

Artículo original

Correlación canónica entre caracteres vegetativos y del fruto en familias de guayabo (*Psidium guajava* L.)

Leneidy Pérez-Pelea^{1*}

Evelyn Bandera-Fernández¹

Juliette Valdés-Infante Herrero²

Josefa Bárbara Velázquez-Palenzuela³

¹Departamento Biología vegetal, Facultad de Biología, Universidad de la Habana. Calle 25 # 455 / I y J, Vedado, La Habana, Cuba

²Departamento de Mejoramiento genético. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Ave 7ma # 3005 / 30 y 32, Miramar, La Habana, Cuba

³Unidad Científica Tecnológica de Base de Alquizar. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Carretera de Pestana Km 2½, Alquizar, Artemisa, Cuba

* Autor para correspondencia. lene@fbio.uh.cu

RESUMEN

El guayabo es un cultivo de gran importancia económica en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. El conocimiento de las asociaciones entre caracteres de importancia agronómica es de gran utilidad en los programas de mejoramiento y selección de cultivares. En el presente estudio se utilizó un análisis de correlación canónica, para estimar la relación existente entre caracteres vegetativos y del fruto, evaluados en tres familias de hermanos completos de guayabo. Las familias fueron obtenidas a partir de cruzamientos intraespecíficos controlados, realizados en el Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Se observaron correlaciones genéticas positivas y significativas entre la mayoría de los caracteres del fruto. Entre caracteres vegetativos y del fruto, se detectaron pocas asociaciones. Sólo se detectó un valor del coeficiente de correlación canónica significativo en el primer par de variables canónicas. El análisis indicó que, entre los caracteres vegetativos, el ancho de la hoja fue el que más contribuyó a la explicación de las variables

canónicas en las familias de hermanos completos de guayabo. En los caracteres del fruto, el número de semillas, el ancho del fruto y el espesor interno de la pulpa, fueron los de mayor contribución a las variables canónicas estimadas. Con el empleo del análisis de correlación canónica se pudo determinar que existe baja asociación entre el grupo de caracteres vegetativos y el del fruto. Por esta razón, no se debe emplear alguno de estos grupos de caracteres para predecir el comportamiento del otro, en estas familias de guayabo.

Palabras clave: fitomejoramiento, selección, correlación genética, análisis multivariante

Recibido: 30/10/2018

Aceptado: 14/06/2019

INTRODUCCIÓN

El guayabo (*Psidium guajava* L.), es uno de los frutales más conocidos, que se cultiva ampliamente en más de 60 países, de las regiones tropicales y subtropicales del mundo ⁽¹⁾

. Se incluye en el género *Psidium* que agrupa alrededor de 150 especies de árboles y arbustos, de las cuales sólo 20 producen frutos comestibles ⁽²⁾.

La demanda y expansión del cultivo del guayabo se ha desarrollado por la necesidad de obtener cultivares, con frutos de buena calidad y larga duración, resistentes a enfermedades y con alto contenido de nutrientes ⁽³⁾. La selección de genotipos promisorios y la propuesta de nuevos cultivares requiere de la evaluación de caracteres de interés agrícola, que presentan herencia cuantitativa y tienen un efecto ambiental negativo. Muchos de estos caracteres están asociados con otros, por lo que la selección de un carácter puede afectar a otros de manera positiva o negativa ⁽⁴⁾. Por esta razón, es importante determinar las correlaciones entre caracteres de interés para el mejoramiento, las cuales pueden originarse por ligamiento de genes o pleiotropía ⁽⁵⁾.

Cuando los caracteres están correlacionados, el criterio de selección que considera una sola variable, puede no generar una ganancia genética satisfactoria para todos los caracteres evaluados ⁽⁵⁾. Los análisis de correlación son factibles para determinar las relaciones mutuas entre varios caracteres y sugieren la ventaja de un esquema de selección para más de un carácter a la vez ⁽¹⁾. Sin embargo, la magnitud y el valor de los coeficientes de correlación no

es suficiente para aclarar las relaciones entre los caracteres, debido a que no existe una relación causa-efecto entre ellos ⁽⁶⁾.

La correlación canónica es un método de análisis multivariado utilizado para examinar la relación entre dos grupos de caracteres ⁽⁷⁾. Este análisis permite agrupar caracteres de interés, de forma tal que la determinación de las asociaciones entre los grupos posibilite la selección indirecta de caracteres ⁽⁴⁾, por lo que brinda informaciones valiosas para la selección de ideotipos en programas de mejoramiento ⁽⁸⁾. En esta técnica, los estimados de correlación se realizan entre combinaciones lineales de los dos grupos de caracteres, denominadas variables canónicas. La correlación entre los correspondientes pares de variables canónicas se define como correlación canónica ⁽⁹⁾

En agronomía, el análisis canónico se ha utilizado para estimar la asociación entre dos grupos diferentes de caracteres; por ejemplo, entre caracteres morfológicos y bioquímicos; caracteres vegetativos y componentes del rendimiento; caracteres agronómicos y de calidades de las semillas; caracteres fisiológicos y morfológicos, entre otros. Estos estudios se han realizado en diversos cultivos como el pimiento rojo (*Capsicum annuum* L.) ⁽¹⁰⁾, el trigo (*Triticum aestivum* L.) ^(8,9,11), el maíz (*Zea mays* L.) ^(12,13), la soya (*Glycine max* L.) ⁽¹⁴⁾, pero han sido poco utilizados en los frutales.

En todos los estudios previamente mencionados, el análisis canónico se realizó con los valores fenotípicos de los caracteres. Algunos autores han planteado que resulta más efectivo realizarlo con los valores genéticos predichos ⁽⁶⁾. Los valores genéticos se pueden predecir por medio de la metodología de los modelos mixtos (*REML-BLUP*, procedimientos de máxima verosimilitud restringida-mejor lineal insesgado), los cuales proveen inferencias más precisas y exactas ^(6,15). Estos autores emplearon el análisis de correlación canónica, para determinar la asociación entre caracteres vegetativos y componentes del rendimiento en familias de hermanos completos de guayabo, basados en los valores genéticos predichos.

Basado en los elementos anteriormente expuestos, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la asociación entre caracteres vegetativos y del fruto, en familias de hermanos completos de guayabo, mediante el cálculo de las correlaciones canónicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal empleado en los experimentos

El estudio fue desarrollado en la Unidad Científico-Tecnológica de Base (UCTB) de Alquizar, provincia Artemisa, perteneciente al Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical (IIFT) de Cuba, que se encuentra ubicada en los 22° 47' de latitud norte y los 82° 31' de longitud oeste, a 11 m sobre el nivel del mar, sobre un suelo Ferralsol éutrico, con una topografía llana de pendiente cero ⁽¹⁶⁾.

Se evaluaron tres familias de hermanos completos de guayabo (*Psidium guajava* L.), obtenidas a partir de cruzamientos intraespecíficos, realizados mediante polinización controlada en el año 2001. Se utilizaron como progenitores femeninos, tres plantas del cultivar 'Enana Roja Cubana' ('EEA 18-40'), que se utiliza a escala comercial en el país. Como progenitores masculinos se emplearon los cultivares: 'N6', 'Suprema Roja' y 'Belic L-207'. Estos cultivares fueron seleccionados como progenitores, por presentar gran variabilidad fenotípica y genotípica, detectada al realizar la evaluación del banco de germoplasma del cultivo por medio de marcadores morfológicos y moleculares ⁽¹⁷⁾.

Las semillas obtenidas de cada cruzamiento, se sembraron en semilleros y posteriormente se trasplantaron a bolsas individuales de 26 x 46 cm que contenían suelo Ferralsol éutrico y materia orgánica (cachaza) a la relación 3:1. Cuando las plantas tenían entre 50 y 60 cm de altura se plantaron en áreas de la UCTB, siguiendo un marco de plantación de 6 x 5 m. Cada una de las plantas obtenidas puede ser considerada un genotipo diferente, debido a que se obtuvieron de semillas, por lo que hay solo una réplica por genotipo. Las tres familias se plantaron de forma adyacente una a la otra, formando un bloque compacto en el mismo lote, junto a los progenitores.

Las plantas se mantuvieron con riego localizado, empleando la técnica de riego por goteo con emisores marca RAM de 2,3 L h⁻¹, espaciados a 0,65 m dentro de un lateral de 20 mm de diámetro. El riego se aplicó con dosis fijas e intervalos fijos (días alternos) y fue suspendido durante los eventos de fuertes lluvias. Las labores culturales, la fertilización y el control fitosanitario fueron realizados según el Instructivo Técnico del cultivo ⁽¹⁸⁾.

Evaluación de caracteres cuantitativos

En las progenies resultantes de los tres cruzamientos y sus progenitores, se evaluaron diez caracteres cuantitativos de los propuestos como descriptores del guayabo ^(19,20). Las mediciones se realizaron teniendo en cuenta las recomendaciones del descriptor del cultivo, publicado por la UPOV ⁽¹⁹⁾. Los caracteres evaluados fueron: largo de la hoja (mm); ancho de la hoja (mm); altura de la planta (m); masa del fruto (g); largo del fruto (mm); ancho del fruto (mm); espesor externo de la pulpa (mm); espesor interno de la pulpa (mm); número de semillas por fruto y masa total de las semillas por fruto (g).

Las plantas se comenzaron a evaluar a los cinco años de edad, a partir del año 2006 y se realizaron mediciones durante tres años consecutivos (2006–2008), en cada uno de los genotipos de las tres familias. Los caracteres vegetativos fueron evaluados en el período marzo–abril y los caracteres del fruto en el período agosto–septiembre, que es el pico de cosecha de verano. Los frutos se cosecharon en su madurez fisiológica y fueron evaluados en completa maduración, dos o tres días después de cosechados. Para la medición de estos caracteres se utilizaron balanzas técnicas, reglas milimetradas y pie de rey.

Evaluación de la asociación entre caracteres vegetativos y del fruto, con el empleo del análisis de correlación canónica

Con el objetivo de identificar y cuantificar la asociación lineal entre el grupo de caracteres vegetativos y el grupo de caracteres del fruto, se desarrolló un análisis de correlación canónica, el cual se enfoca en la correlación entre combinaciones lineales pertenecientes a los grupos de caracteres. Este análisis se realizó con el empleo de los valores genéticos predichos, a partir de los mejores predictores lineales insesgados (*BLUP*) que se obtuvieron por el método de máxima verosimilitud restringida (*REML*) con el empleo del procedimiento *MIXED*. La ecuación del modelo mixto empleado fue la siguiente:

$$Y = Xr + Zg + Wa + e$$

donde:

y es el vector de observaciones.

r es el vector de mediciones que incluye la media general y se considera de efectos fijos.

g es el vector de efectos genotípicos individuales considerados aleatorios.

a es el vector de efectos ambientales (años de evaluación) considerado de efectos fijos.

e es el vector de errores o residuales (aleatorios).

X, Z y W son las matrices de incidencia conocidas, asociadas con los vectores r, g y a, respectivamente.

Previo al cálculo de la correlación canónica, se evaluó el ajuste de los valores de cada uno de los caracteres a la distribución normal, para verificar el cumplimiento de la premisa de normalidad multivariada que tiene el análisis ^(21,22), con el empleo de las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro Wilk, Cramer-von Mises y Anderson-Darling, que brinda el procedimiento *UNIVARIATE* ⁽²³⁾.

Para realizar el análisis de correlación canónica se utilizó el procedimiento *CANCORR*, el cual determinó, primeramente, las correlaciones genéticas existentes entre todos los caracteres evaluados, a partir de los valores genéticos estimados con el procedimiento *BLUP* ⁽¹⁵⁾. Posteriormente, se identificó la asociación entre el grupo de caracteres vegetativos (altura de la planta, largo y ancho del fruto) y el grupo de caracteres del fruto (masa, largo y ancho del fruto, espesor externo e interno de la pulpa, número de semillas y masa total de semillas por fruto), con el cálculo de la correlación canónica. Se determinaron tres funciones o variables canónicas. El procedimiento utiliza el estadístico F para probar una serie de hipótesis nulas que plantean que cada correlación canónica es igual a cero en la población ⁽²¹⁾.

. También fueron determinados, para cada par de variables canónicas (U_i, V_i), los valores de las correlaciones canónicas, la varianza promedio explicada, los valores de redundancia y los coeficientes canónicos.

Todos los análisis estadísticos se desarrollaron con el empleo del programa *SAS*, versión 9.3 ⁽²⁴⁾.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la realización de los procedimientos *MIXED* se obtuvieron los *BLUP*, que constituyen los predictores de los valores genéticos (*Breeding value*). Estos valores genéticos fueron utilizados para determinar la asociación entre caracteres vegetativos (altura de la planta, largo y ancho de la hoja) y del fruto (espesor externo e interno de la pulpa, número y masa total de las semillas por fruto, masa, largo y ancho del fruto), a partir del análisis de correlación canónica. Este análisis es un caso especial de modelo lineal general que está basado en la

matriz de correlación de todos los caracteres evaluados ⁽²⁵⁾. Su objetivo es buscar las relaciones que puedan existir entre dos grupos de caracteres y la validez de las mismas ⁽⁶⁾.

Se observó, que al tener en cuenta todos valores obtenidos en las tres familias para cada carácter, se logró el ajuste a la distribución normal para cada uno de ellos.

En la Tabla 1, se muestran los valores de los coeficientes de correlación entre los diez caracteres evaluados, con su significación estadística. La mayoría de los caracteres del fruto mostraron correlaciones significativas y positivas entre ellos, con excepción del largo del fruto, con el espesor interno de la pulpa y el número de semillas y el espesor externo de la pulpa con el número de semillas, en los cuales se obtuvieron coeficientes negativos. Entre los caracteres vegetativos se observó sólo una correlación positiva y significativa entre el largo y el ancho de la hoja. Este último carácter está correlacionado positivamente con todos los del fruto, con excepción del largo. La altura de la planta no se asoció con ninguno de los caracteres evaluados en las tres familias de guayabo.

Tabla 1. Valores de los coeficientes de correlación obtenidos para los caracteres evaluados en tres familias de hermanos completos de guayabo

Caracteres	AH	AP	MF	LF	AF	EEP	EIP	NS	MTS
LH	0,66***	-0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,16*	-0,08 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,002 ^{ns}
AH	-	0,05 ^{ns}	0,14*	-0,04 ^{ns}	0,23***	0,15*	0,16*	0,24***	0,17*
ALT		-	0,005 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
MF			-	0,66***	0,89***	0,74***	0,46***	0,16*	0,35***
LF				-	0,32***	0,60***	-0,16*	-0,17*	0,01 ^{ns}
AF					-	0,63***	0,69***	0,30***	0,44***
EEP						-	-0,03 ^{ns}	-0,18**	0,05 ^{ns}
EIP							-	0,60***	0,62***
NS								-	0,70***

Leyenda: LH: largo de la hoja, AH: ancho de la hoja, AP: altura de la planta, MF: masa del fruto, LF: largo del fruto, AF: ancho del fruto, EEP: espesor externo de la pulpa, EIP: espesor interno de la pulpa, NS: número de semillas por fruto, MTS: masa total de las semillas por fruto. *, **, *** - Indican la significación estadística para los niveles de significación: 0,05; 0,01 y 0,001, respectivamente

Las mayores correlaciones se observaron entre la masa y el ancho del fruto (0,8866), la masa del fruto y el espesor externo de la pulpa (0,7445) y el número y la masa total de las semillas por fruto (0,7049) (Tabla 1). Los altos valores de los coeficientes de correlación pueden ser resultado del efecto del pleiotropismo, en el cual un mismo gen afecta la expresión de más

de un carácter ⁽²⁶⁾. Esta información es útil para el fitomejoramiento, porque favorece la selección simultánea de dos o más caracteres, al seleccionar uno solo de ellos.

Resultados similares fueron obtenidos al estimar las correlaciones genéticas en las mismas familias de guayabo, pero por el método de covarianza progenie-progenitor ⁽²⁷⁾ en el cual se deben calcular las covarianzas progenie-progenitor de cada carácter y las covarianzas cruzadas entre dos caracteres. En otro estudio realizado se estimaron las correlaciones genéticas entre caracteres asociados al rendimiento en líneas de maíz (*Zea mays* L.) ⁽²⁸⁾, por medio de un método manual que utiliza la fórmula propuesta por otros autores ⁽²⁶⁾ y por la máxima verosimilitud restringida, a través de un procedimiento *MIXED*, en el cual se especificó la opción *GCORR* para que se calcularan las correlaciones genéticas. Estos autores también encontraron resultados equivalentes por los dos métodos, al comparar las correlaciones genéticas obtenidas por ambos métodos, con el empleo de una prueba t de Student de muestras pareadas y no encontrar diferencias significativas. Este resultado les permitió llegar a la conclusión de que las correlaciones genéticas pueden ser estimadas por medio del *PROC MIXED* que es más simple y rápido de hacer ⁽²⁸⁾.

En una evaluación de caracteres del fruto y componentes del rendimiento en familias de hermanos completos de guayabo, se obtuvieron bajos valores de los coeficientes de correlación genética ⁽⁵⁾. Estos resultados son similares a los obtenidos en el presente trabajo en los coeficientes calculados entre caracteres vegetativos y del fruto. Los autores plantearon, a partir de los resultados, que la selección de esos caracteres se va a realizar sin tener una respuesta correlacionada.

Es posible obtener ganancias con respuestas correlacionadas en los caracteres que muestran asociaciones positivas y significativas. La existencia de asociación genética positiva entre dos caracteres implica que los cambios en uno de ellos pueden provocar alteraciones en el otro ⁽⁴⁾. Como todas las correlaciones fueron positivas con la masa del fruto, el ancho del fruto y la masa total de las semillas, la selección simultánea puede promover ganancia en la masa de los frutos y la masa de las semillas, de forma más eficiente ⁽²⁹⁾, pues según lo planteado, cuando se seleccionan los caracteres que contribuyen positivamente con un carácter de interés, se hace un uso más efectivo de la correlación ⁽²⁶⁾.

Los estudios de correlación entre diferentes caracteres de la planta y del fruto, en genotipos de guayabo, pueden proveer una idea, de cuáles caracteres podrían ser utilizados para la selección de parámetros deseables en futuros programas de mejoramiento del cultivo. Las

correlaciones positivas y significativas entre caracteres de interés, son favorables para el mejorador, porque pueden ayudar en el mejoramiento simultáneo de ambos caracteres. Por otra parte, la correlación negativa pudiera solapar la expresión sincronizada de ambos caracteres ⁽³⁰⁾.

El conocimiento de las correlaciones genéticas puede ser muy útil en el mejoramiento, para la selección de caracteres con baja heredabilidad y dificultades en su medición, porque bajo estas condiciones, se puede llevar a cabo la selección indirecta de los mismos; es por ello, que deben ser estimadas las correlaciones genéticas en los programas de mejora ⁽⁴⁾.

Como se obtuvieron bajos valores de los coeficientes de correlación genética entre caracteres vegetativos y del fruto, no son indicadores importantes unos de los otros, o sea, no se pueden utilizar para realizar la selección de más de un carácter. Además, las correlaciones entre pares de caracteres son más difíciles de explicar simultáneamente ^(10,21). Por esta razón, se estimaron tres coeficientes de correlación canónica para explicar la interrelación existente entre los dos grupos de caracteres, pues el número de correlaciones canónicas que se necesitan interpretar, es igual al menor número de caracteres en los grupos ^(21,25), que en este estudio se corresponde con el grupo de las variables vegetativas.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos al realizar el análisis canónico entre los dos grupos de caracteres. Sólo el primer par de variables o funciones canónicas (U_1, V_1) mostró una correlación canónica significativa ($p=0,001$) entre los caracteres vegetativos y los del fruto, con relación a la prueba de razón de verosimilitud. En esta primera función canónica, que es la más importante porque explica el mayor porcentaje de la varianza del conjunto de variables e indica la máxima correlación entre los dos grupos de caracteres, se obtuvo un valor del coeficiente de correlación de 0,3282. Este valor representa la mayor correlación posible entre cualquier combinación lineal de los caracteres vegetativos y cualquier combinación lineal de los caracteres del fruto ⁽²¹⁾ y puede ser interpretado como la correlación simple entre la sumatoria ponderada o combinación lineal de los valores en cada grupo de caracteres, con la ponderación perteneciente a la primera función canónica ⁽²⁵⁾

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos en el análisis de correlación canónica para los caracteres evaluados en tres familias de hermanos completos de guayabo

Variab les canónicas	Correlación canónica	Correlación canónica cuadrada	Autovalor	Proporción acumulada	Razón de verosimilitud	Valor de F	p
U ₁ V ₁	0,39	0,15	0,18	0,67	0,78	2,60	0,000
U ₂ V ₂	0,25	0,06	0,07	0,93	0,92	1,54	0,11
U ₃ V ₃	0,14	0,02	0,02	1,00	0,98	0,83	0,53

Leyenda: F – Valor del estadístico F. p – valor de probabilidad asociado al estadístico F

En otros estudios también se ha obtenido solamente un valor de correlación canónica significativo, en la primera función canónica. Por ejemplo, al relacionar caracteres morfológicos y productivos en familias de medios hermanos de *Jatropha curcas* L. ⁽³¹⁾, entre caracteres agronómicos y de calidad fisiológica de la semilla en poblaciones segregantes de soya ⁽¹⁴⁾ y al asociar variables morfológicas y de la germinación en semillas de cultivares de trigo ⁽³²⁾.

La segunda (U₂V₂) y la tercera (U₃V₃) funciones canónicas van a explicar el mayor porcentaje de la varianza que deja la primera función canónica, o sea, la varianza residual o restante de las primeras funciones. Además, las correlaciones canónicas disminuyen a medida que se calculan funciones adicionales; es decir la primera función refleja la mayor correlación entre los dos grupos, la siguiente la segunda correlación y así sucesivamente ⁽²¹⁾. La prueba de significación de las funciones canónicas utiliza una aproximación de la prueba F para determinar la significación de la Lambda de Wilks, que es igual a la prueba de razón de verosimilitud ⁽²¹⁾. Esta prueba se utiliza para evaluar si las variables de un grupo están correlacionadas con las del otro grupo. Para ello se prueba, de manera secuencial, si todas las funciones canónicas son significativas o no ⁽²⁵⁾. Primero se observa las tres funciones canónicas juntas y se evalúa si las tres correlaciones canónicas son cero; si se rechaza la hipótesis nula (p<0,05), se pasa a evaluar la segunda y la tercera correlaciones ⁽²¹⁾. Para determinar la significación estadística de las otras dos funciones, se elimina la primera función, que es la más significativa y si la segunda prueba es también significativa, se puede proceder sólo con la tercera, para determinar si la función remanente es también significativa ⁽²⁵⁾. Si sólo la primera función canónica es estadísticamente significativa, como en el presente trabajo, es la única que debe ser interpretada.

Aunque las variables canónicas son artificiales, estas pueden ser identificadas en términos de las variables originales. Para ello, se pueden interpretar los coeficientes canónicos estandarizados para cada grupo de caracteres en las tres funciones o variables canónicas (U_1V_1 , U_2V_2 y U_3V_3), así como, las correlaciones entre las variables canónicas y las variables originales, las cuales se muestran en las Tablas 3 y 4, respectivamente. Los coeficientes canónicos se estandarizan para permitir su interpretación, porque las variables originales no tienen que tener varianzas homogéneas, ni estar medidas en la misma unidad ⁽²¹⁾. Las magnitudes de los coeficientes canónicos indican las contribuciones relativas de cada variable en la combinación lineal canónica ⁽²⁵⁾; o sea, los coeficientes indican los efectos de los caracteres vegetativos sobre los del fruto en los genotipos de guayabo.

Al observar los valores obtenidos para los coeficientes estandarizados (Tabla 3), en la primera función que es la única significativa, se puede decir que, si aumentan los valores de ancho de la hoja y altura de la planta, se van a incrementar el ancho del fruto, el espesor externo de la pulpa y el número de semillas y van a disminuir el espesor interno de la pulpa, la masa total de las semillas, la masa y el largo del fruto. Los caracteres que más contribuyeron a la primera variable canónica (V_1) entre los del fruto fueron: el ancho del fruto (1,0750) y el número de semillas (0,7803), mientras que el ancho de la hoja (1,2832) fue el de mayor contribución a la primera variable canónica de los vegetativos (U_1). Estos tres caracteres mostraron correlaciones genéticas positivas y significativas entre ellos y con la mayoría de los restantes caracteres del fruto (Tabla 1). Los restantes caracteres vegetativos y del fruto tuvieron un menor aporte al primer par de variables canónicas U_1, V_1 .

Tabla 3. Coeficientes canónicos estandarizados para las variables canónicas

Var. Can.	Caracteres vegetativos			Var. Can.	Caracteres del fruto						
	LH	AH	AP		MF	LF	AF	EEP	EIP	NS	MTS
U_1	-0,59	1,28	0,04	V_1	-0,34	-0,40	1,07	0,20	-0,38	0,78	-0,13
U_2	1,07	-0,26	-0,36	V_2	-1,79	0,67	0,63	1,21	-0,35	0,48	0,03
U_3	-0,57	0,29	-0,94	V_3	-1,03	0,82	-1,82	1,49	2,20	-0,37	0,58

Leyenda: LH: largo de la hoja, AH: ancho de la hoja, AP: altura de la planta, MF: masa del fruto, LF: largo del fruto, AF: ancho del fruto, EEP: espesor externo de la pulpa, EIP: espesor interno de la pulpa, NS: número de semillas por fruto, MTS: masa total de las semillas por fruto

Las proporciones de varianza extraídas en los dos grupos y los valores de redundancia se muestran en la Tabla 4. Los valores de proporción de varianza extraída y redundancia, indican la magnitud de las correlaciones totales entre los dos grupos de variables, relativa a la varianza de las variables originales. Son diferentes del valor de correlación canónica cuadrada, porque este último estadístico expresa la proporción de la varianza explicada en las variables canónicas ⁽²⁵⁾.

Tabla 4. Proporción de varianza extraída, proporción de varianza acumulada y redundancia de los dos grupos de caracteres en las tres funciones canónicas

Variables canónicas	Caracteres vegetativos			Caracteres del fruto		
	Varianza extraída	Varianza acumulada	Redundancia	Varianza extraída	Varianza acumulada	Redundancia
U ₁ V ₁	0,3877	0,3877	0,0446	0,2920	0,2920	0,0440
U ₂ V ₂	0,2961	0,6837	0,0248	0,1279	0,4198	0,0082
U ₃ V ₃	0,3163	1,0000	0,0061	0,0861	0,5059	0,0017

La primera variable canónica extrajo, como promedio, un 38,77 % de la varianza de los caracteres vegetativos y un 29,20 % de los caracteres del fruto, valores que pueden considerarse bajos. Las tres funciones canónicas juntas extrajeron el 100 % de la varianza del grupo de caracteres vegetativos y el 50,59 % de la varianza de los caracteres del fruto. Si se observan los valores de redundancia, con los caracteres del fruto se puede explicar solo el 4,46 % de la varianza en los caracteres vegetativos, basado en la primera función canónica; mientras que con los caracteres vegetativos se explica el 4,40 % de la variabilidad en los caracteres del fruto (Tabla 4).

Los coeficientes de redundancia se utilizan para medir la capacidad predictiva de un conjunto de caracteres respecto al otro ⁽³³⁾. Los resultados indican que existe una débil asociación entre los caracteres vegetativos y del fruto, por lo que no se puede predecir el comportamiento de los genotipos de guayabo en los caracteres del fruto, a partir de los valores de los caracteres vegetativos y viceversa. Este resultado confirma el obtenido previamente, al estimar las correlaciones genéticas entre todos los caracteres y obtener bajos valores de los coeficientes de correlación entre caracteres vegetativos y caracteres del fruto.

Se puede concluir entonces, que existe una débil correlación entre los caracteres vegetativos y los caracteres del fruto evaluados en las tres familias de hermanos completos de guayabo,

por lo que la selección de determinados caracteres vegetativos no va a implicar que lleve consigo la de los caracteres del fruto y viceversa. Resultados similares fueron obtenidos en progenies de hermanos completos de guayabo en Brasil ⁽⁶⁾. Estos autores, al utilizar el análisis de correlación canónica, determinaron que los valores del coeficiente de correlación para las funciones canónicas fueron bajos y que existía poca correlación genética entre caracteres vegetativos y componentes del rendimiento.

Los coeficientes canónicos son importantes a considerar en las decisiones que se toman en las etapas de selección de individuos superiores, en los programas de mejora, para caracteres de interés, cuando se consideran dos grupos diferentes de caracteres ⁽⁶⁾. El conocimiento del grado de asociación, a través de estudios de correlación, puede identificar caracteres que pueden ser usados como criterios de selección indirecta para el rendimiento o como caracteres secundarios, lo cual mejora la eficiencia de los procesos de selección ⁽³⁴⁾. Varias medidas de correlación bivariadas y multivariadas pueden ser utilizadas para determinar las relaciones entre variables; sin embargo, los coeficientes de correlación bivariados pueden fallar en determinar relaciones complejas. Los modelos multivariados pueden ser apropiados para asegurar las relaciones entre un gran número de variables. El análisis de correlación canónica puede ser utilizado para determinar relaciones entre múltiples variables dependientes e independientes; por tanto, es más exitoso para estimar relaciones complejas en las ciencias biológicas ⁽⁹⁾.

CONCLUSIONES

- Entre los caracteres del fruto evaluados en las familias de hermanos completos de guayabo, se observó una alta correlación genética.
- El análisis de correlación canónica empleado detectó una baja asociación entre el grupo de caracteres vegetativos y el grupo de caracteres del fruto, en las tres familias de hermanos completos de guayabo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Patel RK, Maiti CS, Deka BC, Vermav VK, Deshmukh NA, Verma MR. Genetic variability, character association and path coefficient study in guava (*Psidium guajava* L.) for plant growth, floral and yield attributes. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*. 2015;6(4):457–66.
2. Paiva CL. Índices multivariados e BLUP multisafras na seleção de genótipos de goiabeira. 2017. 99 p.
3. Rawls B, Harris-Shultz K, Dhekney S, Forrester I, Sittther V. Clonal Fidelity of Micropropagated (*Psidium guajava* L.) Plants Using Microsatellite Markers. *American Journal of Plant Sciences*. 2015;6(14):2385–92.
4. Cruz CD, Regazzi AJ, Carneiro PCS. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético (volume 1. Viçosa, Editora UFV. 2004;668.
5. Paiva CL, Viana AP, Santos EA, Freitas JCO, Amaral Junior AT do. Genetic gain estimated by different selection criteria in guava progenies. *Bragantia*. 2016;75(4):418–27.
6. Santos PR dos, Preisigke S da C, Viana AP, Cavalcante NR, Sousa CMB de, Amaral Júnior AT de. Associations between vegetative and production traits in guava tree full-sib progenies. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2017;52(5):303–10.
7. Uurtio V, Monteiro JM, Kandola J, Shawe-Taylor J, Fernandez-Reyes D, Rousu J. A tutorial on canonical correlation methods. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2018;50(6):95.
8. Carvalho IR, de Souza VQ, Nardino M, Follmann DN, Schmidt D, Baretta D. Correlações canônicas entre caracteres morfológicos e componentes de produção em trigo de duplo propósito. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2015;50(8):690–7.
9. Saba J, Taviana S, Qorbanian Z, Shadan E, Shekari F, Jabbari F. Canonical Correlation Analysis to Determine the Best Traits for Indirect Improvement of Wheat Grain Yield under Terminal Drought Stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2018;20(5):1037–48.
10. Cankaya S, Balkaya A, Karaagac O. 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*. 2010;8(1):67–73.
11. Alavi Siney SM, Saba J. Studying the association between physiological and agronomical characteristics of different wheat genotypes in dryland condition using canonical correlation analysis. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 2014;7(1):13–23.

12. de Souza VQ, Baretta D, Nardino M, Carvalho IR, Follmann DN, Konflanz VA, et al. Variance components and association between corn hybrids morpho-agronomic characters. *Científica*. 2015;43(3):246–53.
13. Ceccon G, Santos A, Teodoro PE. Relationships between primary and secondary yield components of a maize population after 13 stratified mass selection cycles. *Journal of Agronomy*. 2016;15(1):33–8.
14. Pereira EM, Silva FM, Val BHP, Neto AP, Mauro AO, Martins CC, et al. Canonical correlations between agronomic traits and seed physiological quality in segregating soybean populations. *Genetics and molecular research: GMR*. 2017;16(2).
15. Resende MDV de. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2016;16(4):330–9.
16. Hernández JA, Pérez JJM, Bosch ID, Castro SN. Clasificación de los suelos de Cuba 2015. Mayabeque, Cuba: Ediciones INCA. 2015;93.
17. Rodríguez NN, Valdés-Infante J, Becker D, Velásques B, Coto O, Rohde W, et al. Morphological, agronomic and molecular characterization of Cuban accessions of guava (*Psidium guajava* L.). *Journal of Genetics and Breeding (Italy)*. 2004;58(1):79–89.
18. MINAG. Instructivo Técnico para el cultivo de la Guayaba. La Habana, Cuba: Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical; 2011 p. 38.
19. UPOV. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, homogeneity and stability. Guava (*Psidium guajava* L.). UPOV Geneva; 1987.
20. Rodríguez-Medina NN, Fermin GA, Valdés-Infante J, Velásquez B, Rivero D, Martínez F, et al. Illustrated descriptors for guava (*Psidium guajava*). *Acta Horticulturae*. 2010;(849):103–10.
21. SAS S. STAT 9.3 User's guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2011;
22. Protásio T de P, Neto G, Maciel R, Santana J de DP de, Guimarães Júnior JB, Trugilho PF. Canonical correlation analysis of the characteristics of charcoal from *Qualea parviflora* Mart. *Cerne*. 2014;20(1):81–8.
23. SAS Institute Inc. Base SAS 9.3 Procedures Guide: Statistical Procedures. 2011;239-505.
24. SAS S. for Windows Version 9.3 SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 2011.
25. StatSoft INC. STATISTICA (data analysis software system) version 10. 2010.
26. Falconer DS, Mackay TFC. Introduction to quantitative genetics. 1996 New York. NY: Longman. :464.

27. Pelea LP, Fernández EB, Herrero JV-I, Palenzuela JBV. Estimación de heredabilidad y correlaciones de caracteres cuantitativos evaluados en poblaciones de guayabo (*Psidium guajava* L.(Myrtaceae))/Heritability and correlations estimation of quantitative traits evaluated in guava (*Psidium guajava* L.(Myrtaceae)) populations. Revista Cubana de Ciencias Biológicas. 2018;6(1):10.
28. Kashiani P, Saleh G. Estimation of genetic correlations on sweet corn inbred lines using SAS mixed model. Am J Agric Biol Sci. 2010;5(3):309–14.
29. MARÇAL T de S, FERREIRA A, OLIVEIRA W dos S, GUILHEN JHS, FERREIRA M da S. Correlações genéticas e análise de trilha para caracteres de fruto da palmeira juçara. Revista Brasileira de Fruticultura. 2015;37(3):692–8.
30. Shiva B, Nagaraja A, Srivastav M, Goswami AK. International Journal of Agricultural Sciences. 2017. Correlation studies among vegetative, fruit physicochemical characters of guava (*Psidium guajava* L.). - Buscar con Google [Internet]. [cited 11/08/2019].
31. Silva LA, Peixoto LA, Teodoro PE, Rodrigues EV, Laviola BG, Bhering LL. Path analysis and canonical correlations for indirect selection of *Jatropha* genotypes with higher oil yield. Genetics and molecular research. 2017;16(1).
32. Erayman M, Abeyo B, Baenziger P, Budak H, Eskridge K. Evaluation of seedling characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) through canonical correlation analysis. Cereal research communications. 2006;34(4):1231–8.
33. Cuadra CM. Nuevos métodos de análisis multivariante. Barcelona, Spain: CMC Editions. 2018. 305 p
34. Neder DG, Costa FR da, Edvan RL, Souto Filho LT. Correlations and path analysis of morphological and yield traits of cactus pear accessions. Crop Breeding and Applied Biotechnology. 2013;13(3):203–7.