

# Relaciones entre componentes morfológicos de palmito y atributos físicos de un inceptisol: una aproximación multivariada

## Relations between morphological components of heart palm and physical attributes of an Inceptisol: a multivariate approach

## Relações entre componentes morfológicos de palmito e atributos físicos de um inceptisol: uma aproximação multivariada

Elizeu de Souza-Lima,<sup>1</sup> Lenon Henrique-Lovera,<sup>2</sup> Rafael Montanari,<sup>3</sup> Alan Rodrigo Panosso,<sup>4</sup> Diego Alexander Aguilera-Esteban<sup>\*5</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de doctorado en Ingeniería Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, Brasil. Correo: elizeu.florestal@gmail.com. orcid.org/0000-0002-0520-6791

<sup>2</sup> Estudiante de doctorado en Ingeniería Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, Brasil. Correo: lhlovera@gmail.com. orcid.org/0000-0002-5918-2203

<sup>3</sup> Profesor investigador, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos. Ilha Solteira, Brasil. Correo: montanari@agr.feis.unesp.br

<sup>4</sup> Profesor investigador, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Departamento de Matemática. Ilha Solteira, Brasil. Correo: alanrp@mat.feis.unesp.br

<sup>5</sup> Profesional de Investigación, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Colombia. Correo: daaguilera@corpoica.org.co. orcid.org/0000-0001-9485-5058

Fecha recepción: 10/09/2016

Fecha aprobación: 06/04/2017

Para citar este artículo: Lima, E. S., Lovera, L. H., Montanari, R., Panosso, A. R., & Aguilera-Esteban, D. A. (2017). Relaciones entre componentes morfológicos de palmito y atributos físicos de un inceptisol: una aproximación multivariada. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 543-554

DOI: [https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num3\\_art:743](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:743)

\* Autor de correspondencia

## Resumen

El estudio del potencial agrícola del suelo desde una aproximación multivariada puede ayudar a interpretar las interacciones de sus atributos en relación con la producción de los cultivos. El objetivo de este estudio fue evaluar, mediante análisis multivariados, las relaciones entre atributos físicos del suelo y los componentes morfológicos del cultivo de palmito en un inceptisol eutric, en el municipio de Registro (São Paulo-Brasil). El experimento se realizó en el año agrícola 2013/2014 (para un cultivo que fue implantado en el año 2012), y en él se analizaron los atributos físicos del suelo a una profundidad de -0,10 m, en una grilla con 54 puntos georreferenciados. Se emplearon tres métodos multivariados: agrupación jerárquica, no jerárquica (*k-means*) y análisis de componentes principales.

Los dos primeros componentes principales (CP1 y CP2) explicaron el 68,29% de las variaciones del conjunto de datos originales, en los que la densidad del suelo y la porosidad total presentaron el mayor poder discriminatorio en CP1, y tan solo el diámetro de tallo presentó poder discriminatorio relevante con CP2. En el análisis de *k-means* se encontraron mayores valores de diámetro de tallo de palmito en la agrupación de puntos con mayores valores de resistencia mecánica a la penetración y menores valores de humedad gravimétrica. La estadística multivariada se mostró eficiente en la discriminación del conjunto de variables físicas del suelo estudiado que tiene mayor relación con los componentes morfológicos de la planta de palmito.

**Palabras clave:** *Bactris gasipaes*, análisis de componentes, anatomía de la planta, densidad del suelo

## Abstract

The study of the soil's agricultural potential from a multivariate approach can help to interpret the interactions between its attributes and crop yield components. The aim of this study was to evaluate the relationships between the soil's physical attributes and morphological components of the heart palm in an Inceptisol Eutric in the city of Registro (São Paulo, Brazil) using multivariate analyses. The experiment was carried in the crop year 2013/2014 for a crop that was implanted in the year 2012, where yield components of heart palm and the soil's physical attributes were analyzed at a depth of -0.10 m, using a grid with 54 georeferenced points. Three multivariate methods were used: hierarchical clustering, non-hierarchical clustering (*k-means*)

and principal components analysis (PCA). The *k-means* analysis showed larger heart palm stem diameter values in the group of points with higher mechanical resistance to penetration values, and lower gravimetric soil moisture values. The PCA showed that the first two principal components (CP1 and CP2) explained 68.29% of the variations of the original data set, where soil density and total porosity showed the largest discriminatory power in CP1, and only stem diameter showed significant discriminatory power in PC2. Multivariate statistics was efficient in the discrimination of the physical variables of the soil studied that have a greater relationship with the morphological components of the heart palm plant.

**Key words:** *Bactris gasipaes*, Component analysis, Plant anatomy, Soil density

## Resumo

Este estudo do potencial agrícola do solo a partir de uma aproximação multivariada pode ajudar a interpretar as interações de seus atributos com relação à produção das culturas. O objetivo deste estudo foi avaliar, mediante análises multivariadas, as relações entre atributos físicos do solo e os componentes morfológicos do cultivo de palmito num inceptisol eutric, no município de Registro (São Paulo, Brasil). O experimento foi realizado no ano agrícola 2013-2014 (para uma cultura que foi implantada em 2012), e nele foram analisados os atributos físicos do solo a uma profundidade de -0,10 m, numa tabela com 54 pontos georreferenciados. Foram utilizados três métodos multivariados: agrupação hierárquica, não

hierárquica (*k-means*) e análise de componentes principais. Os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) explicaram 68,29 % das variações do conjunto de dados originais, nos quais a densidade do solo e a porosidade total apresentaram o maior poder discriminatório em CP1, e tão somente o diâmetro da haste de palmito apresentou poder discriminatório relevante com CP2. Na análise *k-means*, encontraram-se maiores valores de resistência mecânica à penetração e menores valores de umidade gravimétrica. A estatística multivariada se mostrou eficiente na discriminação do conjunto de variáveis físicas do solo estudado que têm maior relação com os componentes morfológicos da planta de palmito.

**Palavras chaves:** *Bactris gasipaes*, análise de componentes, anatomia vegetal, densidade do solo

## Introducción

Desde la década del setenta se presenta un gran interés por la producción de palmito a partir de la palma de *Bactris gasipaes* Kunth, por ser una opción que sustituye los cultivos tradicionales de *Euterpe* spp., que son explotados de forma extractiva, dada su alta tasa de crecimiento, germinación, rusticidad y supervivencia (Mossanek, Wendling, Koehler, & Zuffellato-Ribas, 2014). Las características morfológicas de *B. gasipaes* Kunth, como el diámetro y la altura de planta, el número de hojas y el área foliar, están altamente correlacionadas con la producción del cultivo (Silva et al., 2006).

Esta palma es comúnmente conocida como *pupunha* en Brasil, pijuayo en Perú, chontaruru en Ecuador, chontaduro en Colombia, gachipaes en Venezuela y pejibaye en Costa Rica y Nicaragua (FAO, 2012). El cultivo del palmito, además, se destaca por tener un fuerte impacto social y ambiental, por sus cualidades agronómicas, ecológicas, industriales y comerciales, por lo cual se presenta como una alternativa para los pequeños agricultores (Trintinalio, Tormena, Oliveira, Machado, & Constantin, 2005).

Brasil comercializa cerca de 300 millones de dólares en palmito al año y es el mayor productor, exportador y consumidor del mundo. La región sudeste concentra la mayor área cultivada y cosechada de palmito (cerca del 40 % del total), en la cual se destaca el estado de São Paulo como uno de los mayores productores brasileros: con un área cultivada de 8.580 ha y 3.120 ha cosechadas, que para el 2009 arrojó una producción de 9.920 toneladas, principalmente en la zona del Valle del Ribeira. Esta última comprende los municipios de Registro, Iguape, Sete Barras, Jacupiranga, Cajati y Juquiá (Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística [IBGE], 2009).

La estructura física del suelo es un factor importante para la formación y el establecimiento de cultivos como el del palmito (Casalinho & Martins, 2004). El uso intensivo del suelo y su mecanización de forma indiscriminada en condiciones inadecuadas causa la destrucción de la estructura física, reduce los

contenidos de materia orgánica, aumenta la compactación del suelo y altera sus atributos físicos. Tal práctica, asociada a las precipitaciones intensas en época de preparación del suelo y en la fase de crecimiento inicial de las plantas, constituye un factor que incide en la degradación de la estructura y formación de capas compactadas. Los cambios en los atributos físicos del suelo afectan el movimiento del agua, el aire, los nutrientes y las raíces (Mello Ivo & Mielniczuk, 1999). De esta manera, el manejo del suelo pasa a ser un instrumento esencial para la búsqueda de actividades sostenibles (Casalinho & Martins, 2004).

Con las técnicas de análisis multivariado, es posible explicar la máxima correlación entre las variables y descubrir cuáles de ellas tienen preponderancia para caracterizar o alterar el suelo (Pragana, Ribeiro, Nóbrega, Ribeiro Filho, & Costa, 2012). Las técnicas multivariadas permiten una reducción en la dimensión del análisis con múltiples respuestas, con el objetivo de simplificar su entendimiento, visualización e interpretación y obtener suficientes detalles para una adecuada representación de los resultados (Bognola et al., 2011). El uso de técnicas de multivariadas ha permitido aproximaciones eficientes para las ciencias agrarias, principalmente, por considerar de forma simultánea la variación espacial de un número elevado de variables que influyen en los sistemas de producción agrícola (Barrios, Marques, Panosso, Siqueira, & La Scala, 2012; Silva et al., 2010). Frente a lo expuesto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar, mediante técnicas multivariadas, las relaciones entre algunos atributos físicos del suelo y los componentes morfológicos del cultivo del palmito en un inceptisol eutric, en el municipio de Registro, São Paulo (Brasil).

## Materiales y métodos

El estudio se realizó en la Hacienda de Enseñanza, Investigación y Extensión, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Estadual Paulista (Unesp), en el municipio de Registro (São Paulo), ubicada en las coordenadas 24° 32' 08" S y 47° 51' 55" O, a una

altura de 25 msnm. El clima de la región es tipo Af, tropical sin estación seca, de acuerdo con la clasificación Köppen-Geiger, con precipitación media anual de 1.500 mm y temperatura media de 28 °C. La caracterización del tipo de suelo corresponde al sistema de planicies y terrazas fluviales del Ribeira de Iguape, estado de São Paulo. Estos terrenos se describen como planos en la ribera baja, como una región de depresión tectónica de ribera de sedimentos modernos, suelos aluviales arcillosos del tipo inceptisol eutric en áreas altas de la cuenca e hidromórficos éutricos en suelos de planicie (Santos et al., 2013).

El establecimiento del cultivo se realizó en el año 2012. En enero de dicho año se efectuó la preparación del suelo por medio de subsolado y arado, así como su corrección con 1,5 t ha<sup>-1</sup> de calcárea y, enseguida, el rastrillado para nivelación. La fertilización de establecimiento consistió en 150 g de NPK (4-14-08) por planta y la de mantenimiento se realizó de acuerdo con el análisis de suelo.

En el primer año del cultivo se aplicó la fertilización de cobertura con 60 kg ha<sup>-1</sup> N, 30 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 40 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O + 1250 kg ha<sup>-1</sup> de Fritted Trace Elements (FTE) (Ca 7%; S 5,7%; B 1%; Cu 1%; Mn 1%; Mo 0,1% e Zn 18%), todo lo cual fue aplicado alrededor de la planta. En el segundo año se aplicaron 100 kg ha<sup>-1</sup> N, 50 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 60 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O + 100 kg ha<sup>-1</sup> de FTE y 1.000 kg ha<sup>-1</sup> de calcáreo. El cultivo se plantó el 24 de enero de 2012, los muestreos de suelo y las mediciones de los atributos morfológicos se efectuaron el 25 de abril de 2014.

El espaciamiento para la instalación del experimento fue de 2 m x 1 m (entre líneas por planta). En el área experimental de extensión aproximada de 1 ha, se colectaron muestras de suelo en 54 puntos georreferenciados. El muestreo del suelo se realizó en torno a la planta, a una profundidad entre 0,00 y 0,10 m. Para la evaluación de los atributos de la planta se determinó la altura, el diámetro del tallo a una altura de 50 cm desde el suelo con el uso de un calibrador digital, y el número de hojas y de socas mediante conteo manual.

Para la determinación de los atributos físicos del suelo se empleó la metodología establecida por Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (1997). La resistencia a la penetración (RP) se determinó con penetrómetro de impacto y se calculó con la expresión de Stolf (1991), representada por la ecuación 1.

$$RP = \left[ 5,581 + 6,891 \left( \frac{N}{P - A} \times 10 \right) \right] 0,09811 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

RP es la resistencia mecánica a la penetración (MPa), N es el número de impactos efectuados con el martillo del penetrómetro para la obtención de la lectura, A y P son las lecturas antes y después de la realización de los impactos (cm).

La humedad gravimétrica (HG) se determinó en estufa con muestra de suelo deformada, y la humedad volumétrica (HV) se determinó de acuerdo con la ecuación 2.

$$HV = HG \times Da \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

HV es la humedad volumétrica (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), HG es la humedad gravimétrica (kg kg<sup>-1</sup>), Da es la densidad aparente del suelo (kg dm<sup>-3</sup>).

El muestreo del suelo se realizó en trincheras, usando anillos volumétricos para la determinación de la densidad aparente y barreno holandés para el análisis granulométrico (arena, limo y arcilla).

Los atributos de las plantas fueron el número de hojas (NH); el diámetro de tallo (Diámetro), cm; altura (Alt), cm; y número de brotes por planta (Brotes). Los atributos del suelo fueron la resistencia mecánica a la penetración (RP), MPa; la humedad gravimétrica (HG), kg kg<sup>-1</sup>; la humedad volumétrica (HV), m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; la densidad aparente del suelo (Da), kg dm<sup>-3</sup>; la densidad de partículas (DP), kg dm<sup>-3</sup>; la porosidad total (PT), m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; la arena, g kg<sup>-1</sup>; el limo, g kg<sup>-1</sup>; y la arcilla, g kg<sup>-1</sup>.

Para cada componente morfológico y cada atributo del suelo se realizó inicialmente el análisis de estadística descriptiva auxiliada por la estadística clásica, con el *software* SAS (Schlotzhaver & Littell, 1997). Para la estadística multivariada se emplearon tres métodos para clasificar los elementos muestrales (cada uno de los 54 puntos) en dos o más grupos: análisis de agrupamiento jerárquico, análisis de agrupamiento no jerárquico (*k-means*) y análisis de componentes principales (ACP). Todos los análisis multivariados fueron realizados después de la estandarización de las variables (cada una con media cero y varianza unitaria).

Se aplicó el ACP a todas las variables del suelo y a los componentes morfológicos del cultivo, con el fin de explicar la estructura multivariada contenida en el conjunto inicial de datos evaluados; se tuvo un conjunto menor de variables latentes ortogonales sin interrelaciones en consideración (CP-autovectores), el cual fue generado por correlaciones lineales de las variables originales, a partir de los autovalores de la matriz de covarianza entre los datos (Hair, Anderson, Tatham, & Black, 2005; Johnson & Wichern, 2002). Esa técnica condensa las variables medidas en nuevas variables no medidas, a fin de evaluar el poder discriminatorio de las variables originales. Se consideraron los componentes principales cuyos autovalores fueron superiores a 1 (Kaiser, 1958). Los coeficientes de las funciones lineales, que definen los CP, fueron utilizados en la interpretación de su significado, usando la señal y el tamaño relativo de los coeficientes como una indicación del peso a ser atribuido para cada variable.

Las correlaciones fueron clasificadas de acuerdo con Coelho (2003), para quien el criterio de clasificación de los autovectores (valores que representan el peso de cada carácter en cada componente), variando de -1 a +1, fue el siguiente: valor absoluto  $<0,30$ , clasificado como poco significativo;  $0,30-0,40$ , considerado medianamente significativo; y  $\geq 0,50$ , considerado como altamente significativo. Después de la clasificación, las variables que representan autovectores altamente significativos fueron sometidas a un nuevo ACP para seleccionar los componentes con mayor carga factorial (puntaje).

Posteriormente los datos se sometieron a procesamiento de análisis de agrupamiento por método jerárquico, adoptando la distancia euclidiana como medida de semejanza entre las muestras y el método de Ward como método de ligación de los grupos. Después de adoptar la cantidad de grupos que mejor caracterizó la estructura de estos contenidos en los datos originales, se realizó el análisis de agrupamiento por el método no-jerárquico, utilizando el algoritmo *k-means* (Hair et al., 2005) que permitió caracterizar el patrón de las variables por grupo considerado. Para la realización de los análisis se utilizó el programa Statistica 7.0 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, EUA).

## Resultados y discusión

Los componentes morfológicos de la planta de palmito presentaron valores medios de número de hojas de 5,6, diámetro de tallo de 6,3 cm, altura media de planta de 1,16 m y número de brotes medio de 6,7 (tabla 1). De acuerdo con la clasificación de Pimentel-Gomes y Garcia (2002) se definen cuatro clases: baja ( $CV \leq 10\%$ ), media ( $10\% < CV \leq 20\%$ ), alta ( $20\% < CV \leq 30\%$ ) y muy alta ( $CV > 30\%$ ). En cuanto a los atributos morfológicos de la planta, el número de hojas presentó una variabilidad media, con un coeficiente de variación de 19,7%; el diámetro, la altura de la planta y el número de brotes presentaron variabilidad muy alta, con coeficientes de variación de 33,8%, 36,2% y 41,5%, respectivamente. Con respecto a los atributos físicos del suelo, la RP, HG y HV presentaron variabilidad media, con coeficientes de variación de 16,20%, 13,8% y 15,20%, respectivamente.

El análisis preliminar de componentes principales indicó que las variables del suelo con mayores puntajes correspondieron a los atributos de RP, HG, Da, PT y arcilla; y en cuanto a los componentes morfológicos, únicamente el diámetro del tallo mostró una relevancia significativa, por lo cual solo este atributo es considerado en los análisis subsecuentes.

En el segundo análisis de componentes principales con las variables de mayor puntuación, los dos

primeros componentes (CP1 y CP2) presentaron un autovalor superior a 1, que, en conjunto explican el 68,29 % de la variabilidad total del conjunto de datos originales (tabla 2). El primer componente explicó el 37,36 % de la variabilidad total de los datos del área experimental. Este componente presentó correlaciones significativas con los atributos de resistencia mecánica a la penetración de raíces, humedad gravimétrica, densidad aparente del suelo y porosidad total, lo cual puede ser interpretado como un índice constituido de los atributos físicos del suelo. Dicho componente se correlacionó positiva-

mente con el diámetro del tallo de planta, la resistencia mecánica a la penetración de raíces y la porosidad total; y se correlacionó negativamente con el contenido de arcilla del suelo, la humedad gravimétrica y la densidad aparente del suelo. El segundo componente principal explicó el 30,92 % de la variabilidad de los datos y presentó correlaciones significativas con el diámetro del tallo y la densidad aparente del suelo (factores que también presentaron correlaciones negativas), mientras que para dicho componente la porosidad total y el contenido de arcilla se correlacionaron positivamente.

**Tabla 1.** Estadística descriptiva de los atributos morfológicos de la planta de palmito y de los atributos físicos del suelo inceptisol

Atributo	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	cv (%)	Ck
NH	5,61	6	3	8	1,11	19,7	0,04
Diámetro (cm)	6,34	6,5	2,1	13	2,63	41,5	-0,48
Alt (m)	1,17	1,14	0,5	2,18	0,4	33,8	-0,11
Brotes	6,7	7	2	12	2,43	36,2	-0,49
RP (MPa)	1,1	1,09	0,8	1,56	0,18	16,2	0,43
HG (kg kg <sup>-1</sup> )	0,21	0,2	0,14	0,27	0,03	13,8	-0,37
VM (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,26	0,26	0,17	0,33	0,04	15,2	-0,29
Da (kg dm <sup>-3</sup> )	1,26	1,27	1,12	1,4	0,07	5,1	-0,29
DP (kg dm <sup>-3</sup> )	2,48	2,49	2,41	2,53	0,03	1	1,1
PT (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,49	0,49	0,43	0,55	0,03	5,8	-0,51
Arena (g kg <sup>-1</sup> )	630,3	630,5	566	701	22,48	3,6	1,86
Arcilla (g kg <sup>-1</sup> )	216,1	214,5	170	280	1,95	9	1,33
Limo (g kg <sup>-1</sup> )	152	152	114	180	12,19	8	0,68

NH: número de hojas; Diámetro: diámetro de tallo; Alt: altura; Brotes: número de brotes por planta; RP: resistencia mecánica a la penetración; HG: humedad gravimétrica; HV: humedad volumétrica; Da: densidad aparente del suelo; DP: densidad de partículas; PT: porosidad total; CV: coeficiente de variación; Ck: coeficiente de Kurtosis.

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** Coeficientes de los dos primeros componentes principales de los atributos del suelo y del diámetro del tallo de palmito

Atributo	CP1	CP2
Diámetro	0,49	-0,53*
RP	0,60*	-0,18
HG	-0,66*	0,44
Da	-0,72*	-0,66*
PT	0,71*	0,67*
Arcilla	-0,42	0,68*
Autovalor	2,24	1,86
Varianza explicada (%)	37,36	30,93

\* Correlaciones consideradas en la interpretación del componente principal con valor absoluto >0,50.

Fuente: Elaboración propia

Cada par de CP generó una representación bidimensional del espacio muestral original, denominado biplot, en el cual es posible explicar la estructura de variables mediante la orientación de agrupaciones de estas hacia las regiones de máxima variabilidad. La representación gráfica biplot entre CP1 y CP2 (figura 1) permitió caracterizar las variables que más discriminaron en la formación de las agrupaciones 1 y 2. Los atributos arcilla (-0,42), humedad gravimétrica (-0,66) y densidad aparente del suelo (-0,72) permitieron discriminar las agrupaciones de puntos muestrales en la agrupación 2, localizados a la izquierda del CP1 (correlaciones negativas). Por su parte, los atributos porosidad total (0,71) y resistencia mecánica a la penetración (0,60) caracterizaron la agrupación 1, localizada a la derecha del CP1 (correlaciones positivas).

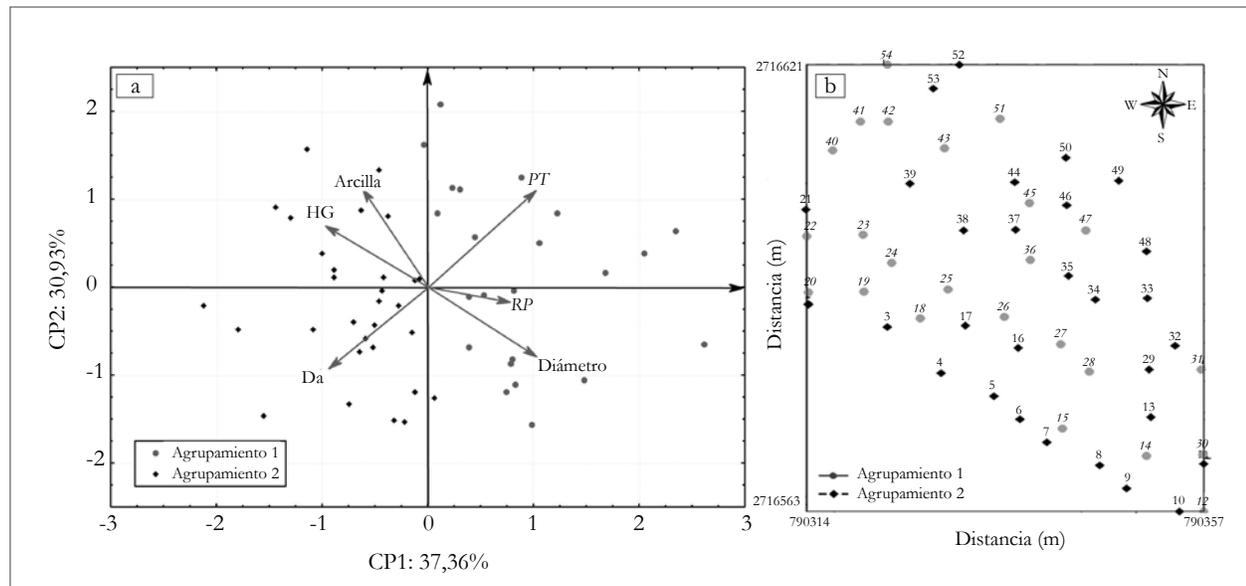
Para CP2, los atributos con mayor poder discriminatorio fueron la porosidad total (0,67) y el contenido de arcilla (0,68), que caracterizaron los puntos arriba de CP2 (correlaciones positivas), mientras que la densidad aparente del suelo (-0,66) y el diámetro

de tallo (-0,53) caracterizaron los puntos debajo de CP2 (correlaciones negativas). Así, la agrupación 1 presentó los menores valores de humedad gravimétrica y de densidad del suelo, mientras que la agrupación 2 presentó los menores valores de porosidad total, de resistencia mecánica a la penetración y de diámetro del tallo. Así, del total de 54 puntos muestreados, el 44 % representa la agrupación 1, en tanto que el 56 % representa la agrupación 2. Se observó también que en la región sur del mapa (figura 1b) se encuentra la mayoría de puntos muestreados que representa la agrupación 2, que obtuvo el menor diámetro del tallo.

De acuerdo con Silva et al. (2010), el dendrograma que se obtuvo por análisis de agrupaciones jerárquicas indicó que la variación expresiva en los valores de distancia euclidiana entre los accesos —para el conjunto de variables consideradas— permite hacer una división de grupos (figura 2). La variación encontrada fue de 16 para 20 y permitió una división de las entradas en dos grupos, lo cual corrobora los resultados obtenidos en el ACP.

Para la confirmación de la ordenación que se encontró en el análisis de agrupaciones jerárquicas, se aplicó el método de los agrupamientos no jerárquicos, en el cual se utilizó el número de agrupaciones igual a 2. Los resultados confirmaron la ordenación ( $p < 0,01$ ), a excepción del contenido de arcilla ( $p = 0,11$ ) (tabla 3). Freddi, Ferraudo, & Centurion

(2008), mediante la aplicación del análisis multivariado en la compactación de un oxisol cultivado con maíz, verificaron que la variación de las observaciones fue inferior al de esta investigación: 6,5 para 12,5. Sin embargo, el análisis de dichos autores fue capaz de discriminar puntos con productividad de cultivos diferentes.



**Figura 1.** a. Gráfico biplot de los dos primeros componentes principales, CP1 y CP2; b. distribución espacial de las agrupaciones generadas por el componente productivo del diámetro del tallo de palmito y los atributos físicos del suelo.

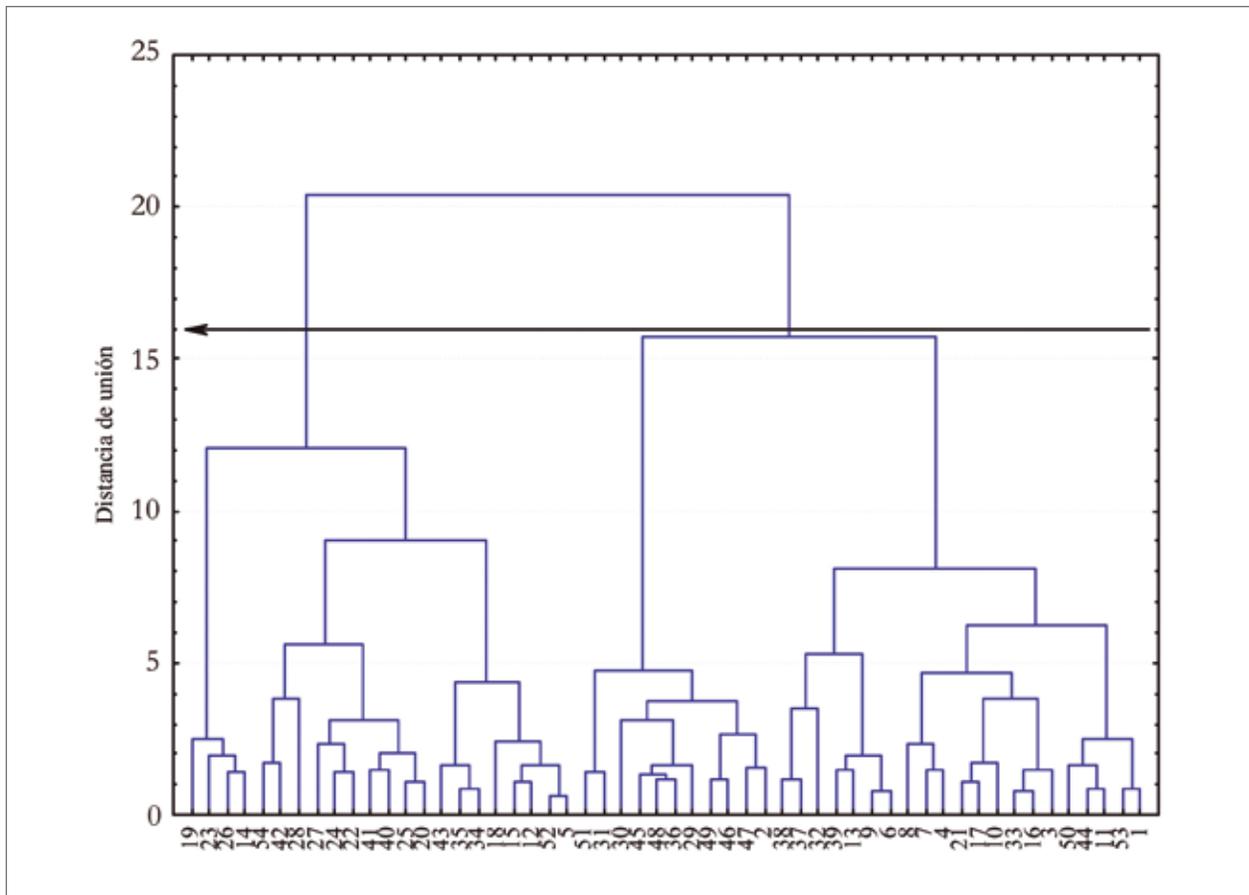
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.** Medias del diámetro del tallo de la planta y de los atributos del suelo de los grupos formados por análisis no-jerárquico de agrupaciones *k-means*

Agrupamientos	Variables					
	Diámetro (cm)	RP (MPa)	PT (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	HG (kg kg <sup>-1</sup> )	Da (kg dm <sup>-3</sup> )	Arcilla (kg kg <sup>-1</sup> )
1	7,175	1,174	0,513	0,193	1,21	212,1
2	5,676	1,032	0,472	0,217	1,302	219,5
Media general	6,425	1,103	0,492	0,205	1,256	215,8
F	4,62*	10,00*	57,77**	11,19**	52,40**	1,93 <sup>ns</sup>

<sup>ns</sup> No significativo a 5 % de probabilidad; \* Significativo a 5 % de probabilidad; \*\* Significativo a 1 % de probabilidad.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2.** Dendrograma resultante del análisis de agrupación jerárquica por puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia

La división en grupos mostró la ordenación de las observaciones de acuerdo con el diámetro del tallo: en la agrupación 1 se encontraron las entradas con los mayores valores del diámetro del tallo y en la agrupación 2, los valores menores de la misma variable, de acuerdo con los atributos físicos del suelo (RP, HG, Da, PT) para la profundidad de 0,00-0,10 m (figura 3).

En relación con las medidas de los atributos físicos (tabla 3), se verificó que el suelo presentó en las agrupaciones 1 y 2 valores de densidad aparente del suelo de 1,20 y 1,30 kg dm<sup>-3</sup> respectivamente. Estos valores son menores al nivel crítico para los suelos arcillosos (Arshad, Lowery, & Grossman, 1996), pues dicho nivel se sitúa cerca de 1,40 kg dm<sup>-3</sup>, valor que podría dificultar el desarrollo radicular. En las agrupaciones 1 y 2, la porosidad total encontrada fue la ideal, ya que, en adecuadas condiciones para

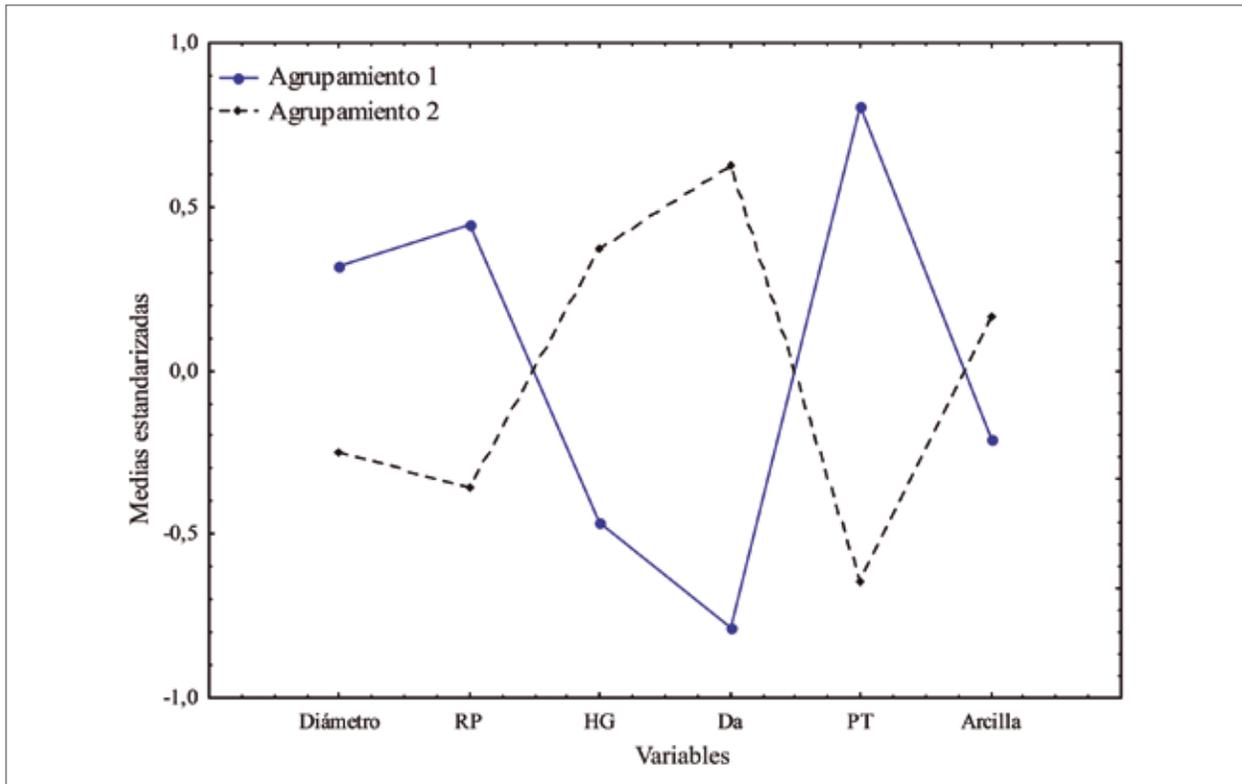
la producción agrícola, el suelo debe presentar una porosidad máxima total de 0,50 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (Kiehl, 1979).

En la condición de una elevada resistencia a la penetración, ocurrieron los menores valores de humedad gravimétrica y de densidad aparente del suelo, y los mayores valores de porosidad total en relación con las otras condiciones (figura 3). Estos resultados difieren del comportamiento normal del suelo, ya que en condiciones de compactación ocurre una reorganización de la matriz del suelo generada por la acción de fuerzas externas, lo que ocasiona la reducción del volumen de los poros y el aumento de la densidad del suelo (Otto, Silva, Franco, Oliveira, & Trivelin, 2011). Sin embargo, aunque los resultados no responden al comportamiento esperado del suelo, concuerdan con los encontrados por Schaffrath, Tormena, Fidalski, y

Gonçalves (2008) en oxisoles, quienes encontraron una correlación negativa entre la densidad del suelo y la porosidad total.

Maria et al. (1999) también encontraron una correlación positiva entre la densidad aparente y

la humedad del suelo en un oxisol. Por otro lado, para las condiciones de mayores densidades del suelo (agrupación 2), se observó un comportamiento opuesto, en el que hubo una disminución de la porosidad total en condición de mayor humedad gravimétrica (figura 3).



**Figura 3.** Medias estandarizadas del diámetro del tallo de palmito y los atributos físicos del suelo según el análisis de agrupaciones no-jerárquicas *k-means*.

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

El análisis de componentes principales indicó que la resistencia a la penetración, la humedad, la densidad aparente, la porosidad total y el contenido de arcilla en el suelo son los atributos físicos que más limitan el desarrollo del diámetro de tallo del palmito.

El uso de análisis multivariado ayudó en la verificación de las similitudes y diferencias encontradas para los puntos de muestreo evaluados con relación

a los atributos estudiados. El método de agrupaciones y el de las correlaciones lineales presentaron resultados similares, por lo tanto, no permitieron una real correlación entre los atributos.

## Descargos de responsabilidad

Este trabajo fue realizado sin financiamiento institucional. Los autores declaran que no existe conflicto de interés con el trabajo presentado.

## Referencias

- Arshad, M. A., Lowery, B., & Grossman, R. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. En J. W. Doran, A. J. Jones (Eds.), *Methods for assessing soil quality* (pp. 1-43). Madison, EE. UU.: SSSA.
- Barrios, M. R., Marques, J., Jr., Panosso, A. R., Siqueira, D. S., & La Scala, N., Jr. (2012). Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(4), 1073-1082.
- Bognola, I. A., Lingnau, C., Lavoranti, O. J., Stolle, L., Higa, A. R., & Oliveira, E. B. (2011). Geoestatística integrada com estatística multivariada e geoprocessamento na definição de unidades de manejo para o *Pinus taeda*. En R. Y. Inamasu, J. M. Naime, A. V. Resende, L. H. Bassoi, & A. C. C. Bernardi (Eds.), *Agricultura de precisão: um novo olhar* (1.ª ed, pp. 227-231). São Carlos: Cubo.
- Casalinho, H. D., & Martins, S. R. (2004). Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade em agroecossistemas: avaliações integrando os conhecimentos acadêmicos e não-acadêmicos. En J. C. Canuto, & J. A. Costabeber (Eds.), *Agroecologia: conquistando a soberania alimentar* (pp. 212-225). Porto Alegre, RS: Emater/RS-Ascar.
- Coelho, A. M. (2003). Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. En N. Curi, J. J. Marques, L. R. G. Guilherme, J. M. Lima, A. S. Lopes, & V. H. Alvares (Eds.), *Tópicos em ciência do solo* (pp. 259-290). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPq). (1997). *Manual de métodos de análise de solos* (2.ª ed.). Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2012). *Productos forestales no madereros 20: frutales y plantas útiles en la vida amazónica*. Roma: FAO, CIFOR y PPI.
- Freddi, O. S., Ferraudo, A. S., & Centurion, J. F. (2008). Análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(3), 953-961.
- Hair, J. F., Jr., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (2005). *Análise multivariada de dados* (5.ª ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2009). *Censo agropecuário 2006 - Resultados preliminares*. Recuperado de <http://www.ibge.gov.br/espagnol/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/>.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2002). *Applied multivariate statistical analysis* (5.ª ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187-200.
- Kiehl, E. J. (1979). *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Agronômica Ceres.
- Maria, I. C. de, Castro, O. M., & Souza Dias, H. (1999). Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23(3), 703-709.
- Mello Ivo, W. M. P., & Mielniczuk, J. (1999). Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23(1), 135-43.
- Mossaneck, E. A. O., Wendling, I., Koehler, H. S., & Zuffellato-Ribas, K. C. (2014). Indução de perfilhos em mudas de pupunheira. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 34(77), 39-48.
- Otto, R., Silva, A. P., Franco, H. C. J., Oliveira, E. C. A., & Trivelin, P. C. O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and tillage research*, 117, 201-210.
- Pimentel-Gomes, F. P., & Garcia, C. H. (2002). *Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais*. Piracicaba: FEALQ.
- Pragana, R. B., Ribeiro, M. R., Nóbrega, J. C. A., Ribeiro Filho, M. R., & Costa, J. Á. (2012). Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado piauiense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(5), 1591-1600.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Oliveira, J. B., Coelho, M. R., ... Cunha, T. J. F. (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Schaffrath, V. R., Tormena, C. A., Fidalski, J., & Gonçalves, A. C. A. (2008). Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(4), 1369-1377.
- Schlotzhaver, S. D., & Littell, R. S. (1997). *SAS: System for elementary statistical analysis*. Cary: SAS.
- Silva, A. S., Lima, J. S. S., Xavier, A. C., & Teixeira, M. M. (2010). Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-amarelo húmico cultivado com café. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(1), 15-22.
- Silva, V. L., Mouro, F. V., Damião Filho, C. F., Mouro, J. R., Silva e Silva, B. M., & Charlo, H. C. O. (2006). Morfologia e avaliação do crescimento inicial de plântulas de *Bactris gasipaes Kunth*. (Arecaceae) em diferentes substratos. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 28(3), 477-480.
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15, 229-235.
- Trintinalio, J., Tormena, C. A., Oliveira, R. R., Jr., Machado, J. L., & Constantin, J. (2005). Alterações nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho distrófico por diferentes manejos na entrelinha da cultura da pupunha (*Bactris gasipaes Kunth*). *Revista Acta Scientia Agronômica*, 27(4), 753-759.