



ENSAYO / TECHNICAL ESSAY

SERVICIOS AMBIENTALES DE LA VEGETACIÓN EN ECOSISTEMAS URBANOS EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

ENVIRONMENTAL SERVICES OF VEGETATION IN URBAN ECOSYSTEMS IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

Eulogio Pimienta-Barríos¹, Celia Robles-Murguía¹, Servando Carvajal², Alejandro Muñoz-Urias¹, Carla Martínez-Chávez³ y Silvia de León-Santos³

RESUMEN

Es abundante la información sobre los problemas ambientales que afectan a las urbes más importantes del mundo, pero es limitada para México. Esta revela que los servicios ambientales proporcionados por la vegetación, particularmente el arbolado, contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por ejemplo; sin embargo, su eficiencia está limitada por la escasez de agua y los contaminantes del aire y se agravará con el cambio climático. Entre los principales efectos de este último destacan la formación de olas e islas de calor y el aumento en la temperatura y en las concentraciones de ozono (O_3) en las ciudades, donde dicho gas constituye una amenaza seria a la salud humana y a la de los árboles al interferir en la fotosíntesis, proceso fundamental en la prestación de servicios ambientales. La vegetación urbana puede ser una fuente de contaminación atmosférica al producir compuestos orgánicos volátiles que conducen a la formación de O_3 . La ciudad de Guadalajara está afectada por el cambio climático porque tiene porcentajes bajos de cobertura vegetal, alta contaminación del aire y la disponibilidad de agua ha disminuido. Estudios de fotosíntesis en árboles que crecen en Guadalajara revelaron amplias diferencias en su eficiencia de secuestrar carbono. Por lo tanto existe potencial para la selección de especies arbóreas con el propósito de usarlas en la reforestación de esta urbe, con el fin de reducir la contaminación del aire y mitigar los efectos del cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático, captura de carbono, ecosistemas urbanos, fotosíntesis de árboles, islas de calor, olas de calor.

ABSTRACT

There is abundant information on environmental issues that affect the most important cities of the world, but it is limited in Mexico. This reveals that the environmental services provided by urban vegetation, particularly trees, contribute to reduce emissions of greenhouses gases, temperature as well as the intensity of both heat island and heat weaves, but those environmental services provided by the vegetation are limited by the scarcity of water and air pollutants, situation that will exacerbate with climatic change. The main effects of climatic change in cities is the increase in temperature, the formation of both heat weaves and heat islands, increased concentrations of ozone (O_3), where O_3 is the main hazard, because it affects both human health and photosynthesis, a process important in providing environmental services. Urban vegetation can be a source of air pollution by producing volatile organic compounds, since they produce O_3 . Both climatic change and heat weaves accelerate the formation of these volatiles. Guadalajara city is affected by climatic change and is vulnerable because it has low percentages of vegetation cover, high air pollution and declining availability of water. Studies of photosynthesis in trees growing in Guadalajara revealed differences in their ability to sequester carbon. Thus, there is a prospective potential to select tree species to be used for reforestation of this city, with the aim to reduce urban air pollution and to mitigate the effects of climate change.

Key words: Climate change, carbon sequestration, urban ecosystems, tree photosynthesis, heat islands, heat waves.

Fecha de recepción/date of receipt: 17 de mayo de 2011; Fecha de aceptación/date of acceptance: 28 de marzo de 2012.

¹ Departamento de Ecología Universidad de Guadalajara. CUCBA. Correo-e: e_pimienta@hotmail.com

² Departamento de Botánica y Zoología. CUCBA.

³ Estudiante de la carrera de Biología. CUCBA.

INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX las ciudades del mundo crecieron de manera desmesurada. En 1900, por ejemplo, 14 % de la población mundial habitaba en ciudades, pero para 1950, 30 % (Wu, 2008) y a principios del siglo XXI alcanzó 50 % (Grimm *et al.*, 2008), y se espera para el 2030 que la cifra aumente a 60 % (Alberti, 2008). En las urbes se trastocó el ambiente a causa de la actividad humana. Entre las modificaciones que sufrió sobresalen la contaminación del aire, la alteración de los sistemas hidrológicos locales y regionales, los cambios en los ciclos biogeoquímicos (Gill *et al.*, 2007; Grimm *et al.*, 2008), la formación de islas de calor (Alcoforado y Andrade, 2008) y las olas de calor (Campbell-Lendrum y Corvalán, 2007). La vegetación urbana, en particular el arbolado, puede mitigar la mayoría de los problemas ambientales que afectan el desarrollo de las grandes urbes del mundo (Gratani *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2005; Nowak, 2006; Gill *et al.*, 2007).

Las ciudades mexicanas también manifestaron un crecimiento notable en las últimas décadas del siglo XX y, con ello, sus problemas ambientales. A principios del siglo pasado en Guadalajara residían 101 mil habitantes (Oliver-Sánchez, 2003), pero ya en 2010 lo hacían 1.65 millones (INEGI, 2010). Los estudios en este contexto son más bien escasos (Jáuregui *et al.*, 1992; Jáuregui, 1997; Zambrano *et al.*, 1999; Davydova-Belitskaya, 2004); se refieren a las 12 urbes con una población superior a 600 mil personas (INEGI, 2010), que se localizan en regiones de clima cálido, lo que las hace más proclives al efecto del cambio climático que las ubicadas en ambientes templados (Gill *et al.*, 2007).

En el presente ensayo se hace una revisión de la literatura acerca de los problemas ambientales que inciden sobre diversas ciudades del mundo y en particular el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), cuyos objetivos consistieron en reconocer los principales factores ambientales que afectan el funcionamiento de los ecosistemas urbanos, específicamente, los que se magnifican por el cambio climático. Además de, evaluar el potencial de la vegetación urbana en la mitigación del estrés ambiental y la variación en la capacidad fotosintética en especies arbóreas urbanas que crecen en el AMG, con el propósito de identificar especies que remuevan CO₂ de manera más eficiente.

Servicios ecosistémicos

Se definen los servicios ecosistémicos como los beneficios ambientales que los organismos obtienen de la fotosíntesis y la transpiración de la vegetación (Chen y Jim, 2008). Entre ellos se distinguen el ahorro de energía, la producción de sombra, el amortiguamiento de la intensidad del viento, la reducción de contaminantes del aire y el ruido, el hábitat para la biodiversidad y el aumento en la captación de agua de lluvia (Gill *et al.*, 2007; Chen y Jim, 2008; Wu, 2008). La fotosíntesis contribuye a

INTRODUCTION

During the XX the century the cities around the world grew in a disproportionate way. In 1900, for example, 14 % of the population of the world lived in the cities, but by 1950, 30 % (Wu, 2008) but at the beginning of the XXth century, it summed 50 % (Grimm *et al.*, 2008), and it is expected that by 2030 this number will get as far as 60 % (Alberti, 2008). In the cities the environment was transformed because of the human activity. Among the changes that it suffered, air pollution is outstanding, as well as the alteration of the local and regional water systems, changes in the biogeochemical cycles (Gill *et al.*, 2007; Grimm *et al.*, 2008), heat islands formation (Alcoforado and Andrade, 2008) and heat waves (Campbell-Lendrum and Corvalán, 2007). Urban vegetation, in particular trees, may mitigate most environmental problems that affect the development of most cities in the world (Gratani *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2005; Nowak, 2006; Gill *et al.*, 2007).

Mexican cities also showed an outstanding growth in the last decades of the XXth century, and so did their environmental problems. During the first years of last century, in Guadalajara lived 101 thousand people (Oliver-Sánchez, 2003), but by 2010, there were 1.65 million (INEGI, 2010). Studies in this field are rather scarce (Jáuregui *et al.*, 1992; Jáuregui, 1997; Zambrano *et al.*, 1999; Davydova-Belitskaya, 2004); they refer to the 12 urban centers with more than 600 thousand people (INEGI, 2010), which are in warm weather regions, which makes them more vulnerable to the effect of climate change that are located in mild environments (Gill *et al.*, 2007).

In this essay is described a review of literature about the environmental problem that affect several cities around the world, and in particular the Metropolitan Area of Guadalajara (AMG, for its acronym in Spanish), whose objectives include the selection of the major environmental factors that affect the way urban ecosystems work, and from them, those which magnifies climatic change. Also, to assess the potential of urban vegetation in the mitigation of environmental stress, and finally, to assess the variation in the photosynthetic ability of the tree species that grow in AMG with the aim to find species that remove CO₂ in a more efficient way.

Ecosystem services

Ecosystem services are defined as environmental benefits that organisms obtain from photosynthesis and the transpiration of plants (Chen and Jim, 2008). Among them, energy saving, shadow production, softening of wind intensity, the reduction of the amount of air pollutants and noise, habitat for biodiversity and the increase in rain water catchment (Gill *et al.*, 2007; Chen and Jim, 2008; Wu, 2008). Photosynthesis helps to diminish the effects of air pollution, in particular that caused by CO₂ and O₃ (Nowak *et al.*, 2006), while transpiration releases

disminuir los efectos de la contaminación del aire, en particular el CO_2 y el O_3 (Nowak *et al.*, 2006), mientras que por la transpiración libera agua a la atmósfera en forma de vapor y actúa como un sistema natural de "aire acondicionado", ya que modifica el microclima de las ciudades (Rowntree, 1986).

Las azoteas verdes son una forma de brindar servicios ambientales a las ciudades. Destaca su participación en la regulación del sistema hidrológico (Mentens y Raes, 2006), en la reducción de la temperatura de los edificios y de los efectos de las islas de calor urbanas (Grant, 2006); además, se ha sugerido que proporcionan un hábitat ideal para la conservación de especies raras o amenazadas (Brenneisen, 2006).

Factores ambientales que afectan el funcionamiento de los ecosistemas urbanos

Contaminación del aire. Las ciudades producen el mayor porcentaje de gases de efecto invernadero lo que favorece el cambio climático global. Las 20 metrópolis más grandes de Estados Unidos de América emiten cada año más CO_2 a la atmósfera que el total de su área continental (Alberti, 2008). Estos aumentos en la atmósfera se han registrado en Phoenix, en donde la concentración de dicho gas en el invierno es 24 % superior que en las áreas rurales aledañas (Martin y Stabler, 2000). El arbolado de Nueva York secuestra 1.521 t de contaminantes aéreos (Nowak *et al.*, 2006). En Beijing, una población de más de dos millones de árboles removió 1.261 t de contaminantes; de los cuales, las partículas suspendidas entre 5 y 10 μm (PM5 y PM10) fueron las principales (Yang *et al.*, 2005).

Disponibilidad de agua. La mayoría de las plantas (excepto las de metabolismo ácido de las crasuláceas) transpiran grandes cantidades de agua (Salisbury y Ross, 1992). Un árbol deciduo en Carolina del Norte transpira de 200 a 400 L de agua en un día cálido de verano (Kozlowski *et al.*, 1991).

Se sabe que la disponibilidad de agua es baja en las grandes ciudades del mundo (O'Hara y Georgakakos, 2008) y todavía menor en países con poco desarrollo económico (Wilby, 2007). En la república mexicana, dos de las ciudades más pobladas, la Ciudad de México y Guadalajara ya presentan problemas de abastecimiento de agua (von Bertrab, 2003; Romero-Lankao, 2010). Esta escasez se agudizará por el cambio climático, pues se incrementará la ocurrencia y duración de las sequías (Gill *et al.*, 2007).

La baja disponibilidad de agua propicia estrés hídrico en la vegetación urbana, lo que acorta la longevidad de los árboles y es una causa importante de la muerte de árboles jóvenes cuando se llevan a cabo proyectos de forestación y reforestación en ciudades (Whitlow *et al.*, 1992). La sequía se agrava porque el pavimento y la compactación del suelo disminuyen la infiltración de agua al sistema radical (Foster y Blaine, 1978), lo que da

water to the atmosphere as steam and acts as a natural system of "air conditioning", as it affects the metropolitan microclimates (Rowntree, 1986).

Roof gardens are a way to provide environmental services to cities. They are important as they help to regulate the water system (Mentens and Raes, 2006), as in the reduction of temperature of buildings and the effects of urban heat islands (Grant, 2006); it has also been suggested that they provide an ideal habitat for the conservation of rare or threatened species (Brenneisen, 2006).

Environmental factors that affect the functioning or urban ecosystems

Air pollution. Cities produce the greatest percentage of greenhouse effect gases and this favors global climate change. The 20 greatest cities of the United States emit each year more CO_2 to the atmosphere than its continental area (Alberti, 2008). These CO_2 increments in the atmosphere have been recorded in Phoenix, where the concentration of this gas in winter is 24 % over tan in the neighboring rural areas (Martin and Stabler, 2000). The trees of New York capture 1.521 t of air pollutants (Nowak *et al.*, 2006). At Beijing, more than 2 million trees removed 1.261 t of pollutants; from them, the suspended particles between 5 and 10 μm (PM5 and PM10) were the most important (Yang *et al.*, 2005).

Water availability. Most plants (except for those of acid metabolism as Crasulaceae) transpire great amounts of water (Salisbury and Ross, 1992). A deciduous tree in North Carolina transpires from 200 to 400 L of water in a warm summer day (Kozlowski *et al.*, 1991).

It is well known that water availability is low in big cities around the world (O'Hara and Georgakakos, 2008) and even lower in countries with little economic development (Wilby, 2007). In Mexico, two of the most populous cities, Mexico City and Guadalajara already have water supply problems (von Bertrab, 2003; Romero-Lankao, 2010). This shortage will be exacerbated by climate change, as the occurrence and duration of droughts will increase (Gill *et al.*, 2007).

The low availability of water promotes water stress in urban vegetation, which shortens the longevity of trees and is a major cause of death of young trees when afforestation and reforestation projects in cities are carried out (Whitlow *et al.*, 1992). The drought becomes worse because the pavement and soil compaction decrease water infiltration to the root system (Foster and Blaine, 1978), leading growing trees on the streets to be the most affected (Whitlow *et al.*, 1992).



lugar a que los árboles que crecen en las calles sean los más afectados (Whitlow *et al.*, 1992).

El efecto de la sequía urbana se va a acentuar por la contaminación del aire, en particular por la presencia de ozono (O₃), ya que este disminuye la eficiencia de la fotosíntesis (Reich y Amundson, 1985) y, como consecuencia, es menor la remoción de gases de efecto invernadero (Davies *et al.*, 2011).

El arbolado urbano puede desempeñar un papel preponderante para enfrentar sequías prolongadas causadas por el cambio climático (Gill *et al.*, 2007), por su capacidad de almacenamiento de agua (Scholz *et al.*, 2007) al permitirle mantener la transpiración y la captura de contaminantes del aire. Por lo tanto, un arbolado denso y sano reduciría el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero que producen los equipos de aire acondicionado (Wu, 2008).

Islas de calor

Las islas de calor urbanas (ICU) son un ejemplo de los cambios microclimáticos provocados por los humanos (Grimm *et al.*, 2008). Se forman por alteraciones en el intercambio de energía como consecuencia de la disminución de las áreas verdes, y son la principal razón de que la temperatura del aire en las metrópolis sea superior al ambiente rural circunvecino (Alberti, 2008).

Desde finales del siglo pasado, la mayoría de las ciudades presentaron el fenómeno de ICU, porque las temperaturas fueron de 5 a 11 °C, valores superiores a los del entorno rural (Aniello *et al.*, 1995). Oleson *et al.* (2011) reconocieron que su aumento se producía por el incremento en las temperaturas máximas nocturnas, y esto daba lugar a que las ICU fueran más intensas por la noche. Se estima que de 3 a 8 % de la demanda de energía eléctrica en Estados Unidos de América se utiliza para compensar los efectos de las ICU (Wu, 2008).

Al incrementar en 25 % el arbolado en Sacramento y Phoenix, sus temperaturas disminuyeron entre 3.3 y 5.6 °C en verano (Akbari, 2002), pues bajo el dosel de los árboles los valores se reducen de 1.7 a 3.6 °C, con respecto a zonas carentes de ellos (Georgi y Zafiriadis, 2006).

Olas de calor

El incremento en la temperatura se manifiesta a través de la periodicidad e intensidad de las olas de calor urbanas (OCU). Las OCU se verifican con mayor frecuencia en ambientes cálidos con baja cobertura vegetal. Aumentan la morbilidad humana, los alérgenos aéreos y las infecciones transmitidas por vectores; por otro lado, propician cambios en la estructura de la vegetación al favorecer la introducción y desarrollo de especies exóticas y la modificación de los tiempos de ocurrencia

The effect of urban drought will become more intense due to air pollution, in particular by ozone (O₃), since it diminishes the efficiency of photosynthesis (Reich and Amundson, 1985) and, consequently, there is a less removal of greenhouse gases (Davies *et al.*, 2011).

Urban trees play a major role when facing long droughts caused by climate change (Gill *et al.*, 2007), from their ability to store water (Scholz *et al.*, 2007) which lets them keep transpiration and air pollutant sequestration. Therefore, a dense and healthy group of trees would reduce the use of energy and greenhouse gas emissions that are produced by air conditioners (Wu, 2008).

Heat Islands

Urban heat islands (ICU, for its acronym in Spanish) are an example of the microclimatic changes caused by man (Grimm *et al.*, 2008). They are formed from the alterations in the energy exchange as a consequence of the reduction of green areas, and are the main reason that air temperature in the cities is higher to that of the neighboring rural environment (Alberti, 2008).

Since the end of the last century, most of the cities in the world experienced the ICU phenomenon, as temperatures were from 5 to 11 °C, higher numbers than those in the rural surroundings (Aniello *et al.*, 1995). 3 to 8 % of the electric demand in the United States is used to compensate the effects of ICU (Wu, 2008). Oleson *et al.* (2011) acknowledged that the increase in temperatures of the cities came from the increase of the maximum temperatures at night, and so ICU were then more intense.

When the number of trees was increased in 25 % in Sacramento and Phoenix, their temperatures lowered from 3.3 to 5.6 °C in summer (Akbari, 2002), as under the canopy of the trees, temperature becomes colder from 1.7 to 3.6 °C, compared to the areas without them (Georgi and Zafiriadis, 2006).

Heat waves

Temperature increase is apparent through the timing and intensity of urban heat waves (OCU, for its acronym in Spanish). OCU are more common in cities placed in warm environments with a low vegetation cover. They provoke that human diseases rise, as well as aerial allergens and infections transmitted by vectors; on the other hand, they promote changes in vegetation structure as they favor the input and development of exotic species and the modification of the timing of phenophases in plants (McMichael *et al.*, 2006; Alcaforado and Andrade, 2008). Gill *et al.* (2007) stated that climate change will increase consecutive dry days and that OCU will be longer. In Europe during the summer of 2003, OCU were attributed to climate change, which caused 35 000 victims in two weeks (Stott *et al.*, 2004). The OCU in Germany between 1990 and 2006 provoked high rates of deaths in Berlin (Gabriel and Endlicher, 2011).

de las fenofases en las plantas (McMichael *et al.*, 2006; Alcoforado y Andrade, 2008). Gill *et al.* (2007) consignaron que el cambio climático aumentará los días secos consecutivos y las OCU serán más largas. En Europa durante el verano de 2003 se formaron OCU imputadas al cambio climático, que causaron 35 000 muertes en dos semanas (Stott *et al.*, 2004). Las OCU en Alemania entre 1990 y 2006 provocaron tasas altas de decesos en Berlín (Gabriel y Endlicher, 2011).

Cambio climático

El Grupo Intergubernamental en Cambio Climático definió a este como "una modificación del clima en el tiempo, que puede ser causado por variabilidad natural o como resultado de la actividad humana" (IPCC, 2007). Es un fenómeno se manifiesta mediante el aumento en la temperatura. Su promedio en la superficie del planeta se ha incrementado entre 0.30 y 0.61 °C desde finales del siglo XIX (Nowak *et al.*, 2002); dicho ascenso es más alto en la superficie terrestre que en los océanos, y se acentúa más durante el invierno en el hemisferio boreal (Alberti, 2008). No obstante, aunque disminuyan las emisiones de gases invernadero, el incremento de la temperatura por el calentamiento global no va a reducirse en al menos 1 000 años (Solomos *et al.*, 2009).

Los estudios de cambio climático en 100 de las áreas urbanas más extensas del mundo de 1950 a 2009 revelaron que las temperaturas en esos lugares son hasta 4 °C por encima de las zonas rurales. Diferencia que se atribuye más al cambio climático regional que a los efectos locales de la urbanización (Mishra y Lettenmaier, 2011). Es aquí donde el arbolado ofrece un alto potencial para moderar el aumento en las temperaturas en áreas urbanas (Georgi y Zafiriadis, 2006), y reducir la emisión de gases de efecto invernadero (Nowak, 2006), además coadyuvará a la adaptación de las ciudades al cambio climático (Gill *et al.*, 2007).

Las altas concentraciones de ozono (O₃) son, probablemente, la principal consecuencia del cambio climático en las metrópolis. El aumento en la temperatura y los niveles altos de irradiación catalizan las reacciones fotoquímicas que forman O₃ (Alberti, 2008), el cual es un agente oxidante agresivo, que en el humano afecta la función de los pulmones y causa problemas respiratorios (Lefohn *et al.*, 2010). Esta es una de las razones por las que el cambio climático es una amenaza para la salud (Campbell-Lendrum y Corvalán, 2007). El arbolado urbano reduce de manera significativa las concentraciones de O₃ (Nowak *et al.*, 2006).

Climate change

The Intergovernmental Panel on Climate Change defined climate change as "a change in climate over time, which can be caused by natural variability or as a result of human activity" (IPCC, 2007). This phenomenon is manifested by the increase in temperature. Its average on the surface of the planet has increased from 0.30 to 0.61 °C since the late XIXth century (Nowak *et al.*, 2002), and this rise is higher at the surface than in the oceans, and is more noticeable during winter in the northern hemisphere (Alberti, 2008). However, even if greenhouse gases are reduced, the temperature rise due to global warming will not get lower by at least 1 000 years (Solomos *et al.*, 2009).

Studies of climate change on 100 of the most extensive urban areas of the world from 1950 to 2009 revealed that temperatures are up to 4 °C above the rural lands. This difference is attributed more to regional climate change than to the local effects of urbanization (Mishra and Lettenmaier, 2011). This is where trees offer a high potential to moderate the rise in temperatures in urban areas (Georgi and Zafiriadis, 2006), and to reduce the emission of greenhouse gases (Nowak, 2006), and contribute to the adaptation of cities to climate change (Gill *et al.*, 2007).

The high concentrations of ozone (O₃) probably are the main result of climate change in cities. The increase in temperature and the high levels of irradiation catalyze photochemical reactions that form O₃ (Alberti, 2008). O₃ is an aggressive oxidizing agent that in humans affects the function of the lungs and cause respiratory problems (Lefohn *et al.*, 2010). This is one of the reasons why climate change is a threat to health in cities (Campbell-Lendrum and Corvalán, 2007). The urban forest significantly reduces the concentrations of O₃ (Nowak *et al.*, 2006).

Air pollution by biogenic sources

Peñuelas and Llusia (2001) informed that land vegetation releases biogenic volatile organic compounds (BVOC) that are exchanged between the biosphere and the atmosphere, affecting the chemical and physical properties of the latter (Peñuelas and Staudt, 2010). Climate change accelerates the formation of BVOC (Peñuelas and Staudt, 2010), as well as heat waves (Wilby, 2007). The BVOC contribute with two-thirds of global greenhouse gas emissions (Guenther *et al.*, 1995); among the most important of them are isoprenoids, carbonyls, alkanes, alkenes, esters, ethers and acids (Kesselmeier and Staudt, 1999). Isoprene and monoterpenoids are highly reactive in the lower atmosphere and exert a strong influence on the photochemical production of O₃ (Guenther *et al.*, 1995). Some tree species emit BVOC such as *Fagus sylvatica* L. (König *et al.*, 1995), *Eucalyptus* sp. (Nunes and Pio, 2001) and *Quercus suber* L. (Pio *et al.*, 2005). The second genus is well represented in the trees



Contaminación del aire por fuentes biogénicas

Peñuelas y Llusia (2001) consignaron que la vegetación terrestre libera compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB), que son intercambiados entre la biósfera y la atmósfera, que afectan las características químicas y físicas de esta última (Peñuelas y Staudt, 2010). El cambio climático acelera la formación de COVB (Peñuelas y Staudt, 2010), lo mismo que las olas de calor (Wilby, 2007). Los COVB contribuyen con dos terceras partes de las emisiones globales de gases (Guenther *et al.*, 1995), entre los más importantes destacan los isoprenoides, los carbonilos, los alcanos, los alquenos, los ésteres, los éteres y los ácidos (Kesselmeier y Staudt, 1999). El isopreno y los monoterpénoides son muy reactivos en la parte baja de la atmósfera y ejercen una fuerte influencia en la producción fotoquímica de O₃ (Guenther *et al.*, 1995). Algunas especies forestales emiten COVB; por ejemplo, *Fagus sylvatica* L. (König *et al.*, 1995); *Eucalyptus* sp. (Nunes y Pio, 2001) y *Quercus suber* L. (Pio *et al.*, 2005). El segundo género está muy bien representado en el arbolado de las ciudades de México y Guadalajara (Benavides-Meza, 1992; López-Coronado y Guerrero-Nuño, 2004).

Ciudad de Guadalajara

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es la segunda zona urbana más grande de México por el número de habitantes, que, en la actualidad, es cercana a cuatro millones y se pronostica que para 2025 será de siete millones (von Bertrab, 2003); incluye cuatro municipios: Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque y Tonalá (INEGI, 2010). Está situada en la región central oeste de México con un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. El bosque La Primavera y el de Los Colomos son dos áreas verdes importantes que junto con el Lago de Chapala participan en la regulación del clima de la zona conurbada (Davydova-Belitskaya, 2004).

Factores ambientales que afectan a la ciudad de Guadalajara

Vegetación y agua. Desde 1960 comenzaron a reducirse las áreas verdes de la ciudad de Guadalajara (Gómez-Sustaita, 2002). A principios del siglo XXI cubrían únicamente 3.5 % de la superficie, lo que resulta insuficiente, ya que debe existir al menos 20 % (Chávez-Anaya *et al.*, 2010). A finales del siglo XX el abastecimiento de agua para la ciudad se convirtió en una crisis generalizada, porque el Lago de Chapala (su principal fuente) registró disminuciones significativas en sus volúmenes de agua almacenada (von Bertrab, 2003).

Contaminación del aire. A partir de las últimas décadas del siglo XX se agravó la contaminación del aire en el AMG (Michel, 1983). Las principales adiciones de compuestos al aire son CO₂, CO, SO₂ y O₃ además de las partículas suspendidas mayores de 10 μm (PM10) (Semades, 2011). En 2007 la emisión

of Mexico City and Guadalajara (Benavides - Meza, 1992; López-Coronado and Guerrero-Nuño, 2004).

Guadalajara city

The Metropolitan Area of Guadalajara (AMG, for its acronym in Spanish) is the second largest city of Mexico in regard to the number of citizens, which, at present, is near 4 million people and it is predicted that by 2025, it will get to 7 million (von Bertrab, 2003); it includes four municipalities: Guadalajara, Zapopan, Tlaquepaque and Tonalá (INEGI, 2010). It is located in the western central region of the country in an area with a mild sub-humid weather with summer rains. *La Primavera* and *Los Colomos* are two great green areas that, together with Chapala Lake, help in the regulation of the climate of the neighboring urban zone (Davydova-Belitskaya, 2004).

Environmental factors that affect Guadalajara city

Vegetation and water. Since 1960 the green areas of Guadalajara started to get smaller (Gómez-Sustaita, 2002). At the beginning of the XXIst century, they covered only 3.5 % of the area, which is not enough, as they should make up 20 % (Chávez-Anaya *et al.*, 2010). At the end of the last century, the provision of water to the city turned into a general crisis, as Chapala Lake (its main source) had records of significant reductions in their volumes of stored water (von Bertrab, 2003).

Air pollution. Since the last decades of the XXth century, air pollution became worse in AMG (Michel, 1983). The major compound additions to the air are CO₂, CO, SO₂ and O₃ as well as suspended particles over 10 μm (PM10) (Semades, 2011). In 2007, the emission of pollutants to the atmosphere was 1 million 400 mil ton year⁻¹, which was attributed to the great increment in the number of cars in AMG, that in 2011 reached 1.7 million (Semades, 2011), and to the low per cent of green areas (Chávez-Anaya *et al.*, 2010).

The distribution of the green areas of Guadalajara is not regular, as the east zone gathers around 4 % of the urban vegetation, while the western, 22 % (Chávez-Anaya *et al.*, 2010); this difference might explain the greatest O₃ concentration at the east of AMG almost all year long (Semades, 2011).

Records of the CO₂ concentration that took place in February 2007 in different parts of AMG using a gas analyzer in the infrared (LI-COR LI-6200), revealed that the average concentration was 20 % higher (461 ppm) than in peripheral rural areas (370 ppm). Idso *et al.* (2001) reported that the increment of this gas in the cities is a contributing factor to capture more heat. It is likely that this situation provokes that temperature rises at night in AMG.

Urban heat islands. The first information about ICU in Guadalajara is dated in 1880 (Bárcena, 1954), as it was determined that the

de contaminantes a la atmósfera fue de 1 millón 400 mil toneladas por año, lo que se atribuye al considerable aumento en el número de automóviles que circulan en el AMG, que en 2011 llegó a 1.7 millones (SEMADES, 2011) y al bajo porcentaje de áreas verdes (Chávez-Anaya *et al.*, 2010).

La distribución de áreas verdes en Guadalajara no es homogénea, pues la zona oriental reúne cerca de 4 % de la vegetación urbana, mientras que la occidental, 22 % (Chávez-Anaya *et al.*, 2010); esta diferencia podría explicar la mayor concentración de O₃ en el oriente del AMG durante casi todo el año (Semades, 2011).

Los registros de la concentración de CO₂ que se realizaron en febrero de 2007, en diferentes puntos del AMG mediante el uso de un analizador de gases en el infrarrojo (LI-COR LI-6200) revelaron que la concentración promedio fue 20 % superior (461 ppm) al de las áreas rurales periféricas (370 ppm). Idso *et al.* (2001) consignaron que el aumento de ese gas en las ciudades es un factor que favorece la captura de más calor. Es probable que dicho aumento contribuya a la elevación de la temperatura nocturna en el AMG.

Islas de calor urbanas. La primera información sobre ICU en Guadalajara data de 1880 (Bárcena, 1954), al identificar que en las áreas circunvecinas la temperatura fue 2 °C inferior a la del centro de la ciudad. Michel (1983), en los años 80 del siglo pasado definió que esta zona era más calurosa que en los alrededores.

En la última década del siglo pasado se estudiaron las ICU en la AMG por Jáuregui *et al.* (1992) y Jáuregui (1997). Registraron que la temperatura del aire mostró una tendencia creciente desde 1931 hasta 1970, de 0.03 °C año⁻¹. La mayor tasa de calentamiento (0.7 °C por década) se produjo durante los años 60, cuando hubo un crecimiento de la población considerable.

Davydova-Belitskaya (2004) dio a conocer tres ICU en el AMG, en zonas con baja cobertura vegetal. Una fue localizada en el centro de la ciudad y las dos restantes en Miravalle y Tlaquepaque. La diferencia de temperatura mínima diaria en el centro y periferia de la isla alcanzó 6 °C en los meses húmedos y hasta 9 °C en los meses secos.

Cambio climático. Estudios recientes sugieren que el cambio climático está afectando al AMG. Las evidencias que confirman lo anterior consisten, por un lado, el análisis del total anual de precipitación estimado para periodos climáticos representativos de 1881 a 2010 reveló incrementos a partir de los años 30 del siglo XX, con una tasa de 22.05 mm por década (Davydova-Belitskaya, 2004). Además, el promedio de temperatura mínima mensual, de alrededor de 0.3 °C por cada diez años, se incrementó en las últimas décadas del siglo pasado. El aumento fue mayor de enero a mayo, de 0.2 a 0.5 °C. En contraste, el

temperatura en las áreas circunvecinas fue 2 °C menor que en el centro de la ciudad. Michel (1983) encontró que en los años 80, el centro de esta ciudad era más caluroso que sus alrededores.

En los últimos años del siglo XX, las ICU de AMG fueron estudiadas por Jáuregui *et al.* (1992) y Jáuregui (1997). Encontraron que la temperatura del aire tenía una tendencia creciente desde 1931 hasta 1970, de 0.03 °C año⁻¹. La mayor tasa de calentamiento (0.7 °C por década) ocurrió durante los años 60 cuando el crecimiento de la población aumentó considerablemente.

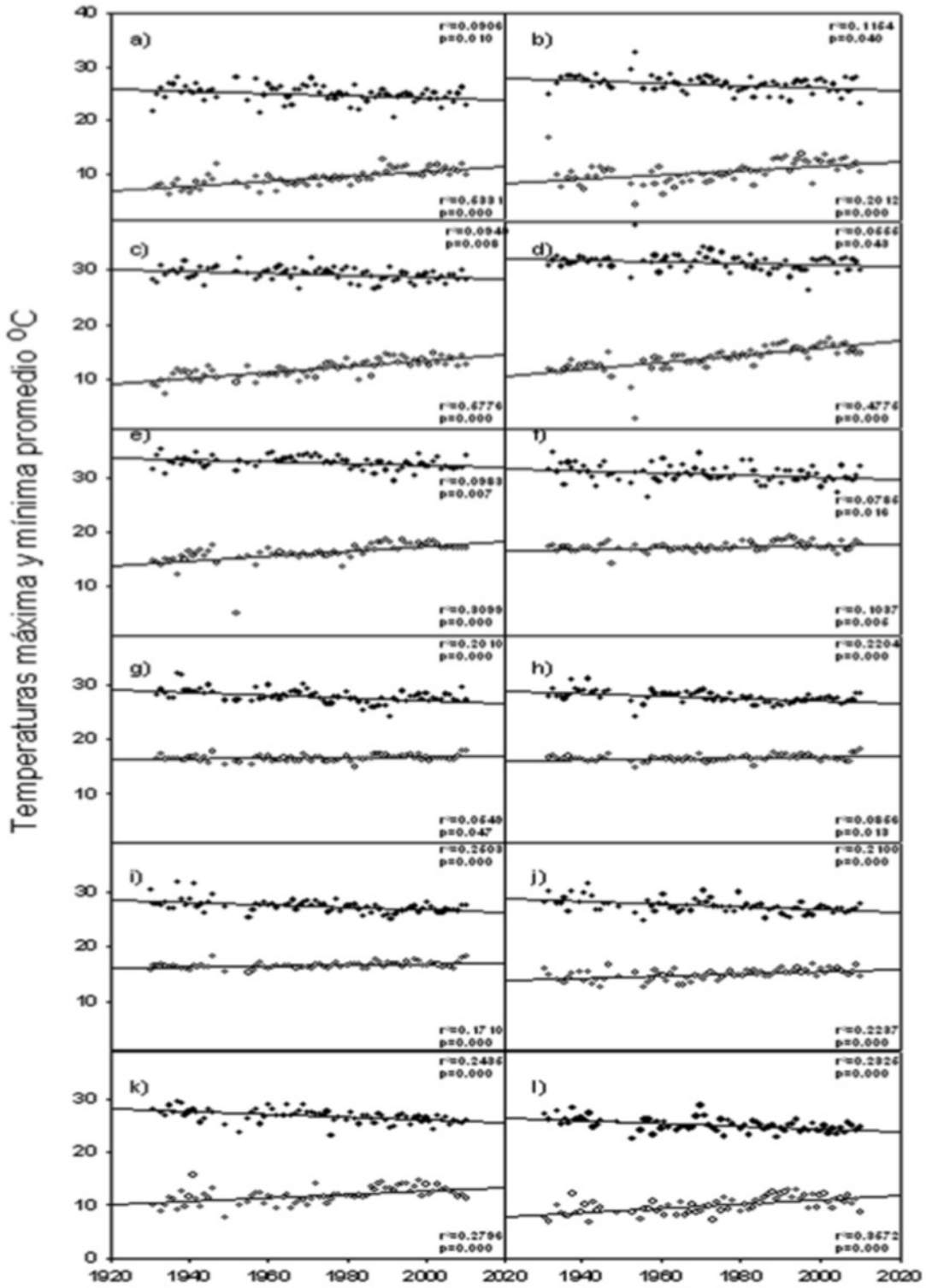
Davydova-Belitskaya (2004) reportó tres ICU en AMG, en áreas con poca cobertura vegetal. Una fue localizada en el centro de la ciudad y las otras dos en Miravalle y Tlaquepaque. La diferencia entre la temperatura mínima diaria en el centro y alrededor de la isla alcanzó 6 °C en los meses húmedos y hasta 9 °C en los meses secos.

Cambio climático. Estudios recientes sugieren que el cambio climático está afectando al AMG. Evidencias que lo confirman son: por un lado, el análisis del total anual de precipitación para periodos climáticos representativos de 1881 a 2010 reveló incrementos que comenzaron en los años 30 del siglo XX, con una tasa de 22.05 mm por década (Davydova-Belitskaya, 2004). También, la temperatura mínima mensual promedio, de aproximadamente 0.3 °C por cada diez años, aumentó en las últimas décadas del siglo pasado. El aumento fue mayor de enero a mayo, de 0.2 a 0.5 °C. En contraste, la temperatura máxima mensual promedio bajó hasta 0.2 °C por década (Figura 1 a, b, c, d, e).

Fisiología vegetal. En relación con el microclima actual de algunas de las áreas verdes de AMG, en un estudio realizado al final de la temporada seca (junio) y con las lluvias ya establecidas (julio) durante 2010, la irradiación, la temperatura del aire y la humedad relativa en el interior de los parques y calles o avenidas vecinas fueron consideradas.

La temperatura promedio diaria en los parques fue 2 °C ± 0.45, menor que fuera de ellos. La humedad relativa no mostró una diferencia significativa entre los parques y sus alrededores, lo que se atribuye a las bajas tasas de transpiración de la vegetación de los parques y, en consecuencia, a una baja eficiencia de enfriamiento. La irradiación fue la variable microclimática que mostró la mayor reducción dentro de los parques (Tabla 1).

La eficiencia de captura de carbono (C) se estimó en árboles adultos en AMG en abril y julio 2008, con un sistema portátil para medir la fotosíntesis (LI-COR LI-6200) cada dos horas desde el amanecer hasta el atardecer, para obtener valores diarios. El mayor valor en este contexto se obtuvo de una especie exótica, *Schefflera actinophylla* (Endl.) Harms, seguida por una especie endémica de México, *Populus mexicana* Wessm. ex DC., y tres especies exóticas de ambientes tropicales húmedos: *Spathodea campanulata* P. Beauv.; *Cassia fistula* L. y *Bougainvillea*



● = máximas; ○ = mínimas; mensuales en: a) = enero; b) = febrero; c) = marzo; d) = abril; e) = mayo; f) = junio; g) = julio; h) = agosto; i) = septiembre; j) = octubre; k) = noviembre; l) = diciembre, de 1910 a 2010.
 ● = maximum; ○ = minimal; monthly: a) = January; b) = February; c) = March; d) = April; e) = May; f) = June; g) = July; h) = August; i) = September; j) = October; k) = November; l) December, from 1910 to 2010.

Figura 1. Promedios de temperaturas.

Figure 1. Average temperatures.

promedio de temperatura máxima mensual disminuyó hasta 0.2 °C por década (Figura 1 a, b, c, d, e).

Ecofisiología vegetal. Con respecto al microclima presente en algunos parques de la AMG, en un estudio realizado al final de la estación seca (junio) y con las lluvias (julio) establecidas durante 2010, se consideró la irradiación, la temperatura del aire y la humedad relativa en el interior de los parques y calles o avenidas aledañas.

La temperatura del aire diaria promedio en los parques fue 2 °C±0.45, menor que fuera de ellos. La humedad relativa no presentó diferencia significativa entre los parques y su entorno, lo cual se atribuye a tasas bajas de transpiración de la vegetación de los parques y, en consecuencia, a una baja eficiencia de enfriamiento. La irradiación fue la variable microclimática que presentó mayor disminución (54-69 %) en el interior de los parques (Cuadro 1).

glabra Choisy. Most of the endemic species of Mexico had intermediate values (*Heliocarpus appendiculatus* Turcz. and *Psidium guajava* L.). The lowest figure of carbon sequestration was recorded in *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. (Figure 2).

Photosynthesis was assessed in eleven tree species younger than two years old, used to reforest the AMG in two locations: Miravalle in Guadalajara, area where air pollution is concentrated and the other in a neighboring rural environment at Zapopan, Jalisco. In both, *Hibiscus mutabilis* L. showed the highest value of photosynthesis and *Schinus molle* L. the lowest. In most of these species considered here, a more reduced photosynthesis was noted in Miravalle than in Zapopan. Except for *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., in exotic species carbon sequestration was higher (Figure 3).



Cuadro 1. Variación promedio diaria de temperatura, humedad relativa e irradiación en parques de Guadalajara y Zapopan, México*. Table 1. Average daily variation of temperature, relative humidity and irradiation in parks of Guadalajara and Zapopan, Mexico*.

Nombre del parque	Fecha de medición	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)		Flujo de fotones para la fotosíntesis (µmol m ⁻² s ⁻¹)	
		Parque	Calle o avenida	Parque	Calle o avenida	Parque	Calle o avenida
		Agua Azul	22-07-10	24±0.4	26±0.7	41±2.1	40±1.9
Monterrey	13-07-10	23±0.3	25±0.6	49±1.7	48±1.8	347±45	751±77
La Calma	08-06-10	30±0.5	32±0.8	23±0.6	23±0.9	306±58	914±96
Monterrey	09-06-10	28±0.6	30±0.9	34±1.1	32±1.3	341±35	1085±73

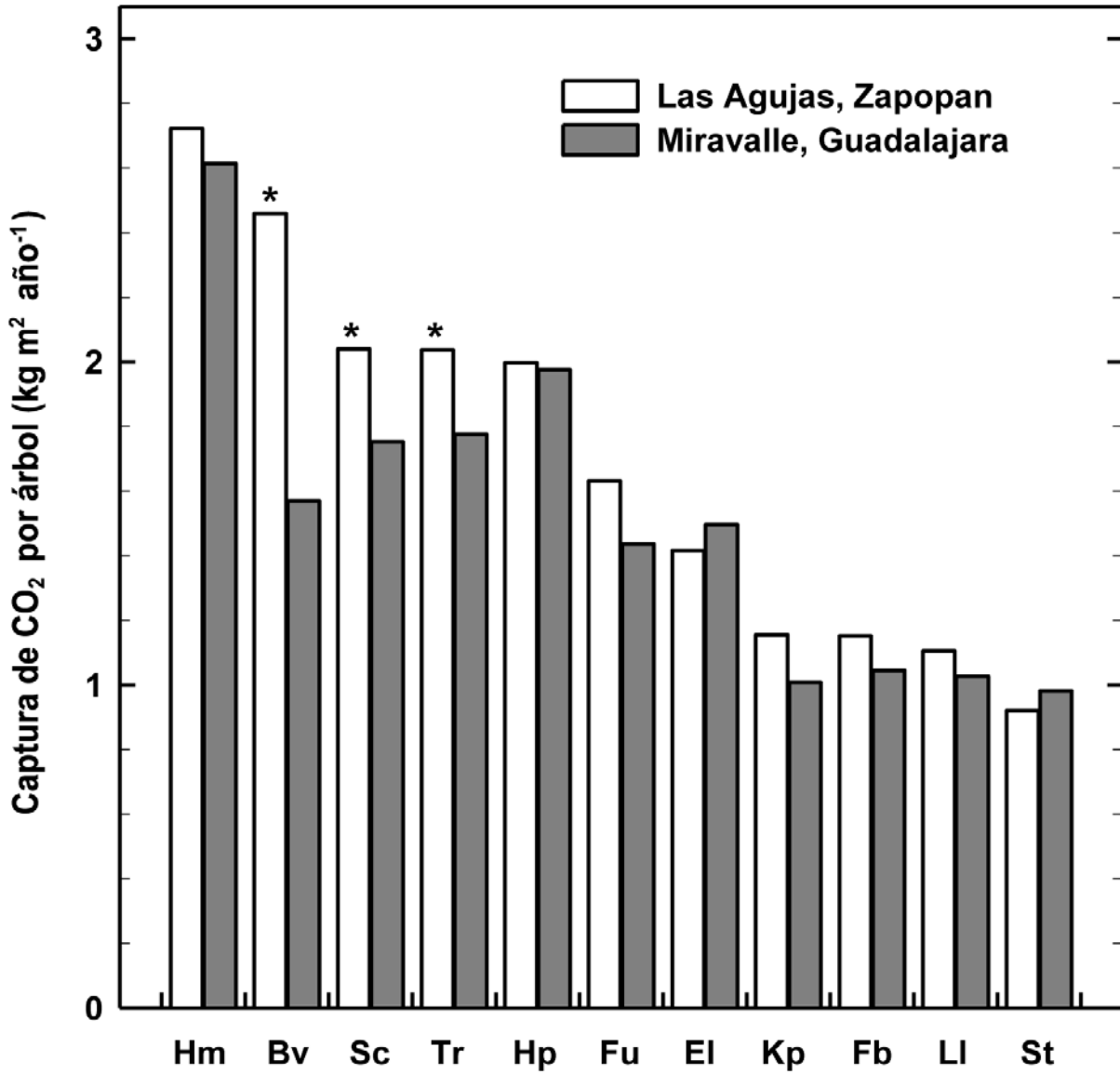
*Los datos son promedios diarios de 10 h a 11 h ± error estándar.

*Data are daily averages from 10 h to 11 h ± standard error.

La eficiencia de captura de carbono (C) fue estimada en árboles adultos del AMG en abril y julio de 2008, con un sistema portátil para medir fotosíntesis (LI-COR LI-6200), cada dos horas desde la salida del sol hasta su puesta, para obtener datos diarios. El valor más alto en este contexto se obtuvo en una especie exótica, *Schefflera actinophylla* (Endl.) Harms, seguido de una endémica de México, *Populus mexicana* Wesm. ex DC., y tres exóticas originarias de ambientes tropicales húmedos: *Spathodea campanulata* P. Beauv.; *Cassia fistula* L. y *Bougainvillea glabra* Choisy. La mayoría de los taxa endémicos de México presentaron valores intermedios (*Heliocarpus appendiculatus* Turcz. y *Psidium guajava* L.). La cifra más baja de captura de carbono se registró en *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. (Figura 2).

Based on what has been expressed before, there is good potential to carry on a process of tree species selection, with a greater ability to remove carbon, and to use them in reforestation projects oriented to reduce greenhouse effect gases and to adapt the AMG to climate change.





Sa= *Schefflera actinophylla*; Pm = *Populus mexicana*; Sc = *Spathodea campanulata*; Cf= *Cassia fistula*; Bg= *Bougainvillea glabra*; Fu= *Fraxinus uhdei*; Mi= *Mangifera indica*; Hr= *Hibiscus rosa-sinensis*; El= *Ehretia latifolia*; Cs= *Chorisia speciosa*; Ca= *Citrus aurantium*; Ha= *Heliocarpus appendiculatus*; Fb = *Ficus benjamina*; Eij= *Eriobotrya japónica*; Pg= *Psidium guajava*; Ec= *Eucalyptus camaldulensis*; Ll= *Ligustrum lucidum*; Pd= *Pithecellobium dulce*.

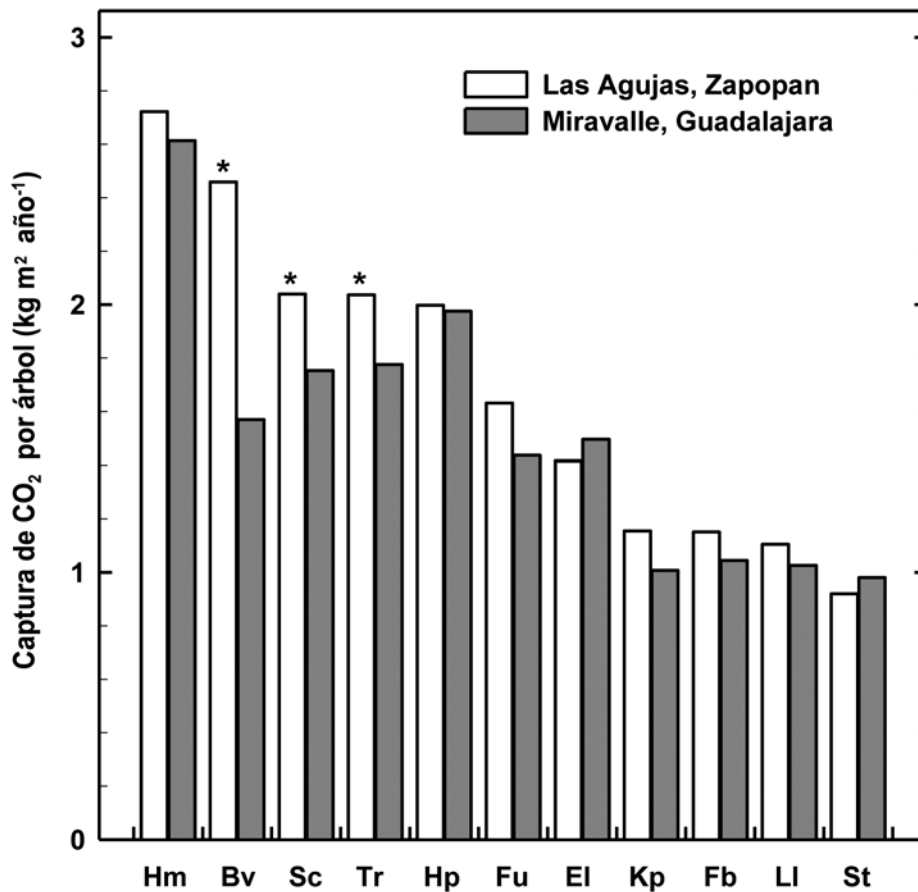
Sa= *Schefflera actinophylla*; Pm = *Populus mexicana*; Sc = *Spathodea campanulata*; Cf= *Cassia fistula*; Bg= *Bougainvillea glabra*; Fu= *Fraxinus uhdei*; Mi= *Mangifera indica*; Hr= *Hibiscus rosa-sinensis*; El= *Ehretia latifolia*; Cs= *Chorisia speciosa*; Ca= *Citrus aurantium*; Ha= *Heliocarpus appendiculatus*; Fb = *Ficus benjamina*; Eij= *Eriobotrya japónica*; Pg= *Psidium guajava*; Ec= *Eucalyptus camaldulensis*; Ll= *Ligustrum lucidum*; Pd= *Pithecellobium dulce*.

Figura 2. Captura anual de carbono en arbustos y árboles que crecen en el AMG.

Figure 2. Annual carbon sequestration in scrubs and trees that grow in AMG.



La fotosíntesis se evaluó en 11 especies arbóreas jóvenes de dos años de edad, que se usan para reforestar el AMG, en dos localidades: Miravalle en Guadalajara, área en la cual la contaminación del aire se concentra y la otra, en un ambiente rural circunvecino en Zapopan, Jalisco. En ambas, *Hibiscus mutabilis* L. mostró el valor más alto de fotosíntesis y *Schinus molle* L. el menor. En la mayoría de los taxa considerados se advirtió una reducción en la fotosíntesis en Miravalle más que en Zapopan. Con excepción de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC., en especies exóticas la captura de carbono fue superior (Figura 3).



Hm= *Hibiscus mutabilis*; Bv= *Bauhinia variegata*; Sc= *Spathodea campanulata*; Tr= *Tabebuia rosea*; Hp= *Hibiscus pernambucensis* Arruda; Fu= *Fraxinus uhdei*; El= *Ehretia latifolia*; Kp= *Koelreuteria paniculata*; Fb= *Ficus benjamina*; LI= *Ligustrum lucidum*; St= *Schinus terebinthifolius*. * = Statistical differences among treatments with the t test (P< 0.05).

Hm= *Hibiscus mutabilis*; Bv= *Bauhinia variegata*; Sc= *Spathodea campanulata*; Tr= *Tabebuia rosea*; Hp= *Hibiscus pernambucensis*; Fu= *Fraxinus uhdei*; El= *Ehretia latifolia*; Kp= *Koelreuteria paniculata*; Fb= *Ficus benjamina*; LI= *Ligustrum lucidum*; St= *Schinus terebinthifolius*. * = Diferencias estadísticas entre tratamientos con la prueba de t (P< 0.05).

Figura 3. Captura de CO₂ de arbustos y árboles jóvenes que se emplean para reforestar la AMG, evaluados en una localidad contaminada de Guadalajara (Miravalle) y en un ambiente rural de Zapopan (Las Agujas).

Figure 3. CO₂ sequestration by shrubs and young trees that are used for reforestation of the AMG, assessed in a polluted location of Guadalajara (Miravalle) and in a rural environment at Zapopan (Las Agujas).

Con base en lo anterior, existe potencial para llevar a cabo un proceso de selección de especies arbóreas, con mayor capacidad de remoción de carbono, para usarlas en proyectos de reforestación orientados a reducir la emisión de gases de efectos invernadero y para la adaptación del AMG al cambio climático.

CONCLUSIONES

Las ciudades contribuyen de manera significativa al cambio climático mundial, porque en ellas se genera la mayor proporción de gases de efecto invernadero. El arbolado puede contribuir a reducir estas emisiones y mitigar los efectos del cambio climático como las altas temperaturas, la intensidad de las islas y olas de calor, entre otras.

Entre los principales efectos del cambio climático en las urbes destaca el aumento en la temperatura, la formación de olas e islas de calor y el aumento de las concentraciones de O_3 . De estos, el O_3 es la amenaza más importante, porque afecta la salud humana y a la fotosíntesis.

El cambio climático y las olas de calor aceleran la formación de O_3 . *Eucalyptus* es uno de los géneros relevantes que emiten estos compuestos, y son numerosas las especies que forman parte del arbolado de las ciudades de México y Guadalajara.

El AMG ha sido impactado por el cambio climático y tiene porcentajes bajos de cobertura vegetal, alta contaminación del aire y está en disminución la disponibilidad de agua.

Estudios de la variación en la eficiencia fotosintética en árboles que crecen en el AMG revelaron amplias diferencias en su eficiencia de secuestrar carbono; por consiguiente existe potencial para la selección de especies arbóreas con el propósito de usarlas en proyectos de reforestación dirigidos a mitigar los efectos del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Guadalajara el financiamiento otorgado al proyecto Ecología Urbana que hizo posible la realización de este trabajo, así como las valiosas observaciones de los árbitros y el editor de la Revista Mexicana de Ciencias Forestales que contribuyeron a mejorar la calidad de este ensayo.

REFERENCIAS

- Akbari, H. 2002. Shade trees reduce building energy use and CO_2 emissions from power plants. *Environ. Poll.* 116: 119-126.
- Alberti, M. 2008. *Advances in urban ecology*. Springer-Verlag. New York, NY. USA. 364 p.
- Alcoforado, J. M. and H. Andrade. 2008. Global warming and the urban heat. In: Marzluff, M. J., E. Shulenberger, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, U. Simon and C. ZumBrunnen (eds.) *Urban Ecology*. Springer-Verlag. New York, NY. USA. pp. 249-262.

CONCLUSIONS

Cities contribute significantly to global climate change as the highest proportion of greenhouse gases are generated in them. Trees can help to reduce these emissions and mitigate the effects of climate change such as high temperatures, the intensity of heat islands and waves, among others.

Among the major impacts of climate change in cities, highlight the increase in temperature, the formation of waves and heat islands and the increasing concentrations of O_3 . Of these, O_3 is the main threat, because it affects human health and photosynthesis.

Climate change and heat waves accelerate the formation of O_3 . *Eucalyptus* is one of the main genus that emit these compounds, and there are numerous species that are part of the trees that grow in Mexico City and Guadalajara.

The AMG has been impacted by climate change and has low percentages of plant cover as well as high air pollution, but water availability is decreasing.

Studies of variation in photosynthetic efficiency in trees growing in the AMG revealed wide differences in their efficiency to sequester carbon; therefore, there is the potential for selection of tree species for the purpose of use in reforestation projects aimed at mitigating the effects of climate change.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Universidad de Guadalajara for having sponsored the Urban Ecology Project which made it possible to accomplish the present work as well as the reviewers and editor of the Revista Mexicana de Ciencias Forestales for having improved this essay.

End of the English version



- Aniello, C., K. Morgan, A. Busbey and L. Newland. 1995. Mapping micro-urban heat islands using LANDSAT TM and a GIS. *Comp. Geosci.* 21 (8): 965-969.
- Bárcena, M. 1954. Descripción de Guadalajara en 1880. Ediciones I. T. G. Guadalajara, Jal. México. 179 p.
- Benavides-Meza, M. H. 1992. Current situation of the urban forest in Mexico City. *J. Arboric.* 18(1): 33-36.
- Brenneisen, S. 2006. Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban Habitats* 4 (1): 1541-7115.
- Campbell-Lendrum, D. and C. Corvalán. 2007. Climate change and developing-country cities: Implications for environmental health and equity. *J. Urban Health* 84 (11): 109-117.
- Chávez-Anaya, J. M., R. V. Villavicencio-García, A. L. Santiago-Pérez, S. L. Toledo-González y J. J. Godínez-Herrera. 2010. Arbolado de Chapalita. Universidad de Guadalajara. Residentes de Chapalita, A. C., Guadalajara, Jal. México. 59 p.
- Chen, W. Y. and C. Y. Jim. 2008. Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests. In: Anderson, N. B., R. Howarth and L. R. Walke (eds). *Ecology, planning and management of urban forests.* Springer Verlag, New York, NY, USA. pp. 53-83.
- Davies, Z. G., J. L. Edmondson, A. Heinemeyer, J. R. Leake and K. J. Gaston. 2011. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *J. Applied Ecol.* 48: 1125-1134.
- Davydova-Belitskaya, V. 2004. El microclima y la situación ecológica de la Zona Metropolitana de Guadalajara. In: López-Coronado A. y J. Guerrero-Nuño (eds). *Ecología Urbana en la Zona Metropolitana de Guadalajara.* Editorial Agata. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. México. pp. 35-60.
- Foster, R. S. and J. Blaine. 1978. Urban trees survival: Trees in the sidewalk. *J. Arboric.* 4(1):14-17.
- Gabriel, K. M. A. and W. R. Endlicher. 2011. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environ. Pollut.* 159: 2044-2050.
- Georgi, N. J. and K. Zafiriadis. 2006. The impact of park trees on microclimate in urban areas. *Urban Ecosyst.* 9:195-209.
- Gill, E. S., J. F. Handley, A. R. Ennos and S. Pauleit. 2007. Adapting cities for climate change: the role of green infrastructure. *Built Environ.* 33 (1):115-133.
- Gómez-Sustaita, G. 2002. El Siglo XX los decenios de Guadalajara. H. Ayuntamiento de Guadalajara. Guadalajara, Jal., México. 306 p.
- Grant, G. 2006. Extensive green roofs in London. *Urban Habitats* 4: 51-65.
- Gratani, L., M. F. Crescente and M. Petrucci. 2000. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of *Quercus ilex* in polluted urban areas (Rome). *Environ Pollut.* 110: 19-28.
- Grimm, N. B., S. H. Faeth, N. E. Golubiewski, C. L. Redman, J. Wu, X. Bai and J. M. Briggs. 2008. Global Change and the Ecology of Cities. *Science* 319 (5864): 7560-7760.
- Guenther, A., C. N. Hewitt, D. Erickson, R. Fall, C. Geron, T. Graedel, P. Harley, L. Klinger, M. Lerdau, W.A. McKay, T. Pierce, B. Scholes, R. Steinbrecher, R. Tallamraju, J. Taylor and P. Zimmerman. 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J. Geophys. Res.* Atmos. 100: 8873-8892.
- Idso, C. D., S. B. Idso and R. C. Balling. 2001. An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix, AZ. USA. *Atmos. Environ.* 35: 995-1000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Censo de población y vivienda. <http://www.censo2010.org.mx/>. (17 de septiembre de 2011).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: The physical Science Basis. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignon, and H. L. Miller (eds). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. Cambridge, UK and New York, NY, USA. 996 p.
- Jáuregui, E. 1997. Heat island development in Mexico City. *Atmos. Environ.* 31 (2): 3821-3831.
- Jáuregui, E., L. Godínez and F. Cruz. 1992. Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmos. Environ. Part B. Urban Atmos.* 26(3): 391-396.
- Kesselmeier, J. and M. Staudt. 1999. Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology. *J. Atmos. Chem.* 33: 23-88.
- König, G., M. Brunda, H. Puxbaum, C. N. Hewitt, S. Craig and D. J. Rudolph. 1995. Relative contribution of oxygenated hydrocarbons to the total biogenic VOC emissions of selected mid-European agricultural and natural plant species. *Atmos. Environ.* 29(8): 861-874.
- Kozłowski, T. T., P. J. Kramer and S. G. Pallardy. 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press. San Diego, CA, USA. 657 p.
- Lefohn, A. S., M. J. Hazucha, D. Shadwick and W. C. Adams. 2010. An alternative form and level of the human health ozone standard. *Inhalation Toxicol.* 22(12): 999-1011.
- López-Coronado, G. A. y J. Guerrero-Nuño. 2004. La vegetación nativa de la Zona Metropolitana de Guadalajara. In: López-Coronado, G. A., J. Guerrero-Nuño (eds). *Ecología Urbana en la Zona Metropolitana de Guadalajara.* Editorial Agata. Guadalajara, Jal., México. pp. 65-97.
- Martin, A. C. and L. B. Stabler. 2000. Seasonal amplitude and distribution of elevated atmospheric CO₂ in Phoenix, AZ. USA. *HortScience* 33:387-519.
- McMichael, A. J., R. E. Woodruff and S. Hales. 2006. Climate changes and human health: present and future risks. *Lancet* 367: 859-869.
- Mentens, J. and D. Raes. 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Landscape and Urban Planning* 77(3): 217-226.
- Michel, E. 1983. La contaminación atmosférica y la salud. *Ciencias Sociales y Humanidades.* Ed. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. México. 73 p.
- Mishra, V. and D. P. Lettenmaier. 2011. Climatic trends in major U.S. urban areas. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2011/2011GL048255.shtml> (10 de septiembre de 2011).
- Nowak, D. J. 2006. Institutionalizing urban forestry as a "biotechnology" to improve environmental quality. *Urban For Urban Gree.* 5: 93-100.
- Nowak, D. J., D. E. Crane and J. C. Stevens. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban For Urban Gree.* 4: 115-123.
- Nowak, D. J., J. C. Stevens, S. S. Sisinni and C. J. Luley. 2002. Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *J. Arbor.* 28(3): 113-121.
- Nunes, T. V. and C. A. Pio. 2001. Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests. *Chemosphere-Global Change Science* 3: 239-248.
- O'Hara, J. K. and K. P. Georgakakos. 2008. Quantifying the urban water supply impacts on climate change. *Water Resour. Manage.* 22(3): 1477-1492.
- Oleson, K. W., G. B. Bonan, J. Feddema and T. Jackson. 2011. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *Internat. J. Climatol.* 31(12): 1848-1865.
- Oliver-Sánchez, L. 2003. Salud, desarrollo urbano y modernización de Guadalajara. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. México. 369 p.
- Peñuelas, J. and J. Llusia. 2001. The complexity of factors driving volatile organic compounds emissions for plants. *Biol. Plantarum.* 44(4):481-487.
- Peñuelas, J. and M. Staudt. 2010. BVOCs and global change. *Trends Plant. Sci.* 15 (3): 133-144.
- Pio, C. A., P. A. Silva, M. A. Cerqueira and T. V. Nunes. 2005. Diurnal and seasonal emissions of volatile organic compounds from cork oak (*Quercus suber*) trees. *Atmos. Environ.* 39(10): 1817-1827.
- Reich, P. B. and R. G. Amundson. 1985. Ambient Levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop Species. *Science* 230(4725): 566-570.
- Romero-Lankao, P. 2010. Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? *Env. Urb.* 22(1): 157-178.
- Rowntree, A. R. 1986. Ecology of the urban forest-introduction to Part II. *Urban Ecol.* 9: 229-243.

- Salisbury, F. and C. W. Ross. 1992. *Plant physiology*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, CA, USA. 422 p.
- Scholz, F. G., S. J. Bucci, G. Goldstein, F. C. Meinzer, A. C. Franco and F. Miralles-Wilhelm. 2007. Biophysical properties and functional significance of stem water storage tissues in neotropical savanna trees. *Plant Cell Environ.* 30(2): 236-248.
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable (Semades), Gobierno de Jalisco Poder Ejecutivo. 2011. Informe de Calidad del aire. Guadalajara, Jal. México. <http://sigajalisco.gob.mx/ramag/mapar.htm> (17 de septiembre de 2011).
- Solomos, S., G. K. Plattner, R. Knutti and P. Friedlingstein. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emission. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 106(6): 1704-1709.
- Stott, P. A., D. A. Stone and M.R. Allen. 2004. Human contribution to the European heat wave of 2003. *Nature* 432(7017): 610-614.
- von Bertrab, E. 2003. Guadalajara's water crisis and the fate of Lake Chapala: a reflection of poor water management in Mexico. *Environ Urban.* 15(2): 127-140.
- Whitlow, H. T., N. L. Bassuk and J. Reichert. 1992. A 3-year study of water relations of urban trees. *J. Appl. Ecol.* 29: 436-450.
- Wilby, R. L. 2007. A review of climate change impacts on the built environment. *Built Environment* 33(1): 31-45.
- Wu, J. 2008. Toward a landscape ecology of cities. In: Andersonm, B., L. R. Howarth and R. Walker (eds.). *Ecology, planning and management of urban forest*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. pp. 10-28.
- Yang, J., J. Mc Bride, J. Zhou and Z. Sun. 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban For. Urban Gree.* 3(2): 65-78.
- Zambrano, A., T. H. Nash and C. Gries. 1999. Physiological effects of the Mexico City atmosphere on lichen transplants on oaks. *J. Environ. Qual.* 28(5): 1548-1555.

