

ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LA DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR EL ARBOLADO URBANO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

FRANCISCO ESCOBEDO y ALICIA CHACALO

RESUMEN

La contaminación atmosférica en la Ciudad de México es muy elevada a lo largo de todo el año. Dado que los árboles tienen una importante participación en la descontaminación del aire, en este trabajo se integró información básica sobre la cobertura arbórea y las especies que la componen, datos meteorológicos y de contaminantes. Estos registros fueron utilizados en un modelo matemático de transpiración y deposición seca, para estimar en forma preliminar la cantidad de descontaminación por el arbolado. Se estudió un área de 1480km² en el Valle de México,

estimando que los bosques urbanos cubren el 26% del área de estudio. El modelo UFORE se aplicó durante un año, por medio de uno de sus componentes, se obtuvo la cantidad de remoción de ozono (O₃) y partículas <10µm (PM₁₀) que remueven los árboles, y se registró la variación estacional. Se obtuvo la descontaminación total en g·m⁻² y en total de toneladas. Se encontró que reduciendo tan solo en 1% la cantidad de O₃ y de PM₁₀ en la Ciudad de México, se podrían ahorrar hasta 10 millones de USD al año.

La Ciudad de México es una de las ciudades más contaminadas en Latinoamérica. Como resultado de este deterioro ambiental los seres humanos se han visto afectados por mortalidad prematura debido a la exposición al aire contaminado, efectos crónicos tales como la reducción en la condición física, daño permanente a los pulmones y enfisemas entre otros (IDRC, 2003). Estos daños se expresan también en términos económicos tales como la ausencia laboral, aumento en los gastos médicos y, subsecuentemente, en pérdidas de productividad. La contaminación atmosférica también implica daño en los materiales, en la vegetación y en la visibilidad (Sánchez y Morel, 1999).

La vegetación urbana, particularmente el arbolado, puede influir en forma directa o indirecta en la calidad ambiental y el bienestar humano, ya que mejora la calidad del aire, provee sombra, y modera la temperatura y el microclima,

afectando al uso de la energía; disminuye las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y a la vez aumenta el valor patrimonial (Escobedo *et al.*, 2008 Nowak *et al.*, 2006). En investigaciones realizadas por Ulrich (1986) se demostró que la respuesta de los seres humanos por efectos de la vegetación puede estar directamente relacionada con la recuperación de la salud en pacientes hospitalizados, así como con mejoras económicamente significativas en el sistema de cuidado de salud. Estudios realizados en Santiago de Chile y en EEUU han determinado que la vegetación arbórea en zonas urbanas puede reducir contaminantes atmosféricos tales como ozono, material particulado, azufre, monóxido de carbono y óxido de nitrógeno (De la Maza *et al.*, 2005; Escobedo, 2004; Nowak *et al.*, 2006). Además, el arbolado urbano reduce el escurrimiento, minimizando así la erosión del suelo y la producción de polvo. Escobedo *et al.* (2008) determinaron la viabilidad económica del uso del manejo del arbolado urbano para

mejoramiento de la calidad del aire en Santiago de Chile.

Condición y manejo del arbolado urbano de la Ciudad de México

En la Ciudad de México el crecimiento de la mancha urbana se ha realizado a costa de áreas naturales y áreas verdes (Benítez *et al.*, 1987; Escurra, 1990). Adicionalmente a las difíciles condiciones que en buena medida la urbanización impone a los árboles, los niveles de contaminación atmosférica son muy elevados la mayor parte del tiempo y la época de sequía dura la mitad del año.

Aunque la ciudad se encuentra ubicada en una zona de gran biodiversidad, ésta se encuentra poco representada en su arbolado, ya que la mayoría son especies introducidas. Por ejemplo, en la Delegación Azcapotzalco solo 4 especies constituyen el 80% del arbolado de aline-

PALABRAS CLAVE / Bosques Urbanos / Calidad del Aire / Servicios Ambientales /

Recibido: 19/10/2006. Modificado: 06/11/2007. Aceptado: 07/11/2007.

Francisco Escobedo. Ph.D. en Manejo de Recursos Forestales, State University of New York - ESF, EEUU. Profesor Asistente, University of Florida (UF) IFAS- School of Forest Resources and Conservation, EEUU. Dirección: PO Box 110806, Bldg. 164, Mowry Rd., Gainesville, FL 32611-0806 EEUU. e-mail: fescobed@ufl.edu

Alicia Chacalo. Doctora en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Azcapotzalco, México. Profesora, UAM, México e-mail: ach@correo.azc.uam.mx

ción y de estas, tres son introducidas (Vázquez *et al.*, 2005).

De manera general, se invierte una importante cantidad de recursos en obras y en construcción, las actividades que más daño causan a los árboles, pero no se destina un mínimo porcentaje para desarrollar la infraestructura que permita la existencia adecuada del arbolado, o bien que mejore la calidad de las áreas verdes existentes. Tampoco se cuenta con una cultura del árbol por parte de los ciudadanos o del gobierno. Esto resulta en que la mayor parte de los árboles presente un estado general regular o malo, ya que no se practican los cuidados ni las técnicas adecuadas de mantenimiento. La ausencia de un plan de manejo es evidente: no hay inventarios, y no se diseñan ni se planifican las plantaciones. Frecuentemente se plantan árboles sin las características adecuadas de altura, diámetro del tronco y tamaño del cepellón; se colocan en espacios reducidos que se vuelven insuficientes para permitir que el árbol continúe su crecimiento tanto en su parte aérea, como en el sistema de raíces por debajo del suelo. Los árboles se encuentran rodeados de pasto, concreto u otras plantas, con una densidad muy alta tanto en las calles como en las áreas abiertas. A estos árboles no se les da seguimiento ni cuidados posteriores, por lo que existe una alta mortandad y muy pocos llegan al estado adulto (Vázquez *et al.*, 2005).

En la Ciudad de México, así como en otras ciudades latinoamericanas, se han promovido políticas y programas ambientales que incorporan la plantación de árboles para el mejoramiento del ambiente (Escobedo, 2004; Escobedo *et al.*, 2008). Si bien estos instrumentos promueven el conocimiento ambiental y mejoran el bienestar de los habitantes urbanos, también es importante determinar cuál es la efectividad de los árboles para descontaminar el aire (De la Maza *et al.*, 2005). Se considera como 'efectividad' a la cantidad de contaminantes atmosféricos, ozono (O₃) y partículas menores a 10µm (PM₁₀) que son removidos por la cobertura arbórea. Una evaluación del estado actual del arbolado urbano de la Ciudad de México y su relación con la descontaminación del aire podría aportar y dar credibilidad a la conservación de las áreas verdes y promover la inversión y el manejo adecuados del arbolado urbano para el mejoramiento ambiental. Igualmente, entender la condición del arbolado urbano, su composición y su función ambiental puede facilitar la toma de decisiones efectivas. Con esos objetivos se integró información básica de la cobertura arbórea, datos meteorológicos y de contaminación por hora, a lo largo de un año, de la Ciudad de México dentro de un modelo matemático de transpiración y deposición seca. Así, el modelo permitió estimar de manera preliminar la cantidad

de descontaminación de O₃ y PM₁₀ por el arbolado urbano de la Ciudad de México durante el año 2000.

Sitio de Estudio

El área de estudio fue el Distrito Federal, con una superficie de 1480km² en el Valle de México, a 2240msnm. El clima local es semiárido, caracterizado por ~816mm de precipitación anual y temperatura media de 16°C (Rzedowski, 1994). Desde la conquista española, la ciudad se ha mantenido como una zona urbana de mayores proporciones y ha servido como centro de gobierno, finanzas e industria en pleno centro del país.

Estos factores, aunados a la rápida modernización e industrialización de la ciudad y de la zona metropolitana, han resultado en un aumento de la infraestructura y del tamaño la mancha urbana. Con un mayor desarrollo, acceso a fuentes de trabajo y aumento en el poder adquisitivo, hubo también una explosión en el número de habitantes y vehículos. La población de 3 millones en 1950 aumentó a casi 20 millones en el año 2000, con una densidad de 5799 habitantes/km² y casi 3,5 millones de automóviles (INEGI, 2003). Este número de vehículos y las condiciones geográficas del área de estudio, tales como mayor radiación solar y la combustión incompleta de los motores, resultan en que la contaminación atmosférica (Tabla I), en particular causada por O₃, sea una de las mayores en México y sin duda el problema ambiental más serio de la ciudad (IDRC, 2003).

TABLA I
CONTAMINACIÓN DE PM₁₀ Y O₃
EN ZONAS METROPOLITANAS DE
MÉXICO DURANTE EL AÑO 2000

Zona Metropolitana	PM ₁₀ (µg·m ⁻³)	O ₃ (ppm)
Ciudad de México	52,4	0,28
Monterrey	59,6	0,14
Guadalajara	59,1	0,22
Valle de Toluca	44,9	0,18
Ciudad Juárez	68,3	0,14

Fuente: SEMARNAT (2002).

TABLA II
COBERTURA POR TIPO DE SUPERFICIE EN LA CIUDAD DE MÉXICO,
DISTRITO FEDERAL POR KM² Y PORCENTAJE DE ÁREA DE ESTUDIO

Área de estudio	Total km ²	Bosques (Arbolado urbano)	Pastizal	Otros tipos de vegetación km ² (%)	Cultivos	Asentamientos humanos
Distrito Federal	1480	383 (26%)	109 (7%)	16 (1%)	375 (25%)	590 (40%)

Fuente: INEGI (2003). Nota: Bosques incluye tanto bosques naturales como bosques perturbados. Las definiciones de los otros tipos de superficies se presentan en INEGI (2003).

Fuera de los inventarios del arbolado urbano público para delegaciones particulares dentro de la Ciudad de México presentados en Vázquez *et al.*, (2005) y Aldama *et al.*, (2002), así como información existente sobre la cubierta vegetal a nivel nacional y regional Rzedowski (1994), existe poca información sobre la cobertura arbórea dentro de la Ciudad de México y el área de estudio. Sin embargo, usando datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática (INEGI), se puede estimar que los bosques urbanos cubren un 26% del área de estudio (Tabla II).

El Modelo UFORE

Para determinar el efecto del arbolado urbano sobre la calidad del aire en la Ciudad de México, se aplicó durante un año el modelo UFORE (Urban Forest Effects Model; Modelo de Efectos del Bosque Urbano). El modelo fue desarrollado por el Departamento de Agricultura-Servicio Forestal de los EEUU para asistir en el manejo e investigación de la estructura y funciones del arbolado urbano. El modelo UFORE puede ser utilizado tanto en áreas urbanas como peri-urbanas y calcula la remoción de contaminantes por parte de la superficie foliar como función de la deposición seca y la transpiración. Los resultados del modelo han sido comprobados y verificados usando áreas de prueba y mediciones de campo en Santiago, Chile (Escobedo, 2004; Escobedo *et al.*, 2008) y a lo largo de Norteamérica (Nowak *et al.*, 2006). Para el presente análisis se usó un componente específico del modelo UFORE que cuantifica las deposiciones secas de contaminantes atmosféricos, en particular la remoción de O₃ y PM₁₀ cada hora por parte de la cobertura arbórea a través de un año.

El modelo UFORE integró tres tipos de información en este análisis: 1) parámetros estimados sobre la estructura de la cobertura arbórea, 2) información meteorológica cada hora y para un año de la estación meteorológica Licenciado Benito Juárez de la Ciudad de México (Estación 7666793-MMMX), y 3) concentraciones por hora y para un año de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (RAMA, 2000).

Las deposiciones secas por hora de O₃ y PM₁₀ a copas de árboles durante el año 2000 se calculan con el modelo. El flujo de contaminantes (Fc; g-m⁻³-s⁻¹) se calcula (Nowak y Crane, 2000) como el producto entre la velocidad de deposición seca (Vd; m-s⁻¹) y la concentración de contaminantes (C; g-m⁻³).

La velocidad de deposición (Vd) se calcula (Baldocchi *et al.*, 1987) como la sumatoria inversa de tres resistencias: aerodinámica (Ra), capa de contorno (límite) cuasilaminar (Rb) y de copa (Rc):

Ra y Rb de O₃ se calculan usando valores y algoritmos presentados en Nowak y Crane (2000) y datos meteorológicos de velocidad de viento, temperatura y fracción de nubosidad, mientras que Rc, la resistencia de la copa del árbol por hora durante la época con hojas para O₃ se calcula en base a una modificación de los modelos de deposición big leaf (hoja grande) y copa con múltiples capas (Baldocchi *et al.*, 1987; Baldocchi, 1988), usando valores presentados en Lovett (1994) y Hosker y Lindberg (1982). Los valores de Ra y Rb son menores a Rc (Nowak *et al.*, 2006). Las entradas meteorológicas por hora para calcular la resistencia de copa son la radiación fotosintéticamente activa (PAR; calculada como el 46% del total de entradas de radiación, de acuerdo con Monteith y Unsworth, 1990), la temperatura (°K), la velocidad del viento (m-s⁻¹), las concentraciones de CO₂ (calibradas a 360ppm), y la humedad absoluta (kg-m⁻³). La temperatura del aire, velocidad del viento y la humedad absoluta, se miden directamente a partir de información de mediciones de la estación meteorológica por hora, o se calculan según algoritmos presentados en Nowak y Crane (2000). Una estación meteorológica ubicada en el centro del área de estudio fue seleccionada como representativa para la Ciudad de México. La carencia de parámetros requeridos por el modelo y la falta de acceso a otras estaciones limitaron un análisis sobre efectos del microclima urbano a los objetivos de este estudio. El total de radiación solar se calculó usando el National Renewable Energy Laboratory Meteorological -Statistical Solar Radiation Model (METSTAT) con entradas de la información meteorológica para el año 2000 (Maxwell, 1994). Algoritmos, entradas, métodos y valores para el modelo UFORE se presentan con detalle en Nowak y Crane (2000) y Escobedo (2004).

La velocidad de deposición seca para partículas se fijó en 0,0064m-s⁻¹ para la temporada con hojas basado en el valor promedio de Vd en la literatura (Lovett, 1994), tomando en cuenta un factor de resuspensión de partículas a la atmósfera del 50% (Zinke, 1967) y un índice de área foliar (IAF) de 6, considerando un solo lado de la hoja, e índice de área de corteza de 1,7. Finalmente, Vd se ajustó a un IAF estimado y

a la temporada con y sin hojas actual de la Ciudad de México.

Dada la carencia de información sobre características del arbolado urbano en la Ciudad de México, el modelo utiliza una estimación de IAF= 4 para la cobertura de árboles urbanos en una área de estudio de 1480km² (Tabla II) y una distribución del área de superficie de hoja de 75% para las especies deciduas y 25% para siempreverdes (Maas *et al.*, 1995; Escobedo *et al.*, 2006). El valor de IAF es la superficie foliar total dividida por cobertura arbórea total incluyendo capas del dosel (Nowak *et al.*, 2006). Basado en información de INEGI (2003), el porcentaje de superficie de la categoría "bosques" se ingresó al modelo para representar cobertura arbórea urbana dentro del área de estudio (Tabla III). Las fechas locales donde los árboles se encuentran con hojas (20 de marzo) y sin hojas (20 de noviembre), fueron ingresadas al modelo de forma tal que la transpiración de las especies deciduas y la deposición relacionada de contaminantes se limiten al período con hojas, y que permita ilustrar la variación estacional de remoción para contaminantes e influencia de especies arbóreas siempreverdes. A fin de limitar las estimaciones en deposiciones solo para los períodos de deposiciones secas, las velocidades de deposición se fijaron en 0 durante los períodos de precipitación (Nowak y Crane, 2000).

La información por hora de las concentraciones de O₃ (ppm) y de PM₁₀ (µg-m⁻³) se obtienen de la base de da-

tos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (RAMA 2000) cada hora y para el año 2000 de 9 estaciones de monitoreo (Tabla IV). Los valores por hora de los ppm se convierten en µg-m⁻³ basándose en mediciones de la temperatura atmosférica y presión (Seinfeld, 1986). Si falta información meteorológica o de concentraciones de contaminantes para una hora específica, ésta se estima usando el promedio mensual para esa hora en particular (Nowak y Crane 2000). En casos donde falte información de concentraciones de contaminantes de todo un mes o una temporada, se estima mediante interpolaciones de información existente y basándose en el patrón mensual para el promedio de dichas concentraciones.

El flujo promedio por año de contaminantes (Fc; g-m² de cobertura arbórea) entre los sitios de monitoreo se multiplica por la cobertura arbórea de la ciudad (Ac; m²) para estimar el total de descontaminación por un año (D; ton) que realizan los árboles en la ciudad de México.

Las remociones totales de O₃ y PM₁₀ llevadas a cabo por árboles se estiman usando el rango típico de velocidades de deposición seca (Lovett, 1994).

Usando la cantidad de remoción por tonelada de contaminantes atmosféricos, se puede estimar también el beneficio económico a la salud pública (externalidad) usando un valor monetario por tonelada extraída. El valor monetario de la remoción de contaminantes por árboles se

TABLA III
PARÁMETROS INTEGRADOS A UFORE

Ciudad	Área	Cobertura arbórea	Cobertura arbórea	IAF*	Cobertura siempre-verde
	km ²	%	m ²		%
México	1480	26	386464000	4	25

* IAF: índice de área foliar, según Maas et al. (1995).

TABLA IV
PROMEDIO ANUAL DE PM₁₀ Y O₃ EN LA CIUDAD DE MÉXICO DURANTE EL AÑO 2000

Estaciones de monitoreo	Descripción de uso de suelo y densidad poblacional	PM ₁₀ (µg-m ⁻³) ^a	O ₃ (ppm) ^b
Cerro de la Estrella	Comercial y residencial de media densidad	61,65	0,031
La Villa	Comercial y residencial de alta densidad	44,80	0,032
Merced	Comercial y residencial de alta densidad	53,66	0,034
Netzahualcóyotl	Residencial de alta densidad	52,93	0,037
Pedregal	Residencial de baja densidad	51,56	0,043
Tlalnepantla	Industrial y residencial de media densidad	49,54	0,032
Tultitlán	Peri-urbana y residencial de media densidad	46,90	0,037
Villa de las Flores	Peri-urbana y residencial de media densidad	50,88	0,034
Xalostoc	Industrial y residencial de media densidad	66,41	0,029

a: n= 8785 mediciones b: n= 8784 mediciones.
Fuente: (RAMA, 2000).

estima al sustituir los valores medios para las externalidades económicas de Chile a México, para los dos tipos de contaminantes. Los valores de externalidad del año 2000 son PM_{10} = USD18,192/ton y O_3 = USD\$1,315/ton (Banco Mundial, 1994). Este estudio supone que las externalidades de Santiago de Chile se pueden transferir a la realidad de México. El valor monetario por tonelada esta basado en un estudio que valora los beneficios al controlar una tonelada de emisiones durante un año. Suposiciones y limitaciones del análisis costo-beneficio se presentan en Banco Mundial (1994).

Resultados

La descontaminación total como tasa ($g \cdot m^{-2}$) de cobertura arbórea y como toneladas totales se presenta en la Tabla V. En comparación, para la ciudad de Santiago de Chile durante 2000, los valores de F_c promedio para PM_{10} y O_3 son de 7,6 y 2,8 $g \cdot m^{-2}$ (Escobedo *et al.*, 2008). En cambio, en Nueva York, EEUU, fue de 3,1 y 3,4 $g \cdot m^{-2}$ en 1994, mientras que en El Paso, Texas (e indirectamente Ciudad Juárez, Chihuahua) fue 4,0 y 3,1 $g \cdot m^{-2}$ (Nowak *et al.*, 2006). Estos resultados subrayan la importancia que los niveles ambientales de contaminación y condiciones climático-geográficas, y composición del arbolado, juegan en el aporte del arbolado a la descontaminación. En Santiago, con sus altos niveles de PM_{10} , temporada con inversiones térmicas prolongadas y alta de cobertura arbórea siempreverde, el rol del arbolado aumenta. En cambio Nueva York, con sus largos inviernos, bajas concentraciones de contaminantes y mayoría de especies arbóreas con hojas caducas, el aporte de la cobertura arbórea se halla minimizado (Nowak *et al.*, 2006). El IAF, superficie foliar total y la proporción de la superfi-

cie foliar siempreverde forman la base del modelo y son las variables más fácilmente alteradas por políticas y alternativas de manejo del arbolado urbano.

La aplicación de estos resultados a la Ciudad de México indica de manera preliminar que la reducción de 1% de O_3 y PM_{10} resultaría en un ahorro de 10 millones de USD al año; en términos humanos implica que en el 2010 hubiera 3329 consultas y 419 ingresos de hospital por complicaciones respiratorias (IDRC, 2003; Tabla VI). Como comparación, en Santiago de Chile durante el año 2000 y también 1997, la combinación de cobertura arbórea y arbustiva aportó la reducción de un 3% por la descontaminación de PM_{10} durante un año de análisis (Escobedo, 2004).

De manera preliminar se presentó un método que puede ser usado para estimar la descontaminación por parte del arbolado urbano y para evaluar las políticas ambientales que promueven la conservación de áreas verdes. Desafortunadamente, el modelo UFORE no calcula el efecto de árboles individuales, ni por tipo de especie sobre la descontaminación, ni distingue diferencias entre especies nativas e introducidas. Adicionalmente, la insuficiente información meteorológica no permitió estudiar el efecto del arbolado para mejorar la calidad del aire, ya que en este estudio solo se estimó la remoción. Finalmente, las entradas de estructura arbórea para este análisis son en base a la literatura y en un estudio similar realizado en Santiago de Chile. Mediciones actuales de especies, tamaños y biomasa foliar facilitarían la estimación de las emisiones biogénicas por parte del arbolado urbano. Investigaciones adicionales usando como base mediciones de la estructura actual y las emisiones biogénicas del arbolado urbano aportarían al conocimiento de los efectos de la vegetación sobre la calidad del medio ambiente urbano.

Un censo del arbolado provee la información necesaria para entender las influencias de la vegetación urbana al ambiente y a sus habitantes (Aldama *et al.*, 2002; De la Maza *et al.*, 2005; Escobedo *et al.*, 2006). Además, si se determina y analiza la estructura actual del arbolado urbano se podrá entender cuales son los requerimientos de mantenimiento, las técnicas silvícolas, el uso de suelos y para el ordenamiento territorial (De la Maza *et al.*, 2005; Escobedo *et al.*, 2006). Por ejemplo, en Santiago de Chile y en Modesto, California, EEUU, se concluyó que el manejo del arbolado urbano es una política ambiental costo-efectiva para el mejoramiento ambiental (McPherson *et al.*, 1999; Escobedo *et al.*, 2008).

Las acciones gubernamentales debieran enfocarse a la calidad tanto de los árboles como de su plantación para asegurar su supervivencia y no tan solo a continuar plantando individuos como ha ocurrido hasta ahora. Esto incluye un conjunto de actividades que van desde la planeación de las plantaciones hasta el establecimiento de los árboles, lo que se logra con un programa de manejo y cuidados posteriores adecuado. A esos efectos, es importante el empleo de especies arbóreas apropiadas al sitio de plantación, con bajo requerimiento de riego, de mantenimiento y baja alergenicidad se deben considerar.

Es necesario formar investigadores y aumentar el número de arboristas que atiendan de manera profesional al arbolado y, sobre todo, capacitar a las cuadrillas para realizar la poda, que es el tratamiento más requerido y el que más puede dañar al arbolado si no se efectúa de manera apropiada y con los principios elementales.

Mantener un arbolado saludable que logre llegar a la etapa adulta debe ser el principio rector de los planes de manejo. Este bosque urbano adulto brindará más beneficios para mejorar la calidad del aire de las ciudades.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a David Nowak del USDA Forest Service por su asistencia y al USDA Forest Service Northern Research Station.

REFERENCIAS

- Aldama A, Chacalo A, Grabinsky J, Vázquez HJ (2002) Amenazas al arbolado y a las áreas verdes urbanas. Caso de estudio: Ciudad de México. *Arborea* 4: 4-10, 21.
- Baldocchi D (1988) A multi-layer model for estimating sulfur dioxide deposition to a deciduous oak forest canopy. *Atm. Env.* 22: 869-884.
- Baldocchi DD, Hicks BB, Camara P (1987) A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atm. Env.* 21: 91-101.

TABLA V

FLUJO (F_c) Y DESCONTAMINACIÓN (D) DE PM_{10} Y O_3 EN LA CIUDAD DE MÉXICO, DISTRITO FEDERAL DURANTE EL AÑO 2000

Contaminante	(F_c) promedio	F_c min.	F_c max.	D promedio	D min.	D max.
		$g \cdot m^{-2}$			toneladas	
PM_{10}	5,6	2,2	8,7	2161	844	3377
O_3	4,8	1,6	8,4	1863	619	3258

TABLA VI

VALOR MONETARIO* DE REMOCIÓN POR TONELADA DE CONTAMINANTES POR ÁRBOLES EN LA CIUDAD DE MÉXICO, USANDO VALORES DE EXTERNALIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Contaminante	Valor	Valor min.	Valor max.
PM_{10}	39314	15357	61429
O_3	2450	814	4285

* En miles de USD. Fuente: Banco Mundial (1994).

- Banco Mundial (1994) *Chile-Managing Environmental Problems: Economic Analysis of Selected Issues*. Report N° 13061-CH. World Bank, Washington, DC, EEUU. 199 pp.
- Benítez G, Chacalo A, Barois I (1987) Evaluación comparativa de la pérdida de la cubierta vegetal y cambios en el uso del suelo en el sur de la Ciudad de México. En Rapoport E, López-Moreno I (Eds.) *Aportes a la Ecología Urbana de la Ciudad de México*. Limusa. México. 228 pp.
- De la Maza CL, Rodríguez M, Hernández J, Serra MT, Gutiérrez P, Escobedo F, Nowak D, Prendez M, Araya J, Varnero MT (2005) Silvicultura urbana: Vegetación urbana como factor de descontaminación. *Chile Forestal* 313: 46-49.
- Escobedo FJ (2004) A cost-effective analysis of urban forest management's role in improving air quality in Santiago, Chile. Tesis. SUNY. Syracuse, NY, EEUU. 296 pp.
- Escobedo F, Nowak DJ, Wagner J, De la Maza CL, Rodríguez M, Crane DE, Hernández J (2006) The socioeconomics and management of Santiago de Chile's public urban forests. *Urban For. Urban Green*. 4: 105-114.
- Escobedo FJ, Wagner J, Nowak DJ, de la Maza CL, Rodríguez M, Crane DE (2008) Analyzing the cost-effectiveness of Santiago Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *J. Env. Manag.* 86: 148-157.
- Escorra E (1990) De las Chinampas a la Megalópolis. Fondo de Cultura Económica. México. 119 pp.
- Hosker RPIr, Lindberg SE (1982) Review: atmospheric deposition and plant assimilation of gases and particles. *Atm. Env.* 16: 889-910.
- IDRC (2003) Contra la contaminación del aire en Ciudad de México: La campaña por aire limpio apunta a mejorar la salud y reducir sus gastos. Estudio de Caso: México (Contaminación Ambiental) 8. CASE-ECO-8S. International Development Centre, Canada. 4 pp. http://www.idrc.ca/es/ev-29135-201-1-DO_TOPIC.html (8 abr 2006)
- INEGI (2003) Estadísticas ambientales. Instituto Nacional de Estadísticas Geografía e Informática www.inegi.gob.mx/est/default.asp?c=5827 (abr 2006) Según: SEMARNAT Compendio de Estadísticas Ambientales, 2002. México.
- Lovett GM (1994) Atmospheric deposition of nutrients and pollutants in North America: an ecological perspective. *Ecol. Appl.* 4: 629-650.
- Maas JM, Vose JM, Swank WT, Martínez-Yrizar A (1995) Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west México. *Forest Ecol. Manag.* 74: 171-180.
- Maxwell EL (1994) A meteorological / statistical solar radiation model. En Proc. 1994 Annu. Conf. of the American Solar Energy Society. San Jose, CA, EEUU. pp. 421-426.
- McPherson EG, Simpson JR, Peper PJ, Xiao Q (1999) Benefit-cost analysis of Modesto's Municipal Urban Forest. *J. Arboricult.* 25: 235-248.
- Monteith JL, Unsworth MH (1990) *Principles of Environmental Physics*. Arnold. Nueva York, NY, EEUU. 304 pp.
- Nowak DJ, Crane DE (2000) The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions. En Hansen M, Burk T (Eds.) *Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21st Century: Proceedings of the IUFRO Conference*. Gen. Tech. Rep. NC-212. U.S. Department of Agriculture., EEUU. pp. 714-720.
- Nowak DJ, Crane DE, Stevens JC (2006) Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban For. Urban Green*. 4: 115-123.
- RAMA (2000) Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. <http://www.sma.df.gob.mx/simat/prama.htm>
- Rzedowski J (1994) *La vegetación de México*. Limusa. México. 503 pp.
- Sánchez JM, Morel JT (1999) Una estimación de salud de reducir la contaminación atmosférica en Santiago. En Varas JI (Ed.) *Economía del medio ambiente en América Latina*. Universidad Católica de Chile. pp. 157-176
- Seinfeld JH (1986) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. Wiley. Nueva York, NY, EEUU. 738 pp.
- SEMARNAT (2002) *Guía de Indicadores de la Calidad del Aire*. Gobierno de la Ciudad de México-SMA- INE. México. 2002.
- Ulrich RS (1986) Human Responses to Vegetation and Landscapes. *Landsc. Urban Plann.* 13: 29-44.
- Vázquez HJ, Grabinsky J, Chacalo A y Aldama A (2005) Inventario del arbolado urbano de la Delegación Azcapotzalco. *Arbórea* 7: 25-29.
- Banco Mundial (1994) *Chile-Managing Environmental Problems: Economic Analysis of Selected Issues*. Report N° 13061-CH. World Bank, Washington, DC, EEUU. 199 pp.
- Zinke PJ (1967) Forest interception studies in the United States. En Sopper WE, Lull HW (Eds.) *Forest Hydrology*. Pergamon. Oxford, RU. pp. 137-161.

PRELIMINARY ESTIMATE OF AIR POLLUTION REDUCTION BY URBAN TREES IN MEXICO CITY

Francisco Escobedo and Alicia Chacalo

SUMMARY

Air pollution levels in Mexico City are exceedingly high throughout the year. Since urban trees have a role in removing air pollution, this study used tree cover and structure estimates as well as actual meteorological and pollution concentration data as input in a transpiration and dry deposition, mathematical model to preliminarily estimate air pollution removal by an urban forest. An area of 1480km² was studied in the Valle de

Mexico, estimating that urban forests covered 26% of the study area. The UFORE model was applied to estimate the pollution removal of ozone (O₃) and particulate matter <10µm (PM₁₀) by trees as well as seasonal variations. Estimated total pollution removal results are presented in g·m⁻² and in tons. Reducing just 1% of ozone and PM₁₀ in Mexico City can result in benefits of up to 10 million USD per year.

ESTIMAÇÃO PRELIMINAR DA DESCONTAMINAÇÃO ATMOSFÉRICA PELA ARBORIZAÇÃO URBANA DA CIDADE DO MÉXICO

Francisco Escobedo e Alicia Chacalo

RESUMO

A contaminação atmosférica na Cidade do México é muito elevada ao longo de todo o ano. Devido que as árvores têm uma importante participação na descontaminação do ar, neste trabalho se integrou informação básica sobre a cobertura arbórea e as espécies que a compõem, os dados meteorológicos e de contaminantes. Estes registros foram utilizados em um modelo matemático de transpiração e deposição seca para estimar, de forma preliminar, a quantidade de descontaminação pela arborização. Estudou-se uma área de 1480km² no Vale

do México, estimando que os bosques urbanos cobrem 26% da área de estudo. O modelo UFORE foi aplicado durante um ano, por meio de um de seus componentes, se obteve a quantidade de remoção de ozônio (O₃) e partículas <10µm (PM₁₀) que removem as árvores, e se registrou a variação estacional. Obteve-se a descontaminação total em g·m⁻² e em total de toneladas. Encontrou-se que reduzindo somente 1% a quantidade de ozônio e de PM₁₀ na Cidade do México, se poderia poupar até 10 milhões de USD ao ano.