

Correlación y análisis de coeficiente de sendero en chile dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivado bajo invernadero

Correlation and path coefficient analysis in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grown under greenhouse conditions

José Eladio Monge-Pérez¹, Esteban Elizondo-Cabalcaeta²,
Michelle Loría-Coto³

Fecha de recepción: 14 de setiembre de 2020

Fecha de aprobación: 18 de enero de 2021

Monge-Pérez, J.E; Elizondo-Cabalcaeta, E; Loría-Coto, M. Correlación y análisis de coeficiente de sendero en chile dulce (*Capsicum annuum* L.) cultivado bajo invernadero. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-1. Enero-Marzo 2022. Pág 128-139.

<https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5335>

- 1 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Investigador de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, docente de la Sede de Guacaste, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx
 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>
- 2 Ingeniero agrónomo, egresado de la Universidad Nacional, Costa Rica.
Correo electrónico: estebanec5@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-7483-0662>
- 3 Máster en Administración Educativa, Investigadora de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.
Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>



Palabras clave

Capsicum annuum; calidad; rendimiento; correlación de Pearson; análisis de sendero; número de frutos por planta.

Resumen

Se establecieron correlaciones de Pearson entre doce variables para 27 genotipos de chile dulce producidos bajo invernadero. Las variables evaluadas fueron: altura de planta (AP), área de la hoja (AH), diámetro del tallo (DT), longitud del tallo (LT), longitud del fruto (LF), ancho del fruto (AF), relación longitud/ancho del fruto (LF/AF), grosor del pericarpio (GP), número de frutos por planta (NFP), edad al inicio de cosecha (EIC), peso del fruto de primera calidad (PF), y rendimiento comercial (RC). Además, se realizó el análisis de sendero para RC. Se obtuvo una correlación positiva y significativa entre RC y, tanto NFP ($r=0,51^{**}$), como LF ($r=0,40^*$) y LF/AF ($r=0,39^*$). El principal efecto directo positivo sobre RC fue ejercido por NFP (coeficiente de sendero-CS=1,78), seguido por PF (CS=0,73), AF (CS=0,70), LF (CS=0,62), GP (CS=0,31) y AP (CS=0,26), mientras que los máximos efectos indirectos positivos sobre RC fueron ejercidos por AH (CS=1,37), LF/AF (CS=1,29), AP (CS=1,17), LT (CS=1,13) y LF (CS=1,01), a través de NFP. Por otra parte, DT (CS=-0,37), LT (CS=-0,24), EIC (CS=-0,22) y AH (CS=-0,18) ejercieron un efecto directo negativo sobre RC. Los resultados obtenidos de la correlación y el análisis de sendero mostraron que la eficiencia en la selección para RC en chile dulce puede ser aumentada a través de la selección de NFP. Se concluye que NFP fue la variable principal que contribuyó con RC, y que es un criterio de selección fundamental en fitomejoramiento de chile dulce cultivado bajo invernadero. Otras variables importantes a considerar son LF y LF/AF.

Keywords

Capsicum annuum; quality; yield; Pearson correlation; path analysis; number of fruits per plant.

Abstract

For 27 sweet pepper genotypes grown under greenhouse conditions the researchers estimated Pearson correlations among twelve variables: plant height (PH), leaf area (LA), stem diameter (SD), stem length (SL), fruit length (FL), fruit width (FW), fruit length/width ratio (FL/FW), pericarp thickness (PT), number of fruits per plant (NFP), days to start of harvest (DSH), first quality fruit weight (FQFW), and commercial yield (CY). Also, path analysis was estimated for CY. CY showed a positive and significant correlation with NFP ($r=0,51^{**}$), FL ($r=0,40^*$) and FL/FW ($r=0,39^*$). The main positive direct effects on CY were exhibited by NFP (path coefficient-PC=1,78), FQFW (PC=0,73), FW (PC=0,70), FL (PC=0,62), PT (PC=0,31) and PH (PC=0,26), while maximum positive indirect effects on CY were exhibited by LA (PC=1,37), FL/FW (PC=1,29), PH (PC=1,17), SL (PC=1,13) and FL (PC=1,01) through NFP. On the other hand, the main negative direct effects on CY were exhibited by SD (PC=-0,37), SL (PC=-0,24), DSH (PC=-0,22) and LA (PC=-0,18). Results from correlation and path analysis showed that efficiency in selection for CY in sweet pepper may be increased through selection of NFP. It is concluded that NFP was the main CY contributing variable in these trials, and thus represents a fundamental selection criteria for greenhouse sweet pepper breeding. Other important variables to consider are FL and FL/FW.

Introducción

El chile dulce (*Capsicum annuum* L.) pertenece a la familia Solanaceae, y es una de las hortalizas más populares, cuyo origen es Centro y Suramérica [1]; es un cultivo que se siembra en grandes áreas en todas las zonas del mundo, y posee una gran variabilidad de cultivares [2].

La especie *C. annuum* presenta dos componentes químicos que la hacen interesante: la capsantina, que le confiere el color rojo del fruto a muchas variedades; y la capsaicina, que le brinda la pungencia a los cultivares que la poseen, como el denominado ‘chilli’ en India y otros países, que se usa como especia o condimento en la cocina [3]. Por el contrario, los chiles dulces se caracterizan por su ausencia de capsaicina.

El chile dulce se cultiva por su sabor, su aroma delicado y placentero, y su color. Se usa en ensaladas y como hortaliza cocida, y representa un componente importante del mercado mundial de hortalizas frescas [4].

En fitomejoramiento, generalmente hay interés en mejorar varios atributos del fenotipo simultáneamente; el grado en que esos caracteres están correlacionados, influirá en el éxito de los fitomejoradores. Además, el desarrollo de cultivares de alto rendimiento requiere del conocimiento de la variación genética existente y del grado de asociación entre las características que contribuyen con el rendimiento. Por lo tanto, la selección debe ser realizada con base en esas características componentes, después de evaluar su asociación con el rendimiento [5].

La capacidad productiva en chile dulce es una característica compleja, que resulta de varios componentes morfológicos: número de flores, tamaño del fruto, grosor del pericarpio, peso del fruto; todos estos caracteres son específicos de cada genotipo, y son altamente influenciados por las condiciones de crecimiento y desarrollo; por lo tanto, el rendimiento está determinado por la interacción de factores genéticos, fisiológicos y ambientales [4].

El chile dulce presenta una alta variabilidad de caracteres, y pocas correlaciones entre ellos [2]. El establecimiento de correlaciones entre caracteres, y el grado de su influencia recíproca, es muy útil en los procesos de selección genética. El conocimiento de las correlaciones ofrece la posibilidad de evaluar los caracteres complejos mediante la evaluación de los caracteres menos complejos [2] [6]. Es imperativo conocer la interrelación entre el rendimiento y sus componentes para llegar a un índice de selección óptimo para el fitomejoramiento del rendimiento [7] [5]. El estudio de las relaciones entre las características cuantitativas es importante para evaluar la viabilidad de la selección conjunta de dos o más características [8].

La correlación y el análisis de sendero son herramientas estadísticas que ayudan a organizar la relación entre las variables predictoras y las variables de respuesta. La correlación simplemente mide la asociación entre el rendimiento y otras características, mientras que el análisis de coeficiente de sendero permite la separación de la correlación en efectos directos (coeficiente de sendero) y los efectos indirectos (efectos ejercidos a través de otras variables) [7].

El estudio de los coeficientes de correlación indica la naturaleza de la asociación, pero esto por sí solo no provee una visión exacta de la influencia relativa de cada característica sobre el rendimiento, debido a que una característica puede no estar directamente correlacionada con el rendimiento, pero puede influenciarlo a través de otras características. Por lo tanto, la correlación entre dos variables indica solo que las variables están asociadas, pero no implica una relación de causa y efecto [9] [10] [11] [12] [13].

Para describir en mayor profundidad los valores de correlación fenotípica, se diseñó el análisis de coeficiente de sendero, para identificar las características que tienen efectos directos e indirectos significativos sobre el rendimiento de frutos. En esta situación, el coeficiente

de correlación puede ser confundido con el efecto indirecto debido a la asociación común inherente en las interrelaciones entre características. El análisis de coeficiente de sendero es útil en proveer información adicional que describe a priori las relaciones de causa y efecto, entre el rendimiento y sus componentes. Por lo tanto, el análisis de sendero permite la separación del efecto directo, y el efecto indirecto a través de otras características relacionadas, por medio de la desagregación (partición) de los coeficientes de correlación [5] [14] [15] [10] [16] [11] [9], y esto puede ayudar en la identificación de las características que más contribuyen con el rendimiento [8] [1]. La técnica de análisis de sendero ha colaborado en el desarrollo de estrategias apropiadas para seleccionar genotipos superiores en diferentes cultivos [4].

Varios investigadores han realizado estudios sobre la correlación de variables en chile dulce [17], [6], [18], [2] [19]. Por otra parte, varios investigadores han utilizado el análisis de sendero en chile dulce [19] [6] [20] [21] [22] [3] [10] [8] [12] [13] [23] [14] [24] [15] [1] [5] [7] [25] [26] [16] [9] [11] [27] [28] [4].

El objetivo de esta investigación fue establecer las correlaciones de Pearson entre doce variables, y obtener el análisis de sendero para el rendimiento comercial, en 27 genotipos de chile dulce cultivados bajo ambiente protegido, en Alajuela, Costa Rica.

Materiales y métodos

La investigación se realizó de julio de 2010 a abril de 2011, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, situada a 10° 1' latitud Norte y 84° 16' longitud Oeste, en el distrito San José del cantón Central de la provincia de Alajuela, a una altitud de 883 msnm, con un promedio de precipitación anual de 1940 mm distribuidos de mayo a noviembre, y un promedio anual de temperatura de 22 °C.

El ensayo se llevó a cabo en un invernadero modelo XR de la marca Richel (Francia), tipo multicapilla, de plástico, con ventilación cenital automática. Se evaluaron 27 genotipos híbridos de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) (cuadro 1), correspondientes a tres tipos, según la forma del fruto: cónico (12 genotipos), cuadrado (13 genotipos) y rectangular (2 genotipos).

Cuadro 1. Genotipos de chile dulce utilizados en la investigación.

Tipo de chile dulce	Genotipos
Cónico (n=12)	Cortés (Distribuidora Agro Comercial); FBM-1 (Universidad de Costa Rica); FBM-2 (Universidad de Costa Rica); FBM-3 (Universidad de Costa Rica); FBM-7 (Universidad de Costa Rica); FBM-11 (Universidad de Costa Rica); FBM-12 (Universidad de Costa Rica); Jumbo (Villaplants); Lamuyo Amarillo (Villaplants); Lamuyo Experimental (Villaplants); Tiquicia (Villaplants); V-701 (Seracsa)
Cuadrado (n=13)	Amarillo Americano (Villaplants); MACR-101-07 (Semillas Este Oeste); MACR-102-07 (Semillas Este Oeste); MACR-103-07 (Semillas Este Oeste); MACR-104-07 (Semillas Este Oeste); MACR-105-07 (Semillas Este Oeste); Magno (Resusa); Oberon (Resusa); Rojo Americano (Villaplants); Sweet Pepper Red (Semillas Agrícolas de Costa Rica); Vikingo (Sakata); XPPAD-169 (Sakata); XPPAD-286 (Sakata)
Rectangular (n=2)	Estrella (Rauco); XC-425 (Seracsa)

Nota: El nombre entre paréntesis corresponde a la empresa productora o comercializadora de la semilla de cada genotipo.

El almácigo se sembró el 7 de julio de 2010. El trasplante se realizó 43 días después de la siembra. Las plántulas se establecieron en sacos de 1 m de longitud, 22 cm de ancho, y 22 cm de altura, rellenos con sustrato de fibra de coco. La distancia entre hileras fue de 1,54 m, y entre plantas de 0,25 m, para una densidad de 2,60 plantas/m². El cultivo se manejó en condiciones hidropónicas, y mediante poda española, que consistió en dejar las plantas a libre crecimiento. Se implementó un sistema de manejo integrado de plagas, y se utilizó un programa de fertilización validado para la producción comercial de chile dulce, según las experiencias previas en el invernadero de la EEAFBM. El fertirriego se suministró a cada hora, entre las 7:00 a.m. y las 4:00 p.m.

La cosecha se realizó del 1º de noviembre de 2010 al 14 de abril de 2011, y se realizó un total de 20 cosechas, las cuales se efectuaron semanalmente recolectando todos los frutos con un 50 % de madurez mínima. Los frutos se clasificaron en tres categorías de calidad (primera, segunda y rechazo), de acuerdo a diversos parámetros, según el tipo de chile dulce (cuadros 2 y 3).

Cuadro 2. Parámetros de calidad para chile dulce tipo cónico.

Parámetro	Categoría de calidad		
	Primera	Segunda	Rechazo
Longitud del fruto	Mayor a 12 cm	Menor a 12 cm	Menor a 6 cm
Forma del fruto	Sin curvaturas	Con curvaturas	Frutos deformes
Presencia de manchas, cicatrices, o quema de sol	Ninguna	No mayores a 1 cm ²	Mayores a 1 cm ²
Estrías o grietas	Ninguna	No mayores a 3 cm de longitud	Mayores a 3 cm de longitud

Cuadro 3. Parámetros de calidad para chile dulce tipo cuadrado y tipo rectangular.

Parámetro	Categoría de calidad		
	Primera	Segunda	Rechazo
Longitud y ancho del fruto	Igual o mayor a 7,5 cm	Menor a 7,5 cm	Menor a 7,5 cm
Forma del fruto	Puntas bien definidas	Puntas deformes	Frutos muy deformes
Presencia de manchas, cicatrices, o quema de sol	Ninguna	No mayores a 1 cm ²	Mayores a 1 cm ²
Estrías o grietas	Ninguna	No mayores a 3 cm de longitud	Mayores a 3 cm de longitud

Se evaluaron las siguientes variables:

1. Altura de la planta (AP, en m): se midió la altura de las plantas al final del ciclo del cultivo, a los 209 días después de trasplante (ddt). La altura se midió desde la base del tallo de la planta, hasta el último meristemo de crecimiento apical, con la ayuda de una cinta métrica marca Assist, modelo 32G-8025, con una capacidad de 800,0 ± 0,1 cm.
2. Área de la hoja (AH, en cm²): a los 182 ddt se tomaron ocho hojas ubicadas en la parte central de las plantas, para cada unidad experimental. Cada muestra se evaluó utilizando un medidor de área foliar Modelo Li-3100C, y se calculó el promedio por hoja.

3. Diámetro del tallo (DT, en mm): se realizó una medición a cada una de las plantas de la unidad experimental a los 182 ddt; esto se realizó con la ayuda de un calibrador digital marca Mitutoyo, modelo CD, con una capacidad de $15,00 \pm 0,01$ cm. Esta medición se hizo en la parte media del tallo, antes de la primera bifurcación.
4. Longitud del tallo (LT, en cm): se realizó la medición a los 48 ddt, a cada planta de la unidad experimental, y se obtuvo el promedio. La medición se realizó con una cinta métrica, desde la base del tallo de la planta hasta la zona en que inicia la bifurcación del tallo.
5. Longitud del fruto (LF, en cm): se evaluó esta característica a 20 frutos de cada repetición, en frutos que no presentaba deformidades. A cada fruto se le midió su dimensión longitudinal, con un calibrador digital.
6. Ancho del fruto (AF, en cm): se evaluó esta característica a 20 frutos de cada repetición, en frutos que no presentaban deformidades. A cada fruto se le midió sus dimensiones en la sección ecuatorial, con un calibrador digital.
7. Relación longitud/ancho del fruto (LF/AF): se obtuvo al dividir la longitud entre el ancho de cada fruto, y luego se obtuvo el promedio.
8. Grosor del pericarpio (GP, en mm): se recolectaron 20 frutos por cada repetición a lo largo de la cosecha. Se realizó un corte transversal en la parte media del fruto, y con un calibrador digital se midió el grosor del pericarpio en la parte más ancha.
9. Número de frutos por planta (NFP): se obtuvo al registrar el número total de frutos producidos en cada parcela, y dividir ese dato entre el número de plantas por parcela.
10. Edad al inicio de la cosecha (EIC, en ddt): se registró la fecha de inicio de la cosecha para cada parcela, y se calculó el número de días transcurridos desde el trasplante.
11. Peso del fruto de primera calidad (PF, en g): se midió el peso de cada uno de los frutos de primera calidad producido, y se obtuvo el promedio. Para la evaluación de esta variable, se utilizó una balanza electrónica marca Ocony, modelo TH-I-EK, con una capacidad de $5000,0 \pm 0,1$ g.
12. Rendimiento comercial (RC, en kg/planta): se contabilizó el peso de los frutos de primera y segunda calidad producidos por parcela, y se dividió ese dato entre el número de plantas por parcela.

Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar, con dos repeticiones por tratamiento (genotipo). La unidad experimental estuvo constituida por dos sacos con cuatro plantas cada una, y la parcela útil se formó por las cuatro plantas ubicadas en la posición central de la unidad experimental. Todos los frutos producidos dentro de la parcela útil fueron evaluados. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre las doce variables evaluadas. Además, se realizó el análisis de sendero para RC (variable dependiente), en cuyo caso se obtuvo el coeficiente de sendero (CS), tanto para los efectos directos como indirectos.

Resultados y discusión

En el cuadro 4 se muestra el resumen estadístico de los valores obtenidos para cada una de las variables estudiadas. Sobresale el alto coeficiente de variación obtenido por LF/AF (CV = 42,52%) y NFP (CV = 31,73%); las otras variables que también mostraron una variabilidad importante de los datos fueron LF (CV = 25,48%), PF (CV = 24,29%), LT (CV = 23,16%) y AH (CV = 20,94%).

En el cuadro 5 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson (r), entre las variables evaluadas. De las 66 correlaciones de Pearson calculadas, 24 de ellas fueron no significativas, 4 fueron significativas ($p \leq 0,05$), y 38 fueron altamente significativas ($p \leq 0,01$). Por su magnitud, sobresalen las correlaciones obtenidas entre: LF y LF/AF ($r = 0,96^{**}$); AF y LF/AF ($r = -0,90^{**}$); AP y AH ($r = 0,90^{**}$); AF y PF ($r = 0,89^{**}$); AF y NFP ($r = -0,89^{**}$); NFP y PF ($r = -0,88^{**}$); AH y GP ($r = -0,87^{**}$); AF y GP ($r = 0,86^{**}$); y GP y NFP ($r = -0,85^{**}$).

Cuadro 4. Resumen estadístico de los valores obtenidos para cada variable en chile dulce.

Variable	Promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
AP	1,30	0,82	1,71	1,31	0,22	17,19
ÁH	115,14	73,91	158,91	117,35	24,11	20,94
DT	14,45	12,51	16,55	14,66	1,16	8,02
LT	25,81	11,38	36,88	26,13	5,98	23,16
AF	7,18	4,97	9,28	7,25	1,40	19,54
LF	10,84	7,78	19,43	11,24	2,76	25,48
LF/AF	1,63	0,90	3,49	1,48	0,69	42,52
GP	5,17	4,06	6,31	5,48	0,70	13,58
EIC	80,89	74	91	83	5,03	6,21
NFP	23,90	14,51	38,50	21,00	7,58	31,73
PF	175,79	106,65	243,45	185,00	42,70	24,29
RC	2,35	1,70	3,01	2,31	0,39	16,61

Nota: AP: altura de planta (m); AH: área de la hoja (cm^2); DT: diámetro de tallo (mm); LT: longitud de tallo (cm); AF: ancho del fruto (cm); LF: longitud del fruto (cm); LF/AF: relación longitud/ancho del fruto; GP: grosor del pericarpio (mm); EIC: edad al inicio de cosecha (ddt); NFP: número frutos por planta; PF: peso del fruto (g); RC: rendimiento comercial (kg/planta).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las variables en chile dulce.

	AH	DT	LT	AF	LF	GP	EIC	NFP	PF	RC	LF/AF
AP	0,90 ^{**}	0,54 ^{**}	0,50 ^{**}	-0,63 ^{**}	0,56 ^{**}	-0,78 ^{**}	0,42 [*]	0,66 ^{**}	-0,58 ^{**}	0,15 ^{ns}	0,59 ^{**}
AH		0,46 [*]	0,57 ^{**}	-0,71 ^{**}	0,58 ^{**}	-0,87 ^{**}	0,30 ^{ns}	0,77 ^{**}	-0,65 ^{**}	0,22 ^{ns}	0,65 ^{**}
DT			-0,14 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	0,17 ^{ns}
LT				-0,73 ^{**}	0,54 ^{**}	-0,63 ^{**}	0,06 ^{ns}	0,63 ^{**}	-0,61 ^{**}	0,19 ^{ns}	0,64 ^{**}
AF					-0,76 ^{**}	0,86 ^{**}	0,03 ^{ns}	-0,89 ^{**}	0,89 ^{**}	-0,35 ^{ns}	-0,90 ^{**}
LF						-0,73 ^{**}	0,12 ^{ns}	0,56 ^{**}	-0,50 ^{**}	0,40 [*]	0,96 ^{**}
GP							-0,24 ^{ns}	-0,85 ^{**}	0,76 ^{**}	-0,28 ^{ns}	-0,82 ^{**}
EIC								-0,05 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,03 ^{ns}
NFP									-0,88 ^{**}	0,51 ^{**}	0,73 ^{**}
PF										-0,23 ^{ns}	-0,69 ^{**}
RC											0,39 [*]

Nota: AP: altura de planta (m); AH: área de la hoja (cm^2); DT: diámetro de tallo (mm); LT: longitud de tallo (cm); AF: ancho del fruto (cm); LF: longitud del fruto (cm); GP: grosor del pericarpio (mm); EIC: edad al inicio de cosecha (ddt); NFP: número frutos por planta; PF: peso del fruto (g); RC: rendimiento comercial (kg/planta); LF/AF: relación longitud/ancho del fruto; ns: no significativa; *: significativa ($p \leq 0,05$); **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

La correlación hallada entre LF y LF/AF fue positiva y altamente significativa ($r = 0,96^{**}$). En otro ensayo se obtuvo también una correlación positiva entre estas variables ($r = 0,65$) [18].

En la presente investigación se encontró una correlación negativa y altamente significativa entre AF y LF/AF ($r = -0,90^{**}$); otros investigadores hallaron también un resultado similar ($r = -0,70$ a $-0,78$) [18].

La correlación obtenida entre AP y AH fue positiva y altamente significativa ($r = 0,90^{**}$); en otro estudio se encontró un resultado similar ($r = 0,36^*$) [14], pero en otros estudios la correlación entre estas variables no fue significativa [22] [19].

En el presente trabajo se halló una correlación positiva y altamente significativa entre AF y PF ($r = 0,89^{**}$); otros autores encontraron también una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas variables ($r = 0,28 - 0,97$) [17] [21] [23] [14] [25] [26] [27] [6] [18] [2] [11] [1] [15] [10] [3] [19]. Sin embargo, otros investigadores hallaron una correlación negativa y significativa entre ambas variables ($r = -0,22^*$) [12]; y en otros trabajos dicha correlación no fue significativa [9] [7] [24] [22] [20].

La correlación encontrada entre AF y NFP fue negativa y altamente significativa ($r = -0,89^{**}$); otros autores también hallaron una correlación negativa, y significativa o altamente significativa, entre dichas variables ($r = -0,21$ a $-0,62$) [26] [16] [11] [7] [10]. Sin embargo, en otros estudios dicha correlación fue positiva, y significativa o altamente significativa ($r = 0,17$ a $0,65$) [17] [21] [23] [15] [3]; y en otros casos esta correlación no fue significativa [9] [27] [6] [2] [5] [1] [24] [22] [20] [19].

En el presente ensayo se encontró una correlación altamente significativa y negativa entre NFP y PF ($r = -0,88^{**}$). En otros trabajos se halló también una correlación negativa, y significativa o altamente significativa, entre ambas variables ($r = -0,27$ a $-0,82$) [23] [9] [11] [10] [3]. Sin embargo, en otros casos se encontró una correlación positiva, y significativa o altamente significativa ($r = 0,20 - 0,66$) [21] [7] [15]; y en otros estudios dicha correlación no fue significativa [17] [26] [27] [6] [2] [1] [24] [13] [8] [22] [20] [19].

La correlación hallada entre AH y GP fue negativa y altamente significativa ($r = -0,87^{**}$). Sin embargo, otros autores obtuvieron correlaciones no significativas entre ambas variables [22] [19].

En la presente investigación se encontró una correlación positiva y altamente significativa entre AF y GP ($r = 0,86^{**}$). Otros investigadores hallaron también una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre ambas variables ($r = 0,32$ a $0,87$) [17] [23] [25] [18] [2] [3] [22]; y en otros estudios dicha correlación no fue significativa [5] [20] [19].

En el presente trabajo se halló una correlación negativa y altamente significativa entre GP y NFP ($r = -0,85^{**}$); otros autores encontraron también una correlación negativa, y significativa o altamente significativa, entre estas variables ($r = -0,31$ a $-0,73$) [23] [3]. Sin embargo, otros investigadores hallaron una correlación positiva y altamente significativa entre ambas variables ($r = 0,28^{**}$) [17]; y en otros trabajos dicha correlación no fue significativa [2] [5] [22] [20] [19].

Con respecto al rendimiento comercial, se obtuvo una correlación positiva y altamente significativa entre RC y NFP ($r = 0,51^{**}$), y una correlación positiva y significativa entre RC y LF ($r = 0,40^*$), así como entre RC y LF/AF ($r = 0,39^*$).

En el cuadro 6 se presentan los coeficientes de sendero (CS) estimados de los efectos directos e indirectos de las variables evaluadas sobre RC en Chile dulce, según el análisis de sendero.

Cuadro 6. Coeficientes de sendero (CS) estimados de los efectos directos (diagonal, en letra negrita) e indirectos de las variables sobre el rendimiento comercial (kg/planta) en chile dulce.

	AP	AH	DT	LT	AF	LF	GP	EIC	NFP	PF	LF/AF	CRC
AP	0,26	-0,16	-0,20	-0,12	-0,44	0,35	-0,24	-0,09	1,17	-0,42	0,04	0,15 ^{ns}
AH	0,23	-0,18	-0,17	-0,14	-0,50	0,36	-0,27	-0,07	1,37	-0,47	0,05	0,22 ^{ns}
DT	0,14	-0,08	-0,37	0,03	-0,06	0,11	-0,11	-0,08	0,18	-0,08	0,01	-0,29 ^{ns}
LT	0,13	-0,10	0,05	-0,24	-0,51	0,34	-0,20	-0,01	1,13	-0,45	0,05	0,19 ^{ns}
AF	-0,16	0,13	0,03	0,17	0,70	-0,48	0,27	-0,01	-1,58	0,65	-0,07	-0,35 ^{ns}
LF	0,15	-0,10	-0,06	-0,13	-0,53	0,62	-0,23	-0,03	1,01	-0,36	0,07	0,40 [*]
GP	-0,21	0,16	0,13	0,15	0,60	-0,46	0,31	0,05	-1,52	0,56	-0,06	-0,28 ^{ns}
EIC	0,11	-0,05	-0,12	-0,01	0,02	0,07	-0,07	-0,22	-0,08	0,12	0,003	-0,25 ^{ns}
NFP	0,17	-0,14	-0,04	-0,15	-0,62	0,35	-0,27	0,01	1,78	-0,65	0,05	0,51 ^{**}
PF	-0,15	0,12	0,04	0,15	0,62	-0,31	0,24	-0,04	-1,57	0,73	-0,05	-0,23 ^{ns}
LF/AF	0,15	-0,12	-0,06	-0,15	-0,63	0,60	-0,25	-0,01	1,29	-0,50	0,07	0,39 [*]

Nota: AP: altura de planta (m); AH: área de la hoja (cm²); DT: diámetro de tallo (mm); LT: longitud de tallo (cm); AF: ancho del fruto (cm); LF: longitud del fruto (cm); GP: grosor del pericarpio (mm); EIC: edad al inicio de cosecha (ddt); NFP: número frutos por planta; PF: peso del fruto (g); LF/AF: relación longitud/ancho del fruto; CRC: correlación con el rendimiento comercial; ns: no significativa; *: significativa (p≤0,05); **: altamente significativa (p≤0,01).

El principal efecto directo positivo fue ejercido por NFP (CS = 1,78). Además, las otras variables que ejercieron un efecto directo positivo relevante sobre RC fueron PF (CS = 0,73), AF (CS = 0,70), LF (CS = 0,62), GP (CS = 0,31) y AP (CS = 0,26). Los principales efectos indirectos positivos sobre RC fueron ejercidos por AH (CS = 1,37), LF/AF (CS = 1,29), AP (CS = 1,17), LT (CS = 1,13) y LF (CS = 1,01), a través de NFP. Esto indica que los frutos alargados (mayor LF y mayor LF/AF) producen más frutos por planta, y esto contribuye a un mayor RC, por lo que son caracteres importantes para la selección genética en fitomejoramiento en chile dulce. De todas las variables evaluadas, solamente NFP, LF y LF/AF obtuvieron correlaciones positivas significativas (o altamente significativas) con RC, y también efectos directos positivos sobre RC, lo que enfatiza la importancia de dichas variables en el fitomejoramiento de chile dulce producido bajo invernadero.

Otros efectos indirectos positivos sobre RC fueron ejercidos por AF (CS = 0,65) y GP (CS = 0,56), a través de PF; por PF (CS = 0,62) y GP (CS = 0,60), a través de AF; y por LF/AF (CS = 0,60), a través de LF.

Por otra parte, las siguientes variables ejercieron un efecto directo negativo sobre RC: DT (CS = -0,37), LT (CS = -0,24), EIC (CS = -0,22), y AH (CS = -0,18). Además, los principales efectos indirectos negativos fueron ejercidos por AF (CS = -1,58), PF (CS = -1,57) y GP (CS = -1,52), en todos los casos a través de NFP; por NFP (CS = -0,65) a través de PF; y por LF/AF (CS = -0,63) y NFP (CS = -0,62), a través de AF.

En el cuadro 7 se muestran las variables que ejercen los efectos directos (positivos y negativos) más importantes sobre el rendimiento en chile dulce, según varias investigaciones. Todos esos trabajos se llevaron a cabo a campo abierto, con excepción de uno que fue realizado en invernadero en India [4]; por lo tanto, la presente investigación podría constituir el primer informe publicado sobre análisis de sendero en chile dulce cultivado bajo invernadero, realizado fuera de la India.

Al igual que en el presente trabajo, en otras investigaciones el principal efecto directo positivo se encontró para NFP [27] [11] [1] [24] [22] [19] [6]. En otros trabajos, el principal efecto directo positivo fue ejercido por PF [3] [8]; en el presente ensayo dicha variable ocupó la segunda posición, con un coeficiente (CS = 0,73) que representó menos de la mitad del coeficiente obtenido por NFP.

Con relación al principal efecto directo negativo sobre RC, al igual que en el presente ensayo, en otra investigación también dicho efecto fue hallado para DT [5], y en otros ensayo dicha variable ocupó la segunda posición como efecto directo negativo principal [15].

En el cultivo de melón (*Cucumis melo*), se ha informado que la asociación de caracteres revelada por el análisis de sendero puede estar influenciada por diferentes factores, como el germoplasma utilizado, el ambiente, y las variables usadas en el análisis [29], por lo que la aplicabilidad general del análisis de sendero puede ser establecida por medio del análisis de datos de diferentes grupos de germoplasma bajo diferentes condiciones de producción [30]. Entonces, se puede deducir también que, en el caso de chile dulce, las diferencias entre los valores obtenidos en el presente ensayo y los datos de la literatura, se pueden deber a las diferencias en el material genético utilizado y en las condiciones ambientales, así como en las variables evaluadas.

Cuadro 7. Coeficientes de sendero (CS) estimados de los efectos directos (positivos y negativos) más importantes sobre el rendimiento (kg/planta) en chile dulce, según cada caso informado en la literatura.

Caso	Efectos positivos (CS)		Efectos negativos (CS)		Referencia
	1° posición	2° posición	1° posición	2° posición	
1	LF (0,984)	CAR (0,659)	SST (-0,173)	AP (-0,137)	[4]
2	NFP (0,654)	PF (0,432)	n.d.	n.d.	[27]
3	NFP (1,034)	PF (0,399)	CC (-0,139)	NRPP (-0,038)	[11]
4	EIF (0,864)	PF (0,659)	E50F (-0,836)	AP (-0,086)	[7]
5	RMS (0,669)	LF (0,218)	DT (-0,093)	AP (-0,017)	[5]
6	NFP (0,818)	PF (0,656)	EIF (-0,165)	AF (-0,043)	[1]
7	CF (0,814)	E50F (0,105)	NRPP (-0,118)	DT (-0,077)	[15]
8	NFP (0,626)	PF (0,203)	LF (-0,005)	n.d.	[24]
9	RA (0,972)	EIC (0,035)	E50F (-0,041)	NRPP (-0,015)	[13]
10	AA (0,760)	CT (0,517)	AD (-0,149)	NRPP (-0,108)	[12]
11	PF (1,306)	CT (1,053)	PP (-1,409)	EIF (-1,225)	[8]
12	EIC (2,710)	DC (2,180)	MF (-2,840)	LF (-0,480)	[10]
13	PF (0,138)	LF (0,123)	NRPP (-0,025)	AP (-0,022)	[3]
14	NFP (0,849)	PF (0,673)	NRPP (-0,186)	LP (-0,142)	[22]
15	GP (5,480)	AF (1,400)	PF (-2,800)	NE (-1,660)	[20]
16	NFP (0,530)	PF (0,310)	EIC (-0,210)	NRPP (-0,170)	[19]
17	NFP (1,036)	PF (0,571)	AF (-0,037)	LF (-0,029)	[6]

Nota: AP: altura de planta (m); DT: diámetro de tallo (mm); AF: ancho del fruto (cm); LF: longitud del fruto (cm); GP: grosor del pericarpio (mm); EIC: edad al inicio de cosecha (ddt); NFP: número frutos por planta; PF: peso del fruto (g); CAR: contenido de azúcares reductores; SST: sólidos solubles totales (°Brix); CC: contenido de capsaicina; NRPP: número de ramas principales por planta; EIF: edad al inicio de la floración (ddt); E50F: edad al 50 % de floración (ddt); RMS: rendimiento de materia seca; CF: cuaje de frutos (%); RA: rendimiento por área (ton/ha); AA: contenido de ácido ascórbico; CT: clorofila total; AD: ancho del dosel; PP: peso del pericarpio; DC: duración de la cosecha (días); MF: madurez del fruto (%); LP: longitud del pedicelo (mm); NE: número de entrenudos; n.d.: no dato.

Conclusiones

Los resultados obtenidos de la correlación y el análisis de sendero mostraron que la eficiencia en la selección para rendimiento comercial en chile dulce puede ser aumentada a través de la selección de NFP.

Se concluye que NFP fue la variable principal que contribuyó con el rendimiento comercial, debido a su efecto directo positivo y alto, y su correlación positiva y alta con el rendimiento comercial por planta, y que es un criterio de selección fundamental en fitomejoramiento de chile dulce cultivado bajo invernadero. Otras variables importantes a considerar son LF y LF/AF.

La presente investigación podría constituir el primer informe publicado sobre análisis de sendero en chile dulce cultivado bajo invernadero, realizado fuera de la India.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Florida y de la Universidad de Costa Rica, para la realización de este trabajo. Asimismo, agradecen la colaboración de Jendry Portilla, Cristina Arguedas, Jorge Díaz, Carlos González y Julio Vega en el trabajo de campo, y de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés.

Referencias

- [1] H. Rokib, A. Matin, A. Nazmul, B. Abul and H. A. K. M. Mahmudul, "Genetic association analysis and selection indices for yield attributing traits in available chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes," *Molecular Plant Breeding*, vol. 7, no. 19, pp. 1-9, 2016.
- [2] E. Madosa, S. Ciulca, G. Velicevici, C. Avadanei, L. Sasu, A. Cioroga and I. Friskan, "Study of correlations between component characters of production capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*)," *Bulletin UASVM, Horticulture*, vol. 65, no. 1, pp. 90-94, 2008.
- [3] M. K. Bundela, S. C. Pant, Madhuri and K. Singh, "Correlation and path coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.) for yield and yield attributing traits," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 7, no. 11, pp. 65-70, 2018.
- [4] S. Roy, S. Chatterjee, M. A. Hossain, S. Basfore and C. Karak, "Path analysis study and morphological characterization of sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*)," *International Journal of Chemical Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1777-1784, 2019.
- [5] A. Shumbulo, M. Nigussie and S. Alamerew, "Correlation and path coefficient analysis of hot pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes for yield and its components in Ethiopia," *Advances in Crop Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 1-5, 2017.
- [6] L. Sasu, E. Madosa, G. Velicevici, S. Ciulca, C. Avadanei and G. Gorinoiu, "Studies regarding correlations between the main morphological traits in a collection of bell pepper (*Capsicum annuum* var. *grossum*) local landraces," *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, vol. 17, no. 2, pp. 285-289, 2013.
- [7] Shweta, H. R. Basavarajappa, D. Satish, R. C. Jagadeesha, C. N. Hanachinmani and A. M. Dileepkumar, "Genetic correlation and path coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes for growth and yield contributing traits," *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 7, no. 2, pp. 1312-1315, 2018.
- [8] R. Dolkar, M. B. Madalageri and G. Manjunath, "Correlation and path analysis for growth, earliness, yield and quality parameters in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *HortFlora Research Spectrum*, vol. 4, no. 3, pp. 268-272, 2015.
- [9] A. Vikram, I. Warshamana and M. Gupta, "Genetic correlation and path coefficient studies on yield and biochemical traits in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *International Journal of Farm Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 70-75, 2014.
- [10] S. Chakrabarty and A. K. M. A. Islam, "Selection criteria for improving yield in chili (*Capsicum annuum*)," *Advances in Agriculture*, pp. 1-9, 2017.
- [11] T. Yatung, R. K. R. Dubey, V. Singh, G. Upadhyay and A. K. Pandey, "Selection parameters for fruit yield and related traits in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *Bangladesh Journal of Botany*, vol. 43, no. 3, pp. 283-291, 2014.

- [12] M. Y. Jogi, M. B. Madalageri, V. M. Ganiger, G. Bhuvaneshwari, H. B. Patil and Y. K. Kotikal, "Character association and path analysis studies in green chilli (*Capsicum annuum* L.)," *International Journal of Agricultural Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 547-550, 2013.
- [13] A. Mamatha, Devaraju, U. P. Chand and V. Srinivasa, "Genetic correlation and path coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes under hill zone of Karnataka," *The Bioscan*, vol. 11, no. 3, pp. 1995-1998, 2016.
- [14] S. Misra, R. K. Lal, M. P. Darokar and S. P. S. Khanuja, "Genetic associations and path-coefficient analysis of the economic traits in the chilli (*Capsicum annuum* L.)," *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 1, no. 3, pp. 346-350, 2010.
- [15] U. U. Pujar, S. Tirakannanavar, R. C. Jagadeesha, V. D. Gasti and N. Sandhyarani, "Genetic variability, heritability, correlation and path analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, vol. 5, no. 5, pp. 579-586, 2017.
- [16] H. M. Vijaya, A. P. M. Gowda and S. D. Nehru, "Genetic variability, correlation coefficient and path analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes," *Research in Environment and Life Sciences*, vol. 7, no. 3, pp. 175-178, 2014.
- [17] S. Cancaya, A. Balkaya and O. Karaagac, "Canonical correlation analysis for the determination of relationships between plant characters and yield components in red pepper [*Capsicum annuum* L. var. *conoides* (Mill.) Irish] genotypes," *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 8, no. 1, pp. 67-73, 2010.
- [18] A. Ben-Chaim and I. Paran, "Genetic analysis of quantitative traits in pepper (*Capsicum annuum*)," *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 125, no. 1, pp. 66-70, 2000.
- [19] V. K. Sharma, C. S. Semwal and S. P. Uniyal, "Genetic variability and character association analysis in bell pepper (*Capsicum annuum* L.)," *Journal of Horticulture and Forestry*, vol. 2, no. 3, pp. 58-65, 2010.
- [20] S. Aklilu, B. Abebie, D. Wogari and A. T. Wolde, "Genetic variability and association of characters in ethiopian hot pepper (*Capsicum annuum* L.) landraces," *Journal of Agricultural Sciences*, vol. 61, no. 1, pp. 19-36, 2016.
- [21] K. Amit, I. Ahad, V. Kumar and S. Thakur, "Genetic variability and correlation studies for growth and yield characters in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *Journal of Spices and Aromatic Crops*, vol. 23, no. 2, pp. 170-177, 2014.
- [22] P. Bijalwan and A. C. Mishra, "Correlation and path coefficient analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.) for yield and yield attributing traits," *International Journal of Science and Research*, vol. 5, no. 3, pp. 1589-1592, 2016.
- [23] D. Mathew, S. D. Doijode and K. M. Reddy, "Correlation and path coefficient analysis in five species of *Capsicum*," *Capsicum and Eggplant Newsletter*, vol. 23, pp. 57-60, 2004.
- [24] M. K. Pandit and S. Adhikary, "Variability and heritability estimates in some reproductive characters and yield in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *International Journal of Plant & Soil Science*, vol. 3, no. 7, pp. 845-853, 2014.
- [25] A. R. Silva, M. Nascimento, P. R. Cecon, M. J. L. C. Sapucay, E. R. Rêgo and L. A. Barbosa, "Path analysis in multicollinearity for fruit traits of pepper," *IDESIA*, vol. 31, no. 2, pp. 55-60, 2013.
- [26] B. V. Tembhrune and S. K. Rao, "Stability analysis in chilli (*Capsicum annuum* L.)," *Journal of Spices and Aromatic Crops*, vol. 22, no. 2, pp. 154-164, 2013.
- [27] E. Madosa, L. Sasu, S. Ciulca, G. Velicevici, E. A. Ciulca and C. Avadanei, "Possibility of use of Romanian bell pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*) local landraces in breeding process," *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, vol. 38, no. 2, pp. 56-60, 2010.
- [28] C. G. P. Carvalho, V. R. Oliveira, C. D. Cruz and V. W. D. Casali, "Análise de trilha sob multicolinearidade em pimentão," *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 34, no. 4, pp. 603-613, 1999.
- [29] E. Feyzian, H. Dehghani, A. M. Rezai and M. Jalali, "Correlation and sequential path model for some yield-related traits in melon (*Cucumis melo* L.)," *Journal of Agricultural Science and Technology*, vol. 11, pp. 341-353, 2009.
- [30] B. P. Reddy, H. Begum, N. Sunil and M. T. Reddy, "Correlation and path coefficient analysis in muskmelon (*Cucumis melo* L.)," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 6, no. 6, pp. 2261-2276, 2017.