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{R}, \text{ la matriz de correlaciones.}$$

Aplicación al ACS

Sea \mathbf{F} la matriz de frecuencias relativas obtenidas de la tabla de contingencia. Defina los vectores $\mathbf{f} = \mathbf{F}\mathbf{1}$ y $\mathbf{c} = \mathbf{F}'\mathbf{1}$, los elementos de \mathbf{f} son las frecuencias marginales relativas de las filas de \mathbf{F} y los elementos de \mathbf{c} son las frecuencias marginales relativas de las columnas. Además \mathbf{D}_f y \mathbf{D}_c son matrices diagonales con los elementos de \mathbf{f} y \mathbf{c} en la diagonal principal, respectivamente.

El ACS se obtiene al considerar la SVD generalizada de $(\mathbf{F} - \mathbf{f}\mathbf{c}')$, donde $\mathbf{N}'\mathbf{D}_f^{-1}\mathbf{N} = \mathbf{I}$ y $\mathbf{M}'\mathbf{D}_c^{-1}\mathbf{M} = \mathbf{I}$, o bien la SVD de la matriz de residuales $\mathbf{A} = \mathbf{D}_f^{-1/2}(\mathbf{F} - \mathbf{f}\mathbf{c}')\mathbf{D}_c^{-1/2}$. Las coordenadas de las filas de la tabla de contingencia son las filas de $\mathbf{C}_f = \mathbf{D}_f^{-1/2}\mathbf{U}_1\mathbf{D}$ y las coordenadas de las columnas son

$$\mathbf{C}_c = \mathbf{D}_c^{-1/2}\mathbf{V}_1\mathbf{D}.$$

Ejemplo

La tabla de contingencia del Cuadro 1 contiene la clasificación de los 300 municipios más representativos de México, determinados por el volumen de captación y aplicación de recursos, de acuerdo al porcentaje de sus egresos destinados a obra pública durante el año 2001 y a su región geográfica.

Los datos se analizaron con el paquete estadístico S-PLUS para obtener las coordenadas de las categorías de las dos variables, vea la representación gráfica de la tabla de contingencia en la Figura (1).

Cuadro 1. Tabla de contingencia con clasificación de los 300 municipios más representativos de México, determinados por el volumen de captación y aplicación de recursos, de acuerdo al porcentaje de sus egresos destinados a obra pública durante el año 2001 y a su región geográfica.

Región	Bajo	Medio	Alto	Total
	(0-24.40) %	(24.41-48.80) %	(48.81-73.20) %	
Norte	54	21	5	80
Centro	78	56	10	144
Sur	38	28	10	76
Total	170	105	25	300

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a las Finanzas públicas estatales y municipales de México, (2001). INEGI.

Los municipios de la región norte se asocian más con un bajo porcentaje de egresos destinado a obra pública, mientras que los municipios del centro se asocian con porcentajes medios, los municipios de la región sur se asocian a porcentajes altos y medios. La aproximación de la matriz a la matriz de residuales es de 100 %.

Conclusiones

De lo anterior se desprende que el ACP, el ACPN y el ACS pueden ser obtenidos partiendo del AG, aplicando la SVD a la matriz adecuada. El AG es una poderosa herramienta que facilita considerablemente el estudio de los métodos multivariados aquí presentados. Obtener más métodos multivariados a través del AG puede ser considerado para futuros estudios.

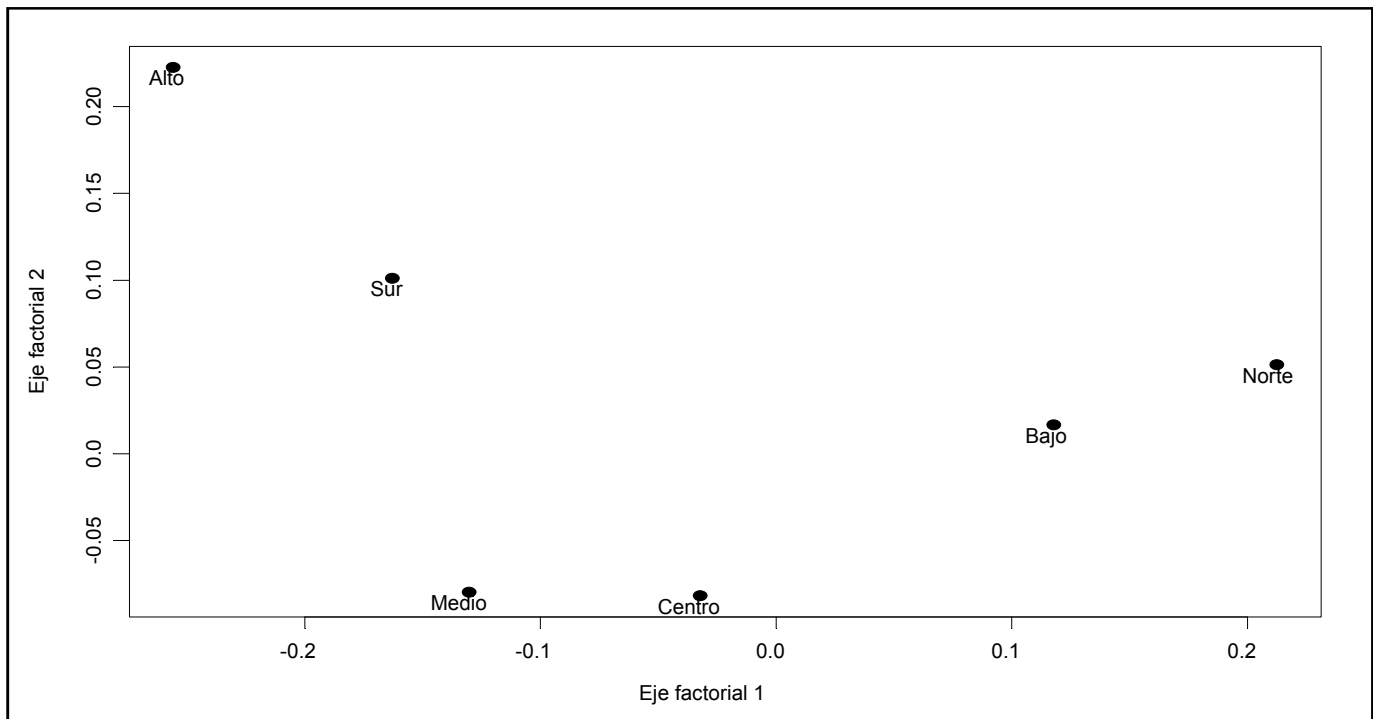


Figura 1. Tabla de contingencia de 300 municipios más representativos de México, determinados por el volumen de captación y aplicación de recursos, de acuerdo al porcentaje de sus egresos destinados a obra pública durante el año 2001 y a su región geográfica.

Literatura Citada

Greenacre, M. J. y Blasius. 1994. Correspondence analysis in the social science. Academic Press. 370 p.
 Johnson, R. M. 1963. On a theorem stated by Eckart and

Young. Psychometrika 28:259-263.

Lebart, L., Morineau, A. y Warwick, K. 1984. Multivariate descriptive statistical analysis. John Wiley and Sons. 231 p.

Colofón

Este ejemplar de la Revista Agraria –*Nueva Epoca*– se terminó de imprimir en formato digital (PDF) en la Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, para su distribución en medios múltiples.

En Saltillo, Coah., México, a los 14 días del mes de febrero
del año 2011



UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

www.uaaan.mx - (844) 411-02-00; Fax (844) 411-02-00, Ext. 2041

e-mail: investigacion@uaaan.mx