

Carbohydrate-based urban soil amendments to improve urban tree establishment

Enmiendas a suelos urbanos con carbohidratos para mejorar el establecimiento del arbolado

Luis M. Morales-Gallegos¹; Tomás Martínez-Trinidad^{1*}; Armando Gómez-Guerrero¹; Javier Suárez-Espinosa²

¹Colegio de Postgraduados, Posgrado en Ciencias Forestales. Carretera México-Tezcoco km 36.5, Montecillo. C. P. 56230. Tezcoco de Mora, Estado de México, México.

²Colegio de Postgraduados, Posgrado en Estadística. Carretera México-Tezcoco km 36.5, Montecillo. C. P. 56230. Tezcoco de Mora, Estado de México, México.

*Corresponding author: tomtz@colpos.mx tel.: +52 595 952 0200 ext. 1474.

Abstract

Introduction: A factor limiting the development of tree vegetation in urban environments is the condition of the soil.

Objective: To evaluate the effect of the application of carbohydrates (sucrose and glucose) to the soil regarding the growth and vitality of jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) planted in urban areas.

Materials and methods: Eight carbohydrate treatments and one control (water) were applied. Increase in height and diameter, foliage color, chlorophyll fluorescence, dry root matter, root starch, respiration and soil moisture were evaluated. An analysis of variance and a comparison of means was performed (Tukey, $P < 0.05$); when the normal distribution of the data was not proved, nonparametric methods were used (Kruskal-Wallis and Wilcoxon rank-sum test).

Results and discussion: The increase in height and diameter, the green color of the foliage and the fluorescence of the chlorophyll showed no significant differences ($P > 0.05$). Dry root weight and soil respiration were significantly different ($P < 0.05$) with higher response in the highest carbohydrate treatment (80 g·L⁻¹ glucose with 80 g·L⁻¹ sucrose). There was no effect on the characteristics of the aerial part, possibly due to the short evaluation time (about one year).

Conclusion: The amendment of glucose and sucrose to the soil in urban trees stimulated the root growth of *J. mimosifolia*.

Keywords: *Jacaranda*

mimosifolia; urban trees; root growth; glucose; sucrose.

Resumen

Introducción: Un factor que limita el desarrollo de la vegetación arbórea en ambientes urbanos es la condición del suelo.

Objetivo: Evaluar el efecto de la aplicación de carbohidratos (sacarosa y glucosa) al suelo sobre el crecimiento y vitalidad de árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) plantados en áreas urbanas.

Materiales y métodos: Se aplicaron ocho tratamientos de carbohidratos y un control (agua). Se evaluó incremento en altura y diámetro, color de follaje, fluorescencia de la clorofila, materia seca de raíces, almidón en raíces, respiración y humedad del suelo. Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, $P < 0.05$); cuando no se pudo probar la normalidad de los datos se utilizaron métodos no paramétricos (Kruskal-Wallis y suma de rangos de Wilcoxon).

Resultados y discusión: El incremento en altura y diámetro, el color verde del follaje y la fluorescencia de la clorofila no presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$). El peso seco de raíces y la respiración del suelo fueron estadísticamente significativos ($P < 0.05$) con mayor respuesta en el tratamiento más alto de carbohidratos (80 g·L⁻¹ de glucosa con 80 g·L⁻¹ de sacarosa). No hubo efecto en las características de la parte aérea, debido posiblemente al corto tiempo de evaluación (aproximadamente un año).

Conclusión: La enmienda de glucosa y sacarosa al suelo en el arbolado urbano estimuló el crecimiento de raíces de *J. mimosifolia*.

Palabras clave: *Jacaranda*

mimosifolia; árboles urbanos; crecimiento de raíces; glucosa; sacarosa.

Introduction

Today, the planting of trees in cities is done with the intention of obtaining environmental, social and economic benefits, also known as ecosystem services of urban forests (de Abreu-Harbach, Chebel, & Matzarakis, 2015; Moser et al., 2018; Pincetl, Gillespie, Pataki, Saatchi, & Saphores, 2012). The proper establishment of urban trees involves consideration of climatic and soil aspects as well as species (Jankovska et al., 2015; Koeser, Gilman, Paz, & Harchick, 2014); however, when climatic conditions are favorable and suitable tree species for the planting space are used, one of the main problems for optimal plant development is the condition of the soil (Day, Wiseman, Dickinson, & Roger, 2010; Ow & Yusof, 2018).

The World Reference Base for Soil Resources classifies urban soils as Technosols (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015), which do not have a definite arrangement of layers (horizons) and possess material of anthropogenic origin (Hassan, 2018; Watson, Hewitt, Custic, & Lo, 2014). For this reason, it is common to find disturbed soils in urban areas due to constant remodeling, adaptation or construction of infrastructure (Guilland, Maron, Damas, & Ranjard, 2018; Pereira et al., 2016). Physical alteration of soil layers modifies general properties such as infiltration, aeration, microfauna, nutrients, texture, density, pH, and concentration of salts or carbonates (Pereira et al., 2016; Scharenbroch, Meza, Catania, & Fite, 2013; Tresch et al., 2018). This limits proper root growth and development, demerits plant vitality, and increases the risk of mortality (Ow & Yusof, 2018; Vidal-Beaudet, Galopin, & Grosbellet, 2018).

The trees set in urban environments goes through a process of adaptation to the new conditions of the planting site (Mohedano-Knight, Cetina-Alcalá, Chacalo-Hilu, Trinidad-Santos, & Gonzalez-Cossio, 2005), in which the vegetation presents some degree of physiological stress that affects its growth (Johnston & Hiron, 2014; Jankovska et al., 2015). This situation is aggravated by the use of young trees, a common practice in the interior of cities due to the ease of management and planting (Koeser et al., 2014; Roman, Battles, & McBride, 2013). Newly transplanted young trees are more vulnerable to physiological stress because they have small energy reserves to cope with stressful situations (Day et al., 2010; Ramírez, Handa, Posada, Delagrangé, & Messier, 2018). As a result, success in urban afforestation is low, with mortality rates ranging from 30 to 50 % in the first year of planting (Percival & Fraser, 2005).

The use of amendments in urban soils is a viable strategy to improve their physical, chemical and

Introducción

En la actualidad, la plantación de árboles en las ciudades se realiza con la intención de obtener beneficios ambientales, sociales y económicos, también conocidos como servicios ecosistémicos del arbolado urbano (De Abreu-Harbach, Chebel, & Matzarakis, 2015; Moser et al., 2018; Pincetl, Gillespie, Pataki, Saatchi, & Saphores, 2012). El establecimiento adecuado de árboles urbanos implica la consideración de aspectos climáticos y de suelo, así como de especies (Jankovska et al., 2015; Koeser, Gilman, Paz, & Harchick, 2014); no obstante, cuando las condiciones climáticas son favorables y se utilizan especies arbóreas adecuadas al espacio de plantación, uno de los principales problemas para el desarrollo óptimo de las plantas es la condición del suelo (Day, Wiseman, Dickinson, & Roger, 2010; Ow & Yusof, 2018).

La Base Referencial Mundial del recurso suelo clasifica a los suelos urbanos como Tecnosoles (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015), los cuales no presentan un arreglo definido de capas (horizontes) y poseen material de origen antropogénico (Hassan, 2018; Watson, Hewitt, Custic, & Lo, 2014). Por esto, es común encontrar suelos perturbados en áreas urbanas debido a la constante remodelación, adecuación o construcción de infraestructura (Guilland, Maron, Damas, & Ranjard, 2018; Pereira et al., 2016). La alteración física de las capas del suelo modifica las propiedades generales como infiltración, aeración, microfauna, nutrientes, textura, densidad, pH y la concentración de sales o carbonatos (Pereira et al., 2016; Scharenbroch, Meza, Catania, & Fite, 2013; Tresch et al., 2018). Lo anterior limita el crecimiento y desarrollo adecuado de raíces, demerita la vitalidad de las plantas e incrementa el riesgo de mortandad (Ow & Yusof, 2018; Vidal-Beaudet, Galopin, & Grosbellet, 2018).

El arbolado establecido en ambientes urbanos atraviesa un proceso de adaptación a las nuevas condiciones del sitio de plantación (Mohedano-Caballero, Cetina-Alcalá, Chacalo-Hilu, Trinidad-Santos, & González-Cossio, 2005), en el cual, la vegetación presenta algún grado de estrés fisiológico que afecta su crecimiento (Johnston & Hiron, 2014; Jankovska et al., 2015). Esta situación se agrava con el uso de árboles jóvenes, una práctica común al interior de las ciudades debido a la facilidad de manejo y plantación (Koeser et al., 2014; Roman, Battles, & McBride, 2013). Los árboles jóvenes recién trasplantados presentan mayor vulnerabilidad al estrés fisiológico, debido a que cuentan con pocas reservas energéticas para afrontar situaciones estresantes (Day et al., 2010; Ramírez, Handa, Posada, Delagrangé, & Messier, 2018). En consecuencia, el éxito en las forestaciones urbanas es

biological characteristics (Ceveira & Lavado, 2006; Vidal-Beaudet, Forget-Caubel, & Grosbellet, 2015). The amendments cover well-root manures, fertilizers and the use of carbohydrates such as sucrose, glucose, fructose and starch (Percival, Fraser, & Barnes, 2004). The application of amendments of carbohydrates to the soil implies that small amounts of these are used by the microorganisms, thereby increasing the microfauna of the soil (Martínez-Trinidad, Watson, Arnold, & Lombardini, 2010; Percival & Fraser, 2005), being the biodiversity of the organisms that inhabit the soil, an important indicator of its quality (Schloter, Nannipieri, Sørensen, & Elsas, 2017). Soil microorganisms participate in important biochemical processes that contribute to improving soil properties and nutrient availability for plants (Ponge et al., 2013). Similarly, carbohydrate amendments such as sucrose, applied to the root system of trees, promote the growth of fine roots (Al-Habsi & Percival, 2006; Percival et al., 2004). Proper development of the root system in a newly planted tree is key to its survival in adverse environments such as those prevailing in a city (Day et al., 2010; Vidal-Beaudet et al., 2015). These factors improve settlement and increase the survival rate of urban woodland (Scharenbroch et al., 2013; Vidal-Beaudet et al., 2018). In this context, the objective of this study was to evaluate the effect of the application of carbohydrates (sucrose and glucose) to the soil on the growth and vitality of jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) planted in urban areas, as a management alternative during the initial stages of tree establishment.

Materials and methods

Study setting

The assay was set in the urban green area named "Alameda Texcoco" in Texcoco de Mora, whose coordinates are 19° 31' 11.07" N and 98° 52' 29.68" W, at an average altitude of 2 250 m. The climate is temperate semi-dry, with an average annual temperature of 15.9 °C and a precipitation of approximately 650 mm per year (Moreno, 2007). The soil is a Vertisol type with clayed texture, moderate drainage, neutral to slightly acidic pH, organic matter between 1.12 and 2.03 % and electrical conductivity between 0.53 and 0.71 dS·m⁻¹ (Gutiérrez & Ortiz, 1999; Segura, Gutiérrez, Ortiz, & Gómez, 2000). Thirty-six jacaranda trees with a normal diameter of 0.05 m and a height of 2 m, on average, were planted in holes of 0.5 m long x 0.4 m high approximately with separation of 6 m between plants. The treatments were completely randomized by factorial arrangement 3 x 3 (0, 60, 80 g·L⁻¹ glucose; 0, 60, 80 g·L⁻¹ sucrose) (Table 1).

In the first application of the treatments, the surface layer of the soil was removed in order to remove the

bajo, con tasas de mortandad que oscilan entre 30 y 50 % en el primer año de la plantación (Percival & Fraser, 2005).

El uso de enmiendas en suelos urbanos es una estrategia viable para mejorar sus características físicas, químicas y biológicas (Ceveira & Lavado, 2006; Vidal-Beaudet, Forget-Caubel, & Grosbellet, 2015). Las enmiendas abarcan abonos orgánicos, fertilizantes y el uso de carbohidratos como sacarosa, glucosa, fructosa y almidón (Percival, Fraser, & Barnes, 2004). La aplicación de enmiendas de carbohidratos al suelo implica que pequeñas cantidades de estos sean aprovechados por los microorganismos, incrementando así la microfauna del suelo (Martínez-Trinidad, Watson, Arnold, & Lombardini, 2010; Percival & Fraser, 2005), siendo la biodiversidad de los organismos que habitan el suelo un importante indicador de su calidad (Schloter, Nannipieri, Sørensen, & Elsas, 2017). Los microorganismos del suelo participan en importantes procesos bioquímicos que contribuyen a mejorar las propiedades del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Ponge et al., 2013). Asimismo, las enmiendas con carbohidratos como la sacarosa, aplicadas al sistema de raíces de los árboles, promueven el crecimiento de raíces finas (Al-Habsi & Percival, 2006; Percival et al., 2004). Un desarrollo adecuado del sistema de raíces en un árbol recién plantado es clave para su supervivencia en ambientes adversos como los que prevalecen en una ciudad (Day et al., 2010; Vidal-Beaudet et al., 2015). Estos factores mejoran el establecimiento e incrementan la tasa de supervivencia del arbolado urbano (Scharenbroch et al., 2013; Vidal-Beaudet et al., 2018). En tal contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de carbohidratos (sacarosa y glucosa) al suelo sobre el crecimiento y vitalidad de árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) plantados en áreas urbanas, como una alternativa de manejo durante las etapas iniciales del establecimiento de arbolado.

Materiales y métodos

Establecimiento del ensayo

El ensayo se estableció en el área verde urbana denominada "Alameda Texcoco" en Texcoco de Mora, cuyas coordenadas son 19° 31' 11.07" N y 98° 52' 29.68" O, a una altitud promedio de 2 250 m. El clima es templado semiseco, con temperatura media anual de 15.9 °C y precipitación aproximada de 650 mm anuales (Moreno, 2007). El suelo es del tipo vertisol de textura arcillosa con buen drenaje, pH neutro a ligeramente ácido, materia orgánica entre 1.12 y 2.03 % y conductividad eléctrica entre 0.53 y 0.71 dS·m⁻¹ (Gutiérrez & Ortiz, 1999; Segura, Gutiérrez, Ortiz, & Gómez, 2000). Treinta y seis árboles de jacaranda con un diámetro normal de 0.05 m y una

Table 1. Carbohydrate treatments in jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia*) planted in “Alameda Texcoco”, State of Mexico.

Cuadro 1. Tratamientos con carbohidratos en árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*) plantados en la alameda de Texcoco, Estado de México.

Glucose/Glucosa (g·L ⁻¹)	Sucrose/Sacarosa (g·L ⁻¹)	Treatment/Tratamiento
0	0	G0S0 (Control)
0	60	G0S6
0	80	G0S8
60	0	G6S0
60	60	G6S6
60	80	G6S8
80	0	G8S0
80	60	G8S6
80	80	G8S8

vegetation around the trunk; subsequently, Faena[®] herbicide was applied every two months to avoid the presence of vegetation. The treatments were applied as drenches of 10 L of solution directly to the soil at a distance of 0.5 m from the base of each tree, after transplantation (Martínez-Trinidad et al., 2010), with seasonal applications for an entire year.

Plant parameters

Tree growth was measured seasonally with a diameter tape (Forestry Suppliers Inc., Jackson, MS, USA), taking into account the increase in diameter of the trunk (cm), from an indelible mark made at 0.1 m above the ground, and the increase in total height of each tree (m) with a retractable tape (Truper[®]). The foliage color of each tree was determined at the beginning of the trial as a reference point (before applications), and seasonally (Mohedano-Caballero et al., 2005) through pictures taken with a 12.1 megapixel digital camera (Sony DSC-w290[®]). These were obtained between 9 and 11 o'clock with a west orientation and only in the seasons where the trees had foliage. In each picture, the number of green pixels was analyzed using the “histogram” module of the ImageJ[®] computer software (National Institutes of Health, Wayne Rasband, USA) version 1.50i (Abràmoff, Magalhães, & Ram, 2004; Schneider, Rasband, & Elieiri, 2012). The dry matter of roots of each tree was quantified through two holes made in the soil (0.05 m diameter x 0.1 m length), North and South, at a distance of 0.5 m from the base of the tree, which were filled with sand (Martínez-Trinidad et al., 2010). This was collected every two and a half months, placed in plastic bags inside a cooler at 4 °C and immediately transported to the laboratory.

altura de 2 m, en promedio, se plantaron en cepas de 0.5 m de largo x 0.4 m de alto aproximadamente con separación de 6 m entre planta. Los tratamientos tuvieron un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3 x 3 (0, 60, 80 g·L⁻¹ glucosa; 0, 60, 80 g·L⁻¹ sacarosa) (Cuadro 1).

En la primera aplicación de los tratamientos, la capa superficial del suelo se removió con la finalidad de eliminar la vegetación alrededor del tronco; posteriormente, el herbicida Faena[®] se aplicó cada dos meses para evitar la presencia de vegetación. Los tratamientos se aplicaron vertiendo directamente al suelo un total de 10 L de solución a una distancia de 0.5 m de la base de cada árbol, posterior al trasplante (Martínez-Trinidad et al., 2010), con aplicaciones estacionales por todo un año.

Parámetros de la planta

El crecimiento de los árboles se midió de manera estacional con una cinta diamétrica (Forestry Suppliers Inc., Jackson, MS, EUA), tomando en cuenta el incremento en diámetro del tronco (cm), a partir de una marca indeleble hecha a 0.1 m sobre el suelo, y el incremento en altura total de cada árbol (m) con un flexómetro (Truper[®]). El color del follaje de cada árbol se determinó al inicio del ensayo como punto de referencia (antes de las aplicaciones), y de manera estacional (Mohedano-Caballero et al., 2005) a través de imágenes tomadas con una cámara digital de 12.1 megapíxeles (Sony DSC-W290[®]). Estas se obtuvieron entre las 9 y 11 h del día con una orientación al oeste y solo en las estaciones en que el arbolado tenía follaje. En cada imagen se analizó la cantidad de píxeles de color verde

Samples were carefully washed to separate the roots from the sand; subsequently, the plant material was dried in a forced air stove at 65 °C for 72 h until a constant weight was obtained (Zhang, Xie, & Li, 2016), which was determined on an analytical balance (Mettler AJ 150[®], USA).

Tree vitality was assessed through the recording of chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) with a Pocket PEA portable fluorimeter (Hansatech Instruments Ltd., UK), with a detection time of 1 s, light emission at a wavelength of 650 nm and an intensity of 3500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Zhang et al., 2016). In order to make the measurements, 10 randomly chosen leaves around the crown of each tree were adapted to darkness with fluorimeter clips for a period of 10 minutes (Morales-Gallegos, Martínez-Trinidad, Gómez-Guerrero, Razo-Zárate, & Suárez-Espinosa, 2019). The starch content of the roots was determined in samples collected randomly from below the base of the trunk, which were macerated in liquid nitrogen and stored at -20 °C until its processing in the laboratory. Two alcoholic extractions of sugars were performed from the collected tissues, each with 40 mL of ethanol at 80 % (v/v) for 20 min at 100 °C (Quentin et al., 2015). The extraction obtained was diluted in 10 mL of distilled water for quantitative determination; the samples were worked in triplicate and evaluated by hydrolysis of the precipitate of the alcoholic extraction process with the enzyme diastase (SIGMA[®]) (Palevitz & Newcomb, 1970). The anthrone method was applied to the resulting hydrolysate to determine the starch content based on the glucose content present in the sample (Witham, Blaydes, & Devlin, 1971).

Soil Variables

Soil respiration was determined using the alkaline trap method (Anderson, 1982). To this purpose, 60 g of soil was taken from each plantation hole; the sample was kept at 4 °C in a cooler while transported to the laboratory. The samples were then dried at 30 °C until a constant weight was obtained, and were incubated in 500 mL glass vials. To homogenize the moisture of the soil samples, the field capacity constant was determined to serve as a reference to estimate the amount of water to be added, which in this case was 30 mL. The soil was deposited inside each vial and a test tube (Pyrex[®]) containing 5 mL of NaOH was placed on top. The vials were let to balance for 24 h and 15 d; at the end of each period the CO₂ of the atmosphere of the vial which passed to the NaOH solution was evaluated (Anderson, 1982). The total soil carbon was quantified by the method of wet oxidation with potassium dichromate (K₂Cr₂O₇) in acidic medium. To do this, 0.5 g of dry soil was sifted through 0.5 mm mesh

con el módulo “histograma” del programa de cómputo ImageJ[®] (National Institutes of Health, Wayne Rasband, EUA) versión 1.50i (Abràmoff, Magalhães, & Ram, 2004; Schneider, Rasband, & Eliceiri, 2012). La materia seca de raíces de cada árbol se cuantificó a través de dos perforaciones realizadas en el suelo (0.05 m diámetro x 0.1 m de longitud), al norte y al sur, a una distancia de 0.5 m de la base del árbol, las cuales se rellenaron con arena (Martínez-Trinidad et al., 2010). Esta se colectó cada dos meses y medio, se colocó en bolsas de plástico dentro de una hielera a 4 °C e inmediatamente se transportó al laboratorio. Las muestras se lavaron cuidadosamente para separar las raíces de la arena; posteriormente, el material vegetal se secó en estufa de aire forzado a 65 °C por 72 h hasta obtener peso constante (Zhang, Xie, & Li, 2016), el cual se determinó en una balanza analítica (Mettler AJ 150[®], EUA).

La vitalidad del árbol se evaluó mediante el registro de la fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm) con un fluorímetro portátil Pocket PEA (Hansatech Instruments Ltd., UK), con tiempo de detección de 1 s, emisión de luz a una longitud de onda de 650 nm con intensidad de 3500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Zhang et al., 2016). Para hacer las mediciones, 10 hojas elegidas al azar alrededor de la copa de cada árbol se adaptaron a la obscuridad con clips del fluorímetro, por un lapso de 10 minutos (Morales-Gallegos, Martínez-Trinidad, Gómez-Guerrero, Razo-Zárate, & Suárez-Espinosa, 2019). El contenido de almidón de las raíces se determinó en muestras colectadas al azar por debajo de la base del tronco, las cuales se maceraron en nitrógeno líquido y almacenaron a -20 °C hasta su procesamiento en laboratorio. Se realizaron dos extracciones alcohólicas de azúcares de los tejidos colectados, cada una con 40 mL de etanol al 80 % (v/v) por 20 min a 100 °C (Quentin et al., 2015). El resultante de la extracción se diluyó en 10 mL de agua destilada para la determinación cuantitativa; las muestras se trabajaron por triplicado y se evaluaron a través de la hidrólisis del precipitado del proceso de extracción alcohólica, con la enzima diastasa (SIGMA[®]) (Palevitz & Newcomb, 1970). Al hidrolizado resultante se aplicó el método de antrona para determinar el contenido de almidón con base en el contenido de glucosa presente en la muestra (Witham, Blaydes, & Devlin, 1971).

Variables del suelo

La respiración del suelo se determinó a través del método de trampas alcalinas (Anderson, 1982). Para ello, 60 g de suelo se tomaron de cada cepa de plantación; la muestra se mantuvo a 4 °C en una hielera mientras se transportaba al laboratorio. Posteriormente, las muestras se secaron a 30 °C hasta obtener peso constante y se incubaron en frascos de vidrio de 500 mL. Para homogeneizar la humedad

and placed in a 500 mL Erlenmeyer flask, then 10 mL of $K_2Cr_2O_7$ (1N) and 20 mL of phosphoric acid (H_3PO_4) were added; the mixture was stirred and allowed to stand for 20 min. Subsequently, 200 mL of distilled water, 10 mL of H_3PO_4 and 25 drops of diphenylamine indicator were added and titrated with ferrous sulfate ($FeSO_4$) at 0.5 N (Eyherabide, Sainz, Barbieri, & Echeverría, 2014). Finally, soil moisture was measured with a FieldScout® TDR-300 time domain reflectometer (Spectrum Technologies, Inc., USA) with 20 cm long electrodes (thin root growth area). Humidity was measured twice a month during the evaluation of the experiment (approximately one year).

Statistical analysis

A completely randomized experimental design was used with eight treatments and one control (purified water); each treatment had four replications. Assumptions of normality were verified with the Kolmogorov-Smirnov test ($n \geq 30$ and $\alpha = 0.05$) and homogeneity of variances (Levene test). The information was analyzed through the sum of Type III squares of the GLM (generalized linear model) procedure of the SAS® statistical software in its version 9.4 (SAS Institute Inc., 2013). When significance was found between treatments, a comparison of means was performed with the Tukey Honestly-significant-difference test (HSD) with $\alpha = 0.05$. When the assumptions were not met in the data, the Kruskal-Wallis nonparametric method was used, and the means were compared with the Wilcoxon rank-sum test.

Results and discussion

Increase in height and diameter

After 371 d, no statistical evidence was found that carbohydrate amendments affected the increase in height or diameter in jacaranda trees ($P > 0.05$). Percival et al. (2004) and Percival and Fraser (2005) point out that the application of carbohydrates directly to the soil stimulates the development of the root system to a greater extent; however, the effects on the aerial part of the tree (height, diameter and active foliage) may not be evident in the short term. Good root development, after planting, helps support and improves the ability of the plant to dispose of soil resources; nonetheless, in many cases, the benefits are quantifiable in the long term (Day et al., 2010).

The results of this work are contrary to those observed in birch trees (*Betula pendula* Roth.), which positively responded to the application of $70 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ sucrose to the soil, stimulating the growth of both roots and shoots (Percival & Fraser, 2005). A disadvantage of sugars placed in the soil is that some of them can be used

de las muestras de suelo, se determinó la constante de capacidad de campo, la cual sirvió de referencia para estimar la cantidad de agua a adicionar que en este caso fueron 30 mL. El suelo se depositó al interior de cada frasco y encima se colocó un tubo de ensayo (Pyrex®) que contenía 5 mL de NaOH. Los frascos se dejaron equilibrar por 24 h y 15 d; al final de cada periodo se evaluó el CO_2 de la atmósfera del frasco que pasó a la solución de NaOH (Anderson, 1982). El carbono total del suelo se cuantificó por el método de oxidación húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio ácido. Para ello, 0.5 g de suelo seco se tamizaron en malla de 0.5 mm y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 500 mL, después se agregaron 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ (1N) y 20 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4); la mezcla se agitó y se dejó reposar por 20 min. Posteriormente, se añadieron 200 mL de agua destilada, 10 mL de H_3PO_4 y 25 gotas de indicador de difenilamina y se tituló con sulfato ferroso ($FeSO_4$) a 0.5 N (Eyherabide, Saínz, Barbieri, & Echeverría, 2014). Finalmente, la humedad del suelo se midió con un reflectómetro de dominio temporal FieldScout® TDR-300 (Spectrum Technologies, Inc., EUA) con electrodos de 20 cm de longitud (área de crecimiento de raíces finas). La humedad se midió dos veces por mes durante la evaluación del experimento (aproximadamente un año).

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con ocho tratamientos y un control (agua purificada); cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones. Se comprobaron los supuestos de normalidad con la prueba Kolmogórov-Smirnov ($n \geq 30$ y $\alpha = 0.05$) y la homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). La información se analizó a través de la suma de cuadrados tipo III del procedimiento GLM (modelo lineal generalizado) del programa estadístico SAS® en su versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2013). Cuando se encontró significancia entre tratamientos se llevó a cabo una comparación de medias con la prueba de diferencia significativa honesta de Tukey (DSH) con $\alpha = 0.05$. Cuando no se cumplieron los supuestos en los datos se utilizó el método no paramétrico de Kruskal-Wallis y se compararon las medias con la suma de rangos de Wilcoxon.

Resultados y discusión

Incremento en altura y diámetro

Después de 371 d, no se encontró evidencia estadística de que las enmiendas con carbohidratos afectaran el incremento en altura o diámetro en árboles de jacaranda ($P > 0.05$). Percival et al. (2004) y Percival y Fraser (2005) señalan que la aplicación de carbohidratos directamente al suelo estimula el desarrollo del

by the microbiota or may be lost by the effect of rain or irrigation (Martinez-Trinidad, et al., 2010), which may explain, in part, the lack of significance between treatments for the variables of increase in height and diameter in this trial. Moreover, it has been found that the application of carbohydrates injected directly to the tree trunk of jacaranda (*J. mimosifolia*) and evergreen oak (*Quercus virginiana* P. Miller) favorably promotes growth in height and diameter (Martinez-Trinidad, Watson, Arnold, Lombardini, & Appel, 2009; Morales-Gallegos et al., 2019).

Dry matter of roots

There was a significant effect on dry matter of jacaranda tree roots ($P \leq 0.05$) with treatment of glucose with $80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ and sucrose with $80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (G8S8) (Figure 1) with an average of 0.034 g, this being the highest treatment in carbohydrate concentration. As for the control (G0S0), the dry matter of roots reached an average of 0.006 g.

The application of sugars to the soil tends to initially stimulate root growth (Martinez-Trinidad et al., 2010; Percival et al., 2004), mainly due to the improvement in microbial activity and its interaction with the rhizosphere (Percival et al., 2004). An adequate development of fine roots may favor, in the future,

sistema de raíces en mayor medida; sin embargo, los efectos en la parte aérea del árbol (altura, diámetro y follaje activo) pueden no ser evidentes en el corto plazo. Un buen desarrollo de las raíces, posterior a la plantación, ayuda al soporte y mejora la capacidad de la planta para disponer de los recursos del suelo; no obstante, en muchas de las ocasiones, los beneficios son cuantificables en el largo plazo (Day et al., 2010).

Los resultados de este trabajo son contrarios a los observados en abedul (*Betula pendula* Roth.), que respondió favorablemente a la aplicación de $70 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de sacarosa al suelo estimulando el crecimiento tanto de raíces como de brotes (Percival & Fraser, 2005). Una desventaja de los azúcares dispuestos en el suelo radica en que parte de estos pueden ser utilizados por la microbiota o pueden perderse por el efecto de la lluvia o el riego (Martínez-Trinidad, et al., 2010), lo que puede explicar, en parte, la falta de significancia entre tratamientos para las variables de incremento en altura y diámetro en este ensayo. Por otra parte, se ha encontrado que la aplicación de los carbohidratos inyectados directamente al tronco de árboles de jacaranda (*J. mimosifolia*) y encino siempre verde (*Quercus virginiana* P. Miller) promueve favorablemente el crecimiento en altura y diámetro (Martínez-Trinidad, Watson, Arnold, Lombardini, & Appel, 2009; Morales-Gallegos et al., 2019).

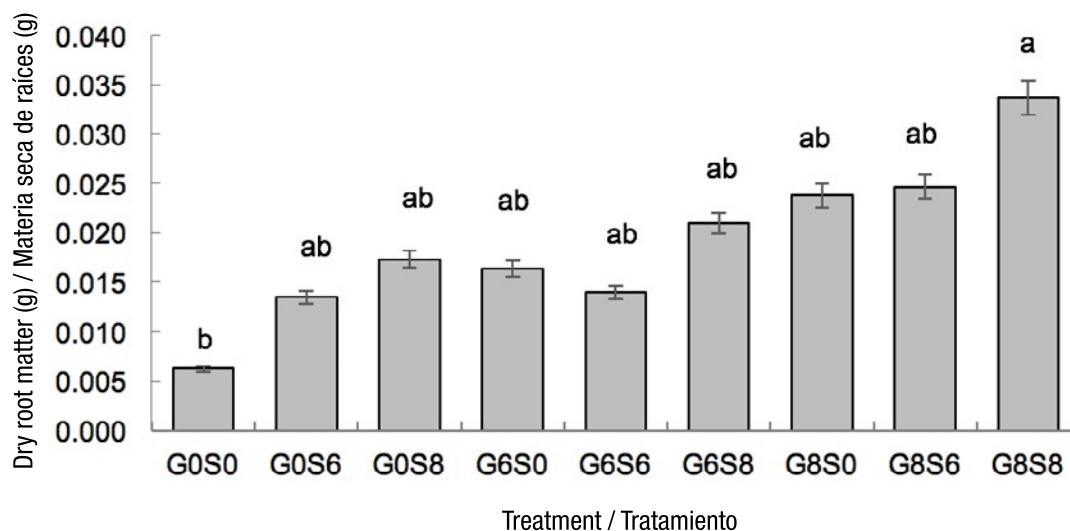


Figure 1. Dry matter of roots of jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia*) with carbohydrate amendments to the soil. The bars indicate the standard error of the mean. Equal letters mean statistically similar means ($P \leq 0.05$) using Tukey's HSD test. Carbohydrate concentrations in the treatments: G0, G6 and G8 = 0, 60 and $80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ glucose, respectively; S0, S6 and S8 = 0, 60 and $80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ sucrose, respectively.

Figura 1. Materia seca de raíces de árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*) con enmiendas de carbohidratos al suelo. Las barras indican el error estándar de la media. Letras iguales significan medias estadísticamente similares ($P \leq 0.05$) usando DSH de Tukey. Concentraciones de carbohidratos en los tratamientos: G0, G6 y G8 = 0, 60 y $80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de glucosa, respectivamente; S0, S6 y S8 = 0, 60 y $80 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ de sacarosa, respectivamente.

the settlement of the plant and, consequently, a better growth (Day et al., 2010). Previous studies have demonstrated the positive effect of sucrose on root system development in trees such as horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.), cherry (*Prunus avium* L.) and oak (*Quercus robur* L.) (Percival et al., 2004).

Foliage Color

The green color of jacaranda tree foliage was not statistically significant ($P > 0.05$). In a study of *Pinus greggii* Engelm., Mohedano-Caballero et al. (2005) used the same method to determine green pixels of the leaves from trees which were stressed by transplantation (up to 90 % in root cutting) and no significant differences were found either; the authors attributed this to a possible effect of continuous regrowth throughout the study, which prevented significant differences in the color of the tops of this tree species. In stressful conditions, whether biotic or abiotic, the plant is able to move its energy reserves as required; for example, for the production of out-of-season regrowth (Valenzuela, Maillard, González, & González, 2013; Wiley, Casper, & Helliker, 2017). Similarly, in this assay, there was continuous regrowth possibly induced by stress at the planting site, which could affect the evaluation of green color throughout the trial.

Chlorophyll fluorescence

The fluorescence of chlorophyll showed no statistically significant differences in any treatment. The Fv/Fm value ranged from 0.713 in the glucose-free treatment with 60 g·L⁻¹ sucrose (G0S6) to 0.735 in the sucrose-free 80 g·L⁻¹ glucose treatment (G8S0). Some authors claim that the values of Fv/Fm between 0.78 and 0.85 are considered indicators of good health or lack of stress in vegetation (Callow, May, & Johnstone, 2018; Johnstone, Moore, Tausz, & Nicolas, 2013; Uhrin & Supuka, 2016). Taking into account the above-mentioned interval as an indicator of good health, jacaranda trees, planted in an urban space with carbohydrate amendments, had values below what is indicated as optimal. This may be because the trees presented physiological stress due to the process of adaptation to the planting site (Mohedano-Caballero et al., 2005). Similar data were recorded in a trial where carbohydrates (glucose) were injected into the tree trunk of jacaranda (Morales-Gallegos et al., 2019).

Starch in roots

According to Figure 2, at the end of the evaluation period (371 d), significant statistical differences ($P \leq 0.05$) were found in starch content in roots of jacaranda trees treated with carbohydrate amendments. The highest values correspond to the treatment of

Materia seca de raíces

Hubo un efecto significativo en la materia seca de raíces de árboles de jacaranda ($P \leq 0.05$) con el tratamiento de glucosa con 80 g·L⁻¹ y sacarosa con 80 g·L⁻¹ (G8S8) (Figura 1) con un promedio de 0.034 g, siendo este el tratamiento más alto en concentración de carbohidratos. En cuanto al control (G0S0), la materia seca de raíces alcanzó un promedio de 0.006 g.

La aplicación de azúcares al suelo tiende a estimular inicialmente el crecimiento de las raíces (Martínez-Trinidad et al., 2010; Percival et al., 2004), principalmente por la mejora en la actividad microbiana y la interacción de esta con la rizosfera (Percival et al., 2004). Un desarrollo adecuado de raíces finas puede favorecer, en el futuro, el establecimiento de la planta y, en consecuencia, un mejor crecimiento (Day et al., 2010). Estudios previos han demostrado el efecto positivo de la sacarosa sobre el desarrollo del sistema de raíces en árboles como castaño de indias (*Aesculus hippocastanum* L.), cerezo (*Prunus avium* L.) y roble (*Quercus robur* L.) (Percival et al., 2004).

Color del follaje

El color verde del follaje de árboles de jacaranda no fue estadísticamente significativo ($P > 0.05$). En un estudio de *Pinus greggii* Engelm., Mohedano-Caballero et al. (2005) utilizaron el mismo método para determinar pixeles de color verde de las hojas de los árboles, los cuales fueron estresados mediante banqueo (hasta 90 % en el corte de raíces), y tampoco encontraron diferencias significativas; los autores atribuyeron esto a un posible efecto de rebrote continuo a lo largo del estudio, lo cual impidió encontrar diferencias significativas en el color de las copas de dicha especie arbórea. En situaciones de estrés, ya sea biótico o abiótico, la planta es capaz de mover sus reservas energéticas según se requieran; por ejemplo, para la producción de rebrotes fuera de temporada (Valenzuela, Maillard, González, & González, 2013; Wiley, Casper, & Helliker, 2017). De manera similar, en este ensayo hubo rebrotes continuos posiblemente inducidos por estrés al sitio de plantación, lo que pudo afectar la evaluación de color verde a lo largo del ensayo.

Fluorescencia de clorofila

La fluorescencia de la clorofila no mostró diferencias estadísticas significativas en algún tratamiento. El valor Fv/Fm varió de 0.713 en el tratamiento sin glucosa con 60 g·L⁻¹ de sacarosa (G0S6) a 0.735 en el tratamiento de 80 g·L⁻¹ de glucosa sin sacarosa (G8S0). Algunos autores afirman que los valores de Fv/Fm entre 0.78 y 0.85 se consideran indicadores de buena salud o de la falta

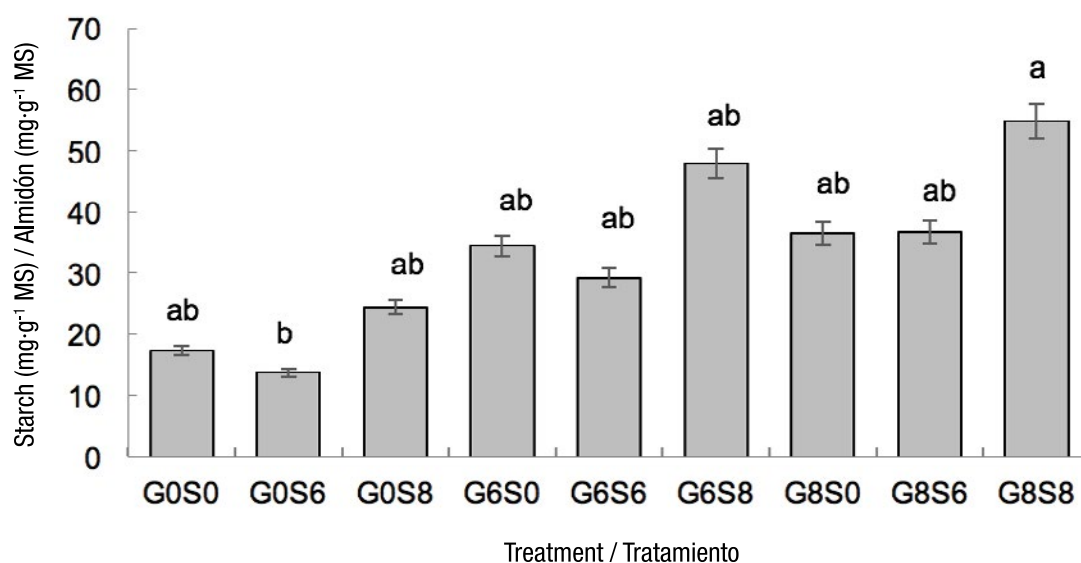


Figure 2. Starch content in roots of jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia*) at the end of the evaluation period (371 d) with carbohydrate amendments to the soil. The bars indicate the standard error of the mean. Equal letters mean statistically similar means ($P \leq 0.05$) using Tukey's HSD test. Carbohydrate concentrations in the treatments: G0, G6 and G8 = 0, 60 and 80 g·L⁻¹ glucose, respectively; S0, S6 and S8 = 0, 60 and 80 g·L⁻¹ sucrose, respectively.

Figura 2. Contenido de almidón en raíces de árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*) al final del periodo de evaluación (371 d) con enmiendas de carbohidratos al suelo. Las barras indican el error estándar de la media. Letras iguales significan medias estadísticamente similares ($P \leq 0.05$) usando DSH de Tukey. Concentraciones de carbohidratos en los tratamientos: G0, G6 y G8 = 0, 60 y 80 g·L⁻¹ de glucosa, respectivamente; S0, S6 y S8 = 0, 60 y 80 g·L⁻¹ de sacarosa, respectivamente.

80 g·L⁻¹ glucose and 80 g·L⁻¹ sucrose (G8S8) with 54.8 mg·g⁻¹ MS. This is consistent with previous studies in other species where sucrose stimulated the growth of the root system (Martinez-Trinidad et al., 2010; Percival et al., 2004; Percival & Fraser, 2005).

Urban environmental conditions play an important role in the variability of carbohydrate concentration in plant tissues (Maselli & Silveira, 2017), because large amounts of sugars are invested in tissue generation and defense. It has been observed, for example, that the species of silver maple (*Acer saccharinum* L.) and Norway maple (*Acer platanoides* L.), tend to mobilize their carbohydrate reserves for shoot production after a pruning event (stress) (Ramirez et al., 2018). In this work, starch values in roots remained at their highest point at 322 d (Figure 3), more than a month before regrowth (mid-April 2018).

Soil respiration and total carbon

Net soil respiration did show significant differences ($P \leq 0.001$). This ranged from 2.15 mg C-CO₂·m⁻² dry soil·h⁻¹ in the water-only treatment (G0S0) to 5.08 mg C-CO₂·m⁻² dry soil·h⁻¹ in the highest carbohydrate concentration treatment (G8S8). Microbial populations in soil are often quite sensitive to changes in general

de estrés en la vegetación (Callow, May, & Johnstone, 2018; Johnstone, Moore, Tausz, & Nicolas, 2013; Uhrin & Supuka, 2016). Tomando en cuenta el intervalo antes mencionado como un indicador de buena salud, los árboles de jacaranda, plantados en un espacio urbano con enmiendas de carbohidratos, tuvieron valores por debajo de lo que se indica como óptimo. Esto puede deberse a que los árboles presentaron estrés fisiológico a consecuencia del proceso de adaptación al sitio de plantación (Mohedano-Caballero et al., 2005). Datos similares se registraron en un ensayo donde los carbohidratos (glucosa) fueron inyectados al tronco de árboles de jacaranda (Morales-Gallegos et al., 2019).

Almidón en raíces

De acuerdo con la Figura 2, al final del periodo de evaluación (371 d), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) en el contenido de almidón en raíces de árboles de jacaranda tratados con enmiendas de carbohidratos. Los valores más altos corresponden al tratamiento de 80 g·L⁻¹ de glucosa y 80 g·L⁻¹ de sacarosa (G8S8) con 54.8 mg·g⁻¹ MS. Esto concuerda con estudio previos en otras especies donde la sacarosa estimuló el crecimiento del sistema de raíces (Martínez-Trinidad et al., 2010; Percival et al., 2004; Percival & Fraser, 2005).

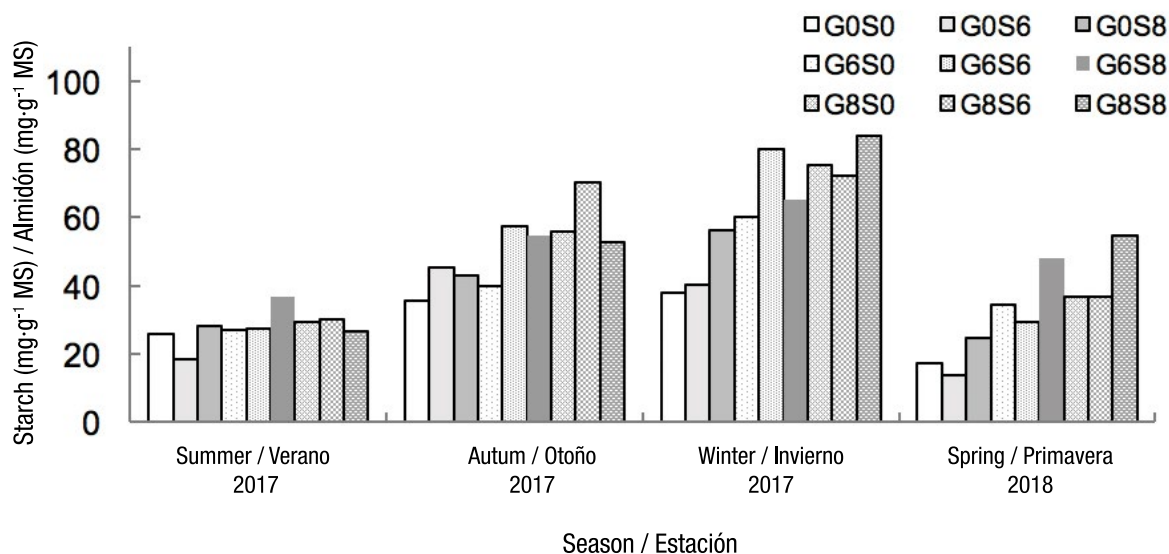


Figure 3. Variation of starch content in roots of jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia*) with carbohydrate amendments to the soil, during an annual growth cycle (June 2017 to June 2018). Carbohydrate concentrations in the treatments: G0, G6 and G8 = 0, 60 and 80 g·L⁻¹ glucose, respectively; S0, S6 and S8 = 0, 60 and 80 g·L⁻¹ sucrose, respectively.

Figura 3. Variación del contenido de almidón en raíces de árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*) con enmiendas de carbohidratos al suelo, durante un ciclo anual de crecimiento (junio de 2017 a junio de 2018). Concentraciones de carbohidratos en los tratamientos: G0, G6 y G8 = 0, 60 y 80 g·L⁻¹ de glucosa, respectivamente; S0, S6 y S8 = 0, 60 y 80 g·L⁻¹ de sacarosa, respectivamente.

conditions, so they provide information about their alterations in an early and reliable manner (Paolini, 2017). An increase in CO₂ production in soil may indirectly indicate the activity of microorganisms oxidizing soil organic matter under aerobic conditions, and the growth of their populations accelerating nutrient cycling (Schloter et al., 2017). This is because part of the carbohydrates placed in the soil serve as easily assimilable carbon and energy reserve (Ziter & MacDougall, 2013).

In a study with carbohydrate amendments under semi evergreen oaks (*Q. virginiana*), there was an increase in microbial activity (soil respiration as CO₂); however, this only lasted while carbohydrates were metabolized by soil microorganisms (Martinez-Trinidad et al., 2010). It is important to mention that, although the net mass of CO₂ was different between treatments, proportionally, the stimulation in respiration is low if the total soil carbon is considered. In this case, respiration was less than 1 % and there were no statistical differences between treatments (Table 2). Compared to some forest soils, the consumption of 1% of soil carbon can be reached in the first 20 d in fertile soils and in more than 100 d in low fertility soils (Gómez-Guerrero & Doane, 2018).

Las condiciones ambientales urbanas juegan un papel importante en la variabilidad de la concentración de carbohidratos en los tejidos de la planta (Maselli & Silveira, 2017), debido a que se invierten grandes cantidades de azúcares en la generación de tejidos y defensa. Se ha observado, por ejemplo, que las especies de acer plateado (*Acer saccharinum* L.) y acer real (*Acer platanoides* L.), tras un evento de poda (estrés), tienden a movilizar sus reservas de carbohidratos para la producción de brotes (Ramírez et al., 2018). En este trabajo, los valores de almidón en raíces se mantuvieron en su punto más alto a los 322 d (Figura 3), más de un mes antes de los rebrotes (mediados de abril de 2018).

Respiración y carbono total del suelo

La respiración neta del suelo sí mostró diferencias significativas ($P \leq 0.001$). Esta varió de 2.15 mg C-CO₂·m⁻² suelo seco·h⁻¹ en el tratamiento que contenía solo agua (G0S0) a 5.08 mg C-CO₂·m⁻² suelo seco·h⁻¹ en el tratamiento más alto en concentración de carbohidratos (G8S8). Las poblaciones microbianas en el suelo suelen ser bastante sensibles a cambios en las condiciones generales, por lo que suministran información sobre sus alteraciones de manera anticipada y confiable (Paolini, 2017). Un aumento

Table 2. Soil respiration and total carbon in jacaranda trees (*Jacaranda mimosifolia*) in the “Alameda de Texcoco”, State of Mexico.**Cuadro 2. Respiración del suelo y carbono total en árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*) en la Alameda de Texcoco, Estado de México.**

Treatment/ Tratamiento	CO ₂ (mg C-CO ₂ ·m ⁻² dry soil·h ⁻¹)/ CO ₂ (mg C-CO ₂ ·m ⁻² suelo seco·h ⁻¹)	SEM/ EE	TC (%)/ CT (%)	SEM/ EE
G0S0	2.152 d	±0.61	0.563 a	±0.12
G0S6	3.145 cd	±0.36	0.605 a	±0.04
G0S8	4.785 ab	±0.96	0.509 a	±0.20
G6S0	3.437 bcd	±0.66	0.628 a	±0.17
G6S6	3.915 abc	±1.09	0.551 a	±0.24
G6S8	4.772 ab	±0.94	0.909 a	±0.31
G8S0	3.627 bc	±0.28	0.432 a	±0.15
G8S6	4.585 abc	±0.67	0.759 a	±0.28
G8S8	5.085 a	±0.89	0.914 a	±0.25

CO₂ = net soil respiration; TC = total soil carbon; SEM = standard error of the mean. Equal letters mean statistically similar means ($P \leq 0.05$) using Tukey's HSD test. Carbohydrate concentrations in the treatments: G0, G6 and G8 = 0, 60 and 80 g·L⁻¹ glucose, respectively; S0, S6 and S8 = 0, 60 and 80 g·L⁻¹ sucrose, respectively.

CO₂ = respiraci3n neta del suelo; CT = carbono total del suelo; EE = error estandar de la media. Letras iguales significan medias estadisticamente similares ($P \leq 0.05$) usando DSH de Tukey. Concentraciones de carbohidratos en los tratamientos: G0, G6 y G8 = 0, 60 y 80 g·L⁻¹ de glucosa, respectivamente; S0, S6 y S8 = 0, 60 y 80 g·L⁻¹ de sacarosa, respectivamente.

Soil moisture

Soil moisture was kept constant throughout the trial mainly due to scheduled irrigation. The values ranged from 31 to 46.9 % volumetric water content, finding the highest values in the rainy season without becoming statistically significant ($P \leq 0.05$) with the days outside the rainy season (dry season).

Conclusions

Carbohydrate amendments to the soil stimulate the development of fine roots of trees planted in urban spaces; however, aerial characteristics such as foliage color or increase in height and diameter of trees were not altered, possibly due to the short evaluation time (about one year). The study of aspects related to the development of the aerial part of the trees, initially modifying the conditions of the root system, implies a longer evaluation time than considered in this trial. The results indicate that amendments with carbohydrates such as glucose and sucrose have an indirect positive effect on soil respiration and therefore on roots, possibly due to increased microbial activity that improves soil characteristics.

en la producci3n de CO₂ en el suelo puede indicar, de manera indirecta, la actividad de los microorganismos realizando la oxidaci3n de la materia orgánica del suelo, bajo condiciones aer3bicas, y el crecimiento de sus poblaciones acelerando la circulaci3n de los nutrientes (Schloter et al., 2017). Lo anterior debido a que parte de los carbohidratos dispuestos en el suelo sirven como carbono f3cilmente asimilable y reserva energ3tica (Ziter & MacDougall, 2013).

En un estudio con enmiendas de carbohidratos debajo de encino siempre verde (*Q. virginiana*), se registr3 incremento en la actividad microbiana (respiraci3n del suelo como CO₂); sin embargo, solo dur3 mientras los carbohidratos fueron metabolizados por los microorganismos del suelo (Martínez-Trinidad et al., 2010). Es importante mencionar que, aunque la masa neta de CO₂ fue diferente entre tratamientos, proporcionalmente, la estimulaci3n en respiraci3n es baja si se toma en cuenta el carbono total del suelo. En este caso, la respiraci3n fue menor de 1 % y sin diferencias estadísticas entre tratamientos (Cuadro 2). Si se compara con algunos suelos forestales, el consumo de 1 % del carbono del suelo se puede alcanzar en los primeros 20 d en suelos fértiles y en más de

Acknowledgements

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship for graduate studies of the first author, and the municipal authorities of the city of Texcoco de Mora for allowing this essay to be carried out in the urban green area.

End of English version

References / Referencias

- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11, 36–42. Retrieved from <https://imagescience.org/meijering/publications/download/bio2004.pdf>
- Al-Habsi, S., & Percival, G. (2006). Sucrose-induced tolerance to and recovery from deicing salt damage in containerized *Ilex aquifolium* L. and *Quercus robur* L. *Arboriculture & Urban Forestry*, 32(6), 277–285. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=32&IssueID=6>
- Anderson, J. P. E. (1982). Soil respiration. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis (part 2). Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 831–871). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Inc. & Soil Science Society of America, Inc.
- Callow, D., May, P., & Johnstone, D. M. (2018). Tree vitality assessment in urban landscapes. *Forests*, 9(5), 1–7. doi: 10.3390/f9050279
- Ceveira, G., & Lavado, R. S. (2006). Efecto del aporte de enmiendas orgánicas sobre propiedades físicas e hidrológicas de un suelo urbano degradado. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 24(2), 123–130. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Gabriela_Civeira/publication/237601849
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Roger, H. J. R. (2010). Tree root ecology in the urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(5), 193–205. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=36&IssueID=5>
- De Abreu-Harbach, L. V., Chebel, L. L., & Matzarakis, A. (2015). Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landscape and Urban Planning*, 138, 99–109. doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.02.008
- Eyherabide, M., Saíenz, R. H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del Suelo (Argentina)*, 32(1), 13–19. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/317537397>
- Gómez-Guerrero, A., & Doane, T. (2018). The response of forest ecosystems to climate change. *Developments in Soil Science*, 35, 185–206. doi: 10.1016/B978-0-444-63865-6.00007-7

100 d en suelos de baja fertilidad (Gómez-Guerrero & Doane, 2018).

Humedad del suelo

La humedad del suelo se mantuvo constante en todo el ensayo debido principalmente a que se contó con riego programado. Los valores oscilaron entre 31 a 46.9 % de contenido volumétrico de agua, encontrando los valores más altos en la temporada de lluvias sin llegar a ser estadísticamente significativos ($P \leq 0.05$) con los días fuera de la temporada de lluvias (temporada de secas).

Conclusiones

Las enmiendas de carbohidratos al suelo estimulan el desarrollo de las raíces finas de árboles plantados en espacios urbanos; sin embargo, las características de la parte aérea como el color del follaje o el incremento en altura y diámetro de los árboles no fueron alteradas, debido posiblemente al corto tiempo de evaluación (aproximadamente un año). El estudio de aspectos relacionados con el desarrollo de la parte aérea de los árboles, modificando de manera inicial las condiciones del sistema de raíces, implica un tiempo de evaluación mayor al considerado en este ensayo. Los resultados indican que las enmiendas con carbohidratos como glucosa y sacarosa tienen un efecto positivo indirecto en la respiración del suelo y, por tanto, en las raíces, debido posiblemente a un incremento de la actividad microbiana que mejora las características del suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca para estudios de postgrado del primer autor, y a las autoridades municipales de la ciudad de Texcoco de Mora por permitir llevar a cabo este ensayo en sus áreas verdes urbanas.

Fin de la versión en español

- Guilland, C., Maron, P. A., Damas, O., & Ranjard, L. (2018). Biodiversity of urban soils for sustainable cities. *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1267–1282. doi: 10.1007/s10311-018-0751-6
- Gutiérrez, C. M. C., & Ortiz, S. C. A. (1999). Origen y evolución de los suelos en el ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia*, 33(2), 199–208. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/301957920>
- Hassan, S. M. (2018). Challenges of Soil Taxonomy and WRB in classifying soils: Some examples from Iranian soils. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 14, 63–70. doi: 10.2478/bgeo-2018-0005
- Jankovska, I., Brūmelis, G., Nikodemus, O., Kasparinskis, R., Amatniece, V., & Straupmanis, G. (2015). Tree species establishment in urban forest in relation to vegetation composition, tree canopy gap area and soil factors. *Forests*, 6(12), 4451–4461. doi: 10.3390/f6124379
- Johnston, M., & Hiron, A. (2014). Urban trees. In G. R. Dixon, & D. E. Aldous (Eds.), *Horticulture: Plants for people and places* (vol. 2, pp. 692–711). Lancashire, UK: Springer. doi: 10.1007/978-94-017-8581-5_5
- Johnstone, D., Moore, G., Tausz, M., & Nicolas, M. (2013). The measurement of plant vitality in landscape trees. *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*, 35(1), 18–27. doi: 10.1080/03071375.2013.783746
- Koeser, A. K., Gilman, E. F., Paz, M., & Harchick, C. (2014). Factors influencing urban tree planting program growth and survival in Florida, United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 655–661. doi: 10.1016/j.ufug.2014.06.005
- Martínez-Trinidad, T., Watson, W. T., Arnold, M. A., & Lombardini, L. (2010). Microbial activity of a clay soil amended with glucose and starch under live oaks. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(2), 66–72. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=36&IssueID=2>
- Martínez-Trinidad, T., Watson, W. T., Arnold, M. A., Lombardini, L., & Appel, N. D. (2009). Carbohydrate injections as a potential option to improve growth and vitality of live oaks. *Arboriculture & Urban Forestry*, 35(3), 142–147. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=35&IssueID=3>
- Maselli, L. G., & Silveira, B. M. (2017). Dendrochemistry, a missing link to further understand carbon allocation during growth and decline of trees. *Trees*, 31(6), 1745–1758. doi: 10.1007/s00468-017-1599-2
- Mohedano-Caballero, L., Cetina-Alcalá, V. M., Chacalohilu, A., Trinidad-Santos, A., & González-Cossio, F. (2005). Crecimiento y estrés post-trasplante de árboles de pino en suelo salino urbano. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(1), 43–50. doi: 10.5154/r.rchsh.2003.06.042
- Morales-Gallegos, L. M., Martínez-Trinidad, T., Gómez-Guerrero, A., Razo-Zárate, R., & Suárez-Espinosa, J. (2019). Inyecciones de glucosa en *Jacaranda mimosifolia* D. Don en áreas urbanas de Texcoco de Mora. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 79–98. doi: 10.29298/rmcf.v10i52.414
- Moreno, S. E. (2007). Características territoriales, ambientales y sociopolíticas del municipio de Texcoco, Estado de México. *Quivera*, 9(1), 177–206. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40190110>
- Moser, A., Uhl, E., Rötzer, T., Biber, P., Caldentey, J. M., & Pretzsch, H. (2018). Effects of climate trends and drought events on urban tree growth in Santiago de Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 45(1), 35–50. doi: 10.7764/rcia.v45i1.1793
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Portal de suelos de la FAO. Base de referencia mundial. Retrieved March 9, 2019 from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/base-referencial-mundial/es/>
- Ow, L. F., & Yusof, M. L. (2018). Stability of four urban trees species in engineered and regular urban soli blends. *Journal of Urban Ecology*, 4(1), 1–6. doi: 10.1093/jue/juy014
- Palevitz, B. A., & Newcomb, E. H. (1970). A study of sieve element starch using sequential enzymatic digestion and electron microscopy. *The Journal of Cell Biology*, 45(2), 383–398. doi: 10.1083/jcb.45.2.383
- Paolini, G. J. E. (2017). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos. *Terra Latinoamericana*, 36(1), 13–22. doi: 10.28940/terra.v36i1.257
- Percival, G. C., & Fraser, G. A. (2005). Use of sugars to improve root growth and increase transplant success of birch (*Betula pendula* Roth.). *Journal of Arboriculture*, 31(2), 66–77. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/289885427>
- Percival, G. C., Fraser, G. A., & Barnes, S. (2004). Soil injections of carbohydrates improve fine root growth of established urban trees. *Arboricultural Journal*, 28(1-2), 95–101. doi: 10.1080/03071375.2004.9747404
- Pereira, P., Ferreira, A. J. D., Pariente, S., Cerdà, A., Walsh, R., & Keesstra, S. (2016). Urban soils and sediments. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 2493–2499. doi: 10.1007/s11368-016-1566-3
- Pincetl, S., Gillespie, T., Pataki, D. E., Saatchi, S., & Saphores, J. D. (2012). Urban tree planting programs, function of fashion? Los Angeles and urban tree planting campaigns. *GeoJournal*, 78(3), 475–493. doi: 10.1007/s10708-012-9446-x
- Ponge, J. F., Pérès, G., Guernion, M., Ruiz-Camacho, N., Cortet, J., Pernin, C., ... Bispo, A. (2013). Impact of agricultural practices on soil biota: A regional study. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 271–284. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.08.026
- Quentin, A. G., Pinkard, E. A., Ryan, M. G., Tissue, D. T., Baggett, L. S., Adams, H. D., ... Woodruff, D. R. (2015). Non-structural carbohydrates in woody plants compared among laboratories. *Tree Physiology*, 35(11), 1146–1165. doi: 10.1093/treephys/tpv073
- Ramírez, J. A., Handa, I. T., Posada, J. M., Delagrangé, S., & Messier, C. (2018). Carbohydrate dynamics in roots, stems, and branches after maintenance pruning in two common urban trees species of North America.

- Urban Forestry & Urban Greening*, 30, 24–31. doi: 10.1016/j.ufug.2018.01.013
- Roman, L. A., Battles, J. J., & McBride, J. R. (2013). The balance of planting and mortality in a street tree population. *Urban Ecosystems*, 17(2), 387–404. doi: 10.1007/s11252-013-0320-5
- SAS Institute Inc. (2013). The SAS system for windows. Release 9.4. Cary, NC, USA: Author.
- Scharenbroch, B. C., Meza, E. N., Catania, M., & Fite, K. (2013). Biochar and biosolids increase tree growth and improve soil quality for urban landscapes. *Journal of Environmental Quality*, 42(5), 1372–1385. doi: 10.2134/jeq2013.04.0124
- Schlöter, M., Nannipieri, P., Sørensen, S. J., & Elsas, J. D. (2017). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 54, 1–10. doi: 10.1007/s00374-017-1248-3
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22930834>
- Segura, C. M., Gutiérrez, C. M., Ortiz, S. A., & Gómez, D. D. (2000). Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México. *Terra*, 18(1), 33–44. Retrieved from <https://chapingo.mx/terra/contenido/18/1/art35-44.pdf>
- Tresch, S., Moretti, M., Le Bayon, R. C., Mäder, P., Zanetta, A., Frey, D., & Fliessbach, A. (2018). A gardener's influence on urban soil quality. *Frontiers in Environmental Science*, 6(25), 1–17. doi: 10.3389/fenvs.2018.00025
- Uhrin, P., & Supuka, J. (2016). Quality assessment of urban trees using growth visual and chlorophyll fluorescence indicators. *Ekológia (Bratislava)*, 35(2), 160–172. doi: 10.1515/eko-2016-0013
- Valenzuela, N. L. M., Maillard, P., González, B. J. L., & González, C. G. (2013). Balance de carbohidratos en diferentes compartimentos vegetales de encino (*Quercus petraea*) y haya (*Fagus sylvatica*), sometidos a defoliación y sombra. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 8(1), 33–38. doi: 10.5154/r.rchsza.2012.06.027
- Vidal-Beaudet, L., Forget-Caubel, V., & Grosbellet, C. (2015). Favour street tree root growth with high supplies of organic matter induces changes in urban soil properties. *Acta Horticulturae*, 1099, 943–950. doi: 10.17660/ActaHortic.2015.1099.120
- Vidal-Beaudet, L., Galopin, G., & Grosbellet, C. (2018). Effect of organic amendment for the construction of favourable urban soils for tree growth. *European Journal of Horticultural Science*, 83(3), 173–186. doi: 10.17660/eJHS.2018/83.3.7
- Watson, G. W., Hewitt, A. W., Custic, M., & Lo, M. (2014). The management of tree root systems in urban and suburban settings: A review of soil influence on root growth. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(4), 193–217. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=40&IssueID=4>
- Wiley, E., Casper, B. B., & Helliker, B. R. (2017). Recovery following defoliation involves shifts in allocation that favor storage and reproduction over radial growth in black oak. *Journal of Ecology*, 105(2), 412–424. doi: 10.1111/1365-2745.12672
- Witham, F. H., Blaydes, D. F., & Devlin, R. M. (1971). *Experiments in plant physiology*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Company.
- Zhang, C. J., Lim, S. H., Kim, J. W., Nah, G., Fischer, A., & Kim, D. S. (2016). Leaf chlorophyll fluorescence discriminates herbicide resistance in *Echinochloa* species. *Weed Research*, 56(6), 424–433. doi: 10.1111/wre.12226
- Zhang, Y., Xie, J. B., & Li, Y. (2016). Effects of increasing root carbon investment on the mortality and resprouting of *Haloxylon ammodendron* seedlings under drought. *Plant Biology*, 19(2), 1–10. doi: 10.1111/plb.12511
- Ziter, C., & MacDougall, S. A. (2013). Nutrients and defoliation increase soil carbon inputs in grassland. *Ecology*, 94(1), 106–116. doi: 10.1890/11-2070.1