



Áreas verdes urbanas e infiltración de agua como servicio ambiental en xalapa, veracruz, méxico
Urban green areas and water infiltration as an environmental service in Xalapa, Veracruz, Mexico

José Carlos Villalba-Murrieta¹, Rene Murrieta-Galindo¹ y Olivia Palacios-Wassenaar^{1,2*}

¹El Colegio de Veracruz. Carrillo Puerto 26, Zona Centro, Centro, 91000 Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

²Instituto de Ecología A.C., Red de Biodiversidad y Sistemática.

* Autor para correspondencia. Email: olivia.palacios@gmail.com

Recibido 25 de enero 2021; recibido en forma revisada 22 de marzo de 2021; aceptado 15 de septiembre de 2021

RESUMEN

Las áreas verdes de una ciudad contribuyen a la infiltración del agua de lluvia hacia el subsuelo, fomentando la recarga de los acuíferos y la regulación de aportes hídricos a ríos, por lo que brindan un importante servicio ambiental, aunque este servicio ha sido poco estudiado. El presente trabajo tiene como objetivo conocer la capacidad potencial de infiltración en cinco áreas verdes urbanas y periurbanas, con la finalidad de proponer estrategias para incrementar la eficiencia de este servicio ambiental en la ciudad de Xalapa, Veracruz. Para ello se utilizó el método de anillos concéntricos en muestreos al azar en cinco áreas verdes: Las Macadamias, Parque Natura, Molinos de San Roque, Tejar Garnica y Francisco J. Clavijero. La capacidad potencial de infiltración encontrada para dichas áreas fue de 16.01 L/h por metro cuadrado y la capacidad potencial de recarga de los acuíferos podría alcanzar hasta un 40% del agua que consume la ciudad. Los principales factores que influyeron en la infiltración de las áreas verdes evaluadas fueron la porosidad y el porcentaje de arena y arcilla en el suelo. La infiltración de hasta 4000 mm/h por metro cuadrado podría ser fomentada mediante el uso de pavimentos porosos y zanjas de infiltración en nuevas zonas habitacionales, vialidades y áreas

verdes. Se recomienda el análisis de otros factores como el tamaño de los poros del suelo, presencia de mantillo y tipo de cobertura vegetal; e incorporar en las normas sobre áreas de expansión urbana la utilización de pavimentos porosos y zanjas de infiltración, con la finalidad de favorecer este servicio ambiental.

Palabras Clave: expansión urbana, pavimentos porosos, recarga de acuíferos

ABSTRACT

The green areas of a city contribute to the infiltration of rainwater into the subsoil, promoting the recharging of aquifers and the regulation of water contributions to rivers, for which they provide an important environmental service, although this service has been little studied. The present work aims to know the potential infiltration capacity in five urban and peri-urban green areas, in order to propose strategies to increase the efficiency of this environmental service in the city of Xalapa, Veracruz. For this, the concentric ring method was used in random samplings in five green areas: Las Macadamias, Parque Natura, Molinos de San Roque, TejarGarnica and Francisco J. Clavijero. The potential infiltration capacity found for these areas was 16.01 L / h per square meter and the potential recharge capacity of the aquifers could reach up to 40% of the water consumed by the city. The main factors that influenced the infiltration of the evaluated green areas were the porosity and the percentage of sand and clay in the soil. Infiltration of up to 4000 mm / h per square meter could be promoted through the use of porous pavements and infiltration ditches in new residential areas, roads and green areas. The analysis of other factors is recommended, such as the size of the soil pores, presence of mulch and type of vegetation cover; and incorporate into the regulations on urban expansion areas the use of porous pavements and infiltration ditches, in order to promote this environmental service.

Key Words: urban expansion, porous pavements, aquifer recharge.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad en el mundo y en México la principal causa de pérdida de áreas verdes es la necesidad de mayores superficies para cultivo, crianza de animales y desarrollos urbanos, que promueve los desmontes ilegales, la extracción de madera y el crecimiento de vías de comunicación (SEMARNAT, 2012). La expansión urbana trae como consecuencia una reducción en la superficie de las áreas verdes, al favorecer el cambio de uso del suelo, generando cambios en la dinámica del sistema natural y una reducción de los servicios ambientales (Liu et al., 2001; Moreno y Céspedes, 2009).

Los servicios ambientales están constituidos por aquellas condiciones y procesos en los cuales los ecosistemas otorgan soporte a los seres humanos (Daily, 1997). Entre los servicios ambientales más importantes se pueden mencionar la regulación de la temperatura, la captura de carbono, la contribución al ciclo del agua, la regulación de inundaciones, el control de la contaminación, la regulación de la calidad del aire y la reducción de la velocidad del viento (ONU, 1996; Nowak et al., 1998; PAOT, 2003). Varios de los servicios ambientales que destacan por su importancia para la

supervivencia humana son proporcionados por el suelo, entre ellos, la retención e infiltración del agua, que forman parte del ciclo hidrológico. A través de estos procesos, se logra la captación y distribución del agua a través de los ecosistemas, siendo la infiltración un proceso esencial para tal función (Schlichting, 1978; Blume, 1990).

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo a través de aberturas y poros de diversos tamaños (Selby, 1970). Este proceso se relaciona principalmente con la lluvia, pero existen diferentes factores que lo condicionan, tales como la degradación ambiental y de los ecosistemas terrestres, que a su vez está ligada a una compleja relación entre los elementos del soporte natural, tales como el suelo, el agua, el aire, los procesos biogeoquímicos y el tejido social (Fernández, 1996). La presencia o ausencia de vegetación se ha demostrado como un parámetro muy importante para la capacidad de infiltración de los suelos, influenciando el tiempo y duración de la escorrentía. Los suelos que presentan vegetación conservada, con árboles y arbustos, generalmente demuestran una mayor capacidad y velocidad de infiltración que aquellos que se encuentran descubiertos

de vegetación (Blackburn, 1984), debido principalmente a su elevada alta porosidad a causa de la actividad biológica y la ausencia de interferencia del ser humano (FAO, 2005; Benítez, 2011; Valdés, 2016).

Por otro lado, Aparicio (1992) destaca que el estudio de la capacidad de infiltración es importante para generar información que contribuya a solucionar problemas de diseño asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas; siendo éste un tema que recibe poca atención por parte de los ingenieros proyectistas, haciendo vulnerables algunas zonas pobladas o construcciones.

En este contexto, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la capacidad potencial de infiltración áreas verdes urbanas y periurbanas de la

ciudad de Xalapa, Veracruz, en relación con la precipitación y las características físico-químicas del suelo, con la finalidad de proponer estrategias para incrementar la eficiencia de este servicio ambiental.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se realizó en la ciudad de Xalapa, localizada en la zona montañosa central del estado de Veracruz, México, en las estribaciones orientales del Cofre de Perote, en la zona de transición entre la Sierra Madre Oriental y la planicie costera del Golfo de México, a una altitud entre 1,250 a 1,560 ms.n.m. (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015) (Figura 1).

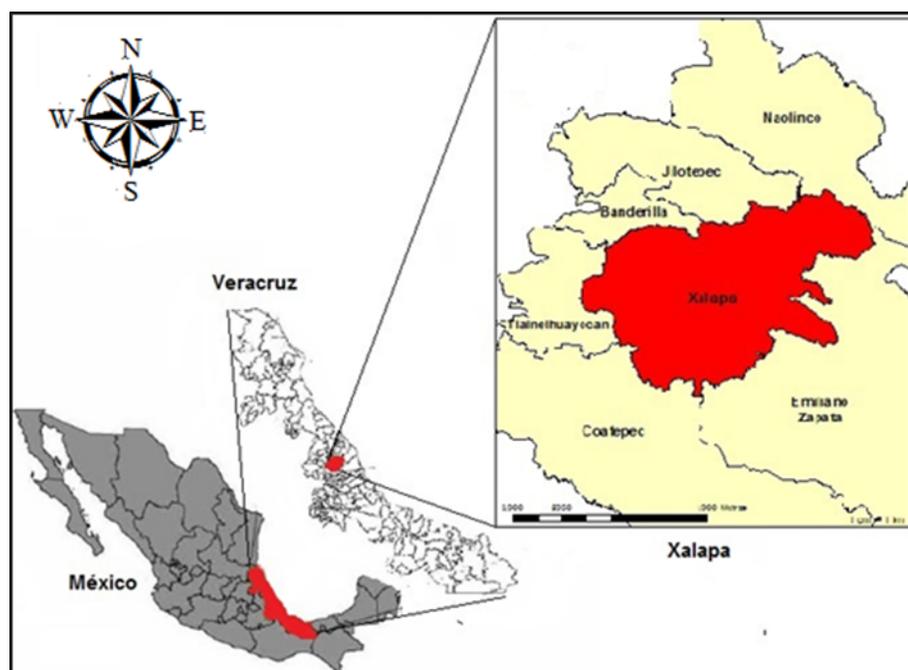


Figura 1. Ubicación del municipio de Xalapa y sus colindancias municipales. Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI, 2015.

El clima es una transición entre templado húmedo con lluvias todo el año al noroeste, mientras que en el resto del área se presenta un clima semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano. La temperatura promedio oscila entre los 18 y 24 °C y la precipitación anual es de 1587 mm (INEGI, 2010). Se observan lluvias abundantes en verano y principios de otoño (junio y septiembre) siendo más ligeras en el resto del año, aunque es común la presencia de lloviznas con niebla en invierno, debido a la afluencia de los vientos del norte (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

La ciudad de Xalapa se encuentra rodeada por numerosas fuentes de agua, como los ríos Sedeño, Carneros y la laguna “El Castillo”. También, presenta arroyos, como el de Chiltoyac y las Ánimas; y dentro del perímetro urbano se localizan los manantiales de los Tecajetes y Xallitic (H. Ayuntamiento, 2015). Sin embargo, el abastecimiento de agua potable se realiza mediante otras fuentes superficiales, principalmente el

río Los Pescados, que pertenece a una de las cuencas de la Región Golfo Centro con el mayor índice de aprovechamiento en la zona, es decir la más “explotada” (MDGIF, 2010). En cuanto a aguas subterráneas, se ubica en la parte central del acuífero Jalapa-Coatepec, el cual tiene un área de recarga de unos 821 Km². De acuerdo con estimaciones de la Comisión Nacional del Agua, la recarga media anual de este acuífero asciende a 120 millones de metros cúbicos (MDGIF, 2010).

Los principales tipos de suelo en la ciudad son Phaeozem (16.94 %), Regosol (15.76 %), Andosol (14.15 %), Luvisol (3.74 %) y Leptosol (0.11 %) (Figura 2); el resto corresponde a la zona urbana (INEGI, 2010).

El análisis de la capacidad de infiltración se realizó en tres áreas verdes urbanas y dos periurbanas de la ciudad de Xalapa (Figura 2):

1. Área Natural Protegida “Molinos de San Roque”
2. Área Natural Protegida “Natura”

3. Área Verde “La Herradura”
4. Parque ecológico “Las Macadamias”
5. Área Natural Protegida “Francisco J. Clavijero”

uso, presión urbana y representatividad tanto ecológica como biológica para la ciudad. Las dos áreas verdes periurbanas (4 y 5) seleccionadas presentan similitud con las áreas verdes urbanas en cuanto a vegetación y tipo de suelo.

Las áreas verdes urbanas (1, 2 y 3) fueron seleccionadas por la importancia que presentan debido a su dimensión,

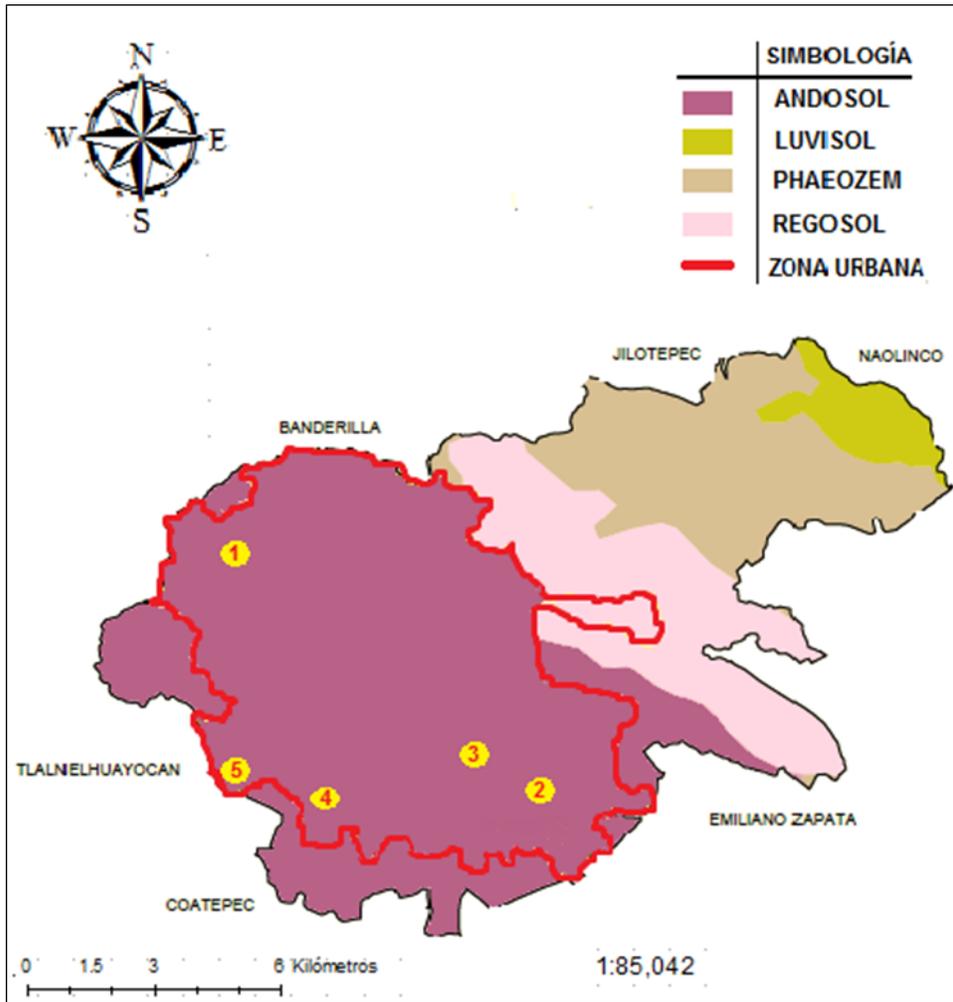


Figura 2. Áreas verdes seleccionadas para estudio de infiltración y tipos de suelo en la zona urbana de Xalapa. Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI, 2010 y Lemoine, 2012.

Para medir la capacidad de infiltración del suelo en las áreas verdes seleccionadas se empleó el método de anillos concéntricos o infiltrómetro de doble anillo de Muntz, usado por Fernández et al. (1971), con modificaciones a fin de adaptarlo a las condiciones de campo. Se sustituyó la lámina de acero inoxidable por lámina de acero común y más delgada, por razones de costo y facilidad de traslado a campo; el suelo en el lugar de muestreo no fue modificado para la medición a fin de mantener su estructura natural; las medidas marcadas en los anillos fueron modificadas y por último, se amplió la colecta de datos para tener una mejor valoración de los factores evaluados. Este método es ampliamente utilizado por su practicidad. Consiste en saturar con agua el espacio de a evaluar, el cual fue

confinado entre dos anillos de un material resistente e impermeable (lámina de acero). Existen diversas medidas de anillos, 28 cm, 30 cm y 32 cm de diámetro para el anillo interno y 53 cm, 55 cm y 57 cm para el anillo externo (Ibañez et al. 2010). Para esta investigación se seleccionó una medida intermedia, 30 cm de diámetro para el interior y 55 cm para el exterior (Figura 3), con el borde superior reforzado y el borde inferior biselado para facilitar su penetración en el terreno. Los anillos se hundieron en el suelo a una profundidad de 10 y 5 cm respectivamente (Figura 4) con la ayuda de un martillo de goma, utilizando una tabla de madera para enterrar ambos cilindros de manera equitativa.



Figura 3. Sistema de anillos concéntricos usados para medir la infiltración. Fotografía: J.C. Villalba-Murrieta.

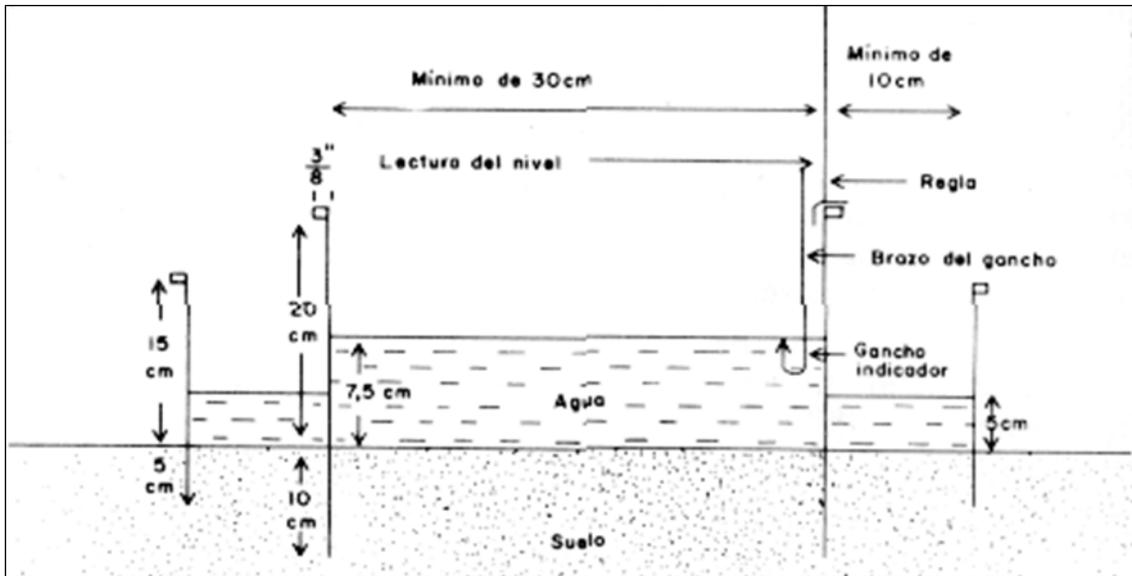


Figura 4. Esquema de uso del método de doble anillo. Fuente: Marano, 2015.

El anillo exterior controla las condiciones de borde, de manera que el flujo en el anillo interno ocurrió de manera vertical. El anillo interior sirvió como medio principal de medición, en el que se tomaron las lecturas. Primero se vertió agua hasta la marca de 5 cm en el anillo exterior; después se vierte agua hasta los 15 cm del anillo interno, en el cual se marca el cero a 5 cm del suelo para mantener un efecto buffer, y una marca “10” a los 15 cm para proporcionar un margen de 10 cm para

las mediciones del nivel de agua a medida que se toma el tiempo. El nivel del agua del anillo interno se mantuvo por debajo de la marca “0” para controlar la relación de nivel de agua con el anillo exterior. Después de agregar el agua, se tomaron 5 mediciones del nivel interno cada minuto, durante los primeros cinco minutos; luego, tres mediciones cada 5 minutos; dos mediciones cada 20 minutos y en una medición a la hora de iniciado el procedimiento. Se da por finalizado el

proceso cuando la diferencia entre una medida y la siguiente es nula. Los datos se registraron en tablas de Excel.

Se realizaron 6 mediciones en sitios ubicados al azar en cada área verde y con los resultados individuales se obtuvo el promedio. El área de infiltración se estimó de acuerdo con la fórmula:

$$A=2*\pi*r*(r+h)$$

Donde

A: área de infiltración

π : Pi (relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro)

r: radio

h: es la altura en función del ejercicio realizado.

Conociendo el área del cilindro y el promedio de la infiltración de las cinco áreas verdes evaluadas se obtuvo el estimado de la capacidad potencial de infiltración total de las áreas verdes evaluadas, mediante la operación de regla de proporciones.

Adicionalmente para cada sitio de muestreo se registraron los siguientes factores: pH del suelo (con medidor digital de alta precisión marca Kecheng), temperatura, humedad, luz y vegetación circundante.

Para comparar la capacidad de infiltración que presentan

las áreas verdes en distintos momentos, se realizaron las pruebas en días donde el suelo se encuentra relativamente seco y en otros con el suelo húmedo (días lluviosos y no lluviosos).

Se evaluaron las características físicas de los suelos (porosidad, tipo de poros, densidad real y aparente, textura, porcentaje de arena, arcilla y limo) en cada sitio, para lo cual se tomaron muestras de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía, campus Xalapa de la Universidad Veracruzana, siguiendo la guía de Narro (1994) y la Norma antes mencionada.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante prueba de Chi-cuadrado y prueba de MonteCarlo para evaluar las diferencias de infiltración entre sitios, y mediante análisis de componentes principales (PCA) para evaluar los factores que inciden en la infiltración, con apoyo de los programas estadísticos PAST versión 3.08. (PAST, 2016) y R versión 3.3.2 (EASP, 2017).

Se hizo una revisión bibliográfica sobre las opciones para fomentar la infiltración a nivel urbano, y se eligió analizar el uso de pavimentos porosos y zanjas de infiltración, por ser los más factibles desde el punto de

vista económico, social y ambiental, de acuerdo con EPA (1980), Yang y Jiang(2003), Ferguson (2005), Rodríguez (2008), García (2011), Saucedo (2012)³.

RESULTADOS

Infiltración en las áreas verdes evaluadas y factores que influyen en el proceso

En el cuadro 1 se resumen las tasas promedio de infiltración obtenidas mediante los muestreos, las

características de los suelos, tipo de poros, cobertura vegetal, presencia de mantillo (materia orgánica en el suelo) y grado de perturbación visible en las áreas verdes evaluadas.

Cuadro 1. Infiltración promedio con lluvia, sin lluvia y total, características del suelo y factores que influyen sobre procesos en las áreas verdes evaluadas

| | J. Clavijero | P. Natura | T. Garnica | Molinos SR | Macadamias |
|---|----------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|
| Infiltración sin lluvia (mm/h) | 441.34 | 617.10 | 360.80 | 204.44 | 174.54 |
| Infiltración con lluvia (mm/h) | 1088.29 | 327.50 | 317.45 | 123.00 | 28.05 |
| Infiltración total (mm/h) | 1529.63 | 944.60 | 678.25 | 327.44 | 202.59 |
| Densidad aparente (g/cm³) | 0.56 | 0.94 | 0.80 | 0.92 | 0.84 |
| Densidad real (g/cm³) | 3.45 | 2.29 | 2.42 | 2.24 | 2.68 |
| Porosidad (%) | 83.8 | 59 | 67 | 59 | 68.7 |
| Tipo de poros | Macroporos | Macroporos | Macroporos | Microporos | Microporos |
| Arena (%) | 45.28 | 27.28 | 49.28 | 26.56 | 38.56 |
| Arcilla (%) | 42 | 44 | 28 | 40.72 | 30.72 |
| Limo (%) | 12.72 | 28.72 | 22.72 | 32.72 | 30.72 |
| Textura | Arcillo arenosa | Arcillosa | Franco arcillo arenosa | Arcillosa | Franco arcilloso |
| Cobertura vegetal | Haya Liquidámbar, Equimite | Cafetal y Hayas | Café, Níspero y Hayas | Haya, Liquidámbar y Roble | Pasto |
| Presencia de Mantillo (materia orgánica en el suelo) | Abundante materia orgánica | Abundante materia orgánica | Poca materia orgánica | Regular materia orgánica | Sin materia orgánica |
| Grado de perturbación | Bajo | Bajo | Bajo | Medio | Medio |

| | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|
| visible | | | | | |
|---------|--|--|--|--|--|

La capacidad de infiltración potencial total estimada para las áreas verdes evaluadas resultó ser de 16.01 L/h por metro cuadrado. Considerando este valor y la superficie disponible de áreas verdes para el año 2015 en Xalapa, se obtiene que la infiltración total potencial de las áreas verdes en la ciudad se estima en 2345.2 m³/h. Sin embargo, el valor real dependerá de la precipitación de la zona. Este valor es equivalente al 40% del flujo total de agua (5810.4 m³/h) que la ciudad obtiene de las cuencas Huitzilapan (3600 m³/h), Pixquiac (2016 m³/h) y el manantial El Castillo (194.4 m³/h) respectivamente (Nuestra agua viene de las cuencas, 2017).

Los resultados obtenidos muestran que Francisco J. Clavijero destaca por tener la mayor tasa de infiltración mientras que Las Macadamias presenta la menor tasa de infiltración (Cuadro 1). Es notorio que la infiltración en

los días sin lluvia es mayor, excepto en el sitio Francisco J. Clavijero. Sin embargo, Aparicio (1992) menciona que durante el proceso existen “pérdidas” en el volumen de agua, lo que puede corresponder directamente a la relación que existe entre la infiltración y la cobertura vegetal, tipo de suelo y otros factores.

De acuerdo con el análisis estadístico, existe una relación significativa entre los resultados con y sin lluvia en las áreas verdes muestreadas (cuadro 2). Esta relación es mayor en los sitios Las Macadamias y el ANP Molinos de San Roque debido a que presentaron la menor capacidad de infiltración (Figura 5).

Cuadro 2. Análisis estadístico Chi-cuadrado de las muestras con y sin lluvia

| Chi-cuadrado | |
|---------------------|----------------------------|
| Rows, columns: 5, 2 | Degrees freedom: 4 |
| Chi2: 484.12 | p (no assoc.): 1.8176E-103 |

Monte Carlo p:0.0001

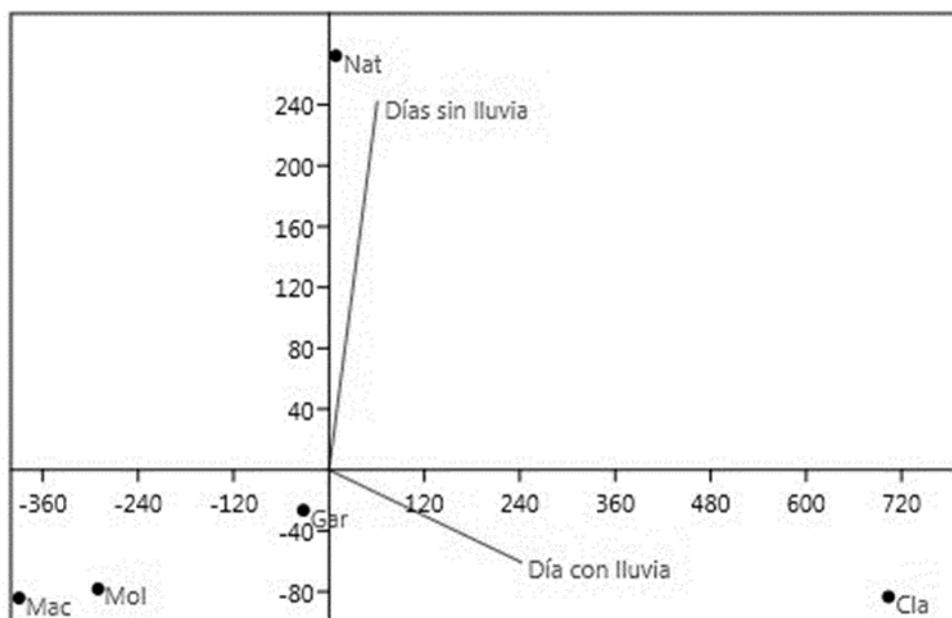


Figura 5. Análisis PCA de los datos de infiltración en días sin lluvia y con lluvia en los sitios evaluados. Nat: Parque Natura; Cla: Francisco J.Clavijero; Mac: Las Macadamias; Mol: Molinos de San Roque; Gar: Tejar Garnica.

La densidad real y la porosidad del área Francisco J. Clavijero son superiores a las otras áreas verdes (cuadro 1), probablemente por su mayor contenido de materia orgánica. De acuerdo con Lutz y Chandler (1946), la calidad del suelo de un sitio se relaciona con su porcentaje de porosidad y normalmente se considera un buen sitio cuanto mayor sea el porcentaje de porosidad. Por otro lado, Donoso (1992) señala que la porosidad

del suelo se determina principalmente por la textura, estructura y la cantidad de materia orgánica. También menciona que el comportamiento del agua y del aire en suelos con el mismo porcentaje de porosidad puede variar, debido a que la porosidad está constituida por macroporos (característicos de suelos arenosos) y microporos (característicos de suelos arcillosos) que a su vez determinan la infiltración y la retención de agua

respectivamente. Estudios realizados por la Universidad del estado de Washington (WSU, 2004) mencionan que la compactación del suelo disminuye su calidad, puesto que limita la profundidad de las raíces y minimiza el tamaño de los poros. Esto provoca una menor absorción e infiltración de agua; en consecuencia, se presenta un

incremento de la escorrentía y de la erosión del suelo. Por ello, en el presente estudio se consideró tanto la porosidad como la presencia superficial de materia orgánica en el suelo en las áreas verdes. En el cuadro 3 se resumen las propiedades de acuerdo con las partículas del suelo

Cuadro 3. Propiedades de los suelos de acuerdo con las partículas que lo conforman

| | Arena | Limo | Arcilla |
|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Porosidad | Principalmente poros grandes | Poros pequeños predominan | Poros pequeños predominan |
| Permeabilidad | Rápida | Baja a moderada | Lenta |
| Capacidad de retención de agua | Limitada | Media | Muy grande |
| Superficie de las partículas del suelo | Pequeña | Media | Muy grande |
| Promedio de retención de agua (mm/m²) | 22.96 - 45.93 | 36.74 – 90.92 | 59.71 – 110.23 |

El resultado de los análisis estadísticos realizados en cuanto a las características hidrofísicas de los suelos en las áreas evaluadas indica que la infiltración se ve significativamente afectada por la porosidad ($Z=94.16$, $df=4$, $P<0.005$), presencia de arcilla ($Z=201.32$, $df=4$, $P<0.005$) y presencia de arena ($Z=175.03$, $df=4$,

$P<0.005$). Se encontró una relación significativa entre los factores porosidad y arcilla en las áreas verdes Francisco J. Clavijero, Molinos de San Roque y Natura. Por otro lado, el porcentaje de arena resultó significativo en las áreas verdes Tejar Garnica y Macadamias (figura 6).

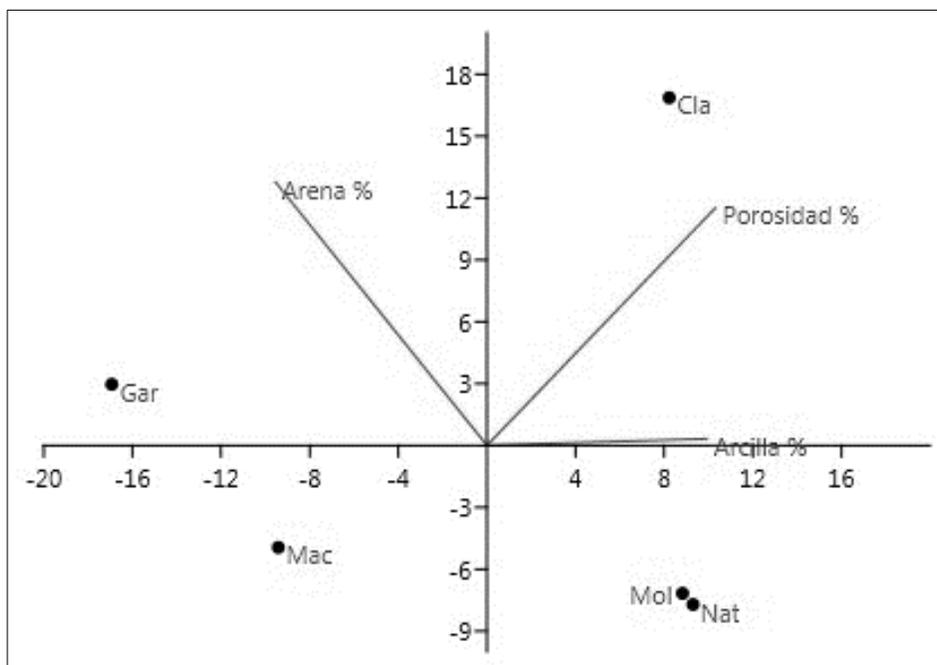


Figura 6. Gráfica PCA de los factores influyentes en la capacidad potencial de infiltración de áreas verdes evaluadas. Nat: Parque Natura; Cla: Francisco J.Clavijero; Mac: Las Macadamias; Mol: Molinos de San Roque; Gar: Tejar Garnica.

Los tipos de vegetación en los sitios de estudio también juegan un papel de gran importancia en el proceso de infiltración, como puede observarse en el cuadro 4.

Cuadro 4. Infiltración de agua en 6 ecosistemas diferentes de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda

| Ecosistema | Capacidad de infiltración (mm/h) |
|---|----------------------------------|
| Bosque de pino con materia orgánica en el suelo | 313 |
| Bosque de pino sin materia orgánica en el suelo | 60.1 |
| Matorral xerófilo con <i>Larrea tridentata</i> | 60.1 |

| | |
|---|-------|
| Matorral xerófilo con <i>Acacia constricta</i> | 26.1 |
| Selva baja caducifolia | 77.4 |
| Pastizal | 205.5 |
| Bosque de encino | 210.2 |

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de García-Hernández et al.(2008).

A partir los análisis realizados y las características resumidas en el cuadro 1, se interpreta la situación de cada una de las áreas verdes evaluadas.

1.- Francisco J. Clavijero: esta área de conservación se encuentra en las afueras de la ciudad capital, formando parte del bosque de niebla. Los muestreos fueron realizados en lugares no modificados para mayor precisión del ejercicio. La vegetación predominante está conformada por Haya (*Platanus mexicana*), Liquidámbar (*Liquidambar macrophylla*), Equimite (*Erythrina caribaea*) y Pipinque (*Carpinus caroliniana*).

El suelo presenta abundante materia orgánica. Es el área que presenta mayor tasa de infiltración, debido a que todos los factores son favorables: suelo con arena, cobertura vegetal arbórea con escaso grado de intervención y abundante materia orgánica.

2.- Parque Natura: se caracteriza por tener la segunda tasa de infiltración más alta, después de

Clavijero. Aunque se encuentra circundada por grandes avenidas de la capital, en su interior presenta zonas de conservación bien conservada, y remanentes de cultivos de café en abandono. La cubierta vegetal se caracteriza por arbustos y árboles de tallas medias y grandes con presencia de abundante materia orgánica en el suelo; y una muy baja perturbación. A pesar de tener un suelo arcilloso, la presencia de materia orgánica y las raíces de la vegetación favorecen la infiltración.

3.- Tejar Garnica: presenta suelo con material rocoso y árboles de grandes dimensiones (más de 10 metros), mientras que los pequeños arbustos alcanzan apenas dos metros como máximo. La cubierta vegetal a nivel de suelo es casi constante por una especie de pasto. La tasa de infiltración en días sin lluvia y días con lluvia es similar, probablemente debido a que el suelo presenta buen porcentaje de arena, lo que propicia una mayor cantidad de macroporos y por ende, favorece la

infiltración (Donoso, 1992). Por otro lado, aunque la cobertura vegetal es diversa y presenta un bajo grado de perturbación, hay escasa materia orgánica en el suelo, por lo que la infiltración es significativamente menor a las áreas anteriores.

4.- Molinos de San Roque: esta área natural protegida se encuentra situada en la periferia de la zona urbana. Pese a su ubicación, la vegetación presenta altos niveles de perturbación, tanto en su interior, como en sus límites. A pesar de ser un área protegida, las tasas de infiltración son relativamente bajas en comparación con las otras áreas verdes muestreadas. Esto puede ser producto del suelo arcilloso que presenta, el cual está casi siempre húmedo, al grado de observar encharcamientos y mal drenaje. La perturbación de la vegetación reduce la cantidad de materia orgánica en el suelo, que podría favorecer la infiltración, como se observó en Parque Natura.

5.- Las Macadamias: esta área está delimitada por el desarrollo urbano y se encuentra rodeada por complejos habitacionales, infraestructuras y una de las avenidas más concurridas de la ciudad. Su capacidad de

infiltración es inferior a las otras áreas. La cubierta vegetal es de pastos, principalmente pasto alfombra o kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) lo que podría explicar en parte esta baja infiltración, ya que los suelos forestales absorben cuatro veces más agua de lluvia que los suelos cubiertos por pastos (Marcano, 2011). Por otro lado, aunque el suelo es franco-arcilloso, carece de materia orgánica, lo cual incide directamente en su capacidad de infiltración y retención de agua (García-Hernández et al., 2008).

Alternativas para mejoramiento de la infiltración

Los pavimentos permeables o porosos generan interés debido a los beneficios potenciales para su uso en calles dentro de la urbe, en nuevos fraccionamientos e incluso en zonas peatonales de las áreas verdes. Sin embargo, es necesario considerar algunos aspectos relevantes de los mismos, especialmente si se usan para áreas verdes urbanas.

Las ventajas y desventajas técnicas se resumen en el cuadro 5.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas técnicas de los pavimentos porosos

| Ventajas y Desventajas Técnicas | | |
|--|---|---|
| Pavimentos Porosos | Relación directa con el control de la cantidad de la escorrentía urbana | La colmatación (por sólidos suspendidos en la escorrentía y la degradación por ciclos de hielo-deshielo). |
| | Disminuye la carga hidráulica en el sistema en tiempo de lluvia y se reducen los diámetros de las conducciones. | Sensible a la compactación del terreno, un desacertado diseño, una mala ejecución o un insuficiente o inexistente mantenimiento producirá una reducción en la fiabilidad del sistema. |
| | Bien diseñado tiene una resistencia y una duración similar a un pavimento convencional | La resistencia a la compresión del concreto poroso es de aproximadamente 2000 libras por pulgada cuadrada (psi) mientras que la del pavimento tradicional en concreto es de 3500 psi o más. |
| | Obra de construcción de manera sencilla, no requiere espacios adicionales para su instalación y apropiado para pendientes suaves. | Menor resistencia que el concreto común, solo debe colocarse en zonas de tránsito ligero. |
| | Proceso de deflexión a mayor tiempo, pero la magnitud de la deflexión es aproximadamente igual a un pavimento convencional. | Poca funcionalidad en zonas con gran aporte de sedimentos o terrenos con pendientes mayores al 5%. |
| | Se considera cadena de drenaje sostenible completa pues integra los procesos de infiltración, captación, transporte y almacenamiento. | La puesta en obra es lenta y laboriosa, además de necesitar revisión constante durante todo el proceso de construcción, método de mantenimiento consiste en trabajos difíciles. |

Fuente: Elaboración propia a partir de EPA, 1980; Ferguson, 2005; Rodríguez, 2008; García, 2011; Saucedo, 2012.

Es importante destacar que el uso de múltiples alternativas en una misma zona o construcción, por ejemplo, pavimentos porosos y canaletas de infiltración, aumentará la superficie de infiltración y por lo tanto, el proceso se verá beneficiado.

En el cuadro 6 se resumen las ventajas y desventajas ambientales de los pavimentos porosos.

Cuadro 6. Ventajas y desventajas ambientales de los pavimentos porosos

| Ventajas y Desventajas Ambientales | | |
|---|--|--|
| Pavimentos porosos | Reutilización de las aguas pluviales para usos no potables. | Riesgo por penetración de contaminantes no retenidos o reducidos. |
| | Los suelos retienen la humedad por más tiempo y permiten la recarga de los mantos freáticos. | Sin un adecuado drenaje de la escorrentía almacenada entre eventos de lluvia, pueden darse condiciones |

| | |
|--|---|
| | anaerobias |
| Reducen el riesgo de inundaciones ya que libera de manera diferida el agua. | El agua almacenada durante un largo periodo de tiempo puede aumentar su temperatura, por lo que su vertido en el medio receptor puede afectar negativamente a los sistemas acuáticos. |
| Mejor aprovechamiento del agua-lluvia al separarse del sistema de drenaje | |
| Mejora de la calidad del agua de escorrentía urbana | |
| Prolongación del tiempo de vida de vegetación. | |
| Disminuye la contaminación propia del agua de escorrentía urbana | |
| Elimina el fenómeno islas de calor en las ciudades. | |
| Ahorro de energía. | |
| Reduce las emisiones de CO ₂ , esto aplica para los pavimentos porosos que están hechos en adoquín, que dentro de sus celdas tienen vegetación. | |

Fuente: Elaboración propia a partir de Yang y Jiang, 2003; Ferguson, 2005; García, 2011; Saucedo, 2012.

Durante los muestreos realizados en las áreas verdes, se pudo observar que en algunas áreas no se presenta infraestructura adecuada que fomente la infiltración, sino lo contrario, aumentando el proceso de escorrentía en caminos internos de las mismas.

En el uso y construcción de pavimentos porosos también se encuentran ventajas y desventajas sociales, relacionadas principalmente a la seguridad y estética del uso de esta alternativa las cuales son mencionadas en el cuadro 7.

Cuadro 7. Ventajas y desventajas sociales del uso de pavimentos porosos

| Ventajas y Desventajas Sociales | | |
|--|--|--|
| Pavimentos porosos | Incrementan los coeficientes de fricción del pavimento poroso contribuyendo a que las carreteras donde estén instalados estos sean más seguras | Carencia de experiencia y desconfianza de los técnicos |
| | Poros trabajan como canales de descompresión donde cualquier agua estancada escapa de debajo de los neumáticos del vehículo, manteniendo los neumáticos en contacto con la superficie. | Desde el punto de vista de seguridad, existe un riesgo de deslizamiento en los primeros meses de su instalación. |
| | Estéticamente, los pavimentos permeables proporcionan una mejor presentación respecto a otros sistemas de drenaje, y permiten el crecimiento de vegetación. | La estética del pavimento poroso es limitada, si la superficie no tiene buenos acabados puede resultar incómodo de pisar y de rodar con ruedas pequeñas debido a las discontinuidades. |
| | El ruido de los neumáticos en un pavimento poroso es de menor intensidad y bajo de tono que el de un pavimento tradicional. | |

Fuente: Elaboración propia a partir de Ferguson, 2005; Rodríguez, 2008; García, 2011.

Finalmente, una de las dudas más comunes se refiere a los aspectos económicos del uso de una técnica de esta magnitud, por lo que en el cuadro 8 se resumen de los datos más relevantes de este aspecto.

Cuadro 8. Ventajas y desventajas económicas del uso de pavimentos porosos

| Ventajas y Desventajas Económicas | | |
|--|--|--|
| Pavimentos porosos | La reducción de los volúmenes de agua en la red convencional implica una reducción de los costos asociados a otros sistemas de tratamiento, por ejemplo, plantas de tratamiento. | Elevado costo de instalación y de mantenimiento de la permeabilidad en casos de condiciones severas de aporte de sedimentos. |
| | El mantenimiento necesario para su buen funcionamiento es muy bajo en comparación con otras técnicas de drenaje urbano sostenible | El costo del pavimento poroso es comúnmente mayor que el del pavimento convencional. |
| | Menor costo de ejecución por metro cuadrado, los materiales empleados son económicos y basta con poca mano de obra. | El pavimento permeable requiere un mantenimiento constante. |

Fuente: Elaboración propia a partir de Rodríguez, 2008 y García, 2011.

Analizando los cuadros presentados, se puede afirmar que esta alternativa presenta grandes ventajas. Adicionalmente, favorecería la infiltración, proporcionando aproximadamente 4000 mm/h de agua infiltrada por metro cuadrado. Adicionalmente al aporte de agua al subsuelo, al reducir la escorrentía, se estarían reduciendo los costos por construcción de infraestructura pluvial, así como los costos de las plantas de tratamiento para aguas grises. Adicionalmente, se disminuyen los riesgos y problemas que ocasiona la inundación por escorrentía en calles y avenidas de la ciudad.

CONCLUSIONES

Las áreas verdes urbanas pueden representar un importante aporte a la recarga de acuíferos por su capacidad de infiltración. En el caso de Xalapa, Veracruz, el aporte estimado podría representar en 40%

del gasto tomado de las fuentes de abastecimiento de la ciudad. Los factores más importantes para favorecer la infiltración están representados por la vegetación, en especial, la arbórea, ya que protege el suelo y proporciona materia orgánica, la cual también favorece el proceso de infiltración.

El uso de alternativas artificiales para fomentar el proceso de infiltración en la zona urbana y al interior de las áreas verdes es una opción que se debe considerar en la planificación urbana, tanto por los beneficios que proporcionan para los reservorios de agua, como por las especificaciones técnicas que se deben considerar al momento de su implementación. Sin embargo, teniendo en cuenta tanto las ventajas como desventajas técnicas, ambientales, sociales y económicas, es relevante mencionar que la implementación de estas alternativas (pavimentos porosos y zanjas de infiltración) permitirían la infiltración de 4000 mm/h por metro cuadrado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio M., F. J. 1992. *Fundamentos de Hidrología de superficie*. Limusa. México. 152 pp.
- Benítez B., G. 2011. Crecimiento de la población y expansión urbana de la ciudad de Xalapa Veracruz y sus efectos sobre la vegetación y agroecosistemas. Tesis de Doctorado. Colegio de Posgraduados. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Veracruz., México. 129 p.
- Blackburn W., H. 1984. Impacts of grazing intensity and specialized grazing systems on watershed characteristics and responses. pp. 927-985. En: National Research Council. *Developing strategies for rangeland management*. Westview Press, Boulder, CO.
- Blume H., P. 1990. Introducción. En: Blume H., P. (eds.) *Manual de la protección del suelo*. Landsberg, Alemania. Ecomed-Verlag. 1-3 pp.
- Daily G. 1997. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC, Ed. Island. 392 pp.
- Donoso Z. C. 1992. *Ecología Forestal. El bosque y su medio ambiente*. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 369 pp.
- EASP (Escuela Andaluza de Salud Pública). 2017. Aprende a usar R, ¿Qué es R? (Consultada el 2 de febrero 2017). <http://www.tutorialr.es/es/index.html>
- EPA (Environmental Protection Agency). 1980. *Porous Pavement*. Municipal Environmental Research Laboratory. Cincinnati, Ohio. 104 pp.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. 79: 9-40 p.
- Ferguson B., K. 2005. *Porous pavements*. Ed. Taylor and Francis. 577 pp.
- Fernández, P. C., J. A. Luque., J. D. Paoloni. 1971. Análisis de la Infiltración y su aplicación para diseño de riego en el valle inferior del Río Colorado. 130: 29 pp.
- Fernández. M., A. 1996. *Ciudades En Riesgo, Degradación Ambiental, Riesgos Urbanos Y Desastres*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. 32 p.
- García-Hernández, M. A., I. Castellanos-Vargas., Z. Cano-Santana y C. M. Peláez-Rocha. 2008. Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana* 26: 21-27.
- García H. E. 2011. *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos*. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia. 218 pp.
- H. Ayuntamiento de Xalapa. 2015. Datos Generales. (Consultada el 28 de marzo 2015). <http://xalapa.gob.mx/gobierno/>
- Ibañez, A. S., R. H. Moreno y J. M. Gisbert B. 2010. Características del infiltrómetro de doble anillo. (Consultada el 2 de octubre 2015). <http://hdl.handle.net/10251/7840>.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2010. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Xalapa, Veracruz de Ignacio de la Llave. (Consultada el 15 de noviembre 2016) <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2015. Conjunto de datos vectoriales topográficos 2013-2018. Escala 1:50 000. Serie III. Versión 2.
- Lemoine R. R. 2012. Cambios en la cobertura vegetal de la ciudad de Xalapa Enríquez, Veracruz y zonas circundantes entre 1950 y 2010. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Veracruzana, Xalapa Ver., México. 48 p.
- Liu, J., T. Dietz., S. Carpenter., M. Alberti., E. Morán., A. Pell., P. Deadman et al. 2001. Propuesta de modificación del método racional. *Cimbra*. 342 24-28 pp.
- Lutz H. J. y F. Jr. Chandler, R. 1946. Forest soils. 514 pp.
- Marano P. 2015. "Infiltración del agua en el suelo". (Consultada el 23 de abril 2015) http://www.academia.edu/9392314/Practico_Infiltracion_2
- Marcano J. 2011. "Importancia de los Bosques: El Agua" (Consultada el 13 de septiembre 2015) <http://www.jmarcano.com/bosques/importancia/agua.html>
- MDGIF (Fortalecimiento de la Gobernabilidad Democrática del Sector Agua y el Saneamiento en México para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio). 2010. Estudio de disponibilidad y calidad del agua en Xalapa-Enríquez, Veracruz. 114 pp.
- Moreno S., E. y S. E. Céspedes F. 2009. La urbanización y el crecimiento demográfico en relación al recurso agua: caso municipio de Chimalhuacán, Estado de México. *Quivera*, Junio-Diciembre, pp. 127-141.
- Narro F. E. 1994. Física de suelos: con enfoque agrícola. Editorial Trillas. 195 pp.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-021-RECNAT-2000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 85 pp.
- Nowak, D., J. Dwyer y G. Childs. 1998. Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. En Krishnamurthy, L. y J. R. Nascimento. *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe*. Chapingo, Estado de México. Universidad Autónoma Chapingo. (Consultada el 21 de abril 2015). <http://www.iadb.org/regions/re2/en2/2NOWAK.pdf>
- Nuestra agua viene de las cuencas. 2017. Nuestra agua y la cuenca del Río Pixquiac. (Consultada el 11 de enero 2017) http://www.lacuencastaentusmanos.com/assets/navdlc_e1.pdf
- ONU (Agenda Hábitat). 1996 (Consultada el 24 de abril 2015). http://www.unhabitat.org/declarations/documents/The_Habitat_Agenda.pdf
- PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F). 2003. Manejo y conservación de áreas verdes. 30 pp.

- PAST (Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis). Acerca de PAST. (Consultada el 9 de octubre 2016) <https://folk.uio.no/ohammer/past/>
- Rodríguez H. J. 2008. Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráfico ligero. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. 515 pp.
- Saucedo V. A. 2012. Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la recarga de los mantos acuíferos del Valle de México. UNAM. 148 pp.
- Schlichting E. 1978. Functions of soil in the ecosphere. Data and documents close. Environmental Protection. 22: 9-12.
- Selby M. J. 1970. Hillslope materials and process. Oxford University Press. Oxford. England. 41 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2012. Deforestación (Consultada el 24 de abril 2015). <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/galeria/Documents/seccion/cambio-climatico/deforestacion/deforestacion.html>
- Valdés Rodríguez O. A. 2016. Cómo las estructuras de las plantas protegen de los deslizamientos. RINDERESU vol. 1 (1): 85-91. (Consultado el 20 de mayo 2020). <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/8/pdf>
- WSU (Universidad del Estado de Washington). 2004. PhysicalPropertiesofSoil. (Consultado el 10 de enero 2017). <http://soils.tfrec.wsu.edu/mg/physical.htm>
- Yang J. y G. Jiang. 2003. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. Cement and Concrete Research. 381–386.