

## Root growth of *Taxodium mucronatum* Ten. planted in an urban area

## Crecimiento radical de *Taxodium mucronatum* Ten. plantado en un área urbana

Pablo Hernández-López<sup>1</sup>; Leopoldo Mohedano-Caballero<sup>1\*</sup>; Dante A. Rodríguez-Trejo<sup>1</sup>; Tomás Martínez-Trinidad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México- Texcoco. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. km 36.5 carretera México- Texcoco. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

\*Corresponding author: mohedano15@hotmail.com; tel.: +52 595 952 1500 ext. 5782.

### Abstract

**Introduction:** The ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.), National Tree of Mexico, is frequently found in urban green areas, in conditions of restricted humidity and compacted soils. These characteristics negatively affect growth and survival.

**Objective:** To evaluate root growth of young ahuehuete trees by the effect of the frequency of irrigation and loosening of the soil surrounding the planting strain.

**Materials and methods:** Twenty four trees 2 m high were planted in an urban area. The experiment was established as a completely random design with factorial arrangement: a) irrigation frequency (frequent [once weekly] and spaced [once every two weeks]) and b) treatment of the soil surrounding the plantation strain (soil with and without loosening). The growth of the root system was monitored for 12 months through digital photographs, obtained from rhizotrons installed on a side wall of each plantation strain.

**Results and discussion:** The original compaction of the site did not present restrictive levels for growth; therefore, the surrounding loosening did not significantly improve ( $P > 0.1$ ) short-term root growth. Root length (267.75 to 453.28 cm) showed no statistically significant differences for the irrigation and soil factors and their interaction; however, the number of roots was affected by the interaction of the factors ( $P \leq 0.1$ ). Trees with frequent irrigation and soil without loosening developed a higher number of roots (190.5).

**Conclusion:** The interaction of irrigation frequency and soil condition influences the number of roots, but not the length.

**Keywords:** Ahuehuete; rhizotron; root system; irrigation; soil compaction.

### Resumen

**Introducción:** El ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.), Árbol Nacional de México, se encuentra frecuentemente en áreas verdes urbanas, en condiciones de humedad restringida y suelos compactados. Estas características influyen negativamente en el crecimiento y supervivencia.

**Objetivo:** Evaluar el crecimiento de raíces de árboles jóvenes de ahuehuete por efecto de la frecuencia de riego y aflojamiento del suelo circundante a la cepa de plantación.

**Materiales y métodos:** Se plantaron 24 árboles de 2 m de altura en un área urbana. El experimento se estableció como un diseño completamente al azar con arreglo factorial: a) frecuencia de riego (frecuente [una vez a la semana] y espaciado [una vez cada dos semanas]) y b) tratamiento al suelo circundante de la cepa de plantación (suelo con y sin aflojamiento). El crecimiento del sistema radical se monitoreó durante 12 meses a través de fotografías digitales, obtenidas de rizotrones instalados en una pared lateral de cada cepa de plantación.

**Resultados y discusión:** La compactación original del sitio no presentó niveles restrictivos para el crecimiento; por tanto, el aflojamiento circundante no mejoró significativamente ( $P > 0.1$ ) el crecimiento radical a corto plazo. La longitud de raíz (267.75 a 453.28 cm) no mostró diferencias estadísticas significativas para los factores riego, suelo y su interacción; sin embargo, el número de raíces sí fue afectado por la interacción de los factores ( $P \leq 0.1$ ). Los árboles con riego frecuente y suelo sin aflojamiento desarrollaron mayor número de raíces (190.5).

**Conclusión:** La interacción frecuencia de riego y condición de suelo tiene efecto sobre el número de raíces, pero no sobre la longitud.

**Palabras clave:** Ahuehuete; rizotrón; sistema de raíces; riego; compactación del suelo.

## Introduction

The root system of trees has as main functions to absorb and to conduct water and minerals, as well as to provide stability through the anchoring to the soil (Fitter, 2002; Hiron & Thomas, 2018). Roots grow continuously, but their proliferation depends on the availability of water and minerals in their microenvironment, in such a way that the ease of plants for absorbing these resources is related to their ability to develop an extensive root system (Ludovici, 2004). A reduced or constricting root system decreases stability and increases tree stress, which limits the possibility of establishment in urban environments (Watson, Hewitt, Custic, & Lo, 2014a).

In urban environments, tree root growth patterns can differ significantly from similar species in forest or agricultural environments (Day, Wiseman, Dickinson, & Harris, 2010a). When urban soil limits tree rooting, root response to adverse conditions is reduced (Watson, Hewitt, Custic, & Lo, 2014b); for example, compact soil, high pH, high temperature, low humidity, and the presence of contaminants can alter root growth, morphology, and physiology (Day, Wiseman, Dickinson, & Harris, 2010b). In this sense, compact soil quickly limits root development (Hiron & Thomas, 2018) and together with insufficient irrigation it prevents radical tree growth (Roman et al., 2015); lack of humidity is considered the leading cause of death of newly planted trees (Lell, 2006).

There are several methodologies for the study of tree root development (Nadezhkina & Cermák, 2003; Ryser, 2006; Stokes et al., 2002), most of them are destructive in nature. In recent years, instruments and methods have been developed that allow the study of the root system in a non-destructive way; for example, ground-penetrating radars (Lantini, Alani, Giannakis, Benedetto, & Tosti, 2019), differential electrical conductivity or root digging by ultrasonic air stream (Nadezhkina & Cermák, 2003). There is another instrument called rhizotron that allows the observation and measurement of plant roots through transparent surfaces, in a non-destructive way (Guedea-Fernández, Arriaga-Frías, & De La Cruz-Guzman, 2001).

The design of rhizotrons is variable and has been developed to evaluate various root characteristics (Busch, Mendelssohn, Lorenzen, Brix, & Miao, 2006; Guedea-Fernández et al., 2001; Silva & Beeson, 2011). This instrument has been used to monitor the growth of thin roots of *Prosopis flexuosa* DC. in the upper soil layer in an arid ecosystem (Guevara, Pancotto, Mastrantonio, & Giordano, 2018); the analysis of root elongation rate of *Juglans nigra* x *Juglans regia* L. through five methods of rhizotron image acquisition (Mohamed et al., 2017); as well as for the comparison

## Introducción

El sistema radical de los árboles tiene como funciones principales absorber y conducir agua y minerales, así como brindar estabilidad a través del anclaje al suelo (Fitter, 2002; Hiron & Thomas, 2018). Las raíces crecen continuamente, pero su proliferación depende de la disponibilidad de agua y minerales en su microambiente, de tal manera que la facilidad de las plantas para absorber estos recursos está relacionada con su capacidad para desarrollar un sistema radical extenso (Ludovici, 2004). Un sistema de raíces reducido o en constricción disminuye la estabilidad y aumenta el estrés de los árboles, lo cual limita la posibilidad de establecimiento en ambientes urbanos (Watson, Hewitt, Custic, & Lo, 2014a).

En entornos urbanos, los patrones de crecimiento de las raíces de los árboles se pueden diferenciar considerablemente de las especies similares en ambientes forestales o agrícolas (Day, Wiseman, Dickinson, & Harris, 2010a). Cuando el suelo urbano limita el enraizamiento de los árboles, la respuesta de las raíces a condiciones desfavorables es reducida (Watson, Hewitt, Custic, & Lo, 2014b); por ejemplo, el suelo compacto, pH elevado, temperatura alta, humedad baja y la presencia de contaminantes pueden alterar el crecimiento, morfología y fisiología de las raíces (Day, Wiseman, Dickinson, & Harris, 2010b). En este sentido, el suelo compacto limita rápidamente el desarrollo de las raíces (Hiron & Thomas, 2018) y junto con el riego insuficiente impiden el crecimiento radical de los árboles (Roman et al., 2015); la falta de humedad se considera la causa principal de muerte de los árboles recientemente plantados (Lell, 2006).

Existen varias metodologías para el estudio del desarrollo de raíces de los árboles (Nadezhkina & Cermák, 2003; Ryser, 2006; Stokes et al., 2002), la mayoría de ellas son de naturaleza destructiva. En años recientes se han desarrollado instrumentos y métodos que permiten el estudio del sistema radical de una forma no destructiva; por ejemplo, los radares de penetración del suelo (Lantini, Alani, Giannakis, Benedetto, & Tosti, 2019), la conductividad eléctrica diferencial o la excavación de raíces mediante corriente de aire ultrasónico (Nadezhkina & Cermák, 2003). Existe otro instrumento llamado rizotrón que permite la observación y medición de raíces de las plantas de una manera no destructiva, a través de superficies transparentes (Guedea-Fernández, Arriaga-Frías, & De la Cruz-Guzmán, 2001).

El diseño de los rizotrones es variable y se han desarrollado para evaluar diversas características de la raíz (Busch, Mendelssohn, Lorenzen, Brix, & Miao, 2006; Guedea-Fernández et al., 2001; Silva & Beeson, 2011).

of root growth of *Acer saccharum* Marsh produced differently in nursery (Richardson-Calfee, Harris, Jones, & Fanelli, 2010).

*Taxodium mucronatum* Ten. is considered the National Tree of Mexico since 1921 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010). This tree is commonly known as ahuehuete or sabino and is used in parks and gardens (CONAFOR & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2011). This semi-deciduous species reaches 50 m of height, is slow growing, has a gray or grayish brown bark, and is attributed medicinal uses together with the leaves (Benítez, Polido, & Equihua, 2004). The ahuehuete grows in semi-arid climates, although it adapts well to temperate ones, prefers acidic soils with sun exposure, requires abundant irrigation, does not tolerate shade, and develops deep roots (Martinez & Chacalo, 1994).

The importance of studying root growth lies in the fact that trees depend on them to promote their establishment and development (Gregory & Kirkegaard, 2017). Young individuals planted in compact, low-moisture soils face problems in extending their root system and maintaining proper growth (Craul, 1992); in addition, root system regeneration is key to their successful establishment in urban environments (Richardson-Calfee et al., 2010). Therefore, this research aimed to identify the effect of the frequency of irrigation and loosening of the surrounding planting soil on the root growth of young trees of ahuehuete (*T. mucronatum*), through an observation window (rhizotron).

## Materials and methods

### Site characterization

The research was carried out on a plot of land annexed to the wastewater treatment plant at Universidad Autónoma Chapingo, in the Estado de México, located in the vicinity of the geographical point 19° 29' 32.6" N and 98° 53' 21.1" W, at an altitude of 2 250 m. The original soil was subjected to alterations, due to the establishment of a project for an urban green area with an artificial lake, which consisted of filling, leveling and slight compaction of the area with clay-textured agricultural soil.

### Experimental design

The experiment was established as a completely random design with factorial arrangement, with the factors: a) frequency of irrigation and b) treatment of the surrounding soil of the plantation strain. The frequency of irrigation was divided into two levels:

Este instrumento ha sido utilizado para el monitoreo del crecimiento de las raíces finas de *Prosopis flexuosa* DC. en la capa superior del suelo en un ecosistema árido (Guevara, Pancotto, Mastrantonio, & Giordano, 2018); el análisis de la tasa de alargamiento de la raíz de *Juglans nigra x Juglans regia* L. a través de cinco métodos de obtención de imágenes del rizotrófon (Mohamed et al., 2017); así como para la comparación del crecimiento de raíces de *Acer saccharum* Marsh producidas en forma distinta en vivero (Richardson-Calfee, Harris, Jones, & Fanelli, 2010).

*Taxodium mucronatum* Ten. es considerado el Árbol Nacional de México desde 1921 (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2010). Dicho árbol se conoce comúnmente como ahuehuete o sabino y es utilizado en parques y jardines (CONAFOR & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2011). Esta especie subperennifolia alcanza 50 m de altura, es de crecimiento lento, tiene corteza de color gris o café grisácea, y se le atribuyen usos medicinales junto con las hojas (Benítez, Pulido, & Equihua, 2004). El ahuehuete crece en climas semicálidos, aunque se adapta bien a los templados, prefiere suelos ácidos con exposición soleada, requiere riego en abundancia, no tolera la sombra y desarrolla raíces profundas (Martínez & Chacalo, 1994).

La importancia de estudiar el crecimiento de las raíces radica en que los árboles dependen de ellas para favorecer su establecimiento y desarrollo (Gregory & Kirkegaard, 2017). Los individuos jóvenes plantados en suelos compactos y con poca humedad enfrentan problemas para extender su sistema de raíces y mantener crecimiento adecuado (Craul, 1992); además, la regeneración del sistema radical es clave para su establecimiento exitoso en entornos urbanos (Richardson-Calfee et al., 2010). Por lo anterior, esta investigación tuvo el objetivo de identificar el efecto de la frecuencia de riego y aflojamiento del suelo circundante de plantación sobre el crecimiento radical de árboles jóvenes de ahuehuete (*T. mucronatum*), a través de una ventana de observación (rizotrófon).

## Materiales y métodos

### Caracterización del sitio

La investigación se realizó en un terreno anexo a la planta tratadora de aguas residuales de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, ubicada en las inmediaciones del punto geográfico 19° 29' 32.6" N y 98° 53' 21.1" O, a una altitud de 2 250 m. El suelo original fue sometido a alteraciones, debido al establecimiento de un proyecto de área verde urbana con un lago artificial, las cuales consistieron en relleno,

frequent irrigation, once a week (FI), and spaced irrigation, once every two weeks (SI). The treatment of the surrounding soil of the plantation strain was also divided into two levels: non-loosened soil (NLS) and loosened soil (LS) (Table 1).

The amount of water used for irrigation was determined based on the reference evapotranspiration parameter (ET<sub>o</sub>) of a week (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006); for its calculation temperature, hours of sunshine, wind speed and relative humidity data for the period from October 2015 to September 2016, of the agrometeorological station in the Universidad Autónoma Chapingo was used. The ET<sub>o</sub> was determined using the ETO Calculator software version 3.1 (Food and Agriculture Organization [FAO], 2009). The average volume of water calculated was 38.5 L per tree, which was supplied in each irrigation with the help of a plastic bucket.

For the preparation of the LS treatment, 15 cm after the lateral walls of the strains were loosened after planting with the help of a common pitchfork, reaching a depth of 25 cm (the bottom of the strain was not loosened). The intervention reached up to this distance to generate a planting area the double of the diameter of the tree rootball hence promoting the growth of the roots (Hirons & Thomas, 2018). In the case of the NLS treatment, no action was taken other than to open the strain. Ten days after the establishment of the experiment, the degree of compaction (lb·in<sup>-2</sup> [psi]) was obtained with an analog soil compaction tester (DICKKEY-jhon®, USA) and the depth of penetration was recorded. The results were converted to kg·cm<sup>-2</sup>·cm<sup>-1</sup> depth.

#### Establishment of the rhizotron

For the evaluation of root growth, a transparent glass wall (6 mm thick and 60 cm high by 60 cm wide) was established in each planting strain. This window had the function of a rhizotron (Figure 1) and was randomly established on one of the four sides of the strain (north, south, east or west). It was decided to do it this way,

nivelación y ligera compactación de la zona con tierra agrícola de textura arcillosa.

#### Diseño experimental

El experimento se estableció como un diseño completamente al azar con arreglo factorial, con los factores: a) frecuencia de riego y b) tratamiento del suelo circundante de la cepa de plantación. La frecuencia de riego se dividió en dos niveles: riego frecuente, una vez a la semana (RF), y riego espaciado, una vez cada dos semanas (RE). El tratamiento al suelo circundante de la cepa de plantación también se dividió en dos niveles: suelo sin aflojar (SSA) y suelo aflojado (SA) (Cuadro 1).

La cantidad de agua utilizada para el riego se determinó con base en el parámetro evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de una semana (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006); para su cálculo se utilizaron datos de temperatura, horas brillo solar, velocidad del viento y humedad relativa del periodo octubre del 2015 a septiembre del 2016, de la Estación Agrometeorológica de la Universidad Autónoma Chapingo. La ET<sub>o</sub> se determinó con el *software* ETO Calculator versión 3.1 (Food and Agriculture Organization [FAO], 2009). El volumen promedio de agua calculado fue de 38.5 L por árbol, que se suministró en cada riego con ayuda de una cubeta de plástico.

Para la preparación del tratamiento SA, 15 cm posteriores a las paredes laterales de las cepas se aflojaron después de la plantación con ayuda de un biello común de cuatro dientes, alcanzando una profundidad de 25 cm (el fondo de la cepa no se aflojó). Se intervino hasta esta distancia para generar un área de plantación del doble del diámetro del cepellón del árbol y así favorecer el crecimiento de las raíces (Hirons & Thomas, 2018). Para el caso del tratamiento SSA no se realizó alguna acción aparte de abrir la cepa. Diez días después del establecimiento del experimento, el grado de compactación (lb·in<sup>-2</sup> [psi]) se obtuvo con un medidor análogo de compactación del suelo (DICKKEY-

**Table 1. Experimental treatments to identify the effect of irrigation frequency and planting soil condition on the radical growth of young *Taxodium mucronatum* trees in an urban area.**

**Cuadro 1. Tratamientos del experimento para la identificación del efecto de la frecuencia de riego y condición del suelo de plantación sobre el crecimiento radical de árboles jóvenes de *Taxodium mucronatum* en un área urbana.**

Treatment /	Key / Clave
Spaced irrigation with non-loosened soil / Riego espaciado con suelo sin aflojar	SI-NLS / RE-SSA
Spaced irrigation with loosened soil / Riego espaciado con suelo aflojado	SI-LS / RE-SA
Frequent irrigation with non-loosened soil / Riego frecuente con suelo sin aflojar	FI-NLS / RF-SSA
Frequent irrigation with loosened soil / Riego frecuente con suelo aflojado	FI-LS / RF-SA

because the root system tends to grow radially when it does not face any obstacles. The window was fastened with wooden stakes 2.5 cm thick and 1 m long joined with common wire. The stakes were fixed to the ground with steel rods 9.53 mm (3/8") in diameter and 30 cm long. To observe the rhizotron, a rectangular trench measuring 60 x 60 x 150 cm was excavated on the same side on which the glass was placed. To avoid effects of solar radiation on root growth, the observation trenches were covered with 60 % shade mesh and a layer of *ocoxal* (dry pine acicles) was placed on it to maintain a dark environment (Figure 2). The use of a rhizotron in each tree allowed the obtaining of digital photographs of the root system, which were processed in the ImageJ® software version 1.50i (Rusband, 2016), to quantify the length and number of new roots.

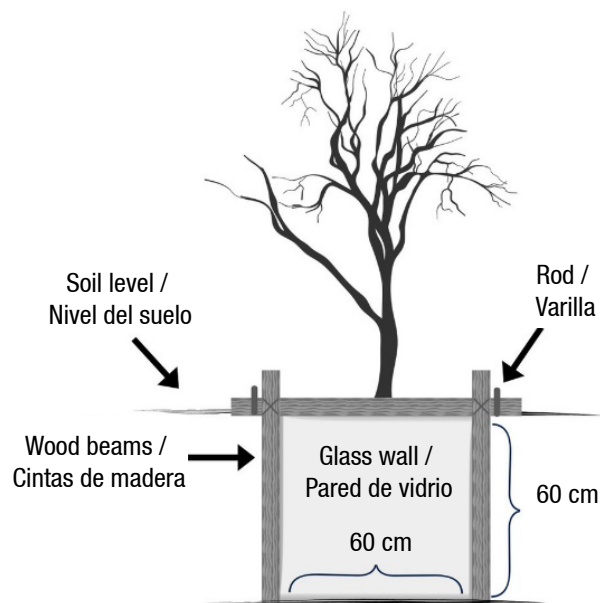
### Planting design

The trees used in the research were produced from seed in an urban tree nursery (GENFOR Landscaping S. A. de C. V) located in Texcoco, Estado de Mexico. Twenty-four (24) four-year-old individuals with an average height of 2.2 m and an average diameter of 2.6 cm, measured at 30 cm from topsoil were used. Six replications were established for each treatment. In the nursery, the trees remained in 30 cm in diameter and 30 cm in height black polyethylene bags. The planting strain measured 30 cm long, 30 cm wide and 30 cm deep. The arrangement of the experimental plot was linear, from north to south,

jhon®, EUA) y se registró la profundidad de penetración. Los resultados se convirtieron a  $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{cm}^{-1}$  de profundidad.

### Establecimiento del rizotrón

Para la evaluación del crecimiento radical se estableció una pared transparente de vidrio (6 mm de espesor y 60 cm de alto por 60 cm de ancho) en cada cepa de plantación. Esta ventana tuvo la función de un rizotrón (Figura 1) y se estableció de manera aleatoria en alguno de los cuatro lados de la cepa (norte, sur, este u oeste). Se decidió hacerlo de esta manera, debido a que el sistema de raíces tiende a crecer en forma radial cuando no enfrenta algún obstáculo. La ventana se sujetó con estacas de madera de 2.5 cm de grosor y 1 m de largo unidas con alambre quemado. Las estacas se fijaron al suelo con varillas de acero de 9.53 mm (3/8") de diámetro y 30 cm de largo. Para observar el rizotrón se excavó una zanja rectangular de 60 x 60 x 150 cm en el mismo lado en que fue colocado el vidrio. Para evitar efectos de la radiación solar sobre el crecimiento radical, las zanjas de observación se cubrieron con malla sombra al 60 % y sobre esta se colocó una capa de *ocoxal* (acículas de pino secas) para mantener un ambiente de oscuridad (Figura 2). El uso de un rizotrón en cada árbol permitió la obtención de fotografías digitales del sistema radical, las cuales se procesaron en el *software* ImageJ® versión 1.50i (Rusband, 2016), para cuantificar la longitud y número de raíces nuevas.



**Figure 1. Rhizotron model used to evaluate the root growth of *Taxodium mucronatum* under different irrigation and soil condition regimes.**

**Figura 1. Modelo de rizotrón utilizado para evaluar el crecimiento radical de *Taxodium mucronatum* bajo diferente régimen de riego y condición de suelo.**



**Figure 2. Appearance of newly planted ahuehuate trees (*Taxodium mucronatum*) with the use of a rhizotron.**

**Figura 2. Aspecto de los árboles de ahuehuate (*Taxodium mucronatum*) recién plantados con el uso de un rizotróon.**

with a spacing of 3 m between trees. The plantation was carried out in October 2016 and the experiment lasted 12 months. Assessments were done every four months after the planting date; in each assessment, observation trenches were uncovered, and digital photographs of the radical system were obtained.

### Statistical analysis

Compaction data in the two surrounding soil conditions were compared using a Student's *t*-test with  $\alpha = 0.1$ . The analysis of variance for the variables of interest (root length and number of roots) was performed with the statistical software SAS® version 9.4 (Statistical Analysis Software Inc. [SAS], 2015). A 90 % reliability level was used because the growth of the root system is complex and highly variable between species and under different soil conditions (Gregory & Kirkegaard, 2017). The means were compared with the Tukey's HSD test ( $\alpha = 0.1$ ) with the following statistical model:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

where,

$Y_{ij}$  = response variable

$\mu$  = general mean

$\alpha_i$  = effect of the *i*-th level of the irrigation factor

$\beta_j$  = effect of the *j*-th level of the soil treatment factor

### Diseño de plantación

Los árboles utilizados en la investigación fueron producidos a partir de semilla en un vivero de árboles urbanos (GENFOR Landscaping S. A. de C. V) ubicado en Texcoco, Estado de México. Se utilizaron 24 individuos de cuatro años con altura promedio de 2.2 m y diámetro promedio de 2.6 cm medido a 30 cm del suelo. Se establecieron seis repeticiones para cada tratamiento. En el vivero, los árboles permanecieron en bolsas de polietileno negro de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura. La cepa de plantación tuvo dimensiones de 30 cm de largo, 30 cm de ancho y 30 cm de profundidad. El arreglo de la parcela experimental fue lineal, de norte a sur, con un espaciamiento de 3 m entre árboles. La plantación se hizo en octubre del 2016 y la duración del experimento fue de 12 meses a partir de esta fecha. Las evaluaciones se hicieron cada cuatro meses posteriores a la fecha de plantación; en cada evaluación se destaparon las zanjas de observación y se obtuvieron las fotografías digitales del sistema radical.

### Análisis estadístico

Los datos de la compactación en las dos condiciones de suelo circundante se compararon a través de una prueba *t* de student con  $\alpha = 0.1$ . El análisis de varianza para las variables de interés (longitud de raíz y número

$\alpha\beta_{ij}$  = interaction between the *i*-th level of the irrigation factor and the *j*-th level of the soil treatment factor  
 $\varepsilon_{ijk}$  = random error.

## Results and discussion

All trees lost foliage during the first four months after planting (October 2016 to February 2017). This can be explained due to the semi-deciduous characteristic of the species, which loses foliage partially from December to January (CONAFOR & CONABIO, 2011; Martínez & Chacalo, 1994); however, root growth was recorded at the fifth month and 60 % of the trees began to show new shoots from the base of the stem. At eight months from planting all trees showed root increase, although the green shoots had dried up, possibly due to seasonal high temperatures. It should be noted that, at the end of the experiment, only 10 trees showed green shoots; however, the analysis was made using data from the 24 trees, since all showed root growth almost until the end of the experiment.

### Soil compaction

Compaction in both soil conditions was low; all measurements were less than 14 kg·cm<sup>-2</sup> (200 psi, 1.38 MPa) at a maximum depth of 29 cm. According to the compaction meter manufacturer's specifications, readings from 0 to 14 kg·cm<sup>-2</sup> indicate soil compaction level where roots can ideally grow (DICKEY-jhon, 2017). It has been documented that the level of compaction that restricts root growth of woody species corresponds to a soil penetration resistance equal to or greater than 20.3 kg·cm<sup>-2</sup> (2 MPa) (Bartzen, Hoelscher, Ribeiro, & Seidel, 2019; Fisher & Binkley, 2000).

The loosened soil of the plantation caused no statistically significant difference in the degree of post-plantation compaction (0.6125 vs. 0.7805 kg·cm<sup>-2</sup>·cm<sup>-1</sup>), because the original soil level was not highly restrictive for root growth and also due to the effect that the opening of the planting strain could have had; therefore, the effect of this practice may be more evident in the medium term. In this work, the loosening of the lateral walls of the planting strain did not cause significantly different effects on the longitudinal growth of the root system and the number of roots ( $P > 0.1$ ), compared to the original conditions of the site. However, several studies have shown that reducing soil resistance, when the degree of compaction is high, does bring benefits to tree growth (Day, Bassuk, & Van Es, 1995; Smiley, Calfee, Fraedrich, & Smiley, 2006; Somerville, May, & Livesley, 2018).

### Root length

Root growth was observed across the rhizotron in all trees (Figure 3); however, root length showed

de raíces) se realizó con el programa estadístico SAS® versión 9.4 (Statistical Analysis Software Inc. [SAS], 2015). Se decidió utilizar un nivel de confiabilidad de 90 %, debido a que el crecimiento del sistema radical es complejo y muy variable entre especies y ante las diferentes condiciones del suelo (Gregory & Kirkegaard, 2017). Las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $\alpha = 0.1$ ) con el modelo estadístico siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

donde,

$Y_{ij}$  = variable de respuesta

$\mu$  = media general

$\alpha_i$  = efecto del *i*-ésimo nivel del factor riego

$\beta_j$  = efecto del *j*-ésimo nivel del factor tratamiento al suelo

$\alpha\beta_{ij}$  = interacción entre el *i*-ésimo nivel del factor riego con el *j*-ésimo nivel del factor tratamiento al suelo

$\varepsilon_{ijk}$  = error aleatorio.

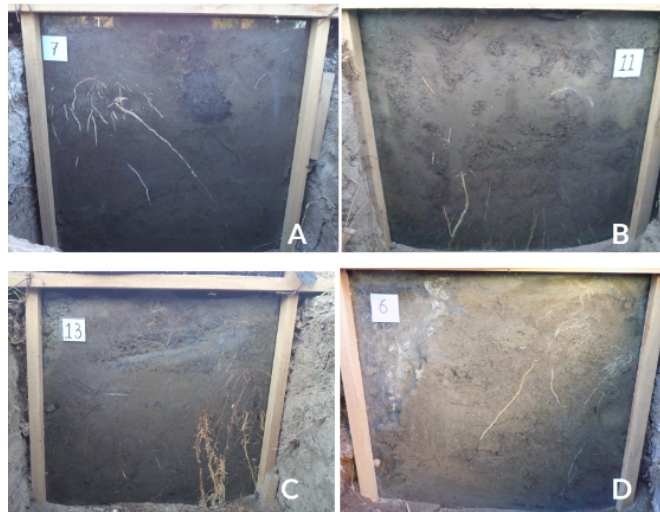
## Resultados y discusión

Todos los árboles perdieron el follaje durante los primeros cuatro meses posteriores a la plantación (octubre del 2016 a febrero del 2017). Esto se puede explicar por la característica subperennifolia de la especie, la cual pierde el follaje parcialmente de diciembre a enero (CONAFOR & CONABIO, 2011; Martínez & Chacalo, 1994); sin embargo, se registró crecimiento radical al quinto mes y 60 % de los árboles comenzaron a mostrar brotes nuevos desde la base del tallo. A los ocho meses de la plantación hubo incremento radical en todos los árboles, aunque los brotes verdes se habían secado, posiblemente por una temporada de temperaturas elevadas. Cabe indicar que, al final del experimento, solo 10 árboles presentaban brotes verdes; no obstante, el análisis se hizo utilizando los datos de los 24 árboles, ya que todos presentaron crecimiento radical casi hasta el final del experimento.

### Compactación del suelo

La compactación en las dos condiciones de suelo fue baja; todas las mediciones fueron menores de 14 kg·cm<sup>-2</sup> (200 psi, 1.38 MPa) a una profundidad máxima de 29 cm. De acuerdo con las especificaciones del fabricante del medidor de compactación, lecturas de 0 a 14 kg·cm<sup>-2</sup> indican nivel de compactación del suelo donde las raíces pueden crecer de manera ideal (DICKEY-jhon, 2017). Se ha documentado que el nivel de compactación que restringe el crecimiento de raíces de especies leñosas corresponde a una resistencia a la penetración del suelo igual o mayor de 20.3 kg·cm<sup>-2</sup> (2 MPa) (Bartzen, Hoelscher, Ribeiro, & Seidel, 2019; Fisher & Binkley, 2000).

El suelo aflojado de la plantación no causó diferencia estadística significativa en el grado de compactación



**Figure 3.** Samples of root growth of *Taxodium mucronatum* in rhizotrons. A) spaced irrigation - non-loosened soil, B) spaced irrigation-loosened soil, C) frequent irrigation - non-loosened soil, D) frequent irrigation-loosened soil.

**Figura 3.** Muestras del crecimiento radical de *Taxodium mucronatum* en los rizotrones. A) riego espaciado-suelo sin aflojar, B) riego espaciado-suelo aflojado, C) riego frecuente-suelo sin aflojar, D) riego frecuente-suelo aflojado.

no statistically significant differences ( $P > 0.1$ ) for irrigation, soil, and their interaction factors (Table 2). This result indicates that the longitudinal growth of the root system of *T. mucronatum* was similar when the same volume of water was supplied once a week or once every two weeks during the first year of plant growth.

An extensive root system is important for plant survival in dry soils (Kozłowski, Kramer, & Pallardy, 1991); therefore, roots can grow further away from the plant when the soil does not have sufficient moisture (Harris, Clark, & Matheny, 2004), because they grow towards where resources are available (Topa, 2004) and soil compaction is not restrictive (Watson et al., 2014b). In contrast, when nutrients and moisture in the soil are sufficient, trees can obtain these resources very close to the stem (Zanetti, Vennetier, Mériaux, & Provansal, 2014). This may explain why, in this research, trees watered every two weeks had similar root length to their frequently watered counterparts, in addition to the fact that the soil did not show restrictive compaction levels; however, root extension may also be affected by environmental conditions, competition with other plants, production method, and tree health (Gilman, 1990).

The ahuehuate demands high levels of humidity in its juvenile stage (CONAFOR & CONABIO, 2011; Martínez & Chacalo, 1994; Villanueva-Díaz et al., 2020); which may explain the similarity in root length when watered with 100 % seven-day ETo and supplied at two irrigation frequencies. In addition, it has been reported that it is more complex to find differences in the growth of

posterior a la plantación ( $0.6125$  vs.  $0.7805 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), debido a que el nivel original del suelo no era altamente restrictivo para el crecimiento de raíces y al efecto que pudo tener abrir la cepa de plantación; por tanto, el efecto de esta práctica puede ser más evidente en un mediano plazo. En este trabajo, el aflojamiento de las paredes laterales de la cepa de plantación no causó efectos significativamente diferentes en el crecimiento longitudinal del sistema radical y el número de raíces ( $P > 0.1$ ), en comparación con las condiciones originales del sitio. No obstante, varios estudios han demostrado que la reducción de la resistencia del suelo, cuando el grado de compactación es alto, sí aporta beneficios al crecimiento de los árboles (Day, Bassuk, & Van Es, 1995; Smiley, Calfee, Fraedrich, & Smiley, 2006; Somerville, May, & Livesley, 2018).

### Longitud radical

En todos los árboles se observó crecimiento radical a través del rizotróon (Figura 3); sin embargo, la longitud de raíz no mostró diferencias estadísticamente significativas ( $P > 0.1$ ) para los factores riego, suelo y su interacción (Cuadro 2). Este resultado indica que el crecimiento longitudinal del sistema radical de *T. mucronatum* fue similar cuando se suministró el mismo volumen de agua una vez por semana o una vez cada dos semanas, durante el primer año de crecimiento.

Un sistema de raíces extenso es importante para la supervivencia de las plantas en suelos secos (Kozłowski, Kramer, & Pallardy, 1991); por tanto, las raíces pueden crecer más lejos de la planta cuando el suelo no cuenta con humedad suficiente (Harris, Clark,



**Table 2. Statistical analysis of the variable root system length (cm) of *Taxodium mucronatum* after 12 months of growth under different irrigation regimes and soil conditions in an urban area.**

**Cuadro 2. Análisis estadístico de la variable longitud del sistema radical (cm) de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento bajo diferente régimen de riego y condición de suelo en un área urbana.**

Factor	P	Level/Nivel	Mean/Media
Irrigation/Riego	0.2238	Frequent/Frevente	360.56 a
		Spaced/Espaciado	270.04 a
Soil/Suelo	0.2242	Non-loosened/Sin aflojar	360.52 a
		Loosened/Aflojado	270.08 a
Irrigation*Soil/ Riego*Suelo	0.2025	FI-NLS/RF-SSA	453.28 a
		FI-LS/RF-SA	267.83 a
		SI-LS/RE-SA	272.32 a
		SI-NLS/RE-SSA	267.75 a

Means followed with the same letter in each factor and interaction are not significantly different according to the Tukey test ( $P = 0.1$ ). SI-NLS = spaced irrigation with non-loosened soil, SI-LS = spaced irrigation with loosened soil, FI-NLS = frequent irrigation with non-loosened soil, FI-LS = frequent irrigation with loosened soil.

Medias seguidas con la misma letra en cada factor e interacción no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P = 0.1$ ). RE-SSA = riego espaciado con suelo sin aflojar, RE-SA = riego espaciado con suelo aflojado, RF-SSA = riego frecuente con suelo sin aflojar, RF-SA = riego frecuente con suelo aflojado.

tree species that require large volumes of water to meet their metabolic and transpiration needs (Craul, 1992). For example, in three species of shrubs (*Ilex cornuta* Lindl. & Paxt, *Pittosporum tobira* Thunb. and *Viburnum odorotissimum* Ker Gawl.), the application of three volumes of irrigation (3, 6 and 9 L) and two frequencies of supply (2 and 4 days) did not cause significant differences ( $P > 0.05$ ) in dry root weight, dry root and dry aerial weight ratio, root biomass and aerial biomass (Gilman et al., 2009). In other studies, frequent irrigation increased survival and growth of newly established palms by 99.4 % (Blair et al., 2019), and decreased stress and improved the growth of *Quercus virginiana* Mill. in the first months after planting (Gilman, 2004), although differences were lost after stopping irrigation.

The use of the rhizotron has been reported as a good *in situ* study methodology to determine the growth of the radical system (Abrisqueta et al., 2008; Guedea-Fernández et al., 2001); however, the results are partial, because only a visible part of the root system is recorded (Lobet & Draye, 2013). It is important to mention that, in this research, the results in root length could be limited when comparing only a part of the radical system of *T. mucronatum*, because the rhizotron only covered a static area of each tree and did not provide information on the total extent and in all directions of the roots (Neumann, George, & Plassard, 2009). For this reason, in some cases it is recommended to supplement or combine the information with other techniques that allow recording greater volume of roots (Lobet & Draye, 2013). In this regard, ground penetration radar has been used to measure the density and architecture

& Matheny, 2004), debido a que estas crecen hacia donde los recursos están disponibles (Topa, 2004) y la compactación del suelo no es restrictiva (Watson et al., 2014b). Por el contrario, cuando los nutrientes y humedad en el suelo son suficientes, los árboles pueden obtener estos recursos muy cerca del tallo (Zanetti, Venetier, Mériaux, & Provansal, 2014). Lo anterior puede explicar la razón por la cual, en esta investigación, los árboles regados cada dos semanas tuvieron longitud radical similar a sus contrapartes regados frecuentemente, además de que el suelo no presentó niveles de compactación restrictiva; sin embargo, la extensión de las raíces también puede ser afectada por condiciones ambientales, la competencia con otras plantas, el método de producción y la salud de los árboles (Gilman, 1990).

El ahuehuate demanda niveles altos de humedad en su etapa juvenil (CONAFOR & CONABIO, 2011; Martínez & Chacalo, 1994; Villanueva-Díaz et al., 2020); esto puede explicar la similitud en la longitud de raíces cuando se regó con 100 % de ETo de siete días y se suministró en dos frecuencias de riego. Sumado a lo anterior, se ha reportado que es más complejo encontrar diferencias en el crecimiento de especies de árboles que requieren grandes volúmenes de agua, para satisfacer sus necesidades metabólicas y de transpiración (Craul, 1992). Por ejemplo, en tres especies de arbustos (*Ilex cornuta* Lindl. & Paxt, *Pittosporum tobira* Thunb. y *Viburnum odorotissimum* Ker Gawl.), la aplicación de tres volúmenes de riego (3, 6 y 9 L) y dos frecuencias de suministro (2 y 4 días) no causó diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) en el peso seco de la raíz, relación peso seco de raíz y peso seco

of tree roots in urban environments (Bassuk, Raffel, & Sax, 2019; Lantini et al., 2019), as well as the X-ray computed tomography, for the visualization of the architecture of the root system through the ground in a non-destructive manner (Gao, Schlüter, Blaser, Shen, & Vetterlein, 2019). The use of other joint techniques is recommended if conditions permit.

### Number of roots

The number of roots showed significant differences for the irrigation factor ( $P = 0.0643$ ) and the interaction irrigation\*soil ( $P = 0.0877$ ) (Table 3). Frequently watered trees (FI) established on non-loosened soil (NLS) developed a higher number of roots (Figure 4), indicating a more fibrous root system compared to the SI-NLS treatment. This result is explained because watered trees frequently retained higher moisture in the soil and, according to Harris et al. (2004), roots branch out more when they grow on moist, fertile, well-ventilated soils. It has also been observed that frequent water supply develops more roots; for example, frequent watering in the first weeks after planting *Acer rubrum* L., in containers, generated more roots and greater radial distribution (Gilman, Grabosky, Stodola, & Marshall, 2003). Moreover, the monthly production of fine roots of *Abies balsamea* L. Mill. (Olesinski, Lavigne, & Krasowski, 2011) and the number of root tips of *Prunus cerasifera* Ehrh. (Cochavi, Rachmilevitch, & Bel, 2019) increased when soil water content increased with irrigation. Combined with the above, the clay soil in the study area could influence a greater branching of the roots, since, according to Zanetti et al. (2014), the number of roots may increase when trees grow on fine textured soils.

de la parte aérea, biomasa de la raíz y biomasa de la parte aérea (Gilman et al., 2009). En otros estudios, el riego frecuente aumentó la supervivencia y crecimiento de palmeras recién establecidas en 99.4 % (Blair et al., 2019), y disminuyó el estrés y mejoró el crecimiento de *Quercus virginiana* Mill. en los primeros meses después de la plantación (Gilman, 2004), aunque las diferencias se perdieron después de suspender el riego.

El uso del rizotrón se ha reportado como una buena metodología de estudio *in situ* para determinar el crecimiento del sistema radical (Abrisqueta et al., 2008; Guedea-Fernández et al., 2001); sin embargo, los resultados son parciales, debido a que solo se registra una parte visible del sistema de raíces (Lobet & Draye, 2013). Es importante mencionar que, en esta investigación, los resultados de longitud de raíces pudieron verse limitados al solo comparar una parte del sistema radical de *T. mucronatum*, debido a que el rizotrón únicamente cubrió un área estática de cada árbol y no proporcionó información sobre la extensión total y en todas las direcciones de las raíces (Neumann, George, & Plassard, 2009). Por tal motivo, en algunos casos se recomienda complementar o combinar la información con otras técnicas que permitan registrar mayor volumen de raíces (Lobet & Draye, 2013). Al respecto, el radar de penetración terrestre se ha utilizado para la medición de la densidad y arquitectura de las raíces de árboles en ambientes urbanos (Bassuk, Raffel, & Sax, 2019; Lantini et al., 2019), y la tomografía computarizada de rayos X, para la visualización de la arquitectura del sistema radical a través del suelo de manera no destructiva (Gao, Schlüter, Blaser, Shen, & Vetterlein, 2019). El uso de otras técnicas conjuntas se recomienda siempre y cuando las condiciones lo permitan.

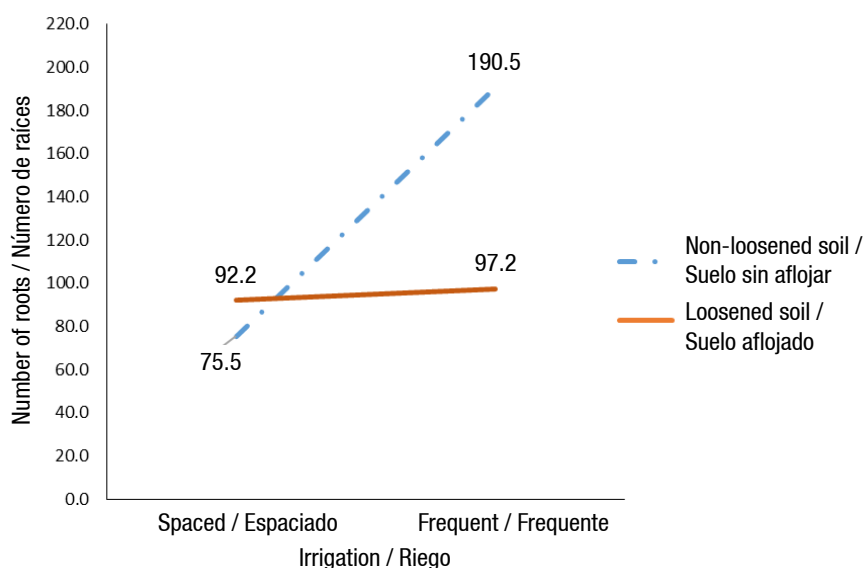
**Table 3. Statistical analysis for the number of roots of *Taxodium mucronatum* after 12 months of growth under different irrigation regimes and soil conditions in an urban area.**

**Cuadro 3. Análisis estadístico para el número de raíces de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento bajo diferente régimen de riego y condición de suelo en un área urbana.**

Factor	P	Level/Nivel	Mean/Media
Irrigation/Riego	0.0643	Frequent/Frecuente	143.83 a
		Spaced/Espaciado	83.83 b
Soil/Suelo	0.2253	Non-loosened/Sin aflojar	133.00 a
		Loosened/Aflojado	94.67 a
Irrigation*Soil/ Riego*Suelo	0.0877	FI-NLS/RF-SSA	190.50 a
		FI-LS/RF-SA	97.16 ab
		SI-LS/RE-SA	92.16 ab
		SI-NLS/RE-SSA	75.50 b

Means followed with the same letter in each factor and interaction are not significantly different according to the Tukey test ( $P = 0.1$ ). SI-NLS = spaced irrigation with non-loosened soil, SI-LS = spaced irrigation with loosened soil, FI-NLS = frequent irrigation with non-loosened soil, FI-LS = frequent irrigation with loosened soil.

Medias seguidas con la misma letra en cada factor e interacción no son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $P = 0.1$ ). RE-SSA = riego espaciado con suelo sin aflojar, RE-SA = riego espaciado con suelo aflojado, RF-SSA = riego frecuente con suelo sin aflojar, RF-SA = riego frecuente con suelo aflojado.



**Figure 4. Interaction between irrigation and soil treatment in response to the number of developed roots of *Taxodium mucronatum* after 12 months of growth, under different irrigation regimes and soil conditions in an urban area.**  
**Figura 4. Interacción entre el riego y tratamiento al suelo en respuesta al número de raíces desarrolladas de *Taxodium mucronatum* después de 12 meses de crecimiento, bajo diferente régimen de riego y condición de suelo en un área urbana.**

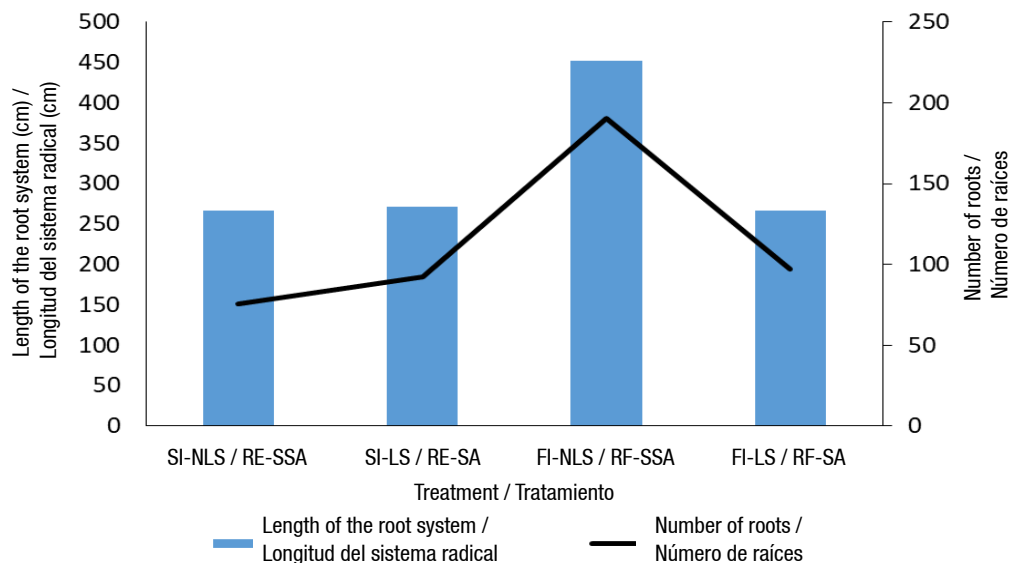
It is important to note that, although the number of roots was similar in both soil conditions, there was a higher number of roots in the soil without loosening, probably due to the fact that it did not show restrictive compaction for growth and that when the planting strain was made, the compaction could have been decreased. On the other hand, *T. mucronatum* is a species typical of riparian vegetation that can grow successfully in conditions of flooding (Lesur, 2011); this means that it is adapted to poorly drained soils (CONAFOR & CONABIO, 2011) and with low levels of aeration, so the loosening of the soil could have increased the proportion of macropores and thus the level of oxygen, decreasing the moisture retention and causing the number of roots to be higher in the soil that was not loosened. High levels of compaction restrict root growth (Watson et al., 2014b); however, when water content is ideal, the negative effects of soil compaction on tree growth may be reduced (Bulmer & Simpson, 2005). Sometimes, the water content in the soil has a greater impact on plant growth than compaction (Blouin, Schmidt, Bulmer, & Krzic, 2008), as happened in the present work.

Spaced irrigation treatments (SI) generated fewer roots (Figure 5), probably because deficit irrigation can decrease the growth of urban trees (Martinez, Cavagnaro, Roig, & Cantón, 2013) and to the high need for moisture of *T. mucronatum* (CONAFOR & CONABIO, 2011; Martínez & Chacalo, 1994; Villanueva-Díaz et al., 2020); therefore, and according to Kozłowski (1987), trees watered frequently and with more roots manage to absorb water more effectively (Figure 5). Although

#### Número de raíces

El número de raíces mostró diferencias significativas para el factor riego ( $P = 0.0643$ ) y la interacción riego\*suelo ( $P = 0.0877$ ) (Cuadro 3). Los árboles regados frecuentemente (RF) y establecidos sobre suelo sin aflojar (SSA) desarrollaron mayor número de raíces (Figura 4), lo cual indica un sistema radical más fibroso en comparación con el tratamiento RE-SSA. Este resultado se explica debido a que los árboles regados frecuentemente retuvieron mayor humedad en el suelo y, de acuerdo con Harris et al. (2004), las raíces ramifican más cuando crecen en suelos húmedos, fértiles y bien aireados. Asimismo, se ha observado que el suministro frecuente de agua desarrolla mayor número de raíces; por ejemplo, el riego frecuente en las primeras semanas posteriores a la plantación de *Acer rubrum* L., en contenedores, generó mayor número de raíces y mayor distribución radial (Gilman, Grabosky, Stodola, & Marshall, 2003). Por otra parte, la producción mensual de raíces finas de *Abies balsamea* L. Mill. (Olesinski, Lavigne, & Krasowski, 2011) y el número de puntas de raíz de *Prunus cerasifera* Ehrh. (Cochavi, Rachmilevitch, & Bel, 2019) aumentaron cuando el contenido de agua del suelo incrementó con los riegos. Aunado a lo anterior, el suelo arcilloso del área de estudio pudo influir en una mayor ramificación de las raíces, ya que, de acuerdo con Zanetti et al. (2014), el número de raíces puede incrementar cuando los árboles se desarrollan en suelos de textura fina.

Es importante resaltar que, aunque el número de raíces fue similar en las dos condiciones de suelo, hubo mayor



**Figure 5.** Radical length and number of roots of *Taxodium mucronatum* per treatment 12 months after planting, under different irrigation regimes and soil conditions in an urban area. SI-NLS = spaced irrigation with non-loosened soil, SI-LS = spaced irrigation with loosened soil, FI-NLS = frequent irrigation with non-loosened soil, FI-LS = frequent irrigation with loosened soil.

**Figura 5.** Longitud radical y número de raíces de *Taxodium mucronatum* por tratamiento a 12 meses de la plantación, bajo diferente régimen de riego y condición de suelo en un área urbana. RE-SSA = riego espaciado con suelo sin aflojar, RE-SA = riego espaciado con suelo aflojado, RF-SSA = riego frecuente con suelo sin aflojar, RF-SA = riego frecuente con suelo aflojado.

there are no statistically significant differences in the root length variable, the number of roots is considered the most appropriate parameter for measuring rooting density (Smit, George, & Groenworld, 2000). It is important to remember that the genetic pool of a plant controls the development, size, shape and function of the root system, but environmental and management conditions can alter the expression of these characteristics (Harris et al., 2004), so the results of this research could also be affected by the environmental conditions of the study area.

## Conclusions

The loosened soil did not improve longitudinal growth of the root system of the ahuehuete (*Taxodium mucronatum*), nor did it promote a higher number of roots; however, the result was based on information from the visible part of the root system of the trees and in the fact that the original compaction level did not present restrictive levels for growth. On the other hand, the highest number of roots was obtained in trees treated with irrigation once a week. It is recommended to conduct research considering soil compaction levels that limit root growth, variation in the volume of irrigation water and increase of observations of the development of the radical system, to determine best practices of establishment and maintenance of new plantations of young trees in urban environments.

número de raíces en el suelo sin aflojamiento, debido probablemente a que este no mostró compactación restrictiva para el crecimiento y a que cuando se hizo la cepa de plantación se pudo disminuir la compactación. Por otra parte, *T. mucronatum* es una especie típica de vegetación ribereña que puede crecer satisfactoriamente en condiciones de inundación (Lesur, 2011); esto significa que está adaptada a suelos mal drenados (CONAFOR & CONABIO, 2011) y con niveles bajos de aireación, por lo que el aflojamiento del suelo pudo aumentar la proporción de macroporos y con ello el nivel de oxígeno, disminuyendo la retención de humedad y ocasionando que el número de raíces fuera más alto en el suelo que no fue aflojado. Los niveles altos de compactación restringen el crecimiento de las raíces (Watson et al., 2014b); sin embargo, cuando el contenido de agua es ideal, los efectos negativos de la compactación del suelo sobre el crecimiento de los árboles pueden reducirse (Bulmer & Simpson, 2005). En ocasiones, el contenido de agua en el suelo tiene mayor impacto en el crecimiento de las plantas que la compactación (Blouin, Schmidt, Bulmer, & Krzic, 2008), tal como sucedió en el presente trabajo.

Los tratamientos con riego espaciado (RE) generaron menor número de raíces (Figura 5), debido probablemente a que el riego deficitario puede disminuir el crecimiento de árboles urbanos (Martínez, Cavagnaro, Roig, & Cantón, 2013) y a la alta necesidad

## Acknowledgements

The authors thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the postgraduate scholarship awarded to the first author, as well as the staff of the wastewater treatment plant at Universidad Autónoma Chapingo for the facilities provided.

### End of English version

## References / Referencias

- Abrisqueta, J. M., Mounzer, O., Álvarez, S., Conejero, W., García-Orellana, Y., Tapia, L. M., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2008). Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 95(8), 959–967. doi: 10.1016/j.agwat.2008.03.003
- Allen, G. R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Retrieved from <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Bartzen, B., Hoelscher, G., Ribeiro, L., & Seidel, E. (2019). How the soil resistance to penetration affects the development of agricultural crops? *Journal of Experimental Agriculture International*, 30(5), 1–17. doi: 10.9734/JEAI/2019/46589
- Bassuk, N., Raffel, G., & Sax, M. S. (2019). Root growth of Accolade™ elm in structural soil under porous and nonporous asphalt after twelve years. *Arboriculture & Urban Forestry*, 45(6), 297–302. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/336678932\\_Root\\_Growth\\_of\\_Accolade\\_Elm\\_in\\_Structural\\_Soil\\_Under\\_Porous\\_and\\_Nonporous\\_Aspphalt\\_After\\_Twelve\\_Years](https://www.researchgate.net/publication/336678932_Root_Growth_of_Accolade_Elm_in_Structural_Soil_Under_Porous_and_Nonporous_Aspphalt_After_Twelve_Years)
- Benítez, B. G., Pulido, S. M. T., & Equihua, Z. M. (2004). *Árboles multiusos nativos de Veracruz para reforestación, restauración y plantaciones*. Veracruz, México: Instituto de Ecología, A. C.
- Blair, S. A., Koeser, A. K., Knox, G. W., Roman, L. A., Thetford, M., & Hilbert, D. R. (2019). Health and establishment of highway plantings in Florida (United States). *Urban Forestry & Urban Greening*, 43, 1–13. doi: 10.1016/j.ufug.2019.126384
- Blouin, V. M., Schmidt, M. G., Bulmer, C. E., & Krzic, M. (2008). Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2444–2452. doi: 10.1016/j.foreco.2008.01.008
- Bulmer, C. E., & Simpson, D. G. (2005). Soil compaction and water content as factors affecting the growth of lodgepole pine seedlings on sandy clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(5), 667–679. doi: 10.4141/S04-055
- Busch, J., Mendelsohn, I. A., Lorenzen, B., Brix, H., & Miao, S. (2006). A rhizotron to study root growth under flooded conditions tested with two wetland Cyperaceae. *Flora*, 201, 429–439. doi: 10.1016/j.flora.2005.08.007
- Cochavi, A., Rachmilevitch, S., & Bel, G. (2019). The effect of irrigation regimes on plum (*Prunus cerasifera*) root system

de humedad de *T. mucronatum* (CONAFOR & CONABIO, 2011; Martínez & Chacalo, 1994; Villanueva-Díaz et al., 2020); por tanto, y de acuerdo con Kozlowski (1987), los árboles regados frecuentemente y con mayor número de raíces logran absorber el agua de manera más eficaz (Figura 5). A pesar de no obtener diferencias estadísticas significativas en la variable longitud de raíz, se considera que el número de raíces es el parámetro más apropiado, para medir la densidad de enraizamiento (Smit, George, & Groenworld, 2000). Es importante recordar que la composición genética de una planta controla el desarrollo, tamaño, forma y función del sistema radical, pero las condiciones medioambientales y de manejo pueden alterar la expresión de estas características (Harris et al., 2004), por lo que los resultados de esta investigación también pudieron verse afectados por las condiciones ambientales del área de estudio.

## Conclusiones

El suelo aflojado no mejoró el crecimiento longitudinal del sistema radical del ahuehuete (*Taxodium mucronatum*) ni promovió mayor número de raíces; sin embargo, el resultado se basa en la información de la parte visible del sistema radical de los árboles y en que el nivel de compactación original no presentaba niveles restrictivos para el crecimiento. Por otra parte, el mayor número de raíces se obtuvo en los árboles tratados con riego una vez por semana. Se recomienda realizar investigación considerando niveles de compactación del suelo que limiten el crecimiento de las raíces, variación del volumen de agua de riego e incremento de las observaciones del desarrollo del sistema radical, para la determinación de mejores prácticas de establecimiento y mantenimiento de nuevas plantaciones de árboles jóvenes en entornos urbanos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de posgrado otorgada al primer autor, así como al personal de la planta tratadora de aguas residuales de la Universidad Autónoma Chapingo por las facilidades brindadas.

### Fin de la versión en español

- development dynamics. *Plant Biosystems*, 153(4), 529–537. doi: 10.1080/11263504.2018.1508087
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2010). Ahuehuete, *Taxodium mucronatum*. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Poster-Ahuehuete-Historico.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) & Comisión Nacional el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2011). *Taxodium mucronatum* Ten. Retrieved from

- <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/1011Taxodium%20mucronatum.pdf>
- Craul, P. J. (1992). *Urban soil in landscape design*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010a). Contemporary concepts of root system architecture of urban trees. *Arbiculture and Urban Forestry*, 36(4), 149–159. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=36&IssueID=4>
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010b). Tree root ecology in the urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Arbiculture & Urban Forestry*, 36(5), 193–205. Retrieved from <https://www.urbanforestry.frec.vt.edu/documents/articles/2010Arbiculture.pdf>
- Day, S. D., Bassuk, N. L., & Van Es, H. (1995). Effects of four compaction remediation methods for landscape trees on soil aeration, mechanical impedance and tree establishment. *Journal of Environmental Horticulture*, 13(2), 64–71. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/285403998\\_Effects\\_of\\_Four\\_Compaction\\_Remediation\\_Methods\\_for\\_Landscape\\_Trees\\_on\\_Soil\\_AerationMechanical\\_Impedance\\_and\\_Tree\\_Establishment](https://www.researchgate.net/publication/285403998_Effects_of_Four_Compaction_Remediation_Methods_for_Landscape_Trees_on_Soil_AerationMechanical_Impedance_and_Tree_Establishment)
- DICKEY-jhon (2017). Soil compaction tester: Installation instructions. Retrieved from [dickey-john.com/product/soil-compaction-tester/](http://dickey-john.com/product/soil-compaction-tester/)
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2009). ETo Calculator version 3.1. Land and water digital media series no. 36. Rome, Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/es/>
- Fisher, R. F., & Binkley, D. (2000). *Ecology and management of forest soils* (3<sup>rd</sup> ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Fitter, A. (2002). Characteristics and functions of root systems. In Y. Waisel, A. Eshel, T. Beeckman & U. Kafkafi (Eds.), *Plant roots the hidden half* (3<sup>rd</sup> ed., pp. 21). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press. doi: 10.1201/9780203909423
- Gao, W., Schlüter, S., Blaser, S. R. G. A., Shen, J., & Vetterlein, D. (2019). A shape-based method for automatic and rapid segmentation of roots in soil from X-ray computed tomography images: Routine. *Plant Soil*, 441, 643–655. doi: 10.1007/s11104-019-04053-6
- Gilman, E. F. (1990). Tree root growth and development II. Response to culture, management and planting. *Journal of Environmental Horticulture*, 8(4), 220–227. doi: 10.24266/0738-2898-8.4.220
- Gilman, E. F. (2004). Effects of amendments, soil additives, and irrigation on tree survival and growth. *Journal of Arbiculture*, 30(5), 301–304. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=30&IssueID=5>
- Gilman, E. F., Grabosky, J., Stodola, A., & Marshall, M. D. (2003). Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *Journal of Arbiculture*, 29(4), 231–235. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=29&IssueID=4>
- Gilman, E. F., Wiese, C. L., Paz, M., Shober, A. L., Scheiber, S. M., Moore, K. A., & Brennan, M. (2009). Effects of irrigation volume and frequency on shrub establishment in Florida. *Journal of Environmental Horticulture*, 27(3), 149–154. doi: 10.24266/0738-2898-27.3.149
- Gregory, P. J., & Kirkegaard, J. A. (2017). Growth and function of root systems. In D. J. Murphy, B. Thomas, & B. Murray (Eds.), *Encyclopedia of applied plant sciences* (2<sup>nd</sup> ed., pp. 230–237). Oxford: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00127-1
- Guedea-Fernández, G., Arriaga-Frias, A., & De la Cruz-Guzmán, G. (2001). El efecto de maceta y el rizotróf: una herramienta para la investigación y docencia. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2), 115–121. Retrieved from [https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id\\_articulo=352&doi=1111&id\\_revista=3](https://chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?id_articulo=352&doi=1111&id_revista=3)
- Guevara, A., Pancotto, V., Mastrantonio, L., & Giordano, C. V. (2018). Fine roots of *Prosopis flexuosa* trees in the field. Plant and soil variables that control their growth and depth distribution. *Plant Ecology*, 219, 1399–1412. doi: 10.1007/s11258-018-0889-0
- Harris, R. W., Clark, J. R., & Matheny, N. P. (2004). *Arbiculture: Integrated management of landscape trees, shrubs, and vines* (4a ed.). USA: Prentice Hall.
- Hirons, A. D., & Thomas, P. A. (2018). *Applied tree biology*. Oxford, UK: John Wiley & Sons.
- Kozłowski, T. T. (1987). Soil moisture and absorption of water by tree roots. *Journal of Arbiculture*, 13(2), 39–46. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/request.asp?JournalID=1&ArticleID=2133&Type=2>
- Kozłowski, T. T., Kramer, P. J., & Pallardy, S. G. (1991). *The physiological ecology of woody plants*. USA: Academic Press.
- Lantini, L., Alani, A. M., Giannakis, I., Benedetto, A., & Tosti, F. (2019). Application of ground penetrating radar for mapping tree root system architecture and mass density of street trees. *Advances in Transportation Studies*, 3, 51–62. Retrieved from <http://www.atsinternationaljournal.com/index.php/2019-issues/special-issue-2019-vol3>
- Lell, J. (2006). *Arbolado urbano. Implantación y cuidados de árboles para veredas*. Buenos Aires, Argentina: Orientación Gráfica Editora.
- Lesur, L. (2011). *Árboles de México*. México: Trillas.
- Lobet, G., & Draye, X. (2013). Novel scanning procedure enabling the vectorization of entire rhizotron-grown root systems. *Plant Methods*, 9(1), 2–10. doi: 10.1186/1746-4811-9-1
- Ludovici, K. H. (2004). Tree roots and their interaction with soil. In J. Burley, J. Evans, & J. A. Youngquist (Eds.), *Encyclopedia of forest sciences* (pp. 1195–1201). Oxford: Elsevier. doi: 10.1016/B0-12-145160-7/00246-5
- Martínez, C. F., Cavagnaro, J. B., Roig, F. A., & Cantón, M. A. (2013). Respuesta al déficit hídrico en el crecimiento de forestales del bosque urbano de Mendoza: Análisis comparativo en árboles jóvenes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional de Cuyo*, 45(2), 47–64. Retrieved from [http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos\\_digitales/6032/t45-2-04-martinez.pdf](http://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/6032/t45-2-04-martinez.pdf)
- Martínez, G. L., & Chacalo, H. A. (1994). *Los árboles de la Ciudad de México*. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco.
- Mohamed, A., Monnier, Y., Mao, Z., Lobet, G., Maeght, J., Ramel, M., & Stokes, A. (2017). An evaluation of inexpensive

- methods for root image acquisition when using rhizotrons. *Plant Methods*, 13, 1–13. doi: 10.1186/s13007-017-0160-z
- Nadezhdina, N., & Cermák, J. (2003). Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. *Journal of Experimental Botany*, 54(387), 1511–1521. doi: 10.1093/jxb/erg154
- Neumann, G., George, T. S., & Plassard, C. (2009). Strategies and methods for studying the rhizosphere—the plant science toolbox. *Plant and Soil*, 321, 431–456. doi: 10.1007/s11104-009-9953-9
- Olesinski, J., Lavigne M. B., & Krasowski M. J. (2011). Effects of soil moisture manipulations on fine root dynamics in a mature balsam fir (*Abies balsamea* L. Mill.) forest. *Tree Physiology*, 31(3), 339–348. doi: 10.1093/treephys/tpr006
- Rasband, W. S. (2016). ImageJ 1.50i. Maryland, USA: National Institute of Mental Health. Retrieved from <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>
- Richardson-Calfee, L. E., Harris, J. R., Jones, R. H., & Fanelli, J. K. (2010). Patterns of root production and mortality during transplant establishment of landscape-size sugar maple. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 135(3), 203–211. doi: 10.21273/JASHS.135.3.203
- Roman, L. A., Walker, L. A., Martineau, C. M., Muffly, D. J., MacQueen, S. A., & Harris, W. (2015). Stewardship matters: Case studies in establishment success of urban trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14(4), 1174–1182. doi: 10.1016/j.ufug.2015.11.001
- Ryser, P. (2006). The mysterious root length. *Plant and Soil*, 286(1), 1–6. doi: 10.1007/s11104-006-9096-1
- Silva, D. D., & Beeson, R. C. (2011). A large-volume rhizotron for evaluating root growth under natural-like soil moisture conditions. *HortScience*, 46(12), 1677–1682. doi: 10.21273/HORTSCI.46.12.1677
- Smiley, E. T., Calfee, L., Fraedrich, B. R., & Smiley, E. J. (2006). Comparison of structural and noncompacted soils for trees surrounded by pavement. *Arboriculture and Urban Forestry*, 32(4), 164–169. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/request.asp?JournalID=1&ArticleID=2952&Type=2>
- Smit, A. L., George, E., & Groenworld, J. (2000). Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. In A. L. Smit, A. G. Bengough, C. Engels, M. van Noordwijk, S. Pellerin, & S. C. van de Geijn (Eds.), *Root methods: a handbook*. Berlin, Germany: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-662-04188-8\_8
- Somerville, P. D., May, P. B., & Livesley, S. J. (2018). Effects of deep tillage and municipal green waste compost amendments on soil properties and tree growth in compacted urban soils. *Journal of Environmental Management*, 227, 365–374. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.09.004
- Statistical Analysis Software Inc. (SAS). (2015). SAS® 9.4. In database products: User's guide (6th ed.). Cary, NC, USA: Author. Retrieved from <https://support.sas.com/en/documentation.html>
- Stokes, A., Fourcaud, T., Hruska, J., Cermak, J., Nadyezhdina, N., Nadyezhdin, V., & Praus, L. (2002). An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar. *Journal of Arboriculture*, 28(1), 2–10. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/279710679\\_An\\_evaluation\\_of\\_different\\_methods\\_to\\_investigate\\_root\\_system\\_architecture\\_of\\_urban\\_trees\\_in\\_situ\\_I\\_ground\\_penetrating\\_radar](https://www.researchgate.net/publication/279710679_An_evaluation_of_different_methods_to_investigate_root_system_architecture_of_urban_trees_in_situ_I_ground_penetrating_radar)
- Topa, M. A. (2004). Root system physiology. In J. Burley (Ed.), *Encyclopedia of forest sciences* (pp. 1606–1615). Oxford, UK: Academic Press. doi: 10.1016/B0-12-145160-7/00102-2
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Beramendi-Orozco, L., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Astudillo-Sánchez, C. C., ... Cerano-Paredes, J. (2020). The climatic response of baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) in San Luis Potosí, Mexico. *Trees*, 34, 623–635. doi: 10.1007/s00468-019-01944-0
- Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014a). The management of tree root systems in urban and suburban settings II: A review of strategies to mitigate human impacts. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(5), 249–271. Retrieved from <http://joa.isa-arbor.com/request.asp?JournalID=1&ArticleID=3331&Type=2>
- Watson, G. W., Hewitt, A. M., Custic, M., & Lo, M. (2014b). 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/request.asp?JournalID=1&ArticleID=3326&Type=2>
- Zanetti, C., Vennetier, M., Mériaux, P., & Provansal, M. (2014). Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions. *Plant and Soil*, 387, 21–35. doi: 10.1007/s11104-014-2253-z