

SISTEMA RADICULAR DE LOS ÁRBOLES EN ÁMBITOS URBANOS

Sandra Rizzardi¹ y Gabriela H. Calvo¹

Fecha de recepción: octubre 2018

Fecha aceptación: enero 2019

RESUMEN

La ciudad nació en íntima relación con lo natural, sin embargo, a partir del progreso, su crecimiento tuvo como consecuencia que esta vinculación se hiciera más difusa. Afortunadamente, en las últimas décadas la sociedad ha tomado conciencia del impacto que tienen los lazos entre la urbe y su entorno y entre la urbe y lo natural que la habita. La ciudad empieza a verse a sí misma como un ecosistema, en el cual lo ambiental ha ganado preponderancia, donde cada uno de sus componentes (ejemplo: el arbolado urbano) requiere de un conocimiento de su biología, comportamiento y beneficios para la sociedad.

En estos momentos, más que nunca, la vegetación y los árboles que se desarrollan en las ciudades resultan esenciales por los extensos beneficios que proporcionan al medio ambiente y a sus habitantes. Por lo tanto, el principal objetivo de esta era debe implicar la sustentabilidad del medio de manera tal de garantizar la salud de todos los seres vivos que lo habitan, promover y garantizar el desarrollo apropiado de sus árboles, minimizar los costos de mantenimiento y mejorar la calidad de vida de las personas que lo habitan. Consecuentemente, y debido al importante crecimiento de las instalaciones subterráneas, es necesario cuidar y preservar los árboles del entorno urbano proponiendo estrategias apropiadas.

Sin embargo, a la hora de concentrarnos en la evaluación de ejemplares, resulta de vital importancia entender la morfología y la fisiología de la raíz en vinculación con la parte aérea de la planta y el suelo. Las raíces son el soporte de los árboles y les proveen de agua y minerales, por ello están íntimamente ligadas al suelo que exploran. En espacios urbanos el entorno subterráneo con el que cuentan las raíces suele ser hostil y restrictivo para el crecimiento, lo cual promueve un desarrollo pobre y poco saludable pero, además, debido a que se desarrollan en un mundo subterráneo resultan ser un desafío a la hora de realizar cualquier trabajo de evaluación, medición y cuantificación. Este trabajo tiene por objetivo la recopilación de información referente a las características del sistema radicular, los efectos del suelo en su crecimiento y métodos posibles de cuantificación y mapeo del sistema

radicular, lo que resulta pertinente a la hora de analizar, evaluar y proteger los árboles y sus sistemas radiculares particularmente en entornos urbanos.

SUMMARY

Cities were born in an intimate relationship with nature, nevertheless, because of progress, this connection became progressively diffuse. Fortunately, in recent decades, society has become aware of the impact of this links between the city and its surroundings and between the city and the natural elements that inhabit it. Consequently, the city is considered as an Ecosystem, in which the Environmental has gained preponderance, where each of its components (example: urban trees) requires knowledge of its biology, behavior and benefits for the whole society.

Nowadays, more than ever, the vegetation and particularly the trees that grow within the city are essential because of the extensive benefits they provide to the environment and its inhabitants. Therefore, the main objective of this era must involve the sustainability of the environment to guarantee health quality of all the living beings in it, promote and support the proper tree development, minimize maintenance costs and improve life quality. Consequently, and due to the important growth of underground facilities, it is essential to take care of and preserve urban trees by proposing appropriate strategies.

However, when focusing on the evaluation of specimens, it is vital to understand the morphology and physiology of the root system in relation to the aerial part of the plant and the ground. The roots provide support, water and minerals, which is why they are intimately connected to the soil. In urban spaces, the underground environment of the root system tends to be hostile and growth restrictive, which promotes poor and unhealthy development, but also because they grow in underground conditions, they become a great challenge when carrying out any evaluation, measurement or quantification work. The objective of this work is to gather information regarding the characteristics of the root system, the effects of soil on root growth and possible methods of root system quantification and mapping, which is relevant particularly in urban environments.

RESUMO

A cidade nasceu em íntima relação com o natural, no entanto, a partir do progresso, seu crescimento teve como consequência que esta conexão se tornasse mais difusa.

Felizmente, nas últimas décadas, a sociedade tomou consciência do impacto das ligações entre a cidade e seus arredores e entre a cidade e o ambiente natural que a habita. A cidade começa a verse como um ecossistema em que as questões ambientais têm ganhado destaque, onde cada um de seus componentes (por exemplo, árvores urbanas) requer um conhecimento de sua biologia, comportamento e benefícios sociais.

Nestes momentos, mais do que nunca, a vegetação e as árvores que se desenvolvem nas cidades são essenciais para os amplos benefícios que proporcionam ao meio ambiente e a seus habitantes. Portanto, o principal objetivo desta era deve envolver sustentabilidade significa, de modo a garantir a saúde de todos os seres vivos que o habitam, promover e assegurar o bom desenvolvimento das suas árvores, minimizar os custos de manutenção e melhorar qualidade de vida das pessoas que nele habitam. Conseqüentemente, e devido ao importante crescimento das instalações subterrâneas, é necessário cuidar e preservar as árvores do ambiente urbano, propondo estratégias apropriadas.

No entanto, quando o foco sobre a avaliação de cópias, é essencial para compreender a morfologia e fisiologia de raiz em conexão com a parte aérea da planta e chão as raízes são o suporte das árvores e fornecem água e minerais, razão pela qual estão intimamente ligadas ao solo que exploram. Nas áreas urbanas, o ambiente subterrâneo tem raízes muitas vezes hostil e restritiva para o crescimento, que promove pobre e em desenvolvimento insalubre, mas também porque eles são desenvolvidos em um mundo as condições subterrâneas são um desafio ao realizar qualquer trabalho de avaliação, medição e quantificação. Este trabalho visa a recolha de informação sobre as características do sistema radicular, os efeitos do solo no crescimento e possíveis métodos de quantificação e mapeamento do sistema radicular, o que é relevante na análise, avaliação e proteger árvores e seus sistemas radiculares, particularmente em ambientes urbanos.

INTRODUCCION

En la actualidad, más de la mitad de la población mundial vive en ámbitos urbanos y esta tendencia se espera que aumente para mediados de nuestro siglo (ONU, 2018) por lo tanto la ciudad se ha transformado en el paisaje cultural por antonomasia, y en la cual se han producido grandes cambios en los patrones de asentamiento (Priego González de Canales, 2002).

Este autor menciona que las ciudades estuvieron vinculadas con el entorno natural desde el comienzo de la historia obteniendo de este modo todos los beneficios propios que brinda la naturaleza desempeñando un papel esencial en la vida humana.

La ciudad moderna fue modificando estos lazos con lo natural de manera paulatina conforme se fue extendiendo y complejizando, de modo tal que el árbol que antes fuera parte del paisaje fue transformándose en un elemento aislado, parte del mobiliario ciudadano y consecuentemente obligado a estar allí donde se lo ubicaba (Rivas Torres, 2005).

Sin embargo, en las últimas décadas la sociedad ha tomado conciencia del impacto que tienen los lazos entre la urbe y su entorno y entre la urbe y lo natural que la habita. La ciudad empieza a verse a sí misma como un ecosistema, en el cual lo ambiental ha ganado preponderancia, donde cada uno de sus componentes (ejemplo: el arbolado urbano) requiere de un conocimiento de su biología, comportamiento y beneficios para la sociedad (Priego González de Canales, 2002).

En estos momentos, más que nunca, los árboles que se desarrollan en la ciudad cumplen innumerables servicios. La vegetación urbana tiene efectos ambientales (Priego González de Canales, 2002; Rivas Torres, 2005) ya que la vegetación reduce la escorrentía de aguas pluviales, mejora calidad del aire a nivel local y regional, aumenta la biodiversidad, minimiza los efectos micro-climáticos y reduce el consumo de energía (Nichols & Lucke., 2017) ya que reduce la temperatura del ambiente en aproximadamente 2° C en lugares abiertos o con poco cemento y en algunos casos de hasta 4°C en los lugares construidos (Gimera y Pastori., 2008), disminuye la contaminación atmosférica y sonora, (Priego González de Canales, 2002), es esencial para la sustentabilidad urbana, pero también posee beneficios de tipo social, económico, psicológico y espiritual (Nowak & Dwyer, 2007; Rivas Torres, 2005), pues contribuye a la calidad de vida de los habitantes y también eleva el valor de la propiedad, (Pérez-Otero et al., 2008; Nichols & Lucke., 2017), mejora la interacción social y reduce el crimen (Nichols & Lucke., 2017).

Por lo tanto, una pobre o escasa planificación y mantenimiento de su entorno tendría un efecto devastador para el medio ambiente. Proveer de alimentos saludables, agua y aire limpios, energía no contaminante y espacios verdes disfrutables, etc., resulta esencial para la supervivencia del planeta y de los espacios urbanos. Por lo tanto, el principal objetivo de esta era debe implicar la sustentabilidad de nuestro medio de tal manera de garantizar la salud de los seres vivos que lo habitan, promover y garantizar el desarrollo apropiado de los árboles,

minimizar los costos de mantenimiento y mejorar la calidad de vida de todos sus habitantes (Nowak & Dwyer, 2007). Consecuentemente, y debido al importante crecimiento de las instalaciones subterráneas (Crow, 2005), es necesario cuidar y preservar los árboles del entorno urbano proponiendo estrategias apropiadas que comprendan, entre otras, la elección apropiada de las especies (Crow, 2005), un plan de podas, la evaluación de ejemplares en riesgo y un consecuente plan de reposición de estos.

A la hora de concentrarnos en la evaluación de ejemplares, especialmente aquellos cultivados, resulta de vital importancia entender la morfología y la fisiología de la raíz en vinculación con la parte aérea (Perry, 1989; Day *et al.*, 2010). Las raíces son el soporte de los árboles, les proveen de agua y minerales, para lo cual deben explorar el suelo que las aloja. En espacios urbanos el entorno subterráneo con el que cuentan las raíces suele ser hostil y restrictivo para el crecimiento, lo cual promueve un desarrollo pobre y poco saludable (Day *et al.*, 2010) pero, además, debido a que se desarrollan en un mundo opaco y subterráneo resultan ser un desafío a la hora de realizar cualquier trabajo de evaluación, medición y cuantificación (Guo *et al.*, 2013). Desconocer lo que sucede debajo de la superficie es un gran problema, debido a que en innumerables ocasiones los árboles no muestran daños visibles en su parte aérea y sólo se detecta el daño cuando es irreparable. Por lo tanto, analizar y conocer el sistema radicular de los árboles resulta vital para el mismo árbol especialmente para aquellos ejemplares que se desarrollan en entornos urbanos (Day *et al.*, 2010) y para la salud de la ciudad en su totalidad.

MARCO TEORICO

LOS ÁRBOLES Y LAS RAICES

Las principales funciones de las raíces son la de anclaje (Horton, 1958), absorción de agua y minerales, síntesis de compuestos de nitrógeno y reguladores de crecimiento tal como ácido abscísico, citoquininas y giberelinas las cuales desempeñan un papel esencial en el crecimiento y funcionamiento radicular. Las raíces también pueden tener una función como sensor de estrés hídrico, situación ante la cual envían señales bioquímicas a la parte aérea (Kramer & Boyer., 1995).

El crecimiento eficaz de las plantas depende de la posibilidad de mantener un balance entre el crecimiento radicular y el crecimiento aéreo. A pesar de haber grandes diferencias

según las especies en lo que refiere a la proporción entre ambos, en todos los casos forman una unidad absoluta e indivisible. Esta interrelación entre ambas tiene como consecuencia que cualquier afección que se produzca en una de ellas tiene irremediablemente cierta repercusión en la otra. (Perry, 1989)

Cuando los árboles crecen en grupos, sus raíces se entrelazan de tal forma que generan injertos (Horton, 1958) naturales de raíz generando una increíble interconexión subterráneamente. En general las plantas tienden a producir más raíces de las que realmente necesitan para subsistir salvo en situaciones de extrema sequía. Sin embargo, el crecimiento radicular puede encontrar obstáculos que limiten su desarrollo: resistencia mecánica del suelo, escasa aireación, bajo o elevado pH, exceso de elementos tóxicos (ej.: aluminio) y competencia por la presencia de otras plantas. Los árboles que se encuentran en contenedores o cazuelas que reducen el espacio físico de crecimiento inhiben el crecimiento de sus raíces aun cuando se encuentren bien hidratados y bajo planes de fertilización controlada. (Kramer & Boyer, 1995)

Debido a la gran cantidad de instalaciones subterráneas se hace imprescindible contar con información acerca de la distribución de las raíces de los árboles y de las probabilidades de que estas instalaciones se vean afectadas por el subsecuente crecimiento radicular de ciertas especies. Por otro lado, diseñadores del paisaje, personal vinculado a los espacios verdes o arquitectos pueden llegar a requerir información sobre la potencial distribución de las raíces a la hora de preservar ejemplares vegetales o construcciones antiguas, por ejemplo (Crow, 2005).

Las raíces de los árboles presentan un gran desarrollo. Poseen la capacidad de extenderse amplia y radialmente en cualquier dirección, frecuentemente por grandes distancias. El tener un sistema radicular extenso le permite mantener la estabilidad y abastecerse de agua y nutrientes, lo cual le exige al árbol establecer una íntima relación con el suelo que lo sostiene y lo rodea. Esto sólo puede llevarse a cabo a través de la producción de delgadas raíces (pelos) que amplían considerablemente el volumen de interacción raíz/suelo.

Anatómicamente las raíces pueden ser fundamentalmente clasificadas entre lignificadas (con presencia de madera) y no lignificadas. Las raíces lignificadas son aquellas que han desarrollado un crecimiento secundario, presentando una estructura rígida y perenne. Funcionalmente, estas raíces son las raíces estructurales cuyo rol es el de anclar al árbol y

crear una red para el desarrollo del sistema radicular total. En general el árbol posee entre 5 y 15 raíces primarias estructurales que emanan desde el cuello de la raíz y desciende oblicuamente dentro del suelo antes de desarrollar crecimiento horizontal a una corta distancia del tronco. (Day *et al.*, 2010)

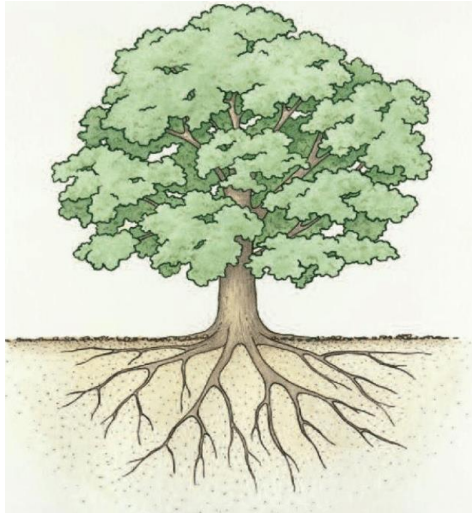
El área en la cual se desarrollan estas raíces con crecimiento secundario no excede el metro o los dos metros de profundidad. (Day *et al.*, 2010)

Es común creer que el sistema radicular de un árbol es el reflejo de su copa y que su desarrollo se extiende en profundidad principalmente. Estos autores encontraron que, si bien existen ciertas inconsistencias acerca de la profundidad que suelen alcanzar las raíces basadas posiblemente en la amplia variabilidad de los perfiles de suelos a largo del territorio explorado como también debido a la variabilidad presentada por las especies estudiadas, sin embargo, se puede concluir que existe una importante tendencia a que las raíces exploren volúmenes superficiales del suelo. Es atípico que el sistema radicular penetre profundidades superiores a los 2 metros: el sistema radicular es superficial (Yeager, 1935; Kokoreva, 1996), con numerosas raíces laterales largas y relativamente pequeñas que se suelen expandir mucho más allá del tronco, habiendo sido encontrado alrededor del 80-90% del total de las raíces dentro de los primeros 100cm del perfil del suelo (Perry, 1989; Corvalán Vera y Hernández Palma, 2009). Como se puede observar la profundidad promedio de un árbol ha sido sobrevalorada y exagerada, mientras que el desarrollo lateral ampliamente subestimado. (Crow, 2005) (Figura 1)

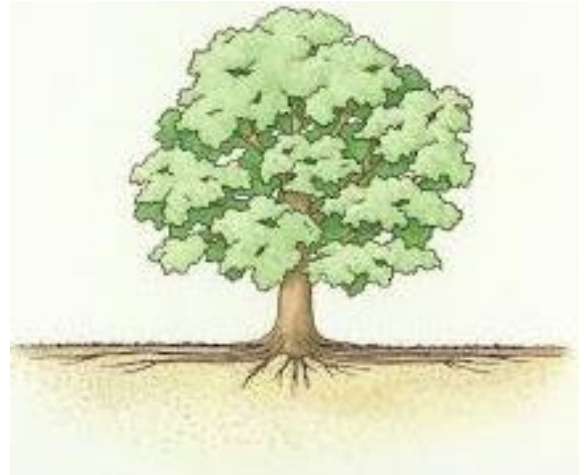
Figura 1

La idea más difundida de una raíz (a), y una representación más realista del sistema radicular (Dobson, 1995)

a)



b)



La arquitectura del desarrollo del sistema radicular de un árbol se encuentra influenciado por la genética, -como ser dimensión espacial, patrón del ramaje, raíz pivotante, entrenudos y largo total (Foxx *et al.*, 1984; Kalliokosky *et al.*, 2008) tanto como por condiciones del entorno en el cual se desarrolla – disponibilidad de nutrientes, abastecimiento de oxígeno, humedad, presión osmótica, temperatura, patógenos, porosidad y textura (Foxx *et al.*, 1984; Sutton, 1980).

Por ejemplo y de acuerdo con la investigación llevada a cabo por Foxx *et al.* en 1984 la profundidad promedio de enraizamiento para árboles de hoja caduca es de 332 cm, con un rango de entre 73 a 3000 cm, siendo el tamarisco la especie de enraizamiento más profunda. La profundidad promedio de enraizamiento para las especies de hoja perenne es de 336 cm, con un rango de entre 10 a 6092 cm (Foxx *et al.*, 1984).

Así mismo, estos autores han establecido que la altura de la planta puede dar una estimación aproximada de la penetración de la raíz y de su extensión horizontal. En la mayoría de los casos estudiados, la relación de profundidad y altura (p / h) para los árboles fue inferior a 1.1. Los árboles que tuvieron menos de 305 cm de altura mostraron una proporción de 0,22 (Foxx *et al.*, 1984).

TIPOS DE RAIZ

Raíz pivotante:

Inicialmente cuando la semilla germina aparece una única raíz (radícula o pivotante) la cual crece geotrópicamente (Sutton, 1980; Kokoreva, 1996). Esta continúa su extensión en profundidad mientras las condiciones del suelo lo permiten y según las características genéticas propias de cada especie. (Sutton, 1980). Esta elongación es mucho más rápida en los primeros 2 a 3 años de vida del ejemplar, pero decrece conforme la edad del árbol y la profundidad en el suelo aumentan (Dobson, 1995).

Por otro lado, las raíces laterales, que también se forman en una temprana instancia, pronto se convierten en soporte estructural. Consecuentemente, el crecimiento de la raíz pivotante declina (Sutton, 1980; Crow, 2005), de hecho, son significativamente pocos los árboles que poseen una considerable raíz pivotante en la madurez. Resulta extremadamente difícil distinguir estas raíces en árboles adultos, ya sea porque fueron dañadas durante etapas tempranas (manejo en vivero, trasplantes, etc.) o porque ciertas condiciones propiciaron su desaparición. Incluso en especies consideradas pivotantes en condiciones naturales, tales como *Quercus* spp., *Pinus* spp. y *Abies* spp., la primera raíz resulta muy difíciles de encontrar (Dobson, 1995).

Las raíces pivotantes intactas suelen desarrollarse por debajo del tronco hasta que llegan a una profundidad aproximada de 0.5/1m (Dobson, 1995), donde se dividen en varias raíces pequeñas que mantienen su crecimiento geotrópico (Perry, 1989).

Raíces laterales:

Las raíces laterales que crecen cerca de la superficie del suelo, que se engrosan con el pasar de los años, conforman el mayor soporte de raíces estructurales dentro del sistema radicular total de un árbol adulto. Se pueden encontrar entre cuatro y once de estas raíces que pueden llegar a desarrollar un diámetro de 30cm o más cerca del nacimiento (Dobson, 1995). El grosor disminuye rápidamente conforme se aleja del tronco llegando a 2-5cm de diámetro a los 2 m de distancia (Perry, 1989). En esta instancia las raíces han perdido gran parte de su rigidez y fuerza estructural. Es en este punto donde tienden a romperse cuando el entramado colapsa frente a una tormenta, por ejemplo (Dobson, 1995). Mas allá de este punto las raíces laterales continúan su extensión por una extensa área de varios metros, sin manifestar una notable disminución de tamaño, típicamente manteniendo un grosor de 1-2cm. En algunas especies (como *Fraxinus* spp, *Prunus* spp., *Crataegus* spp y algunas variedades de *Pinus* spp) estas raíces tienden a crecer y desarrollarse horizontal y extensamente en los primeros

10cm/15cm del suelo formando un amplio sistema superficial que muestra raíces lignificadas cerca del tronco (Dobson, 1995).

Figura 2: Sistemas de raíces laterales entretejidas de un rodal de *Pinus contorta*, de 70 años de edad (Kananaskis, Alberta). (Horton, 1958)



Raíces no-leñosas

Un sistema complejo de raíces más pequeñas crece hacia afuera y predominantemente hacia arriba desde el sistema de raíces estructurales, las que suelen ramificarse extensamente para formar abanicos o tapetes de miles de puntas finas, cortas y no leñosas (Perry, 1989). Estas raíces son generalmente muy pequeñas en diámetro (<2 mm), tienen tasas metabólicas altas y una vida útil que varía de unos pocos días a semanas (Day *et al.*, 2010) y constituyen la fracción principal de la superficie del sistema radicular (Perry, 1989). Además de la absorción, las raíces no leñosas son la ubicación principal de la síntesis de hormonas de la raíz, la asimilación de nutrientes, la exudación de la raíz y la simbiosis con microorganismos del suelo. Entre estas raíces finas, la función es variable y a menudo está determinada por la posición en la jerarquía del sistema raíz (Day *et al.*, 2010).

Las capas superficiales del suelo con frecuencia se secan y están sujetas a temperaturas extremas y a las heladas. El delicado sistema de raíces no leñosas es dañado por estas

fluctuaciones en el ambiente del suelo y por los organismos que lo habitan. Las nuevas raíces se forman rápidamente después de las lesiones, por lo que su población y su concentración en el suelo son extremadamente dinámicas (Perry, 1989).

Este autor afirma que en ambientes naturales o donde los árboles se encuentran cercanos unos de otros sus sistemas radiculares, especialmente la parte formada por las no leñosas, se cruzan en un complejo patrón. Las lesiones, las rocas u otros obstáculos pueden inducir a que las raíces se desvíen de su patrón de crecimiento radial en 90 grados o más. Estos giros y entremezclas de raíces hacen dificultosa la distinción de qué raíces. Los injertos naturales son comunes en este contexto.

Las raíces de primer orden (la punta de la raíz definitiva) son el punto más probable para la colonización de micorrizas y consistentemente tienen niveles más altos de nitrógeno (N) que las raíces de orden superior. Estas finas raíces requieren la menor inversión de carbono (C) para crecer (Day *et al.*, 2010), pero son las más costosas metabólicamente para debido al gran volumen que representan y a la constante reposición que requieren, este consumo total puede alcanzar el 70% del volumen total de carbono según Persson (1996).

Estas raíces proporcionan gran plasticidad para que los árboles respondan a los recursos de nutrientes y agua en el suelo (Day *et al.*, 2010). A pesar de su diminuta longitud (unos pocos milímetros – Perry, 1898), las raíces finas pueden representar hasta el 90% de la longitud total del sistema radicular (Day *et al.*, 2010). De hecho, las raíces finas de primer orden pueden tener una densidad de longitud de raíces considerablemente mayor a otras raíces finas. Algunas raíces no leñosas eventualmente experimentan un desarrollo secundario para convertirse en raíces leñosas, estructurales y contribuyen al marco del sistema radicular, pero la mayoría perecen y son reemplazadas (Day *et al.*, 2010).

Según la investigación realizada por Wallace *et al.* (1980), la profundidad exploración de estas raíces es relativamente superficial y muy limitada por la profundidad de penetración de la precipitación. Si bien el autor encontró diferencias en la distribución de los sistemas radiculares entre especies, en la mayoría de los casos analizados las raíces más pequeñas estuvieron ubicadas en los 10 y 30. Entre el 50 y hasta más del 80 por ciento de las mismas fueron encontradas en los primeros 20 cm. La distribución relativa de la profundidad de las raíces muy finas para los horizontes de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, fue de aproximadamente 17%, 42% y 41%, respectivamente.

CARACTERISTICAS DEL MEDIO Y SU EFECTO EN EL DESARROLLO

Propiedades del suelo

Si bien existen características de desarrollo radicular que son propias de cada especie, existen significativas influencias ejercidas por las características del suelo en el cual se halla el ejemplar (Illichevsky Garin, 1942; Kalliokoski *et al.*, 2008). Existen cuatro grupos principales de limitantes impuestas por el entorno:

- a. **Resistencia mecánica:** Las raíces se encuentran imposibilitadas de crecer y explorar distintos horizontes del suelo debido a una alta densidad aparente, la cual influencia el crecimiento de las raíces (Kokoreva, 1996). Esto incluye bases rocosas, suelos altamente rocosos, arenas, y muchas arcillas altamente compactables (Crow, 2005).

La compactación posee efectos sumamente perjudiciales los cuales son definidos por Coder (2000) y son transcritos a continuación:

- **Reducción de la elongación radicular:** según la compactación se incrementa, las raíces se ven impedidas de continuar su crecimiento y elongación dentro del perfil edáfico debido a la falta de oxígeno, por la reducción del tamaño de los poros y por el aumento de la resistencia del suelo. Según las raíces son expuestas a una presión mayor a 1.2 MPa, la elongación disminuye paulatinamente hasta su interrupción total.
- **Reducción del diámetro de raíz:** Los árboles comienzan a generar más raíces laterales gruesas y cortas cuando la presión del suelo que las rodea excede 0.5 MPa. La escasez de oxígeno y la fuerza del suelo son las mayores limitantes.
- **Raíces muy superficiales:** Debido a que las raíces sobreviven en entorno en el cual la capacidad aeróbica disminuye constantemente, y cuando la capa anaeróbica se expande hacia la superficie, el espacio físico disponible para las raíces vivas se reduce considerablemente. Las consecuencias de tener volúmenes más pequeños de espacio colonizable en la superficie del suelo implica que las raíces y sus recursos están más afectados por la fluctuación del volumen de agua, la carga de calor y el daño mecánico. La sequía y el estrés por calor pueden dañar rápidamente las raíces en esta pequeña capa de suelo oxigenado.
- **Rotura de raíces:** la fuerza mecánica generada en suelos compactados puede romper o quebrar las raíces especialmente la menores a 2 mm de diámetro. La

cantidad de roturas es dependiente del tamaño de la raíz y la profundidad, el peso del elemento compactado, del material orgánico del suelo, etc.

La compactación posee, como se observa, un efecto demoledor para el sistema radicular de cualquier especie, y puede ser causada por múltiples agentes y razones: pisoteo -incluso de aves-, excesivo uso de espacios públicos urbanos, circulación vehicular en zonas sin pavimentar, etc. (Perry, 1989). Siempre que se esté en presencia de suelos compactados, dicha compactación deberá ser considerada permanente ya que después de medio siglo ésta aún afecta bajo condiciones forestales naturales. El tiempo de recuperación para una compactación significativa es de al menos dos generaciones humanas (Coder, 2000)

- b. **Aireación:** Todas las raíces necesitan oxígeno disponible en el suelo que las rodea (Dobson, 1995). Si el nivel de oxígeno en el suelo es menor al 10-15%, las raíces se ven imposibilitadas de seguir creciendo, y este desarrollo se detiene completamente a niveles del 3-5% (Crow, 2005). Dichas condiciones se generan cuando los espacios de aire en el suelo son reemplazados por partículas de suelo, por agua o gases como el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno o metano (Crow, 2005).

La compactación restringe el movimiento de oxígeno en el suelo y desplaza el suelo hacia condiciones anaeróbicas. En estas condiciones, se generan toxinas y formas de elementos esenciales inutilizables. Además, la materia orgánica no se mineraliza ni se descompone. Consecuentemente, se inicia una secuencia de respiración anaeróbica del suelo (fermentación de las raíces). Las raíces de los árboles son aerobios, al igual que los simbiontes de las raíces y las especies dependientes de organismos del suelo. Menos oxígeno impide el crecimiento, la defensa y la supervivencia de las raíces, las cuales utilizan los alimentos disponibles 20 veces más ineficientemente en condiciones casi anaeróbicas. A medida que la concentración de oxígeno cae por debajo del 5% en la atmósfera del suelo, ocurren problemas graves de crecimiento de las raíces (Dobson, 1995).

- c. **Fertilidad:** Los suelos infértiles producen sistemas radiculares superficiales, pobres y con raíces largas y delgadas. Mientras que un suelo fértil produce raíces vigorosas que pueden descender más profundo en su exploración y crecimiento (Crow, 2005) y expansión (Dobson, 1995). Si bien las raíces son incapaces de extenderse en busca de zonas más fértiles, por el contrario, serán capaces de proliferar cuando estén en

contacto con áreas ricas en nitrógeno y fósforo. Estos elementos suelen encontrarse en el horizonte 0, para los suelos que no han sido perturbados (Crow, 2005).

- d. **Humedad:** Los suelos anegados suelen presentar una deficiencia importante en el intercambio gaseoso de manera tal que la cantidad de oxígeno se agota hasta alcanzar condiciones anaeróbicas. (Crow, 2005). Frente a la existencia de capas freáticas altas permanentes los árboles desarrollarán un sistema radicular superficial y muy expandido horizontalmente. De igual manera que un suelo en condición de sequía obligará también a un desarrollo radicular superficial a los fines de maximizar la intercepción del agua de lluvia en superficie (Ballantyne, 1916; Crow, 2005). Por otro lado, en aquellos casos en los cuales existiera una fuente de agua más profunda (zona de capilaridad, por ejemplo), las raíces pueden ser capaces de explorar esta zona siempre que ofrezca óptimas condiciones de penetración y respiración, en cuyo caso la raíz puede llegar a desarrollar dos sistemas, uno superficial y otro a mayor profundidad (Crow, 2005).

La composición orgánica y mineral del suelo determinara la disponibilidad o carencia de agua. Los suelos con alto contenido de arcillas son conocidos por su capacidad de reducirse y resquebrajarse ante la sequedad mientras que las arenas no sufren cambios en las mismas condiciones. Cuando el agua es removida de entre las partículas del suelo por las raíces o como consecuencia del descenso de la capa freática se produce un vacío que puede tener como consecuencia una reducción de ciertos suelos arcillosos, o más frecuentemente, en el aumento del contenido gaseoso intra-partícula (Crow, 2005).

Estas diferencias en el tamaño de partículas, aire y contenido hídrico juegan un rol determinante en la capacidad de exploración y penetración por parte de las raíces. Un suelo que presenta una composición física y química óptima puede reducir la necesidad de exploración en búsqueda de agua y nutrientes. Contrariamente, un suelo suelto y muy drenado puede promover potencialmente una exploración mayor tanto en extensión como en profundidad. Sin embargo, Yeager (1935). referencia una importante relación entre la disponibilidad de agua y el patrón de desarrollo radicular, de forma tal que en situación normal sin irrigación adicional las raíces se extendieron horizontalmente desde 0.4 a 2.1 veces la altura del ejemplar estudiado, mientras que, ante el suministro extra de agua, aunque no excesiva, las raíces tuvieron la tendencia de penetrar más profundamente dicho perfil.

Distribución de las raíces:

La variabilidad de las condiciones del suelo, la competencia entre árboles y la presencia de obstáculos y barreras afecta el patrón de desarrollo, profundidad y extensión del sistema radicular (Corvalán Vera y Hernández Palma, 2009). Debido a que el crecimiento radicular es netamente oportunista (Perry, 1989; Dobson, 1995; Crow, 2005) las raíces tienden a desarrollarse solo en contextos favorables (Dobson, 1995) y debido a que las propiedades del suelo necesarias para este desarrollo radicular varían negativamente en sentido vertical (Perry, 1989), la mayor concentración de raíces se encuentra cerca de la superficie del suelo (Perry, 1989; Dobson, 1995; Corvalán Vera y Hernández Palma, 2009). El horizonte superficial es el que predominantemente posee las mejores condiciones físicas, los recursos hídricos, de oxígeno y de nutrientes. Por debajo del metro de profundidad es muy difícil encontrar raíces que posean un diámetro mayor a unos pocos milímetros (Yaeger, 1935).

Profundidad de raíces:

La raíz más profunda se ubica general y directamente debajo o muy cerca del tronco (Perry, 1989; Dobson, 1995) dependiendo del tipo de raíz de la cual se trate (pivotante/oblicuas). La profundidad máxima varía ampliamente desde apenas 10/20 cm en suelos anegados, a excepcionalmente, decenas de metros en suelos sueltos y bien aireados o en fisuras rocosas (Dobson, 1995). Sin embargo, no existe tal cosa como una especie de raíces profundas o superficiales como tal, ya que todos los árboles pueden desarrollar sistemas radiculares profundos (Dobson, 1995). Según Dobson esta profundidad oscila entre 2 y 3 m cuando las condiciones edáficas así lo permiten, si bien es poco frecuente que cantidades significativas de raíces se encuentren a profundidades sustanciales (> a 2m) (Crow, 2005) aunque se registraran casos en los cuales alguna raíz fue encontrada a profundidades mayores, pero comúnmente entre el 90 y el 99% de los sistemas radiculares de los árboles se concentra en los primeros 100 cm (Crow, 2005). Aparentemente algunas diferencias en la distribución de las raíces dependen de determinadas capacidades genéticas (Dobson, 1995) las cuales otorgan la capacidad de tolerar difíciles condiciones edáficas como ser una pobre aireación o cierto nivel de compactación, por ejemplo. Es esta propensión la que tiene como resultado que algunos sistemas radiculares de ciertos árboles posean raíces más profundas que otros en iguales condiciones. Sin embargo, las condiciones del suelo son de extrema importancia (Brown & Lacate, 1961; Foxx, *et al.*, 1984; Krammer & Boyer, 1995; Crow, 2005), lo prueba el hecho de que ni siquiera las raíces pivotantes pueden continuar su desarrollo en profundidad cuando enfrentan condiciones tales como capas de suelo compactado o rocoso, especialmente arcillas, roca madre, mala aireación o nivel freático alto (Brown & Lacate, 1961). Las

condiciones del suelo modifican los patrones de penetración de las raíces (Foxx, *et al.*, 1984; Dobson, 1995).

Expansión radicular:

Durante muchos años se ha pensado que la expansión del sistema radicular de los árboles se reduce al área delineada por la proyección de la copa. Sin embargo, ciertas excavaciones han revelado que dicha extensión se correlaciona con la altura del árbol y no con la copa, y que esta relación puede verse afectada por patrones genéticos propios de cada especie (Gilman, 1988).

Estas investigaciones afirman que las raíces pueden desarrollarse a distancias considerablemente superiores al perímetro del conopeo (Dobson, 1995; Crow, 2005), siendo estas distancias equivalentes al menos a la altura del árbol, y en determinados casos (especialmente en suelos infértiles o compactados) superiores a 2 y 3 veces la altura del árbol (Woodroof, 1934; Perry, 1984; Gilman, 1988; Dobson, 1995). Se han encontrado variaciones en la longitud de extensión de las raíces de distintas especies. Algunas raíces han sido encontradas a un radio de 10 m y hasta mayor de 20 m (Crow, 2005). Estas raíces que crecen tan alejadas del tronco usualmente se desarrollan muy cerca de la superficie (Dobson, 1995). También se tomó registro de que la presencia de ciertos obstáculos -como rocas o construcciones- constituyen una barrera física que inhibe el normal desarrollo de la raíz (Dobson, 1995) las cuales se ven obligadas a desviar su rumbo de crecimiento (Perry 1989; Dobson, 1995). Dobson establece que apenas esta obstrucción cesa las raíces restablecen el patrón original (Dobson, 1995).

Por otro lado, el desarrollo asimétrico de las raíces no es inusual y puede tener como desencadenante las variaciones edáficas o la topografía del suelo tal como pendientes o lomas (Crow, 2005).

EL ARBOLADO URBANO

Los árboles de las ciudades se encuentran cultivados bajo condiciones extremadamente hostiles y consecuentemente inadecuados para asegurarles una vida saludable y extensa. A menudo los árboles deben enfrentar altos niveles de contaminación atmosférica, del suelo y el agua; además de encontrarse bajo estrés hídrico en forma casi permanente y volúmenes de suelo reducido y altamente compactado (Coder, 2000) con una

consecuente limitación de oxígeno (Perry, 1989), razones éstas que impiden una apropiada expansión radicular afectando la salud de los ejemplares y un anclaje seguro.

Como se explicó anteriormente, las raíces de los árboles pueden llegar a extenderse radialmente a una distancia equivalente al menos a su altura y este sistema radicular puede estar ubicado en los primeros 3 m del tronco.

Este desarrollo es principalmente superficial y debido a que la gran mayoría de las raíces absorbentes se encuentran mucho más cerca de la superficie cualquier perturbación ocasionada en el suelo dentro de los 2-3 metros del tronco (zona de riesgo) en superficie, puede ocasionar un daño irreparable al sistema radicular global y por lo tanto deberá ser evitado. Cuanto más cerca del tronco se produzcan estas alteraciones, mayor será el daño causado al ejemplar y mayor será la pérdida de raíces (Dobson, 1995).

Si las raíces más importantes (diámetro mayor a 20 cm) son cortadas dentro de la zona de riesgo, se puede comprometer seriamente la estabilidad del árbol, pudiendo ser peligroso (Dobson, 1995).

Los árboles de la calle se asocian comúnmente con el agrietamiento y levantamiento del pavimento (Nichols *et al.*, 2017), sin embargo, existe una considerable desinformación acerca del daño que pueden causar realmente. Es cierto que bajo determinadas circunstancias las raíces pueden afectar las estructuras edilicias, sin embargo, un daño directo es poco frecuente y en general sucede cuando los árboles están situados a menos de 1 o 2 metros de las mismas (medianeras, paredes, veredas, cordones, etc.) (Dobson, 1995). Según Nichols *et al.* (2017) el agrietamiento sufrido por las construcciones y solados en la ciudad ocasionado por las raíces de los árboles ocurre debido a que las raíces hidrófilas se ven atraídas por la condensación que se acumula en la parte inferior de los pavimentos.

Detectar un posible deterioro radicular, así como conocer el desarrollo de las raíces (distribución, cantidad, ubicación y tipo) tiene un gran impacto en las decisiones a tomar para las distintas tareas que deben ser realizadas en espacios públicos. Cualquier tarea afecta la salud de los árboles: trabajos realizados en la vía pública, descuidados o cuestionables métodos de poda, y por supuesto el vandalismo, aumentan alarmantemente el estrés que padecen. Toda adversidad incrementa de forma exponencial las probabilidades de ataques patógenos (Baietto *et al.*, 2015) que pudieran afectar la salud y resistencia de los ejemplares.

Hasta hace pocos años, la única manera de investigar la arquitectura, distribución, biomasa y estado sanitario de las raíces de un árbol se ha basado en el uso de equipo de exploración y/o técnicas arqueológicas (remoción física del suelo y uso de agua o aire a alta presión) (Horton, 1958; Brown & Lacate, 1961; Hruska *et al.*, 1999; Guo *et al.*, 2013). Por lo tanto, los tradicionales métodos de excavación resultan intensamente trabajosos y destructivos, con un limitado alcance en la cuantificación además de hacer imposibilidad de repetición del experimento en sucesivas veces y a lo largo del tiempo (Guo *et al.*, 2013; Moore & Ryder, 2015). Para árboles que crecen en situaciones urbanas, este tipo de tareas resultaban irrealizables, pero detectar y cuantificar el tamaño, arquitectura y biomasa de las raíces, es de vital importancia

Afortunadamente, en los últimos años, ha habido una evolución de los instrumentos basados en técnicas desarrolladas en el ámbito de la ingeniería o la medicina, con el fin de evaluar, cuantificar madera (Sambuelli *et al.*, 2003; Romeralo, 2010; Siegert, 2013), algunos han sido desarrollados y testeados con el fin de detectar, evaluar y mapear la distribución, estado y masa de sistemas radiculares desde 1999 (Guo *et al.*, 2013). La mayoría de estos instrumentos son conocidos como no destructivos (Sambuelli *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2013) aunque algunos podrían llamarse cuasi no destructivos ya que en muchos casos ciertos elementos deben insertarse en la madera -sondas, electrodos, transductores, etc.- (Sambuelli *et al.*, 2003).

CONCLUSION

Por lo expresado a lo largo del presente trabajo se deduce que el estudio de las raíces de los árboles, especialmente en ámbitos urbanos, es de vital importancia. Los espacios existentes están urbanizándose en forma vertiginosa y en tal contexto los árboles desempeñan un papel fundamental en la sustentabilidad y calidad de vida de los seres que los habitan.

Para integrar a los árboles en ciudades sustentables, es necesario, por un lado, entender cómo y dónde crecen sus raíces, y por el otro de qué manera este desarrollo se ve afectado por el suelo que las aloja y contiene. De este modo es imprescindible contar con los conocimientos, la información y el equipamiento necesarios, a los fines de tomar las decisiones apropiadas en el momento más conveniente tanto en lo referido a la planificación como al manteniendo de los espacios urbanos, minimizando costos, evitando futuros conflictos y garantizando árboles saludables y seguros.

REFERENCIAS

- Baietto, M., Aquaro, S., Bassi, D., Wilson & A.D., Pozzi, L., (2015). Development of a Novel approach for detecting wood decays in living trees using gas-sensor arrays. *The 6th International Conference on Sensor Devices Technologies and Applications*. IARIA, 2015. ISBN; 978-1-61208-426-8. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/dbd5/06f8d4c362b49e3f41e80a45569354bd3fa1.pdf>
- Ballantyne, A.B. (1916, Abril). Fruit tree root System: Spread and Depth. Bulletin no. 143 *UAES Bulletins. Agricultural Experiment Station*. Utah State University. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/4085/86c22878835890d9831d26465c37ce4418e8.pdf>
- Brown, W.G.E., & Lacate, D.S. (1961). Rooting habits of white and red Pine. *Forest Research Branch*, Technical Note 108, 5-7. Roger Duhamel, FRSC, Queen's Printer and Controller of Stationery, Ottawa, Canada.
- Coder, K.D. (2000, Julio). Soil Compaction and trees: Causes, Symptoms and Effects. University of Georgia, *Wernell School of forest resources extension Publication FOR00-3*. Recuperado de website = www.forestry.uga.edu/efr. USA.
- Corvalán Vera, P. y Hernández Palma, J. (2009). Medición de copas y raíces. *Apuntes de Dendrometría*. Universidad de Chile. Recuperado de https://www.ucursos.cl/forestal/2009/2/EF024/1/material_docente/bajar?id_material=481438
- Crow, P. (2005). The Influence of Soils and Species on Tree Root Depth. *Environmental and Human Sciences Division*. Forest Research Alice Holt Lodge. Farnham Surrey. Forestry Commission . Edinburgh. UK. Recuperado de <http://www.forestry.gov.uk>.
- Day, S.D., Wiseman, P.E., Dickinson, S.B. & Harris, R. (2010, Julio): Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees. *Arboriculture & Urban Forestry 36(4)*. *International Society of Arboriculture*. Recuperado de https://frec.vt.edu/content/dam/frec_vt_edu/documents/p149_159.pdf

- Dobson, M. (1995, Julio). Tree root system. *Arboriculture Research and Information note. AAIS – Arboricultural Advisory and Information Service*. Alice Holt Lodge. Wrecclesham – Furnham – Surrey - GU10 4LH - 130/95/ARB. Recuperado de <http://udspace.udel.edu/handle/19716/2830>
- Foxx, T.S, Tierney, G.D. & Williams, J.M. (1984). *Rooting Depths of Plants Relative to Biological and Environmental Factors*. Los Alamos, New Mexico 87545. U.S. Government Printing Office. Recuperado de <https://www.osti.gov/servlets/purl/6215530>
- Gilman, E.F. (1988, Abril). Predicting Root Spread from Trunk diameter and branch spread. *Journal of Arboriculture*. 14(4). 85-89.
- Gimera, G.M.Otero, J.C. y Pastori Vargas, J. (2008). *El árbol urbano: ¿Actúa como regulador de la temperatura?* Trabajo de los alumnos del Ipem 288 "José Hernández". Area de Ciencias Naturales. I.P.E.M.288 "José Hernández". Recuperado de <http://www.ciacordoba.org.ar/jupgrade/doc/revista/Elarbolurbanocomoreguladordela temperatura.pdf>.
- Guo, L., Chen, J., Cui, X., Fan, B. & Lin, H. (2013, Octubre) Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: a review. *Plant and Soil*. 362, 1–23, doi: 10.1007/s11104-012-1455-5.
- Horton, K.W. (1958). Rooting Habits of Lodgepole Pine (Project K.70). *Forest Research Division*. Technical Note 67, 1-26. The Honorable Alvin Hamilton, M.P., Minister or Northern Affairs and National Resources. Ottawa. U.S.A.
- Hruska, J., Cermák, J. & Sustek, S. (1999, Marzo). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology* 19, 125-130. Heron Publishing - Victoria, Canada. doi: 10.1093/treephys/19.2.125
- Illichevsky Garin, G. (1942, Enero): *Distribution of Roots of Certain Tree Species in two Connecticut soils*. Buelletin 454. Connecticut Agricultural Experiment Station, New Heaven.
- Kalliokoski, T., Nygren, P. & Sievänen, R. (2008). Coarse root architecture of three boreal tree species growing in mixed stands. *Silva Fenica* 42(2), 189-210. The Finnish

- Forest Research Insitute. Vantaa Research Unit. University of Helsinki. Finland.
Recuperado de <https://silvafennica.fi/pdf/article252.pdf>
- Kokoreva, I.I. (1996). Root systems of Crataegus L. in the Trans-Ili Ala tau, Kazakhstan.
Persson, H & Baitulin, I.O. (Ed) En Acta Phytogeogr. Suec. 81 *Plant root systems
and natural vegetation*, (35-38), Uppsala, Suecia: Eklundshof Grafiska. AB
- Kramer, P. J. & Boyer, J.S. (1995). *Water relations of plants and soils*. Department of
Botany. Duke University, Durhan, North Carolina. Academic Press, San Diego,
California, USA.
- Moore, G.M. & Ryder, C.M. (2015, Setiembre) The use of Ground-Penetrating Radar to
locate tree roots. *Arboriculture and Urban Forestry* 41(5), 245-259. Recuperado de
[https://www.researchgate.net/publication/282973227_The_use_of_ground-
penetrating_radar_to_locate_tree_roots#downloadCitation](https://www.researchgate.net/publication/282973227_The_use_of_ground-penetrating_radar_to_locate_tree_roots#downloadCitation)
- Nichols, P. McCallum, A. & Lucke, T. (2017). Using ground penetrating radar to locate and
categorize tree roots under urban pavements. *Urban Forestry & Urban Greening* 27
(2017) 9-14. doi: 10.1016/j.ufug.2017.06.019
- Nowak D.J.& Dwyer J.F. (2007) *Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest
Ecosystems*. In: Kuser J.E. (eds) *Urban and Community Forestry in the Northeast*.
Springer, Dordrecht. Doi 10.1007/978-1-4020-4289-8_2
- ONU (2018, mayo): *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en
desarrollo*. Recuperado de
[https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-
prospects.html](https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html).
- Pérez-Otero, R., Mansilla, J.P., Nicolás, R. y Magán, M. (2008): Estudio biomecánico del
arbolado del Parque del Castillo de Soutomaioir (Pontevedra, España). *I Simposio
Iberoamericano – IV Jornadas Ibéricas de Horticultura Ornamental*. Actas de
Horticultura 52. Innovación y futuro en la Jardinería. Pontevedra. España.
- Perry, T.O. (1989). Tree Roots: Facts and Fallacies. *Journal article. Arnoldia*, 49(4), 2-21.
Arnold Arboretum of Harvard University (Ed) Stable. Recuperado de
[http://arnoldia.arboretum.harvard.edu/pdf/articles/1989-49-4-tree-roots-facts-and-
fallacies.pdf](http://arnoldia.arboretum.harvard.edu/pdf/articles/1989-49-4-tree-roots-facts-and-fallacies.pdf)

- Persson, H. (1996). Fine-root dynamics in forest trees. - Persson, H & Baitulin, I.O. (Ed) En Acta Phytogeogr. Suec. 81 Plant root systems and natural vegetation, (pp. 35-38), Uppsala, Suecia: Eklundshof Grafiska. AB
- Priego González de Canales, C. (2002) Beneficios del Arbolado Urbano (Ensayo Doctorado) España, Universidad de Córdoba. Recuperado en <http://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios%20del%20arbolado%20urbano.pdf>
- Rivas Torres, D. (2005). Planeacion, *Espacios Verdes y sustentabilidad en el distrito Federal*. Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño. Línea de Investigación: Estudios Urbanos. División de Ciencias y Artes para el Diseño. México D. F. Recuperado de http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/2362/Planeacion_espacios_verdes_y_sustentabilidad--2005_07_13_Rivas_Torres_Daniel.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Romeralo, C. (2010). *Reliability of rootfinder instrument for AF decay in standing trees*. Msc. Thesis. Swedish University of Agricultural Science. Uppsala, Sweden. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.9687&rep=rep1&type=pdf>
- Sambuelli, L., Socco, L.V., Godio, A., Nicolotti, G. & Martinis, R. (2003, Sep-Dec). Ultrasonic, electric and radar measurements for living trees assessment. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 44(3-4) 253-279; Università di Torino, Italy. Recuperado de http://www3.ogs.trieste.it/bgta/pdf/bgta44.3.4_SAMBUELLI.pdf
- Siegert, B. (2013, 26 de Abril). Comparative Analysis of tools and methods for the evaluation of tree stability. Results of a field test in Germany. *Arborist News* 201-26-31. Recuperado de <https://www.ias.hk/wp-content/uploads/2016/04/Siegert-Comparative-Analysis-of-Tools-and-Methods-for-the-Evaluation-of-Tree-Stability.pdf>
- Sutton, R.F. (1980, Enero). Root system morphogenesis. *New Zealand Journal of Forestry Science* 10(1). 264-292. Great Lakes Forest Research Centre, Sault Ste. Marie, Ontario, Canada. Recuperado de

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.700.5040&rep=rep1&type=pdf>

Wallace, A., Romney, E.M. & Cha, J.W. (1980). Depth distribution of roots of some perennial plants in the Nevada Test Site Area of the northern Mojave Desert. *Great Basin Naturalist Memoirs* 4(28), 201-207. Recuperado de <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1122&context=gbnm>

Woodroof, J.G. & Woodroof, N.C. (1934, 15 de setiembre). Pecan root growth and development. *Journal of Agricultural Research*. 49(6), 511-530. Washington D.C. USA. Recuperado de <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968576/PDF>

Yeager, A.F. (1935). Root system of certain trees and shrubs grown on prairie soils. *Journal of Agricultural Research* 51(12) 1084-1092. North Dakota Agricultural Experiment Station. Washington DC. Recuperado de <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968618/PDF>.