

# PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL QUALITY INDEX IN IRRIGATED ACAI PLANTATIONS, EASTERN AMAZON, BRAZIL

## ÍNDICE DE CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO EN PLANTACIONES DE ACAI BAJO RIEGO, EN LA AMAZONÍA ORIENTAL, BRASIL

Francisco A. do Carmo-Lucio<sup>1</sup>, Herdjanía Veras-de Lima<sup>1\*</sup>, Antonio Rodrigues-Fernandes<sup>1</sup>, Pedro D. de Oliveira<sup>1</sup>, Edson M. Leal Soares-Ramos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA. Av. Pres. Tancredo Neves, 2501-Caixa Postal 917, CEP 66077-530 Belém (PARÁ). (francisco.aldenir@ufra.edu.br), (antonio.fernandes@ufra.edu.br), (daniel.oliveira@ufra.edu.br), (herdjanía.lima@ufra.edu.br). <sup>2</sup>Universidade Federal do Pará-UFPA. Instituto de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal do Pará-UFPA. (ramosedson@gmail.com).

### ABSTRACT

Knowledge of the soil quality in acai (*Euterpe oleracea* Mart.) plantations is very important to the northern region of Brazil because it is a native species with high economic value. The aim of this study was to evaluate the physical and chemical quality of a Yellow Latosol in an irrigated acai plantation by determining the soil quality index (SQI). The soil was classified as dystrophic Yellow Latosol with medium texture. The water retention curve and soil penetration resistance were determined using 45 undisturbed samples obtained at 0.1 and 0.3 m depth and distributed across two transects. For SQI determination, 15 soil quality indicators at a depth of 0.1 m were evaluated: soil bulk density (Bd); total porosity (TP); macroporosity (Map); penetration resistance (PR); pH in water; P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, H+Al, and Al<sup>3+</sup> levels; organic matter (OM); sum of bases (SB); cation exchange capacity (CEC); and base saturation (V%). The RSS function, to receive, store, and supply water in the soil, was the indicator that most influenced the quality index formation. Soil function was limited for PGR to promote the roots growth, because it represented 22 % of the SQI, but it should be responsible for 25 %. The NS function to provide nutrient supply, was the least limiting to the SQI. The global SQI value of 0.641 suggests that irrigated acai plantation production in Yellow Latosol needs to be improved to PGR, which was limited in the surface layer.

**Keywords:** Soil water retention curve, soil penetration resistance, principal function, score standardization curves, environmental susceptibility.

\* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: August, 2013. Approved: April, 2014.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 48: 361-375. 2014.

### RESUMEN

El conocimiento de la calidad del suelo en las plantaciones de acai (*Euterpe oleracea* Mart.) es muy importante para la región norte de Brasil, ya que es una especie nativa con valor económico alto. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad física y química de un Latosol Amarillo en una plantación de acai de regadío determinando el índice de la calidad del suelo (SQI). El suelo se clasificó como Latosol Amarillo distrófico con textura media. La curva de retención de agua y la resistencia a la penetración del suelo se determinaron usando 45 muestras inalteradas obtenidas a 0.1 y 0.3 m de profundidad y distribuidas en dos transectos. Para determinar SQI, se evaluaron 15 indicadores de calidad de suelo a una profundidad de 0.1 m: densidad aparente del suelo (Bd); porosidad total (PT); macroporosidad (map); resistencia a la penetración (RP); pH en agua; niveles de P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, H+Al, y Al<sup>3+</sup>; materia orgánica (OM); suma de bases (SB); capacidad de intercambio catiónico (CEC); y saturación de bases (V%). La función RSS, de recibir, almacenar, y abastecer de agua al suelo, fue el indicador que más influyó en la formación del índice de calidad. La función del suelo fue limitada para la PGR para promover el crecimiento de las raíces, ya que representó 22 % del SQI, pero debió ser responsable de 25 %. La función de NS de suministrar nutrientes fue la menos limitante para el SQI. El valor global de 0.641 del SQI sugiere que la producción de las plantaciones de acai de regadío en Latosol Amarillo necesita ser mejorada para la PGR, que fue limitada en la capa superficial.

**Palabras clave:** Curva de retención de agua del suelo, resistencia a la penetración del suelo, función principal, curvas de estandarización del puntaje, susceptibilidad ambiental.

## INTRODUCTION

Soil quality is associated with the soil capacity to offer adequate resources for the development of plants. One way to maintain soil quality is by constantly monitoring an area to identify changes in soil characteristics and use appropriate management practices, thus avoiding productive capacity losses (Doran and Parkin, 1994). Soil quality assessments are carried out using physical, chemical and biological soil indicators (Doran and Parkin, 1994). Some physical and chemical indicators are soil bulk density (Araújo *et al.*, 2007), soil water retention curve (Doran and Parkin, 1994), soil penetration resistance, soil pH, cation exchange capacity, base saturation, and phosphorus, potassium, calcium, and magnesium levels (Fageria, 1998; Gomes and Filizola, 2006). These indicators vary according to soil management and crop type (Silva *et al.*, 2006; Sena *et al.*, 2007; Viégas *et al.*, 2008).

The interest in developing dry land acai (*Euterpe oleracea* Mart.) plantations for recovering deforested areas with low productive capacity and reducing pressure on the floodplain ecosystem has increased. Dryland areas allow for soil correction and fertilization, besides other practices that favor increased production and productivity, unlike the Amazonian floodplains, which suffer tidal influences that hinder their management. Irrigation is another practice adopted in dryland acai plantations that increases productivity and enables fruit production at different times of the year (Homma *et al.*, 2006).

Research in the state of Pará involving the physical and chemical properties of soil in acai plantations is beginning and little is known about the effects of changes in these soil attributes and which are the most appropriate indicators for monitoring soil quality. The objective of this experiment was to study the physical and chemical quality of a Yellow Latosol in an irrigated acai plantation by determining the soil quality index (SQI).

## MATERIALS AND METHODS

Undisturbed and disturbed soil samples were collected in December 2009, from a commercial farm located in the northeastern region of the State of Pará, Brazil. The soil was classified as dystrophic Yellow Latosol with medium texture. Values for sand, lime and clay were 681.8, 51.8, and 266.4 g kg<sup>-1</sup>

## INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo se relaciona con su capacidad para ofrecer recursos adecuados para el desarrollo de las plantas. Una manera de mantener la calidad del suelo es por monitoreo constante de un área para identificar cambios en las características del suelo y usar prácticas adecuadas de manejo, evitando así pérdidas de capacidad productiva (Doran y Parkin, 1994). Las evaluaciones de calidad del suelo se realizan usando indicadores de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Doran y Parkin, 1994). Algunos indicadores físicos y químicos son: densidad aparente del suelo (Araújo *et al.*, 2007), curva de retención de agua (Doran y Parkin, 1994), resistencia a la penetración, pH, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, y niveles de fósforo, potasio, calcio y magnesio (Fageria, 1998; Gomes y Filizola, 2006). Estos indicadores varían según el manejo del suelo y el tipo de cultivo (Silva *et al.*, 2006; Sena *et al.*, 2007; Viégas *et al.*, 2008).

El interés en establecer plantaciones de acai (*Euterpe oleracea* Mart.) en tierras secas para recuperar áreas deforestadas con baja capacidad productiva y reducir la presión sobre el ecosistema de llanura de inundación ha aumentado. Las zonas de tierras secas permiten el mejoramiento y fertilización de los suelos, y otras prácticas que favorecen el aumento de la producción y la productividad, a diferencia de las zonas inundadas de la Amazonía, que sufren la influencia de las mareas, lo cual dificulta su manejo. El riego es otra práctica adoptada en plantaciones de acai de tierras secas que aumenta la productividad y permite producir fruta en diferentes épocas del año (Homma *et al.*, 2006).

La investigación en el estado de Pará, que implica las propiedades físicas y químicas del suelo en plantaciones de acai, está comenzando y se sabe poco sobre los efectos de los cambios en las propiedades del suelo, que son los indicadores más apropiados para monitorear la calidad del suelo. El objetivo de esta investigación fue estudiar la calidad física y química de un Latosol Amarillo en una plantación de acai de regadío mediante la determinación del índice de calidad del suelo (SQI).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de suelo alteradas y no alteradas se recolectaron en diciembre de 2009 de una finca comercial ubicada en la región

at 0.1 m depth, and at 0.3 m they were 527.8, 74.2, and 398.0 g kg<sup>-1</sup>, respectively. The climate type is Am according to the Köppen classification, with high rainfall from January to May and low from August to November, and annual average of 2202 mm. The average annual temperature is 26 °C, with 80 % relative humidity.

The area was planted with irrigated 4-year-old acai plants of the BRS-Pará cultivar, spaced 4.0×4.0 m. The planted area was 13 ha and 2.3 ha were selected for the study, and fertilization per plant was 10 kg cattle manure (organic) and 200 g NPK (chemical; 10-28-20), in October 2009. Cattle manure was not chemically characterized, and values were based upon those reported by Artur *et al.* (2007): 2.1 P, 6.8 K, 2.0 Ca, 1.4 Mg and 10.0 N; and by Oliveira *et al.* (2001): 1.84 P, 4.94 K and 8.82 N.

There were 45 sampling sites distributed across two transects for better sampling of the area, with one transect containing 22 points and the other one 23 points, both with 10 m spacing between points and at 0.1 and 0.3 m depths. Undisturbed cores (0.05 m × 0.047 m) were taken for determination of physical properties, whereas a disturbed sample was used for the chemical and soil particle size distribution analyses.

Particle size distribution was evaluated using the pipette method (Gee and Bauder, 1986). The undisturbed samples became saturated with the gradual increase of the water level in trays and then subjected to different potentials, with five samples per potential for a total of nine potentials in 45 samples. Water potentials were -0.001, -0.003, -0.006, and -0.01 MPa on a tension table and -0.03, -0.07, -0.1, -0.3, and -0.5 MPa on pressure plates (Klute, 1986). To achieve potential at the permanent wilting point (PWP) at -1.5 MPa, the WP4-T (Dew Point Potential Meter) method was used by moistening (Costa *et al.*, 2008). The soil water retention curve was fitted to the equation proposed by Van Genuchten (1980):

$$\theta_v = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[ (1 + \alpha \psi)^n \right]^m} \quad (1)$$

where  $\theta_v$  is the volumetric water content (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>);  $\psi$  is the matric potential (MPa);  $\theta_s$  is the saturated water content (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_r$  is the residual water content (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\alpha$ ,  $n$  and  $m$  are model fitting parameters, determined by nonlinear regression using the R software, version 2.11.0.

After equilibrium, the samples were utilized to determine soil resistance to penetration (PR) (Tormena *et al.*, 1998), and then dried in an oven at 105 °C for 24 h to determine soil water content and bulk density (Bd).

noreste del estado de Pará, Brasil. El suelo se clasificó como Lato-sol Amarillo distrófico, con textura media. Los valores para arena, limo y arcilla fueron de 681.8, 51.8 y 266.4 g kg<sup>-1</sup> a 0.1 m de profundidad y a 0.3 m fueron 527.8, 74.2 y 398.0 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. El clima es tipo Am, según la clasificación de Köppen, con precipitaciones altas de enero a mayo y bajas de agosto a noviembre, y la media anual es 2202 mm. La temperatura media anual es 26 °C, con una humedad relativa de 80 %.

La zona fue sembrada con plantas acai de riego de 4 años de edad del cultivar BRS-Pará, a distancia de 4.0×4.0 m. La superficie sembrada fue 13 ha, y 2.3 ha fueron seleccionados para el estudio; la fertilización por planta fue 10 kg estiércol de ganado (orgánico) y 200 g NPK (químico; 10-28-20), en octubre de 2009. El estiércol de ganado no fue caracterizado químicamente, y los valores se basaron en los reportados por Artur *et al.* (2007): 2.1 P, 6.8 K, 2.0 Ca, 1.4 Mg y 10.0 N; y por Oliveira *et al.* (2001): 1.84 P, 4.94 K y 8.82 N.

Hubo 45 sitios de muestreo distribuidos a través de dos transectos para un mejor muestreo de la zona, con un transecto que contenía 22 puntos y el otro 23, ambos con 10 m de espacio entre los puntos y a 0.1 y 0.3 m de profundidad. Las muestras inalteradas (0.05 m×0.047 m) fueron tomadas para determinar las propiedades físicas, y se usó una muestra alterada para los análisis químicos y de la distribución del tamaño de las partículas del suelo.

La distribución del tamaño de partículas se evaluó con el método de la pipeta (Gee y Bauder, 1986). Las muestras no alteradas se saturaron con el aumento gradual del nivel de agua en las bandejas y luego se sometieron a diferentes potenciales, con cinco muestras por potencial y un total de nueve potenciales en 45 muestras. Los potenciales de agua fueron -0.001, -0.003, -0.006 y -0.01 MPa de acuerdo con una tabla de tensiones, y -0.03, -0.07, -0.1, -0.3, y -0.5 MPa en placas de presión (Klute, 1986). Para lograr potencial en el punto de marchitez permanente (PMP) a -1.5 MPa, se usó el método WP4-T (Medida del Punto de Rocío Potencial) por humectación (Costa *et al.*, 2008). La curva de retención de agua del suelo se ajustó a la ecuación propuesta por Van Genuchten (1980):

$$\theta_v = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[ (1 + \alpha \psi)^n \right]^m} \quad (1)$$

donde  $\theta_v$  es el contenido volumétrico de agua (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>);  $\psi$  es el potencial de la matriz (MPa);  $\theta_s$  es el contenido de agua saturada (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\theta_r$  es el contenido de agua residual (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  son parámetros de ajuste de modelos determinados por regresión no lineal usando el programa R, versión 2.11.0.

The total porosity (TP) was obtained by the formula  $TP = (1 - Bd/Pd)$ , where Pd is the particle density ( $Pd = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ). The microporosity (Mip) was determined as the water content retained at a tension of 0.006 MPa, and the macroporosity (Map) as the difference between TP and Mip (EMBRAPA, 1997).

The available water capacity (AWC) was calculated as the difference between the water content at field capacity ( $\theta_{fc}$ ), 0.01 MPa, and at the permanent wilting point (PWP), 1.5 MPa, based on the soil water retention curve (SWRC).

The PR data were adjusted in relation to the soil water content ( $\theta_v$ ) and the bulk density (Bd) using the nonlinear model proposed by Busscher (1990):

$$PR = \alpha \theta_v^b Bd^c \quad (2)$$

where PR is the soil penetration resistance (MPa);  $\theta_v$  is the volumetric water content; Bd is the bulk density;  $\alpha$ ,  $b$  and  $c$  are the fitting parameters of the models obtained by nonlinear adjustments using SAS (SAS Institute Inc., 2004).

To estimate the variation in soil PR, four  $\theta_v$  values related to the following potential ( $\psi$ ) were used:  $\psi = 0.003$  MPa, which corresponds to the least advanced soil drying stage but is lower than  $\theta_{fc}$ ;  $\psi = 0.01$  MPa, which corresponds to  $\theta_{fc}$ ;  $\psi = 0.1$  MPa; and  $\psi = 0.5$  MPa, which corresponds to a more advanced soil stage but is lower than the PWP ( $\psi = 1.5$  MPa).

The chemical characteristics evaluated were: organic matter (OM); pH in  $H_2O$  (1:2.5); exchangeable levels of calcium ( $Ca^{2+}$ ), magnesium ( $Mg^{2+}$ ), potassium ( $K^+$ ), and aluminum ( $Al^{3+}$ ); available phosphorus (P) (Mehlich-1); potential acidity (H+Al); sum of bases (SB); cation exchange capacity (CEC); and base saturation (V%) (EMBRAPA, 1997).

#### Determination of the soil quality index (SQI)

To determine SQI, 15 soil quality indicators were assessed at a depth of 0.1 m because this soil layer has the highest concentration of roots: Bd ( $Mg \text{ m}^{-3}$ ), TP ( $m^3 \text{ m}^{-3}$ ), Map ( $m^3 \text{ m}^{-3}$ ), PR (MPa), pH  $H_2O$ , P ( $mg \text{ kg}^{-1}$ ),  $K^+$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ),  $Ca^{2+}$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ),  $Mg^{2+}$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), H+Al ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ),  $Al^{3+}$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), OM ( $g \text{ kg}^{-1}$ ), SB ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), CEC ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), and V%. The soil quality index model proposed by Karlen and Stott (1994) was used in the present study, with indicators chosen according to the objectives of the evaluation. The model is additive and uses a series of main soil functions, to which weights are assigned and integrated according to the following expression:

Después del equilibrio, las muestras se usaron para determinar la resistencia del suelo a la penetración (PR) (Tormena *et al.*, 1998), y después se secaron 24 h en un horno a 105 °C para determinar el contenido de agua del suelo y la densidad aparente (Bd).

La porosidad total (TP) se obtuvo con la fórmula  $TP = (1 - Bd/Pd)$ , donde Pd es la densidad de partículas ( $Pd = 2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ). La microporosidad (Mip) se determinó como el contenido de agua retenida a una tensión de 0.006 MPa, y la macroporosidad (Map) como la diferencia entre TP y Mip (EMBRAPA, 1997).

La capacidad de agua disponible (AWC) se calculó como la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ), 0.01 MPa, y en el punto de marchitez permanente (PMP), 1.5 MPa, basada en la curva de retención de agua del suelo (SWRC).

Los datos de PR se ajustaron en relación con el contenido de agua del suelo ( $\theta_v$ ) y la densidad aparente (Bd), usando el modelo no lineal propuesto por Busscher (1990):

$$PR = \alpha \theta_v^b Bd^c \quad (2)$$

donde PR es la resistencia a la penetración del suelo (MPa);  $\theta_v$  es el contenido volumétrico de agua; Bd es la densidad aparente;  $\alpha$ ,  $b$  y  $c$  son los parámetros de ajuste de los modelos obtenidos por los ajustes no lineales utilizando SAS (SAS Institute Inc., 2004).

Para estimar la variación de PR del suelo se usaron cuatro valores  $\theta_v$  relacionados con el siguiente potencial ( $\psi$ ):  $\psi = 0.003$  MPa, que corresponde a la etapa menos avanzada de secado del suelo, pero menor que  $\theta_{fc}$ ;  $\psi = 0.01$  MPa, que corresponde a  $\theta_{fc}$ ;  $\psi = 0.1$  MPa; y  $\psi = 0.5$  MPa, que corresponde a una etapa más avanzada del suelo, pero es más baja que PWP ( $\psi = 1.5$  MPa).

Las características químicas evaluadas fueron: materia orgánica (OM); pH en  $H_2O$  (1:2.5); niveles intercambiables de calcio ( $Ca^{2+}$ ), magnesio ( $Mg^{2+}$ ), potasio ( $K^+$ ), y aluminio ( $Al^{3+}$ ); fósforo disponible (P) (Mehlich-1); acidez potencial (H+Al); suma de bases (SB); capacidad de intercambio catiónico (CEC); y saturación de bases (V%) (EMBRAPA, 1997).

#### Determinación del índice de calidad del suelo (SQI)

Para determinar SQI, se evaluaron 15 indicadores de calidad del suelo a una profundidad de 0.1 m, porque esta capa de suelo tiene la mayor concentración de raíces: Bd ( $Mg \text{ m}^{-3}$ ), TP ( $m^3 \text{ m}^{-3}$ ), Map ( $m^3 \text{ m}^{-3}$ ), PR (MPa), pH  $H_2O$ , P ( $mg \text{ kg}^{-1}$ ),  $K^+$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ),  $Ca^{2+}$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ),  $Mg^{2+}$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), H+Al ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ),  $Al^{3+}$  ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), OM ( $g \text{ kg}^{-1}$ ), SB ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), CEC ( $cmol_c \text{ dm}^{-3}$ ), y V%. En el presente estudio se

$$SQI = \sum_q Wi(wt) \quad (3)$$

where  $SQI$  is the soil quality index,  $qWi$  is the value calculated for the main functions that make up the index,  $wt$  is a numerical weight assigned to each function in the overall quality index. The main functions were chosen for evaluation purposes and should be accompanied by physical, chemical, and biological indicators directly related to their measurement.

The numerical weights are assigned to the functions according to their degree of importance to soil function. The sum of the weights of all the main functions should be 1.0, which represents the  $SQI$  for an ideal soil in terms of the proposed objective. When the soil has limitations and no quality, the value is zero. After assigning the relative weights to the functions, the indicators that influence each function to different degrees should be identified and ranked. As for the main functions, numerical weights should be assigned to the indicators, and the higher the level of the indicator, the greater its association with the function. Likewise, the overall sum of the indicators' weights at each level should be 1.0.

After identifying the main functions, their indicators and their respective weights, whose values are multiplied, it is necessary to normalize the values to a single scale between 0 and 1, which was obtained using a function for the standardization of the scores (Wymore, 1993):

$$v = \frac{1}{1 + ((B - L) / (x - L))^{2S(B+x-2L)}} \quad (4)$$

where  $v$  is the standardized score;  $B$  is the critical value or threshold-base indicator, whose standardized score is 0.5 and establishes the boundary between bad and good soil quality;  $L$  is the initial or lowest value that a soil property can express, which may be 0;  $S$  is the slope of the tangent to the curve at the point corresponding to the indicator critical value;  $x$  is the value of the soil property or indicator measured in the field.

To apply the Wymore (1993) equation it is necessary to calculate the slope ( $S$ ) of the score curve tangent for the critical value of the indicator, using equation 2 and:

$$S = \frac{\log(I / v) - 1}{\log((B - L) / (x - L)) \cdot 2(B + x - 2L)} \quad (5)$$

Using the score standardization curves, three typical standardization functions are produced (Figure 1): a) "more is better", b) "maximum value", and c) "less is better".

utilizó el modelo de índice de calidad del suelo propuesto por Karlen y Stott (1994), con indicadores seleccionados de acuerdo con los objetivos de la evaluación. El modelo es aditivo y utiliza una serie de funciones importantes del suelo, a las cuales pesos son asignados e integrados, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$SQI = \sum_q Wi(wt) \quad (3)$$

donde  $SQI$  es el índice de calidad del suelo,  $qWi$  es el valor calculado para las funciones principales que componen el índice,  $wt$  es un peso numérico asignado a cada función en el índice general de calidad. Las principales funciones se eligieron para fines de evaluación y deben ir acompañadas de indicadores físicos, químicos y biológicos relacionados directamente con su medición.

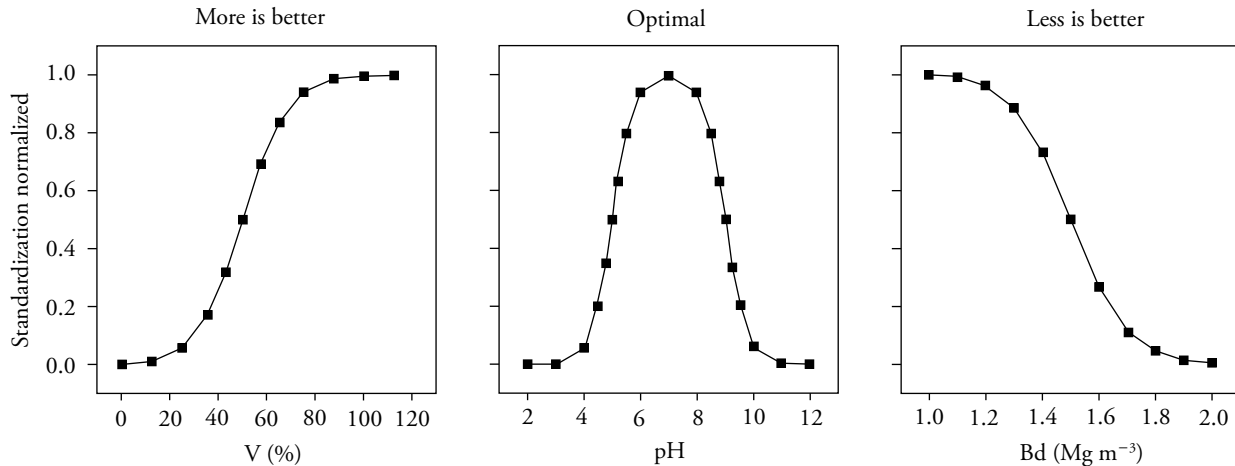
Los pesos numéricos fueron asignados a las funciones del suelo de acuerdo con su grado de importancia. La suma de los pesos de todas las funciones principales debe ser 1.0, lo que representa el  $SQI$  para un suelo ideal en términos del objetivo propuesto. Cuando el suelo tiene limitaciones y carece de calidad, el valor es cero. Después de asignar los pesos relativos a las funciones, los indicadores que influyen en cada función a diferentes grados deben ser identificados y clasificados. En cuanto a las funciones principales, se deben asignar pesos numéricos a los indicadores, y cuanto mayor sea el nivel del indicador, mayor es su asociación con la función. Del mismo modo, la suma total de los pesos de los indicadores en cada nivel debe ser 1.0.

Después de identificar las principales funciones, sus indicadores y sus respectivos pesos, cuyos valores se multiplican, es necesario normalizar los valores en una sola escala entre 0 y 1, la cual se obtuvo usando una función para la estandarización de los puntajes (Wymore, 1993):

$$v = \frac{1}{1 + ((B - L) / (x - L))^{2S(B+x-2L)}} \quad (4)$$

donde  $v$  es el puntaje estandarizado;  $B$  es el valor crítico o el indicador del umbral de base, cuyo puntaje estandarizado es 0.5 y establece el límite entre la mala y la buena calidad del suelo;  $L$  es el valor inicial o más bajo que una propiedad del suelo puede registrar, que puede ser 0;  $S$  es la pendiente de la tangente de la curva en el punto correspondiente al valor crítico del indicador;  $x$  es el valor de la propiedad del suelo o indicador medido en el campo.

Para aplicar la ecuación Wymore (1993) es necesario calcular la pendiente ( $S$ ) de los puntos de la curva tangente para el valor crítico del indicador, utilizando la ecuación 2 y:



**Figure 1. Score standardization curves: “more is better”, “maximum value”, and “less is better”.**  
**Figura 1. Curvas de estandarización de los puntos: “más es mejor”, “valor máximo”, y “menos es mejor”.**

When standardizing the attributes, two limiting values, upper and lower, and a critical value are used. The upper-limit values belong to the quality indicators for which the score function equals 1, when the measured soil property is optimal. The lower-limit values belong to the quality indicators for which the score function equals 0 (zero), when the soil property is at an unacceptable level. The critical values are those for which the score function is equal to 0.5. Both the standardization curves and the limiting values - upper, lower, and critical - must be carefully established. Only information from researchers who are experts on the subject should be used, i.e., values obtained from properly annotated, specific databases and for ideal and similar soil and cultivation conditions (Karlen and Stott, 1994).

The standardization curve type “more is better” has a positive slope (S) and is used for the standardization of indicators for which higher values improve soil quality, such as SB; the “maximum value” curve has a positive slope up to the maximum value and is used for indicators that show positive effects on soil quality, such as pH, up to a certain value and beyond which its influence is negative. The standardization curve type “less is better” has a negative slope and standardizes indicators such as bulk density, penetration resistance, and saturation by Al<sup>3+</sup>, for which quality is associated with lower values. An example of these three types of functions is shown in Figure 1.

**Criteria used to evaluate the soil quality index (SQI)**

The criterion to evaluate the SQI involved using the principles established by Melo *et al.* (2007) to facilitate

$$S = \frac{\log(l/v) - 1}{\log((B - L)/(x - L)) \cdot 2(B + x2.L)} \tag{5}$$

Utilizando las curvas de estandarización del puntaje, se producen tres funciones típicas de estandarización (Figura 1): a) “más es mejor”, b) “valor máximo”, y c) “menos es mejor”.

Al estandarizar los atributos, se utilizan dos valores límites, superior e inferior, y un valor crítico. Los valores del límite superior pertenecen a los indicadores de calidad para los cuales la función en puntos es igual a 1 cuando la característica medida del suelo es óptima. Los valores del límite inferior pertenecen a los indicadores de calidad para los que la función del puntaje es igual a 0 (cero) cuando la característica del suelo está en un nivel inaceptable. Los valores críticos son aquellos para los que la función de los puntos es igual a 0.5. Tanto las curvas de estandarización como los valores límites - superior, inferior y crítico - deben establecerse cuidadosamente. Sólo se debe utilizar información de investigadores expertos en la materia; es decir, valores obtenidos a partir de bases de datos específicas, registradas adecuadamente y para condiciones de suelo y de cultivo ideales y similares (Karlen y Stott, 1994).

El tipo de curva de estandarización “más es mejor” tiene una pendiente positiva (S) y se usa para estandarizar los indicadores para los que los valores más altos mejoran la calidad del suelo, como el SB; la curva “valor máximo” tiene una pendiente positiva hasta el valor máximo y se usa para los indicadores que tienen efectos positivos en la calidad del suelo, como el pH, hasta un cierto valor más allá del cual su influencia es negativa. El tipo de curva de estandarización “menos es mejor” tiene una pendiente negativa y estandariza indicadores como densidad aparente,

comparisons and interpretations related to the application of the Karlen and Stott (1994) method. Thus, four main functions and their respective quality indicators were defined (Table 1): to receive, store, and supply water in the soil (RSS); to promote the roots growth (PGR); to provide nutrient availability to plants (NAP); and to provide nutrient supply (NS). All four functions were considered of equal importance in this assessment, and each was assigned a weight of 0.25.

The SQI calculation was performed as follows:

$$q(PF) = I_1 \times W_1 + \dots + I_n \times W_n \quad (6)$$

where  $q(PF)$  is the partial contribution of each principal function to the overall SQI value,  $I_n$  are the values of the different indicators of the main function assessed, and  $W_n$  are the relative weights assigned to each indicator. The weights represent the importance

resistencia a la penetración, y saturación por  $Al^{3+}$ , para los que la calidad está asociada con valores menores. Un ejemplo de estos tres tipos de funciones se presenta en la Figura 1.

**Los criterios utilizados para evaluar el índice de calidad del suelo (SQI)**

El criterio para evaluar el SQI implicó el uso de los principios establecidos por Melo *et al.* (2007) para facilitar las comparaciones e interpretaciones relacionadas con la aplicación del método de Karlen y Stott (1994). Así, se definieron cuatro funciones principales y sus respectivos indicadores de calidad (Cuadro 1): recibir, almacenar, y abastecer de agua el suelo (RSS), promover el crecimiento de raíces (PGR), proporcionar la disponibilidad de nutrientes a las plantas (NAP); y el suministro de nutrientes (NS). Las cuatro funciones se consideraron de igual importancia en esta evaluación, y a cada una se asignó un peso de 0.25.

**Table 1. Parameters of score functions of physical and chemical indicators used in assessing the soil quality in a Yellow Latosol in an irrigated acai plantation.**

**Cuadro 1. Parámetros de las funciones de los puntos de los indicadores físicos y químicos usados en la evaluación de la calidad del suelo en un Latosol Amarillo con una plantación de acai con regadío.**

Main function	Indicator	Critical limit		Baseline		Optimal	Slope at baseline	Reference
		Lower	Upper	Lower	Upper			
(RSS) <sup>†</sup>	Bd	1.0	2.00	1.50			-2.500	(1)
	OM	0.0	30.0	15.0			0.090	(2)
	TP	0.2	0.80	0.40	0.6	0.5	13.80	(3)
	Map	0.0	0.25	0.10			8.650	(4)
(PGR) <sup>*‡</sup>	Bd	1.0	2.00	1.50			-2.500	(1)
	PR	0.5	4.50	2.50			-0.950	
	OM	0.0	30.0	15.0			0.090	(2)
	SB	0.0	4.70	2.35			0.690	(5)
	pH	2.0	12.0	5.00	9.0	7.0	0.680	(5)
	H+Al	0.0	4.50	2.25			-0.700	(5)
Al <sup>3+</sup>	0.0	1.00	0.50			-2.500	(5)	
(PNA) <sup>§</sup>	P	0.0	20.0	10.0			0.130	(5)
	K <sup>+</sup>	0.0	0.20	0.10			13.50	(5)
	Ca <sup>2+</sup>	0.0	3.00	1.50			0.890	(5)
	Mg <sup>2+</sup>	0.0	1.50	0.75			1.800	(5)
(NS) <sup>¶</sup>	pH	2.0	12.0	5.00	9.0	7.0	0.680	(5)
	CEC	0.0	9.00	4.50			0.300	(5)
	V	0.0	100.0	50.0			0.027	(5)
	OM	0.0	30.0	15.0			0.090	(2)

<sup>†</sup>receive, store, and supply water in the soil; <sup>\*</sup>promote the roots growth; <sup>§</sup>provide plant nutrient availability; <sup>¶</sup>provide nutrient supply. (1) Reichert *et al.*, 2003; (2) Gama, 2004; (3) Kiehl, 1979; (4) Vomocil and Flocker, 1966; and (5) Brasil and Cravo, 2010. <sup>‡</sup>recibir, almacenar y suministrar agua en el suelo; <sup>‡</sup>promover el crecimiento de raíces; <sup>§</sup>proporcionar la disponibilidad de nutrientes a la planta; <sup>¶</sup>suministrar nutrientes. (1) Reichert *et al.*, 2003; (2) Gama, 2004; (3) Kiehl, 1979; (4) Vomocil y Flocker, 1966; y (5) Brasil y Cravo, 2010.

of each indicator in the composition of the soil quality index in a given environment.

In the second step, the values found in each main function were multiplied by the function's respective weight, and the results were summed, thus generating the SQI:

$$SQI = ({}_qRSS \times w_{RSS}) + ({}_qPGR \times w_{PGR}) + ({}_qPNA \times w_{PNA}) + ({}_qSN \times w_{SN}) \quad (7)$$

where  ${}_qRSS$  is the weighted value of the main function to receive, store, and supply soil water;  ${}_qPGR$  is the function to promote the root growth;  ${}_qPNA$  is the function to provide plant nutrient availability;  ${}_qSN$  is the function to provide nutrient supply; and  $w$  are the weights associated with each main function.

The graduation for the SQI was: value less than or equal to 0.5 is bad, from 0.51 to 0.7 is regular, and above 0.71 is optimal.

## RESULTS AND DISCUSSION

The average macroporosity (Map) at a depth of 0.1 m showed a value considered equal to the minimum acceptable value for air circulation in the soil, which is  $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Vomocil and Flocker, 1966), whereas at a depth of 0.3 m the value was lower than the acceptable minimum (Table 2). At numerous points, the area accumulated water during irrigation, showing that at these locations the soil had compromised its water storage capacity.

The values of pH in water, OM,  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Al}^{3+}$  level, potential acidity ( $\text{H}+\text{Al}^{3+}$ ), and CEC of the 0.1 m layer presented medium values, whereas the level of  $\text{Ca}^{2+}$ , sum of bases (SB), and base saturation (V%) were low and those of P and  $\text{K}^+$  were high (Brasil and Cravo, 2010) (Table 2). The low  $\text{Ca}^{2+}$  value

El cálculo de SQI fue el siguiente:

$${}_q(PF) = I_1 \times W_1 + \dots + I_n \times W_n \quad (6)$$

donde  ${}_q(PF)$  es la contribución parcial de cada función principal al valor global de SQI;  $I_n$  son los valores de los diferentes indicadores de la función principal evaluada, y  $W_n$  son los pesos relativos asignados a cada indicador. Los pesos representan la importancia de cada indicador en la composición del índice de calidad del suelo en un entorno dado.

En el segundo paso, los valores encontrados en cada función principal se multiplicaron por el respectivo peso de la función, y los resultados se sumaron, generando así el SQI:

$$SQI = ({}_qRSS \times w_{RSS}) + ({}_qPGR \times w_{PGR}) + ({}_qPNA \times w_{PNA}) + ({}_qSN \times w_{SN}) \quad (7)$$

donde  ${}_qRSS$  es el valor ponderado de la función principal de recibir, almacenar, y suministrar agua al suelo;  ${}_qPGR$  es la función de promover el crecimiento de las raíces;  ${}_qPNA$  es la función de proporcionar la disponibilidad de nutrientes a la planta;  ${}_qSN$  es la función de facilitar el suministro de nutrientes; y  $w$  son los pesos relacionados con cada función principal.

La graduación del SQI fue: valor menor que o igual a 0.5 es malo, de 0.51 a 0.7 es regular, y sobre 0.71 es óptimo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La macroporosidad media (mapa) a una profundidad de 0.1 m mostró un valor considerado igual al valor mínimo aceptable para la circulación de aire en el suelo, que es  $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Vomocil y Flocker, 1966), mientras que a una profundidad de 0.3 m, el valor fue inferior al mínimo aceptable (Cuadro

**Table 2. Soil physical and chemical properties at depths of 0.1 and 0.3 m. Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas del suelo a profundidades de 0.1 y 0.3 m.**

Map	Mip	pH	OM	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CEC	V %
$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$			$\text{g kg}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1}$								
					Depth of 0.1 m							
0.10	0.31	5.3	30.8	39.9	1.9	12.5	6.4	6.5	40.0	20.8	60.7	35.9
					Depth of 0.3 m							
0.08	0.36	5.1	11.8	4.80	0.9	5.70	2.4	6.4	31.4	9.50	40.9	23.3

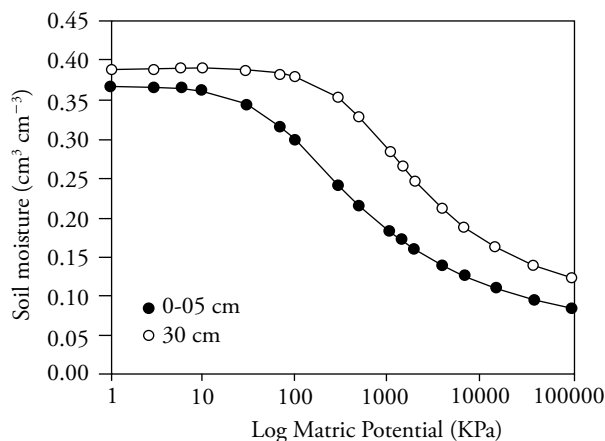


contributed the most to the decrease in the low SB value because  $K^+$  and  $Mg^{2+}$  had high and medium values, respectively.

The soil water retention curves (SWRC) exhibited different behaviors (Figure 2). Less water retention occurred at 0.1 m depth, indicating that the texture, total porosity (TP), and microporosity (Mip) of the soil influenced the water content at the applied tension levels. Based on the SWRC fitting model, it was observed that water loss at the surface was not very pronounced up to a tension of 10 KPa, the range considered to be the field capacity ( $\theta_{fc}$ ). This result indicates a reduced  $Map$  value, which according to Vomocil and Flocker (1966) is considered critical for aeration (Table 2). This finding indicates that this layer will take a longer time to dry which explains why constant flooding was observed during irrigation, i.e., the soil had already surpassed its water storage capacity.

At a depth of 0.3 m, water loss occurred beyond 100 KPa of tension. This result is explained by the decrease in  $Map$ , the increase in Mip, and the more clayey texture of the soil when compared to that at the surface (Figure 2) (Silva *et al.*, 2005).

At 1500 KPa of tension, there was less moisture at a depth of 0.1 m than at 0.3 m. This variation is due to differences in texture because the subsurface showed higher clay content, which has a positive and more pronounced effect on water retention (Beutler *et al.*, 2002). The lower value of the  $\alpha$  fitting parameter of



**Figure 2.** Water retention curves of the experimental plot at depths of 0.1 and 0.3 m.

**Figura 2.** Curvas de retención de agua de la parcela experimental, a profundidades de 0.1 y 0.3 m.

2). En varios sitios, la zona acumuló agua durante el riego, lo que muestra que en estos lugares el suelo fallaba en su capacidad de almacenamiento de agua.

Los valores de pH en el agua, OM, nivel de  $Mg^{2+}$  y  $Al^{3+}$ , acidez potencial ( $H+Al^{3+}$ ), y CEC de la capa de 0.1 m fueron medios, mientras que los del nivel de  $Ca^{2+}$ , suma de bases (SB), y saturación de bases (V%) fueron bajos y los de P y  $K^+$  fueron altos (Brasil y Cravo, 2010) (Cuadro 2). El bajo valor de  $Ca^{2+}$  fue el que contribuyó más a la disminución del valor bajo de SB porque  $K^+$  y  $Mg^{2+}$  tuvieron valores altos y medios, respectivamente.

Las curvas de retención de agua del suelo (SWRC) mostraron comportamientos diferentes (Figura 2). Hubo menos retención de agua a 0.1 m de profundidad, indicando que la textura, porosidad total (TP), y microporosidad (Mip) del suelo influyeron en el contenido de agua en los niveles de tensión aplicados. Basado en el modelo de ajuste SWRC, se observó que la pérdida de agua en la superficie no fue muy pronunciada hasta una tensión de 10 KPa, rango considerado capacidad de campo ( $\theta_{fc}$ ). Este resultado indica un valor reducido de  $Map$  que, de acuerdo con Vomocil y Flocker (1966), es fundamental para la aireación (Cuadro 2). Este hallazgo indica que esta capa necesitará mayor tiempo para secarse, lo cual explica por qué se observaron constantes inundaciones durante el riego; es decir, el suelo ya había superado su capacidad de almacenamiento de agua.

A una profundidad de 0.3 m, la pérdida de agua fue a más de 100 KPa de tensión. Este resultado se explica por la disminución de  $Map$ , el aumento de Mip, y la textura más arcillosa del suelo comparada con la de la superficie (Figura 2) (Silva *et al.*, 2005).

A 1500 KPa de tensión, hubo menos humedad a 0.1 m de profundidad que a 0.3 m. Esta variación se debe a diferencias en la textura porque el subsuelo mostró un mayor contenido de arcilla, lo cual tiene un efecto positivo y más pronunciado en la retención de agua (Beutler *et al.*, 2002). El valor inferior del parámetro de ajuste  $\alpha$  de la SWRC de la capa subsuperficial también indica una mayor retención de agua a una profundidad de 0.3 m comparada con la de la superficie (Cuadro 3).

De acuerdo con el SWRC, la profundidad de 0.1 m tenía una AWC mayor a la de 0.3 m. Esta conclusión se fundamenta en la humedad baja que hay en el punto de marchitez permanente de la curva a 0.1 m de profundidad (Figura 2).

the SWRC of the sub-superficial layer also indicates greater water retention at a depth of 0.3 m compared to that at the surface (Table 3).

According to the SWRC, the depth of 0.1 m had a higher AWC compared to the depth of 0.3 m. This conclusion is supported by the lower moisture present at the permanent wilting point of the curve at a depth of 0.1 m (Figure 2).

The high coefficient of variation (CV) in penetration resistance data was due to the natural variability of soil density and the gradient of soil moisture between samples (Table 4).

The CV of the penetration resistance (PR) at both depths were high (Table 4). This behavior is common

**Table 3. Fitting parameters of Van Genuchten model (equation 1) for soil water retention curve, and available water capacity (AWC) of the experimental plot at depths of 0.1 and 0.3 m.**

**Cuadro 3. Los parámetros de adaptación del modelo de Van Genuchten (ecuación 1) para la curva de retención de agua del suelo y la capacidad de agua disponible (AWC) de la parcela experimental, a profundidades de 0.1 y 0.3 m.**

Depth (m)	Fitting parameters				AWC (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )
	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n	
0.1	0.37 a	0.052 a	0.0158 a	1.308 a	0.17 a
0.3	0.39 a	0.085 a	0.0024 b	1.385 a	0.11 b

Means with different letters in a column are different ( $p \leq 0.05$ ; Tukey test) ♦ Las medias con letras diferentes en una columna son diferentes ( $p \leq 0.05$ ; prueba de Tukey).

El coeficiente de variación (CV) alto en los datos de resistencia a la penetración se debió a la variabilidad natural de la densidad del suelo y al gradiente de humedad del suelo entre las muestras (Cuadro 4).

Los CV de la resistencia a la penetración (PR) en ambos niveles de profundidad fueron altos (Cuadro 4). Este comportamiento es común porque PR se evalúa como una función de la humedad del suelo ( $\theta_v$ ), basado en diferentes potenciales matriciales ( $\psi$ ), aumentando así el grado de heterogeneidad de PR (Cuadro 4). Este hallazgo es congruente con el de Imhoff *et al.* (2000), que encontraron un valor de CV superior a 70 %.

Los valores de PR que se consideran fundamentales para el crecimiento de plantas se utilizan para evaluar el nivel de calidad física del suelo. El valor 2.0 MPa se utiliza en la textura media del suelo con diferentes cultivos (Blainski *et al.*, 2008). En el presente estudio se utilizó 2.5 MPa como valor fundamental porque el área es irrigada y sometida a compactación (Klein y Libardi, 2002). Fue difícil comparar estos resultados con los de otros experimentos porque los estudios sobre plantaciones de acai y realizados en condiciones similares son escasos.

A 0.1 m de profundidad, incluso con  $\psi=0.003$  MPa, el suelo ya mostró una PR mayor a 2.5 MPa, que se considera limitante para el crecimiento de la planta. Este resultado puede explicarse por una Bd alta del suelo ( $> 1.5 \text{ mg m}^{-3}$ ). Con el secado del suelo, a  $\psi=0.01$  MPa, hubo un marcado aumento de la PR, que se observó para las muestras de suelo con valores máximos mayores a 2.5 MPa (Cuadro 5).

**Table 4. Descriptive statistics of the variables penetration resistance (PR), volumetric soil water content ( $\theta_v$ ), and soil bulk density (Bd) at depths of 0.1 and 0.3 m.**

**Cuadro 4. Datos estadísticos descriptivos de las variables de resistencia de penetración (RP), del contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta_v$ ), y la densidad aparente del suelo (Bd) a profundidades de 0.1 y 0.3 m.**

Variable	Mean	(s <sup>2</sup> ) <sup>†</sup>	SD <sup>‡</sup>	Min. <sup>§</sup>	Max. <sup>¶</sup>	CV <sup>‡</sup> (%)
Depth 0.1 m						
PR (MPa)	3.68	6.599	2.57	0.86	10.58	69.83
$\theta_v$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.27	0.005	0.07	0.16	0.380	26.00
Bd (Mg m <sup>-3</sup> )	1.56	0.013	0.12	1.18	1.800	7.380
Depth 0.3 m						
PR (MPa)	3.67	7.297	2.70	0.96	11.53	73.70
$\theta_v$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0.33	0.003	0.05	0.22	0.440	15.84
Bd (Mg m <sup>-3</sup> )	1.50	0.008	0.09	1.33	1.730	6.060

<sup>†</sup>Variance; <sup>‡</sup>Standard deviation; <sup>§</sup>Minimum; <sup>¶</sup>Maximum; <sup>‡</sup>Coefficient of variation ♦ <sup>†</sup>Varianza; <sup>‡</sup>Desviación estándar; <sup>§</sup>Mínimo; <sup>¶</sup>Máximo; <sup>‡</sup>Coefficiente de variación.

because PR is assessed as a function of soil moisture ( $\theta_v$ ), based on different matric potentials ( $\psi$ ), thereby increasing the degree of PR heterogeneity (Table 4). This finding is consistent with that of Imhoff *et al.* (2000), who found a CV value greater than 70 %.

Values of PR which are considered critical for plant growth are used to assess the level of soil physical quality. The 2.0 MPa value is used in medium soil texture with different crops (Blainski *et al.*, 2008). In the present study, 2.5 MPa was used as the critical value because the area is irrigated and subject to compaction (Klein and Libardi, 2002). It was difficult to compare these results with those of other experiments because studies specific to acai plantations and conducted under similar conditions are scarce.

At 0.1 m depth, even with  $\psi=0.003$  MPa, the soil already showed a PR above 2.5 MPa, which is considered limiting for plant growth. This result may be explained by a high soil Bd ( $>1.5 \text{ Mg m}^{-3}$ ). With the drying of the soil, at  $\psi=0.01$  MPa, there was a marked increase in PR, which was observed for soil samples with maximum values above 2.5 MPa (Table 5).

This finding shows that the soil is constrained by PR because this  $\psi$  value is still within the field capacity. These results show the poor soil physical quality because the PR values are restrictive to plant rooting at tensions between 0.003 and 0.5 MPa. Under these situations, moisture control is the suggested practice for PR control. In contrast, this soil requires longer time for water infiltration, and a short time between irrigation events compromises its aeration capacity.

Este hallazgo muestra que el suelo se ve limitado por PR porque este valor de  $\psi$  está todavía dentro de la capacidad de campo. Estos resultados demuestran la mala calidad física del suelo porque los valores de PR restringen el desarrollo de las raíces bajo tensiones entre 0.003 y 0.5 de MPa. En estas condiciones, se sugiere el monitoreo de la humedad para el control de la PR. En contraste, este suelo requiere más tiempo para la filtración del agua, y un período corto de tiempo entre los eventos de riego pone en riesgo la capacidad de aireación.

A una profundidad de 0.3 m, con  $\psi=0.003$  de MPa, el suelo no alcanzó un valor PR restrictivo; sin embargo, con el secado del suelo a  $\psi=0.01$  de MPa, todas las muestras de suelo con un PR por encima de 2.5 de MPa estuvieron en riesgo. Estos resultados muestran que a una profundidad de 0.3 m, PR comienza con el  $\psi=0.01$  de MPa.

Como una práctica de manejo se sugiere que la humedad del suelo a una profundidad de 0.1 m se debe mantener sobre  $0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Según el ajuste, los valores de humedad menores a estos niveles producen valores de PR superiores a 2.5 MPa. Mientras que a una profundidad de 0.3 m, el suelo requiere una  $\theta_v$  igual o superior a  $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para mantener el valor de PR debajo de 2.5 MPa.

### Índice de calidad del suelo (SQI)

Las funciones contribuyeron igualmente al SQI general, y la diferencia observada entre las funciones que tenían las contribuciones más altas y más bajas fue 5 %. Las fracciones del SQI para las funciones

**Table 5. Descriptive statistics of penetration resistance (PR) in the corresponding moisture tension of 0.003 MPa, 0.01 MPa, 0.1 MPa and 0.5 MPa at 0.1 and 0.3 m soil depths.**

**Cuadro 5. Datos estadísticos descriptivos de la resistencia a la penetración (RP) en la correspondiente tensión de humedad de 0.003 MPa, 0.01 MPa, 0.1 MPa y 0.5 MPa a 0.1 y 0.3 m de profundidad del suelo.**

Tension	$\theta_v$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	Depth of 0.1 m			$\theta_v$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	Depth of 0.3 m		
		PR (MPa)				PR (MPa)		
		Mean	Min. <sup>†</sup>	Max. <sup>‡</sup>		Mean	Min.	Max.
0.003 (MPa)	0.35	1.82	0.72	2.81	0.38	1.87	1.70	2.00
0.01 (MPa)	0.26	3.19	1.27	4.93	0.32	3.08	2.79	3.28
0.1 (MPa)	0.20	5.34	2.12	8.24	0.30	3.70	3.35	3.94
0.5 (MPa)	0.18	6.40	2.55	9.89	0.27	5.56	5.04	5.93

<sup>†</sup>Minimum; <sup>‡</sup>Maximum ❖ <sup>†</sup>Mínimo; <sup>‡</sup>Máximo.

At a depth of 0.3 m, with  $\psi=0.003$  MPa, the soil did not reach a restrictive PR value; however, with the drying of the soil to  $\psi=0.01$  MPa, all soil samples with a PR above 2.5 MPa were compromised. These results show that at a depth of 0.3 m, PR starts at the  $\psi=0.01$  MPa.

As a management practice, it is suggested that the moisture of soil located at a depth of 0.1 m should be kept above  $0.29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . According to the fitting, moisture values below these levels produce PR values above 2.5 MPa. Meanwhile, at a depth of 0.3 m, the soil requires a  $\theta_v$  equal to or above  $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  for the PR value to stay below 2.5 MPa.

### Soil quality index (SQI)

The functions contributed equally to the general SQI, and the observed difference between the functions that had the highest and the lowest contributions was 5 %. The fractions of the SQI for the functions were: to receive, store, and supply water in the soil (RSS), 25 %; to promote roots growth (PGR), 22 %; to provide plant nutrient availability (PNA), 25 %; and to provide nutrient supply (NS), 27 % (Table 6).

In the RSS function, the indicators that most influenced the quality index formation were OM ( $30.17 \text{ g kg}^{-1}$ ), TP ( $0.41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), and Map ( $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), which accounted for 52.5, 23.1, and 16.5 %, respectively, of the total SQI function (Table 6). The soil Bd ( $1.56 \text{ Mg m}^{-3}$ ) was assigned the indicator “less is better”, and because its value is close to the critical limit set for this texture, which according to Reichert *et al.* (2003) is  $1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ , its standardized score also decreased, thereby lowering the SQI.

In contrast, the OM was given the indicator “bigger is better”, its measured value stayed within the established average range; thus, its standardized score was also high (0.91), making it the indicator that most increased the SQI. The Map attained the critical threshold value of  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , which indicates that the aeration porosity will also be restrictive to gas exchange, whose limiting value is  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Vomocil and Flocker, 1966).

Soil function was limited for PGR because it represented 22 % of the SQI, when it should be responsible for 25 %. However, the function index was considered normal (0.56) (Table 6). In this function, the indicators that determined the decrease in SQI were Bd, PR, SB, H+Al, and  $\text{Al}^{3+}$ ,

fueron: recibir, almacenar, y abastecer de agua el suelo (RSS), 25 %; promover el crecimiento de las raíces (PGR), 22 %; proporcionar la disponibilidad de nutrientes a la planta (PNA), 25 %; y dar el suministro de nutrientes (NS), 27 % (Cuadro 6).

En la función RSS, los indicadores que más influyeron en la formación del índice de calidad fueron OM ( $30.17 \text{ g kg}^{-1}$ ), TP ( $0.41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), y Map ( $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), que representaron 52.5, 23.1, y 16.5 %, respectivamente, de la función total del SQI (Cuadro 6). A la Bd del suelo ( $1.56 \text{ Mg m}^{-3}$ ) se le asignó el indicador de “menos es mejor”, y debido a que su valor está cerca del límite crítico establecido para esta textura, que según Reichert *et al.* (2003) es de  $1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ , el puntaje estandarizado también se redujo, lo que disminuyó el SQI.

Por el contrario, a la OM se le asignó el indicador “más grande es mejor”, su valor medido se mantuvo dentro del rango promedio establecido; por lo que su puntaje estandarizado también fue alto (0.91), por lo cual fue el indicador que más aumentó el SQI. El Map alcanzó el umbral crítico de  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , indicando que la porosidad de aireación también será limitada para el intercambio de gases, cuyo valor límite es  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Vomocil y Flocker, 1966).

La función del suelo estuvo limitada para la PGR porque representó 22 % del SQI, cuando debió ser responsable de 25 %. Sin embargo, el índice de función fue considerado normal (0.56) (Cuadro 6). En esta función, los indicadores que determinaron la disminución de SQI fueron Bd, PR, SB, H+Al, y  $\text{Al}^{3+}$ , que presentaron puntajes estandarizados considerados bajos ( $<0.5$ ). A Bd, PR, H+Al, y  $\text{Al}^{3+}$  del suelo se les asignaron indicadores “menos es mejor” porque los valores medidos en el campo estaban en el límite crítico establecido para Bd y PR, y el rango medio para H+Al y  $\text{Al}^{3+}$ , así como sus puntajes estandarizados bajos, contribuyeron a la disminución en el índice de función. Sin embargo, la PR exhibió este comportamiento y produjo la disminución en el SQI de la función de PGR, porque sus valores se calcularon usando valores de humedad recogidos bajo tensiones de 0.001 a 0.5 MPa, cuya variación  $\text{PR}=0.86$  a  $10.58 \text{ MPa}$  y  $\text{CV}=69.8 \%$  (Cuadro 4). Estas diferencias de tensión se estimaron para medir los valores de PR bajo diferentes humedades de suelo, que con frecuencia se realizan para determinar la variabilidad en el campo. Los indicadores que más contribuyeron a aumentar la función de PGR fueron OM, con un puntaje óptimo estandarizado ( $> 0.7$ ),

**Table 6. Soil quality index (SQI) of a Yellow Latosol in an irrigated acai plantation, at a depth of 0.1 m.**  
**Cuadro 6. Índice de calidad del suelo (SQI) de un Latosol Amarillo en una plantación de acai con riego, a una profundidad de 0.1 m.**

MF <sup>†</sup>	FW <sup>‡</sup> (A)	QI <sup>§</sup>	IW <sup>§</sup> (B)	Mean	ES <sup>¶</sup> (C)	B x C		Sum BxC=D	A x D		SQI <sup>°</sup>
						Absolute	(%)		Absolute	%	
RSS	0.25	Bd	0.15	1.56	0.34	0.05	7.90	0.65	0.16	25.2	
		OM	0.37	30.2	0.91	0.34	52.5				
		TP	0.26	0.41	0.58	0.15	23.1				
		Map	0.22	0.10	0.49	0.11	16.5				
PGR	0.25	Bd	0.10	1.56	0.34	0.04	6.30	0.56	0.14	21.9	0.641
		PR	0.11	3.68	0.35	0.04	6.70				
		OM	0.28	30.2	0.91	0.25	45.0				
		SB	0.12	20.8	0.40	0.05	8.70				
		pH	0.19	5.34	0.62	0.12	21.3				
		H+Al	0.07	40.0	0.22	0.01	2.90				
		Al <sup>3+</sup>	0.13	6.50	0.42	0.05	9.40				
PNA	0.25	P	0.33	39.85	0.75	0.25	38.1	0.65	0.16	25.3	
		K <sup>+</sup>	0.35	1.900	0.81	0.29	44.1				
		Ca <sup>2+</sup>	0.17	12.50	0.38	0.06	9.90				
		Mg <sup>2+</sup>	0.15	6.400	0.34	0.05	7.90				
NS	0.25	pH	0.25	5.340	0.62	0.15	21.7	0.71	0.18	27.6	
		CEC	0.31	60.70	0.79	0.25	34.7				
		V	0.11	35.99	0.29	0.03	4.60				
		OM	0.33	30.17	0.84	0.28	39.0				

<sup>†</sup>Main functions, <sup>‡</sup>Function weight, <sup>§</sup>Quality indicator, <sup>¶</sup>Indicator weight, <sup>°</sup>Standardized scores, <sup>††</sup>Soil quality index ♦  
<sup>†</sup>Funciones principales, <sup>‡</sup>Peso de la función, <sup>§</sup>Indicador de calidad, <sup>¶</sup>Peso del indicador, <sup>°</sup>Puntajes estandarizados, <sup>††</sup>Índice de calidad del suelo.

which presented standardized scores considered poor (<0.5). The soil Bd, PR, H+Al, and Al<sup>3+</sup> were given indicators “less is better” because the values measured in the field were at the critical limit set for Bd and PR, and the midrange for H+Al and Al<sup>3+</sup>, as well as their low standardized scores, contributed to the decrease in the function index. However, the PR exhibited this behavior and caused the decrease in the SQI of the PGR function because its values were estimated using moisture values gathered at tensions between 0.001 to 0.5 MPa, whose PR variation=0.86 at 10.58 MPa and CV=69.8 % (Table 4). These tension differences were estimated to measure PR values under different soil moistures, which is commonly performed to determine this variability in the field. The indicators that contributed most to the increase in the PGR function were OM, with an optimal standardized score (>0.7), and pH in water, with a regular standardized score (0.51 to 0.7); both contributed 45 and 21.3 %, respectively.

y un pH en el agua con un puntaje estandarizado regular (0.51 a 0.7); ambos contribuyeron con 45 y 21.3 %, respectivamente.

La función de disponibilidad de nutrientes de la planta (PNA) también limitó el SQI, representando 25 % del total de dicho índice, aunque su valor absoluto (0.16) fue bajo. En esta función, los indicadores de Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> fueron los que más contribuyeron a la disminución del índice. Sus respectivos puntajes estandarizados y valores absolutos bajos contribuyeron poco a la composición positiva del índice de función. En esta función, P y K<sup>+</sup> contribuyeron más a la composición del índice. Sus puntajes estandarizados estuvieron en el rango óptimo (Cuadro 6). Una posible explicación para este hallazgo fue la adición de NPK al área de plantación de acai.

La función de NS fue la menos limitante para el SQI. En valores relativos, contribuyó más de lo esperado a la composición de SQI. Representó el porcentaje más alto del valor total del índice, con un

The plant nutrient availability (PNA) function was also limiting to the SQI, representing 25 % of the total SQI, although its absolute value (0.16) was low. In this function, the indicators  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  contributed the most to the decrease in the index. Their respective standardized scores and low absolute values contributed little to the positive composition of the function index. In this function, P and  $\text{K}^+$  contributed the most to the composition of the index. Their standardized scores were in the optimal range (Table 6). A possible explanation for this finding was the addition of NPK to the acai plantation area.

The NS function was the least limiting to the SQI. In relative values, it contributed more than expected to the composition of the SQI. It represented the highest percentage of the total index value, with an absolute value of 0.18. In this function, the V% indicator contributed the most to lower the index. Its average field value, standardized score, and absolute value were considered low, contributing little to the composition of the function index (Table 6). Higher V% values were expected because they corresponded to surface layers; however, the OM contributed the most to increase the SQI, as expected.

## CONCLUSION

The observed global SQI value of 0.641 suggests that irrigated acai plantation production in Yellow Latosol requires improvements to promote the root growth (PGR), which were restricted in the surface layer. No restrictions were found for the functions RSS, PNA, and NS.

## LITERATURE CITED

- Araújo, R., W. J. Goedert, y M. P. C. Lacerda. 2007. Qualidade do solo sob diferentes usos e sob Cerrado Nativo. *Rev. Bras. Ciência Solo* 31: 1099-1108.
- Artur, A. G., M. C. P. Cruz, M. E. Ferreira, V. C. M. Barretto, y R. Y. Yagi. 2007. Esterco bovino e calagem para formação de mudas de guanandi. *Pesq. Agropec. Bras.* 42: 843-850.
- Beutler, A. N., J. F. Centurion, Z. M. Souza, I. Andrioli, y C. G. Roque. 2002. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Rev. Bras. Ciência Solo* 26: 833-842.
- Blainski, É., C. A. Tormena, J. Fidalski, y R. M. L. Guimaraes. 2008. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *Rev. Bras. Ciência Solo* 32: 975-983.
- Brasil, E. C., y M. S. Cravo. 2010. Interpretação dos resultados de análise de solo. In: Cravo M. S., y I. J. M. Viégas, E. C. Brasil. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado*

de Pará. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Brazil. pp: 43-48.

Busscher, W. J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 33: 519-524.

Costa, W. A., C. A. S. Oliveira, y E. Kato. 2008. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-vermelho-amarelo. *Rev. Bras. Ciência Solo* 32: 515-523.

Doran, J. W., and T. B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *In: Doran, J. W., D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (org). Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Sc. Soc. Am., Madison, USA. pp: 3-12.*

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solos, 2ª edição revisado e atualizado, EMBRAPA, Rio de Janeiro, Brazil. 212 p.

Fageria, N. K. 1998. Otimização da Eficiência Nutricional na Produção das Culturas. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 2: 6-16.

Gama, J. R. N. F. (ed). 2004. Solo: Manejo e Interpretação. Belém, Embrapa Amazônia Oriental. 183 p.

Gee, G. W., and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. *In: Klute, A. (ed). Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods. Am. Soc. Agron., Madison, USA. pp: 383-409.*

Gomes, M. A. E., y H. F. Filizola. 2006. Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna. Brazil. 8 p.

## CONCLUSIÓN

El valor global de SQI de 0.641 indica que la producción de las plantaciones de acai de regadío en Latosol Amarillo requiere mejoras para promover el crecimiento de las raíces (PGR), que estuvieron limitadas en la capa superficial. No se encontraron restricciones para las funciones de RSS, PNA, y NS.

—Fin de la versión en Español—

-----\*-----

- Homma, A. K. O., O. L. Nogueira, A. J. E. A. Menezes, J. E. U. Carvalho, C. M. L. Nicoli, y G. B. Matos. 2006. Açá: Novos desafios e tendências. Amazônia. *Ciencia e Desenv.* 1: 7-23.
- Imhoff, S., A. P. Silva, y C. A. Tormena. 2000. Aplicação da curva de resistência do solo à penetração no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.* 35: 1493-1500.
- Karlen, D. L., and D. E. Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *In*: Doran, J. W., D. C. Coleman, D. F. Bzedicek, and B. A. Stewart (eds). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Sc. Soc. Am. (Special Publication, 35), Madison, USA. pp: 53-72.
- Kiehl, E. J. 1979. *Manual de Edafologia*. São Paulo, Agronômica Ceres. 262 p.
- Klein V. A., y P. L. Libardi. 2002. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 26: 857-867.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. *In*: Klute, A. (ed). *Methods of Soil Analysis: Part I-Physical and Mineralogical Methods*, 2 ed. SSSA, Madison, USA. pp: 635-662.
- Melo Filho, J. F., A. L. V. Souza, y L. S. Souza. 2007. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um latossolo amarelo coeso dos tabuleiros costeiros, sob floresta natural. *Soc. Bras. Ciencia S.* 31: 1599-1608.
- Oliveira, A. P. D. S. Ferreira, C. C. Costa, A. F. Silva, y E. U. Alves. 2001. Uso de esterco bovino e húmus de minhoca na produção de repolho híbrido. *Hortic. Bras.* 19: 70-73.
- Reichert, J. M., D. J. Reinert, y J. A. Braidá. 2003. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciencia e Amb. Santa Maria* 27: 29-48.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS 9.1.2 Qualification Tools User's Guide, Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 20 p.
- Sena, W. L., G. R. Silva, y M. L. Silva Júnior. 2007. Avaliação de atributos químicos de um latossolo amarelo sob diferentes sistemas de uso da terra. *Rev. Ciencia Agrár.* 48: 25-40.
- Silva, A. J. N., M. S. V. Cabeda, y J. F. W. F. Lima. 2005. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo amarelo de tabuleiro costeiro. *Rev. Bras. Ciência Solo* 29: 833-842.
- Silva, G. R., M. L. Silva Júnior, y V. S. Melo. 2006. Efeitos de diferentes usos da terra sobre as características químicas de um latossolo amarelo de estado do Pará. *Brazil. Acta Amaz.* 36: 151-158.
- Tormena, C. A., A. P. Silva, y P. L. Libardi. 1998. Caracterização do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Roxo Sob Plantio Direto. *Rev. Bras. Ciência Solo* 22: 573-581.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Viégas, I. J. M., Á. A. S. Gonçalves, D. A. C. Frazão, y H. E. O. Conceição. 2008. Efeito das omissões de macronutrientes e boro na sintomatologia e crescimento em plantas de açazeiro (*Euterpoperacea* Mart.). *Rev. Ciencia Agrár.* 50: 129-141.
- Vomocil, J. A., and W. J. Flocker. 1966. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 4: 242-246.
- Wymore, A. W. 1993. *Model-based Systems Engineering: An Introduction to the Mathematical Theory of Discrete Systems and to the Tricotyledon Theory of system Design*. Boca Raton, CRC Press. 710 p.