

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA ECONÓMICAS, A.C.



VALOR DE LOS ÁRBOLES EN LA CIUDAD DE MÉXICO, MODELO DE PRECIOS  
HEDÓNICOS

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN ECONOMÍA AMBIENTAL

PRESENTA

FRANCISCO ALVAREZ SORIANO

DIRECTORA DE LA TESINA: DRA. LOPAMUDRA CHAKRABORTI

## **Agradecimientos**

*A mi asesora Dra. Lopamudra Chakraborti por su constante apoyo durante todo el programa y por sus enseñanzas;  
al Dr. Héctor Mauricio Núñez Amórtegui por su valiosa ayuda para lograr un mejor trabajo;  
al Dr. Pedro Ignacio Hancevic por sus comentarios  
y al resto de profesores de la MAEA.*

## **Resumen**

*Este trabajo investiga si los habitantes de la Ciudad de México valoran los árboles a través del Porcentaje de Cobertura arborea (PCA) mediante un modelo de Precios hédonicos. Los resultados sugieren que un mayor PCA equivale a una disposición marginal a pagar (DMP) que va de \$8,757.31 a \$61,976.41 por propiedad para el año 2008, estos resultados representan del 0.748 % al 5.292 %. Como porcentaje de los ingresos familiares anuales, estos representan entre el 4.94 % al 34.99 % del ingreso promedio trimestral en la Ciudad de México para el año 2008. En el contexto de una de las ciudades más grandes a nivel mundial y de un país en vías de desarrollo el habitante promedio está dispuesto a pagar un precio implícito en concordancia con lo observado en otros trabajos para otras ciudades por un mayor número de árboles.*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisión de literatura</b>	<b>5</b>
2.1. Servicios ambientales de los árboles urbanos . . . . .	5
2.2. Valoración de los árboles urbanos y áreas verdes . . . . .	6
2.3. Valoración económica en México . . . . .	9
<b>3. Metodología y datos</b>	<b>12</b>
3.1. Modelo teórico . . . . .	12
3.2. Datos . . . . .	15
3.2.1. Características de las viviendas . . . . .	15
3.2.2. Árboles urbanos . . . . .	18
3.2.3. Datos del contexto de la propiedad . . . . .	19
3.3. Modelo econométrico . . . . .	22
3.3.1. Mínimos cuadrados ordinarios . . . . .	22
3.3.2. Regresión espacial . . . . .	26
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>30</b>
4.1. Discusión de resultados . . . . .	34
4.1.1. Pruebas de robustez . . . . .	38
<b>5. Conclusiones</b>	<b>40</b>
<b>Referencias</b>	<b>42</b>

# Índice de figuras

3.1. Precio promedio de las viviendas en miles por CP . . . . .	17
3.2. Porcentaje de cobertura de árboles en la Ciudad de México 2008 . . . . .	20

## Índice de cuadros

3.1. <i>Características de las propiedades</i> . . . . .	18
3.2. <i>Descripción de las variables para la regresión</i> . . . . .	21
3.3. <i>Variables y estadísticas descriptivas de la muestra para la regresión</i> . . . . .	23
4.1. <i>Coeficientes estimados del modelo semi-log</i> . . . . .	30
4.2. <i>Coeficientes estimados del modelo semi-log</i> . . . . .	31
4.3. <i>Prueba de dependencia espacial en el modelo MCO</i> . . . . .	33
4.4. <i>Coeficientes estimados del modelo semi-log espacial</i> . . . . .	34
4.5. <i>Coeficientes estimados del modelo semi-log espacial</i> . . . . .	35
4.6. <i>Coeficientes estimados y DMP de los CP con más y menos PCA</i> . . . . .	38

# 1. Introducción

El uso de los árboles ha pasado de embellecimiento y ornamentación a uno más que incluye la prestación de servicios ambientales en numerosas ciudades, estos servicios incluyen la mejora de la calidad del aire, la reducción de la escorrentía y las inundaciones, la disminución de los niveles de ruido y la moderación del clima (Livesley y col., 2016; Silvera Seamans, 2013). Adicional a los efectos positivos que tienen los propietarios de viviendas con árboles vecinos como sombra y privacidad (Netusil y col., 2010).

Sin embargo, para que estos beneficios se mantengan a lo largo del tiempo se deben considerar dos aspectos: primero, los bosques urbanos requieren un manejo activo, consistente y continuo, es decir se debe dar mantenimiento de manera adecuada. En segundo lugar, los administradores de árboles (tanto públicos como privados) deben involucrar a la comunidad en las decisiones y acciones relacionadas con los bosques urbanos (Clark y col., 1997) . Para esto es necesario que la comunidad reconozca la amplitud de los beneficios que tienen los árboles urbanos, por ello se busca en el presente trabajo estimar los beneficios proporcionados por los árboles a las personas en específico los habitantes de la Ciudad de México, a través del cálculo de la disposición marginal a pagar.

La preservación de la vegetación urbana está fundamentada en tres esferas que son: los recursos arbóreos, un marco comunitario sólido y un manejo apropiado del recurso (Clark y col., 1997). El primero de estos se conforma por la cobertura vegetal, las especies y su distribución. De la cobertura de arboles se desprende un concepto que es la cuantificación del porcentaje de cobertura del dosel de árboles (PCA), es decir *porcentaje de un área ocupada por el techo de los*

*árboles visto desde arriba* (Bravo-Bello y col., 2020; Kenney y col., 2011). La cobertura arbórea de una ciudad ayuda a planificar, administrar e investigar la vegetación actual, así como a estimar el valor de los servicios al revelar tanto las características como la distribución de los árboles (Bravo-Bello y col., 2020; Clark y col., 1997; Kenney y col., 2011). El marco comunitario tiene que ver con la cooperación de toda la comunidad (gobierno y privados) para actuar a través de metas y objetivos específicos con la finalidad de maximizar los beneficios de la vegetación. El último de estos puntos, es decir el manejo apropiado, tiene que ver con los vehículos de políticas específicas para proteger los árboles existentes, gestionar la selección de especies, capacitar al personal y aplicar estándares de cuidado (Clark y col., 1997). Sin embargo, un obstáculo frecuente para la cooperación comunitaria en torno al manejo forestal urbano es la falta de conciencia de los árboles como un recurso comunitario (Clark y col., 1997; Kenney y col., 2011).

De esto se puede derivar que la correcta evaluación, diseño e implementación de las regulaciones de tala y poda de árboles dependen en gran medida de la evidencia empírica de sus costos y beneficios. Mejores regulaciones, como las que se mencionaron anteriormente, permiten la preservación de la vegetación urbana limitando su tala y continuar con los planes de desarrollo urbano de la ciudad.

En la Ciudad de México existen numerosos reportes de tala de árboles, instituciones ambientales estiman que se han talado legalmente entre 20 mil y 56 mil árboles con fines de desarrollo inmobiliario y obras públicas entre los años 2010 y 2015 (ALDF, 2017; Sanchez, 2015). Además existen evidencias de pérdida de espacios públicos destinados como áreas verdes en la ciudad, principalmente en la zona centro por los mismo motivos que se talan árboles (Checa-Artasu, 2016).

La Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT) menciona que “ Uno de los principales impactos, consecuencia de la construcción de obras, es el derribo y la afectación

del arbolado”, entre estas afectaciones están la poda de los árboles que en muchos casos significa la pérdida de ese árbol y por lo tanto una disminución en el nivel de cobertura de árboles de la ciudad (PAOT, 2018). La PAOT menciona en su reporte para el año 2018 que 20,084 árboles fueron derribados en ese año para el desarrollo de obras públicas. Sin embargo, no solo la actuación directa de las personas es un peligro para la cobertura de árboles, las plagas y la falta de mantenimiento. Por ejemplo la poda implica una pérdida de más del 50 por ciento y hasta 90 por ciento de la estructura aérea de los organismos, esto se deriva en la pérdida de cobertura arbórea (PAOT, 2018).

Así, el presente trabajo tiene como objetivo responder a ¿cuál es el valor del nivel de porcentaje de cobertura arbórea en la Ciudad de México?, el propósito de esta pregunta es obtener estimaciones confiables de los beneficios de los árboles y bosques urbanos en la Ciudad de México a través de la disposición marginal a pagar (DMP) por el porcentaje de cobertura arbórea, utilizando un enfoque hedónico. Para esto se utiliza un conjunto de datos que incluye características físicas de las unidades de vivienda, características de la localización y el nivel de porcentaje de cobertura de árboles por código postal (CP), además de otras variables relacionadas con el contexto y estructura de las viviendas.

Los resultados van en línea con evidencia previa en otros países, e.g. (Netusil y col., 2010; Sander y col., 2010). Los resultados muestran evidencia para afirmar que las personas tienen una respuesta positiva hacia los árboles en su comunidad; esto se observa al haber una disposición a pagar una cantidad adicional promedio que va de \$8,757.31 a \$61,976.41 pesos por una vivienda con características similares pero que se encuentre ubicada en una zona con mayor número de árboles, estos resultados representan del 0.748 % al 5.292 % del valor de la propiedad por un incremento del 1 % del porcentaje existente de cobertura en el CP, esto representa del 4.94 % al 34.99 % del ingreso anual medio en la Ciudad de México en el año 2008 que era de \$177,118.75 pesos mexicanos (INEGI, 2008).

Otros estudios en México encuentran evidencia de la relación positiva que hay entre las zonas arboladas y en general los servicios y beneficios que brindan estos a los individuos (Romo-Lozano y col., 2017). Mientras que Cruz Martínez (2016) utiliza precios hedónicos para mostrar que hay una relación positiva entre los precios de las propiedades y la cercanía a una zona arbolada.

El presente trabajo contribuye a la literatura de valoración económica al encontrar evidencias de la disposición a pagar por el porcentaje de cobertura arbórea en la ciudad de México a través de precios hedónicos, en específico de toda una zona urbana y una amenidad ambiental poco explorada por la literatura, además de ser una ciudad en un país en vías de desarrollo. Se aprovechan los datos y la extensión de estos para generar distintos modelos que ayuden a minimizar el sesgo de variables omitidas y también con la finalidad de generar resultados comparables.

En el capítulo siguiente se enlista la literatura relacionada con precios hedónicos, se discuten algunas de las aportaciones de la literatura y el uso aplicado como una especificación para valorar amenidades ambientales, así como diversos trabajos en los que se ha utilizado este modelo de preferencias reveladas. Se mencionan los trabajos realizados en México que principalmente son trabajos que se han enfocado en la Ciudad de México.

En el capítulo 3 se desarrolla el modelo que se utiliza, un modelo simple que relaciona los precios de las viviendas con las amenidades estructurales y ambientales de la propiedad y variables socioeconómicas de los hogares, manteniendo la relación de no linealidad de la variable dependiente con las independientes, es decir estimando un modelo semilogarítmico, además de incluir un modelo de errores espaciales simultáneos autorregresivos (SAR) en específico para los CP. En el capítulo 4 se muestran los resultados de ambos modelos, en el capítulo 5 se discuten los resultados y su relación con otras variables para cerrar con la sección de conclusiones.

## **2. Revisión de literatura**

### **2.1. Servicios ambientales de los árboles urbanos**

En las grandes ciudades los efectos de los problemas ambientales actuales se intensifican debido al calentamiento global, algunos ejemplos de las problemáticas son: la escorrentía de aguas pluviales y el riesgo de inundaciones, la contaminación química y por partículas del aire, el suelo y el agua urbanos, la isla de calor urbano y las olas de calor del verano. Estos efectos del cambio climático promueven que los impactos tanto positivos como negativos de los árboles urbanos se intensifiquen (Livesley y col., 2016). Además los árboles y los bosques son, debido a los cambios estacionales y su tamaño, forma y color, los elementos más destacados de la naturaleza urbana (Tyrväinen y col., 2005).

Los beneficios de los árboles y áreas verdes en las grandes urbes están representados por los servicios ecológicos y ambientales que brindan. La FAO (2014) destaca que estos contribuyen a la seguridad alimentaria y nutricional, pueden aliviar la pobreza y puede aumentar la resistencia de las ciudades a los fenómenos meteorológicos extremos. Entre los servicios ambientales los árboles urbanos apoyan la mitigación y adaptación al cambio climático, a proteger los recursos. Entre los beneficios sociales dar oportunidades recreativas, culturales y sociales.

Adicionalmente y en concordancia con los beneficios ya mencionados, Tyrväinen y col. (2005) menciona que los árboles y los bosques urbanos también contribuyen a un paisaje urbano atractivo y verde y, por lo tanto, comunican la imagen de una ciudad positiva y orientada a la naturaleza. Indirectamente, los árboles y los bosques urbanos pueden promover el turismo

y mejorar el desarrollo económico. A nivel local, los árboles contribuyen a la calidad de las viviendas y los entornos de trabajo y sus beneficios se reflejan en el valor de las propiedades.

Durante el desarrollo y aprovechamiento de las áreas verdes y árboles urbanos se producen una serie de productos finales que inciden negativamente en la calidad de vida, generando costos para la economía y la sociedad. Por ejemplo la liberación de compuestos orgánicos volátiles potencialmente dañinos como hojas y partículas alergénicas como el polen (Livesley y col., 2016). Otro efecto adverso de la presencia de árboles es la percepción de mayor inseguridad al ser escondites en las grandes ciudades para cometer delitos (Cariñanos y col., 2017).

Algo que destacar es que si las ciudades toman medidas para invertir en una visión verde son recompensadas. De hecho, los recursos arbóreos pueden proporcionar, a lo largo de su vida, un paquete de beneficios que vale dos o tres veces más que el costo de establecimiento y cuidado (FAO, 2014). Si bien estos beneficios de los bosques urbanos, otros rodales y árboles individuales no son nuevos, todavía no se reconocen lo suficiente en los procesos de planificación y desarrollo urbano (Tyrväinen y col., 2005).

Se busca, en el presente trabajo, estimar los beneficios que proporcionan a las personas los servicios brindados por la vegetación urbana en términos monetarios, que implican no solo conocer en estos términos las preferencias de las personas si no propiciar que los individuos y gobierno reconozcan estos servicios.

## **2.2. Valoración de los árboles urbanos y áreas verdes**

En el interés por valorar lo árboles urbanos y áreas verdes como una amenidad ambiental se han realizado en distintas ubicaciones para distintos beneficios y utilizado diferentes métodos de valoración. Si bien estas diferencias dificultan la posible comparación de resultados, todos coinciden en un beneficio económico positivo para la comunidad y para los propietarios de

tierras (Sander y col., 2010).

Varios estudios han usado valoración contingente (CV), un modelo de preferencias declaradas para estimar el valor de las áreas de cobertura de árboles en zonas urbanas. Tyrväinen (2001), valora el uso recreativo de bosques urbanos en el distrito de Salo en Finlandia, Tyrväinen y Väänänen (1998) estima la disposición a pagar en North Carelia Finlandia, Majumdar y col. (2011), estima el valor monetario de los beneficios no cotizados de los bosques urbanos para los turistas urbanos en Savannah, Georgia, EU., Kwak y col. (2003), estima el valor que las personas asignan a la montaña Kwanggyo en el Área Metropolitana de Seúl de Corea. Los resultados de los estudios de CV, si bien son en distintos lugares y diferentes grupos encuestados, muestran que las personas están dispuestos a pagar cantidades positivas para mantener los bosques urbanos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los valores estimados usando CV a menudo se cuestionan porque representan solo lo que las personas declaran que pagarían en una situación hipotética y pueden no ser congruente con lo que estarían dispuestos a pagar en una situación real (Koo y col., 2013; More y col., 1988).

Además de CV, otro método que utiliza preferencias declaradas presente en la literatura que busca valorar los servicios y beneficios de los árboles y bosques urbanos son los experimentos de elección. Giergiczny y Kronenberg (2014) quienes estiman el nivel de impuestos que las personas estarían dispuestas a pagar por un incremento en el número de árboles en la Ciudad de Lodz, Polonia. Otros trabajos se centran en estimar el valor recreativo de los bosques urbanos (Giergiczny y col., 2015). Pero, al ser un método que utiliza escenarios hipotéticos y a través de estos obtener una estimación se tienen los mismos problemas que con el método de CV.

Precios hedónicos es preferido sobre otros métodos de valoración económica, como menciona Freeman III y col. (2014), porque permite estimar los precios implícitos de las características que diferencian productos estrechamente relacionados en una clase de productos. Los precios hedónicos tienen como finalidad medir el valor que los hogares asignan a un recurso determina-

do cercano a la ubicación de la propiedad (Hamilton & Morgan, 2010), el acceso a medios de transporte amigables con el medio ambiente (Mayor y col., 2012) o para estimar el valor de los beneficios ambientales (Bond y col., 2002).

El modelo hedónico del valor de la propiedad es una de las formas más directas de cómo los mercados privados pueden revelar la disposición de los consumidores a pagar (DAP) por medidas de calidad ambiental (Bishop y col., 2020). Este método basado en las preferencias reveladas se ha utilizado para calcular el valor de los árboles urbanos en función de características estructurales y precios de las viviendas (Sander y col., 2010).

Entre estos estudios hay los que valoran las características de los árboles o relacionadas con estos dentro del vecindario. Netusil y col. (2010) evalúan el impacto del tamaño de los árboles en el precio de las propiedades, mientras que Belcher y Chisholm (2018) estiman el nivel de conservación de los árboles como un aspecto que consideran las personas al valorar los árboles. Otro atributo recurrente es la distancia de las viviendas a los bosques urbanos y áreas verdes. Tyrväinen y Miettinen (2000) encuentran para el caso de Finlandia que los valores de las casas disminuye con un aumento de un kilómetro en su distancia al bosque más cercano, las casas con vista al bosque son más caras que las propiedades comparables. Donovan y Butry (2009) y Sander y col. (2010) utilizan una variable de distancia entre la propiedad y bosques urbanos y áreas verdes encontrando también una relación inversa, es decir a mayor distancia de una zona arbolada menor es el valor marginal.

La cobertura arbórea entendida como el porcentaje del área total que ocupan los árboles es una de las variables ambientales que se han valorado con este modelo. Sander y col. (2010) estiman el valor de esta variable para Dakota y Ramsey, en Minnesota EU. Donovan y Butry (2009) utiliza esta variable para casas en específico y la proporción que ocupan los árboles. Saphores y Li (2012) utilizan también esta variable para estudiar el caso de la ciudad de Los Angeles. Estos estudios coinciden en que se valora positivamente un mayor porcentaje de árboles. Estas

variables se utilizan en el presente trabajo en distintos modelos para explorar los distintos resultados que se obtienen y reducir los sesgos comúnmente presentes en las estimaciones de precios hedónicos para las amenidades.

Para estimar el precio de bienes implícitos, una herramienta usualmente utilizada es SIG para calcular con mayor certidumbre la distancia para acceder a las amenidades; Hamilton y Morgan (2010) estiman la disposición a pagar por estar cerca de una playa calculando con SIG la distancia entre el bien y la amenidad, también con esta herramienta se pueden obtener características de los espacios verdes urbanos, como la distancia de la propiedad a este, el tipo y el nivel de vegetación (Geoghegan y col., 1997; Kong y col., 2007).

### **2.3. Valoración económica en México**

El uso de herramientas de valoración económica en México es relativamente nuevo y se han centrado en las ciudades más grandes del país, el trabajo de Gonzalez y col. (2013) que usa el método de precios hedónicos para estimar la disposición a pagar por mejor calidad en el aire en Monterrey, Guadalajara y la Ciudad de México. El método de precios hedónicos es uno de los más usados, las amenidades a valorar han sido diversas; por ejemplo valorar la distancia con los centros de trabajo (Lara y col., 2017), estimar el valor de parcelas en zonas de conservación considerando aspectos ambientales (Martínez-Jiménez y col., 2017) y los trabajos que se han enfocado en servicios y amenidades ambientales como la calidad del aire (Chakraborti y col., 2019), la disponibilidad de agua y recolección de desechos (Sobrino, 2014).

En lo que respecta a la valoración de los recursos forestales en México la investigación se restringen a los métodos de valoración contingente y costo de viaje (Romo-Lozano y col., 2017). También la mayoría de estos se han centrado en bosques y los servicios ecosistémicos y recreativos, además de centrarse en las zonas rurales del país (Romo-Lozano y col., 2017).

Solo se encuentra los trabajos de valoración de árboles en la Ciudad de México Cruz Martínez (2016), Flores Xolocotzi y col. (2010) y Martínez-Cruz y Sainz-Santamaría (2017), los primeros utilizan el método de costo de viaje para estimar el valor de dos espacios boscosos encontrando que cada tipo de visitante asigna a cada viaje un valor recreativo de 33 dólares (del 2008) y 12 dólares (del 2008), en tanto que Flores Xolocotzi y col. (2010) estima también el uso recreativo del Parque Hundido en la Ciudad de México a través de valoración contingente. Por su parte Cruz Martínez (2016) usa un modelo de precios hedónicos con una especificación espacial, que incluye variables estructurales y del vecindario para las áreas verdes divididas en espacios deportivos, arbolados y de arbustos. Específicamente utiliza la distancia a las propiedades a estos y encuentra que hay una valoración positiva para las áreas arboladas, no así para los otros dos tipos de áreas verdes.

En estos trabajos, las variables independientes que se usaron en las aplicaciones mencionadas además de la de interés (comúnmente una variable ambiental), son: para las variables estructurales, área del terreno de la propiedad y construida (Chakraborti y col., 2019; Gonzalez y col., 2013), mientras que en el caso de las variables del vecindario usan variables como: porcentaje de viviendas con acceso a los servicios de electricidad, alcantarillado, agua (Chakraborti y col., 2019) y la cercanía a estaciones de metro que es uno de los principales medios de transporte en la ciudad (Cruz Martínez, 2016), para todas las variables encuentran relaciones positivas, salvo en el caso de estaciones del metro, entre dichas amenidades y el precio de las viviendas. Además, existen otras variables exploradas por trabajos que buscan también a través del método de salarios hedónicos, como la tasa de desempleo por ubicación y número de habitantes encontrando una relación negativa entre ingreso de los hogares y estas variables (Núñez y col., 2017).

El trabajo que aquí se desarrolla pretende a partir del porcentaje de árboles por código postal en la Ciudad de México y con el uso de un modelo de precios hedónicos estimar la disposición a pagar de las personas por una mayor densidad de árboles. Con esto se pretende ayudar a sumar a

la literatura de valoración en México utilizando una base de datos agrupados por código postal. Si bien no es el primer trabajo en México que utiliza el modelo de precios hedónicos, si es el primer trabajo que utiliza esta variable como un proxy de la vegetación, además de hacerlo para la zona urbana más importante del país.

### 3. Metodología y datos

En esta sección se describe el modelo de precios hedónicos estándar para estimar el valor de las amenidades ambientales, porcentaje de cobertura arbórea, desarrollado principalmente por Freeman III y col. (2014) y Phaneuf y Requate (2019), así como la especificación econométrica que se usa para estimar los parámetros de interés.

#### 3.1. Modelo teórico

En esta sección se desarrolla brevemente el modelo de Freeman III y col. (2014) y Rosen (1974), aplicado a bienes que no están en un mercado explícito. El bien  $x = (x_1, \dots, x_c)$  es un bien compuesto, donde  $c$  son el número de características del bien. Así el bien  $x$  se ve completamente descrito por los vectores de características ambientales y no ambientales  $E_{i,z}$ ,  $G_z$  y  $L_z$ . Por lo tanto, los compradores y habitantes de las propiedades tienen una utilidad que es una función del vector del bien numerario  $X$  y las amenidades de la vivienda:

$$U = U(X, E_{i,z}, G_z, L_z) \quad (3.1)$$

donde  $E_{i,z}$  son las variables estructurales que se relacionan con las características directas de la propiedad;  $G_z$  las variables del código postal en el que se encuentra la propiedad y definen la facilidad con la que se puede llegar a los servicios desde la propiedad; y  $L_z$  las variables de características ambientales del vecindario o código postal que describen la calidad de su entorno, como la contaminación o la calidad del agua (Freeman III y col., 2014), para el caso esta variable

es el porcentaje de cobertura arbórea. Los compradores maximizan su utilidad eligiendo de entre las características del bien compuesto y el bien numerario sujeta a la restricción presupuestaria:

$$Y - P(E_{i,z}, G_z, L_z) - X = 0 \quad (3.2)$$

donde  $Y$  representa el ingreso y  $X$  es el bien numerario.  $P(E_{i,z}, G_z, L_z)$  es la función de precio hedónico de la vivienda, que se da de las interacciones entre compradores y vendedores de las propiedades que hay en el mercado. Los supuestos para estimar la función de  $P(E_{i,z}, G_z, L_z)$  son la información perfecta sobre todas las posibles alternativas de viviendas, hay libertad de elección, que el mercado esta en equilibrio; estos supuestos implica que los compradores han elegido una propiedad entre el mercado que maximiza su utilidad. Finalmente se asume que la disponibilidad de viviendas en el corto plazo es fija entonces los precios solo vienen dados de las ofertas de los compradores (Phaneuf & Requate, 2019), es decir, que todos los individuos han tomado sus decisiones que maximizan su utilidad dados los precios de la vivienda y que el mercado de viviendas esta vacío. Así, la ecuación de precios hedónicos se puede expresar de la siguiente manera, donde se buscará estimar el parámetro  $\beta$  que indica el grado de relación entre las amenidades y el precio:

$$p_i = f(E_{i,z}, G_z, L_z, \beta, \epsilon_i) \quad (3.3)$$

Donde  $p_i$  es el precio observado de la propiedad  $i$ ,  $f(\bullet)$  es una especificación funcional para los precios hedónicos observados en el mercado, y  $E_{i,z}, G_z, L_z$  que como se mencionó anteriormente son las características ambientales y no ambientales observadas de la propiedad  $i$  y el CP  $z$ , respectivamente, y  $\epsilon_i$  es un término de perturbación que captura los determinantes del precio no contabilizados por las variables explicativas. Idealmente, el valor estimado para  $\beta$  permite establecer una relación causal entre las amenidades relacionadas con la calidad ambiental y los precios de las viviendas, además de poder obtener una estimación no sesgada del precio marginal implícito de  $L_z$  (características ambientales) para el hogar  $i$ , que se define como:

$$\hat{p}_{L_z} = \frac{\partial \hat{f}(E_{i,z}, G_z, L_z, \beta)}{\partial L_z}, \quad i = 1, \dots, I, \quad z = 1, \dots, Z \quad (3.4)$$

Si en particular se cumple que la derivada mostrada en 3.4 existe y además es distinta de 0, entonces se tiene un valor estimado del precio implícito de la amenidad, indica que es posible medir la disposición marginal de los hogares a pagar por  $L_z$  en equilibrio directamente a partir de la estimación del precio hedónico, en el caso que  $\hat{p}_{L_z} > 0$  se considera como una amenidad que las personas valoran positivamente para el caso contrario donde  $\hat{p}_{L_z} < 0$  se trataría de una desamenidad que los individuos perciben como algo negativo.

La teoría de precios hedónicos establece que una casa representa un conjunto de atributos. Sin embargo, no afirma cuántos y qué atributos son. Esto dificulta la estimación estadística adecuada porque las estimaciones de los parámetros de los atributos en el modelo estarán sesgadas si se omiten atributos.

En la mayoría de los modelos se considera que el componente aleatorio representa choques no observados en el sistema, errores de medición y variación aleatoria en los datos, pero con una regresión hedónica, mientras este componente aleatorio todavía existe, el índice de atributos omitidos también está presente (Parmeter y C., 2012).

Para mitigar este sesgo se incluyen efectos fijos por códigos postales para controlar por las diferencias entre un código postal y otro que no se explican o no se controlan en el modelo (Bishop y col., 2020; Chakraborti y col., 2019). Sin embargo, este efecto sigue presente y se busca atenuar en lo posible.

## 3.2. Datos

Se recolectaron datos de distintas fuentes, el precio de las viviendas y las características estructurales provienen de la SHF, mientras que las variables que funcionan como las amenidades y características del vecindario destacando la densidad de árboles y la cercanía a áreas verdes son del INEGI y la PAOT del Distrito Federal (ahora Ciudad de México), todas las variables para el año 2008. En el cuadro 3.1 se describe las características de las viviendas que se utilizan en la regresión, en el cuadro 3.2 se describen cada una de las variables independientes y Las estadísticas descriptivas para ellas se dan en el Cuadro 3.3.

### 3.2.1. Características de las viviendas

La variable dependiente de interés para la estimación del modelo es el precio de la vivienda. Se obtuvieron datos de tasaciones externas en la Ciudad de México, recopiladas y publicadas por la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF), la institución estima tanto el valor del terreno como el de la estructura, considerando sus características y ubicación. Estos terrenos con estructuras o lotes baldíos se tasan con el fin de obtener hipotecas para financiar la compra de viviendas y terrenos.

Para el año 2008 se cuenta con información de 23,677 viviendas en la Ciudad de México, con información sobre el tamaño del terreno, área contruida, año de construcción y superficie accesoria (elementos como terrazas, patios y estacionamientos cubiertos y cuartos de servicio contruidos con elementos provisionales DOF (2012)) ; estas propiedades están distribuidas en 1,036 CP de 1404 que hay en la Ciudad de México.

Las otras características disponibles de las viviendas son la *referencia de proximidad urbana*, que la SHF indica que estas están en función a las principales características de ubicación municipal del inmueble valuado y la proximidad hacia el centro económico reconocido y se

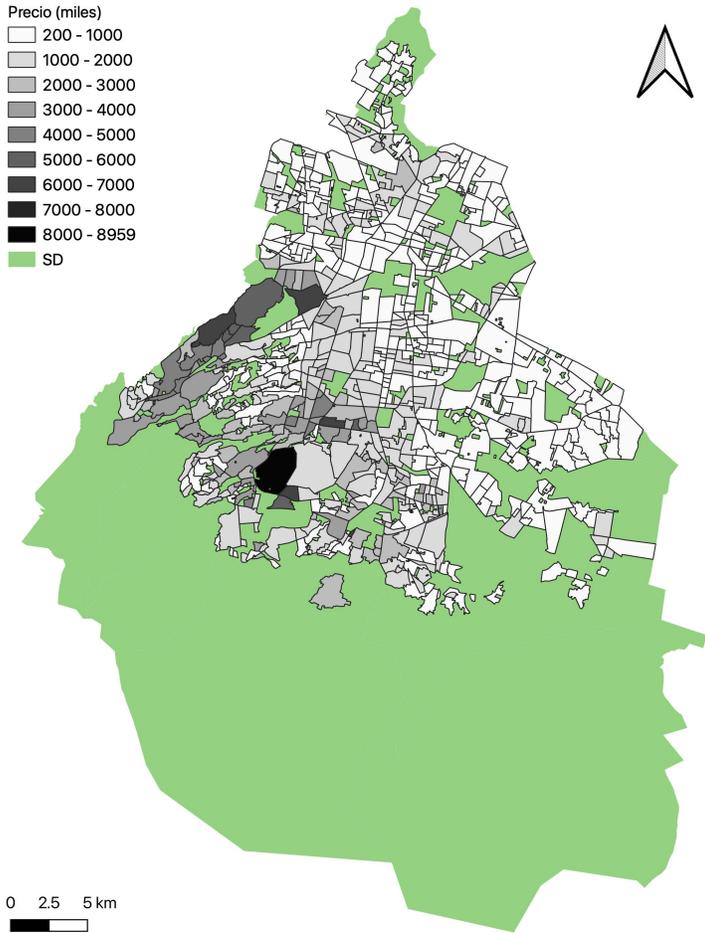
clasifican en: Céntrica es decir que se encuentra en zonas limitadas generalmente por vías primarias, definidas por la autoridad como zona centro; Intermedia que se trata de una proximidad definida a partir de vías primarias limitadas generalmente por vialidades de velocidad intermedia; Periférica que son propiedades que se encuentra su acceso y límite mediante vías rápidas, en la mayoría de los casos reconocida como zona urbana de crecimiento inmediato, forma parte de la ciudad; De expansión: zona reconocida por la autoridad como de crecimiento potencial. En muchos casos estas propiedades no se encuentra definido su uso de suelo y se encuentra en proceso de reconocimiento en función de su crecimiento, próxima a ser parte de la ciudad; Rural: reconocido por la autoridad como de uso agrícola o sin dotación de servicios (DOF, 2012), esta característica por lo tanto depende de la observación del evaluador y no es posible identificar visualmente.

Así del total de propiedades 8,239 son catalogadas como Céntricas, 11,653 como Intermedias, 3595 se clasifican como Periféricas, 59 como De expansión y el resto es decir 131 se consideran como Rurales.

Para la regresión final se descartaron las viviendas que se encontraban en CP para los que no se encontró información de cobertura arbórea o datos de las características sociodemográficas del vecindario. Los valores que no se hallaron de PCA son debido a la división entre zonas de conservación y zona urbana que hace la PAOT, con esto se debieron descartar 1,134 observaciones que son aquellas viviendas que se encuentran en las zonas consideradas de conservación; las observaciones que fueron descartadas por datos sobre el vecindario iguales a 0 se debe a la distribución de las AGEBS entre Urbanas y no urbanas, se eliminaron debido a esto 153 observaciones de las propiedades. En total se descartaron 1,287 observaciones por cuestiones de distribución geográfica y disposición de los datos. Además, otras 34 observaciones se eliminaron por inconsistencias en el área del terreno y el área del CP en el que se encuentran estas observaciones, al ser mayor el área del terreno que la del CP, tomando en cuenta que es una zona urbana con un número promedio de 5,146 viviendas por CP (INEGI, 2008) la existencia de un

CP con una única vivienda es improbable. También se descartan otras 10 observaciones dado que presentaban valores negativos en la característica superficie accesoria.

Figura 3.1: Precio promedio de las viviendas en miles por CP



Fuente: SHF (2020)

Así los datos para la regresión lo conforman 22,346 propiedades distribuidas en 791 CP de la Ciudad de México (Ver Cuadro 3.1), el valor promedio de cada vivienda es de \$1,170,967.00 pesos mexicanos (Cuadro 3.1), el mayor número de observaciones es para el CP 11320 en la delegación Miguel Hidalgo con 797 propiedades con un valor promedio de \$942,982.60 pesos mexicanos. El CP con el mayor promedio de precios es 01900 en la Alvaro Obregón con un

promedio de \$8,958,603.55. En el otro extremo esta el código 03640 con un precio promedio de \$199,900.00. La figura 3.1 muestra los precios promedio para cada uno de los CP para los que se tiene información, así se puede observar que los mayores niveles de precios se concentran en las alcaldías centrales (Benito Juárez, Cuauhtémoc y Álvaro Obregón, mientras que la zona oriente de la ciudad tiene los precios más bajos.

Para la característica de referencia de proximidad las propiedades que son Intermedias alcanzan la cifra de 11,069, mientras que 7,932 son viviendas céntricas, 3,188 se consideran periféricas y el restante son propiedades catalogadas como En Expansión o Rural. Se agrega también la variable Año de construcción (Cuadro 3.1), en promedio las viviendas fueron construidas en el año 1995, también se incluyen datos sobre terrenos que al carecer de una construcción tienen para año de construcción igual a 0.

Cuadro 3.1: *Características de las propiedades*

Variable	Descripción	Media	Desviación Est.	Min	Max
Valor de la propiedad	Pesos mexicanos	\$ 1,170,967.00	\$ 1,333,383.00	\$ 2,160.00	\$ 42,200,000.00
Superficie del terreno	Metros cuadrados	1,676.00	6,906.93	0	150,367.00
Superficie construida	Metros cuadrados	114.86	1051.65	0	95,574.17
Superficie accesoria	Metros cuadrados	4.43	18.16	0	1,220.00
Año de construcción		1996	55	0	2008

Fuente: SHF (2020)

### 3.2.2. Árboles urbanos

Para la variable independiente de interés, *porcentaje de cobertura arbórea por código postal* se utilizan los datos de la PAOT (2010) de áreas verdes por colonia esto es la superficie de área verde urbana (arbolado) por colonia del suelo urbano de la Ciudad de México, la información la obtuvieron tomando como base el inventario de áreas verdes urbanas del Distrito Federal con imágenes de los años 2007 y 2008, el origen de esta información son mosaicos de imágenes satelitales multiespectrales Quickbird. Esta base incluye datos de área en metros cuadrados de

la colonia y del arbolado, para construir el porcentaje de cobertura arbórea se obtuvo la relación entre el área total y la superficie arbolada.

Se estimaron los niveles de cobertura forestal por CP para la ciudad de México, el promedio de cobertura de arbolado es de 9.97 %, el CP 11580 es el de mayor porcentaje con un 110.77 % de cobertura este se ubica en la delegación Miguel Hidalgo en la zona del bosque de Chapultepec un área arbolada que se destaca por el alto número de parques y el bosque de Chapultepec, el segundo CP con mayor porcentaje tiene un 63.23 % de arbolado y se trata del código 01729 en la delegación Álvaro Obregón, el CP con menor cobertura es el 09704 en Iztapalapa con un 0.0007059 %. El grafico 3.2 muestra la distribución en porcentaje de cobertura de árboles por CP.

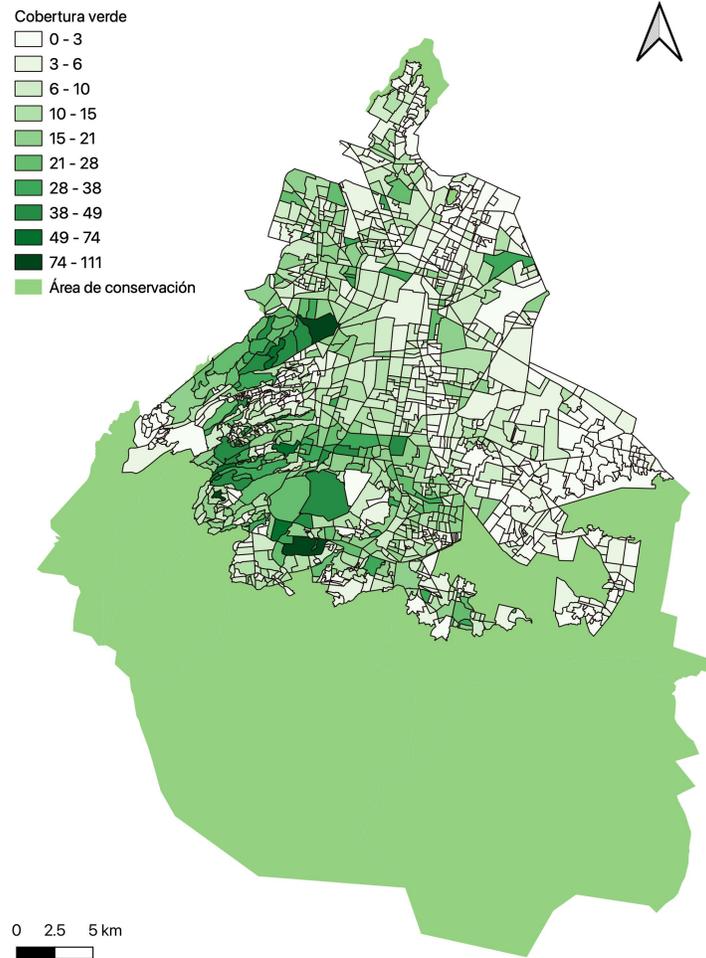
### **3.2.3. Datos del contexto de la propiedad**

El problema de identificación de la función de precios hedónicos suele implicar un sesgo de variable omitida, siendo esto uno de los mayores retos para obtener un estimador confiable del precio hedónico. Para reducir este sesgo, se incluyen características socioeconómicas (Bishop y col., 2020). Para capturar las características socioeconómicas, se consideran los datos del Censo de población y vivienda 2010, disponibles a nivel Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB).

Según la definición de INEGI, una AGEB urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de las zonas urbanas que son aquellas con población mayor o igual a 2,500 habitantes y en las cabeceras municipales.

El censo de población y vivienda en México no incluye datos sobre el ingreso, por lo que se

Figura 3.2: Porcentaje de cobertura de árboles en la Ciudad de México 2008



Fuente: "PAOT, 2010"

utilizan variables que ayuden a aproximarse, tales como nivel educativo medido en años y el porcentaje de población ocupada. Además se consideran otros datos disponibles en el censo como variables del vecindario: población, número de hogares, nivel promedio de estudios, porcentaje de la población con acceso a servicios de salud, porcentaje de viviendas habitadas, viviendas con 2 o más habitaciones para dormir y el porcentaje de disponibilidad entre los hogares de los servicios básicos: electricidad, drenaje y agua potable (Ver Cuadro 3.3).

Para la construcción de las observaciones se asociaron cada AGEB a un código postal según los polígonos de CP y los centroides de los AGEB. Se estimaron los resultados con la suma o

Cuadro 3.2: Descripción de las variables para la regresión

Variable	Fuente	Descripción
Valor de la propiedad	SHF	Valor de la <i>i-esima</i> propiedad en pesos mexicanos.
<i>log</i> Valor de la propiedad	SHF	Logaritmo del valor de la propiedad <i>i</i>
<i>log</i> Superficie del terreno	SHF	Logaritmo de los metros cuadrados de terreno que tiene la propiedad <i>i</i>
<i>log</i> Superficie construida	SHF	Logaritmo de los metros cuadrados de construcción de la propiedad <i>i</i>
<i>log</i> Superficie accesoria	SHF	Logaritmo de los metros cuadrados de superficie accesoria de la propiedad <i>i</i>
<i>log</i> Año de construcción	SHF	Logaritmo del año de construcción de la <i>i-esima</i> propiedad
Céntrica	SHF	Variable que indica si la <i>i-esima</i> propiedad es Céntrica con 1 y 0 en caso contrario
Periférica	SHF	Variable que indica si la <i>i-esima</i> propiedad es Periférica con 1 y 0 en caso contrario
Intermedia	SHF	Variable que indica si la <i>i-esima</i> propiedad es Intermedia con 1 y 0 en caso contrario
Rural	SHF	Variable que indica si la <i>i-esima</i> propiedad es Rural con 1 y 0 en caso contrario
PCA	PAOT	Porcentaje de cobertura arbórea del <i>z-esimo</i> código postal.
<i>log</i> NUE	INEGI	Logaritmo natural del número de unidades económicas en el <i>z-esimo</i> código postal.
<i>log</i> Población	INEGI	Logaritmo natural de la población total del <i>z-esimo</i> código postal.
PEA	INEGI	Porcentaje de la población total que es económicamente activa (personas mayores de 15 años) en el <i>z-esimo</i> código postal.
Nivel promedio de estudios	INEGI	Años de estudio promedio de la población en el <i>z-esimo</i> código postal.
Acceso a servicios de salud	INEGI	Porcentaje de la población total que tiene acceso a servicios básicos de salud en el <i>z-esimo</i> código postal.
<i>log</i> Hogares totales	INEGI	Logaritmo natural del total de hogares en el <i>z-esimo</i> código postal.
Habitantes promedio por hogar	INEGI	Ocupantes que en promedio habitan un hogar en el <i>z-esimo</i> código postal.
Dos dormitorios o más	INEGI	Porcentaje del total de viviendas que tienen dos o mas dormitorios en el <i>z-esimo</i> código postal.
Viviendas habitadas	INEGI	Porcentaje de viviendas habitadas del total de viviendas en el <i>z-esimo</i> código postal.
Viviendas con acceso a agua	INEGI	Porcentaje del total de viviendas que tienen acceso a los servicios básicos de agua en el <i>z-esimo</i> código postal.
Viviendas con acceso a drenaje	INEGI	Porcentaje del total de viviendas que tienen acceso a los servicios básicos de drenaje en el <i>z-esimo</i> código postal.
Viviendas con acceso a electricidad	INEGI	Porcentaje del total de viviendas que tienen acceso a los servicios básicos de electricidad en el <i>z-esimo</i> código postal.
Metro	PAOT	Es igual a 1 si el <i>z-esimo</i> código postal tiene al menos una estación del metro a menos de 2,000 metros de su perímetro o dentro del área del CP y 0 en cualquier otro caso.
Metrobús	PAOT	Es igual a 1 si el <i>z-esimo</i> código postal tiene al menos una estación del metro a menos de 2,000 metros de su perímetro o dentro del área del CP y 0 en cualquier otro caso.
Riesgo sísmico	PAOT	Es igual a 1 si el riesgo por sismo es Alto o Muy alto en el <i>z-esimo</i> código postal y 0 en caso contrario.

Fuente: Elaboración propia.

media, dependiendo el tipo de variable, a nivel de código postal para las características socio-económicas considerando todos los AGEB que están dentro del de código postal, para aquellos códigos postales que no tenían un AGEB contenido se obtenía el vecino más cercano.

Adicionalmente se agregaron las variables de disponibilidad según datos de Sistema de información geográfica de la Ciudad de México con datos del año 2008, la disponibilidad del sistema de transporte metro y metrobús, para ello se utilizaron bivARIABLES para el caso de estaciones del Sistema colectivo metro, donde se le asignaba el valor de 1 si había una estación

de este sistema de transporte a un kilómetro o menos de distancia del centroide del polígono de cada CP, de manera similar se generó la variable para las estaciones de Metrobús (MB) con la diferencia que este resultó significativo a una distancia de 500 metros o menos. Ambos son con datos del año 2008, en dicho año había 11 líneas del metro y 2 del MB. Otra variable con misma fuente es la variable de Riesgos por sismos, este riesgo se clasifica en Muy Alto, Alto, Medio y Bajo, para incluirlo en el modelo se construyó una variable con dos valores donde es igual a 1 para los niveles de Riesgo Muy Alto y Alto y cero en cualquier otro caso.

El conjunto de datos final son datos de corte transversal para el año 2008. En el Cuadro 3.2 se dan mayores detalles de las variables que se utilizaron para la regresión así como la relación que hay con el modelo. El cuadro 3.3 resume las variables ya transformadas de la muestra para la regresión de las variables dependientes e independientes, dentro de las variables independientes se incluyen variables proxys que se mencionaron anteriormente como controles características del código postal, así se utilizan variables socioeconómicas y de transporte.

### **3.3. Modelo econométrico**

El objetivo de la estimación hedónica es utilizar datos sobre los precios de la vivienda y sus características para estimar el esquema de precios de equilibrio  $P(x)$ . Que, tal como se menciono anteriormente,  $x$  es un bien compuesto de las características ambientales, demográficas y sociales.

#### **3.3.1. Mínimos cuadrados ordinarios**

Las alternativas que da la literatura de una forma funcional a estimar incluyen la transformación lineal, cuadrática, log-log, semilogarítmica, semilogarítmica inversa, exponencial y de Box-Cox (Freeman III y col., 2014), esto debido que los compradores no pueden tratar los atributos individuales de la vivienda como elementos discretos entre los que pueden elegir y mezclar

Cuadro 3.3: *Variables y estadísticas descriptivas de la muestra para la regresión*

Variable	Observaciones	Media	Desviación Est.	Min	Max
Valor de la propiedad **	22,346	\$ 1,170,967.00	\$ 1,333,383.00	\$ 2,160.00	\$ 42,200,000.00
PCA***	791	10.3277%	7.3549%	0.0007%	100.0000%
log Valor de la propiedad **	22,346	13.64851	0.76320	7.67786	17.55788
log Superficie del terreno **	22,346	4.80027	2.07562	-2.40795	11.92083
log Superficie construida **	22,346	4.34988	0.62870	0.00000	11.46766
log Superficie accesoria**	22,346	0.57750	1.15306	-1.77196	7.10661
log Año de construcción**	22,346	7.59405	0.20339	0.00000	7.60490
Céntrica**	22,346	0.35496	0.47851	0.00000	1.00000
Periférica**	22,346	0.14267	0.34974	0.00000	1.00000
Intermedia**	22,346	0.49535	0.49999	0.00000	1.00000
En Expansión**	22,346	0.00170	0.04120	0.00000	1.00000
log NUE*	791	6.20161	1.16932	0.00000	8.81981
log Población *	791	9.40935	0.85441	4.87520	11.73432
PEA *	791	0.49002	0.04276	0.36928	0.64164
Nivel promedio de estudios *	791	11.99889	1.53405	7.72000	14.90500
Acceso a servicios de salud *	791	0.68070	0.05650	0.42014	0.82443
log Hogares totales *	791	8.21410	0.86505	3.87120	10.29350
Habitantes promedio por hogar *	791	3.20451	0.46428	2.13817	4.79200
Dos dormitorios o más *	791	0.58959	0.08250	0.24437	0.86066
Viviendas habitadas *	791	0.86021	0.05431	0.35355	0.98313
Viviendas con acceso a agua *	791	0.81563	0.06469	0.34922	0.97821
Viviendas con acceso a drenaje *	791	0.81816	0.06445	0.35009	0.97821
Viviendas con acceso a electricidad *	791	0.82296	0.06384	0.35269	0.97764
Metro***	791	0.80918	0.39295	0.00000	1.00000
Metrobús***	791	0.02099	0.14335	0.00000	1.00000
Riesgo sísmico***	791	0.75186	0.43194	0.00000	1.00000

Fuente: \* INEGI (2010) \*\* SHF (2020) y \*\*\* PAOT (2010)

hasta que se encuentra la combinación deseada de características (Kong y col., 2007).

Cropper y col. (1988) encuentran que cuando algunas variables no se observan o son reemplazadas por variables proxy, formas funcionales cuadráticas produjeron estimaciones sesgadas de los precios marginales. En cambio, las formas más simples, semilogarítmico, doble logarítmico y lineal funcionaron mejor. Por lo anterior se optara en este trabajo por estimar en una primera especificación una forma semilogarítmica, esta forma se decidió en función de el uso de proxys a variables del hogar al utilizar variables del código postal para construir las características de los habitantes de una vivienda en específico.

En estos trabajos el tipo de especificaciones más comunes son lineales, logarítmicos o semilogarítmicos estimados por el método de MCO, efectos fijos para cada ubicación geográfica

(Gonzalez y col., 2013) y efectos fijos con datos panel por años y ubicación geográfica (Chakraborti y col., 2019).

El uso de variables control para los vecindarios son diversas, por ejemplo: Donovan y Butry (2009) consideran variables por código postal donde se busca capturar los efectos individuales de cada vecindario, la distancia a medios de transporte o avenidas son usuales en los modelos de valoración hedónica (Donovan & Butry, 2009; Sander y col., 2010; Saphores & Li, 2012).

Inicialmente se estima un modelo de referencia con las variables de interés, el logaritmo del precio de las propiedades sobre el porcentaje de cobertura arbórea por código postal, la finalidad de esta primera regresión es verificar que existe una relación entre estas variables, después se estima un segundo modelo por mínimos cuadrados ordinarios controlando por las variables estructurales de la propiedad y del vecindario. a través de una regresión semi-logarítmica para los valores de las propiedades agrupados por código postal con valores del año 2008:

$$\ln p_{i,z} = \alpha + \beta_1 VE_{i,z} + \gamma_1 VS_z + \eta_1 PCA_z + \eta_2 VA_z + \epsilon_{i,z} \quad (3.5)$$

donde  $\alpha$  es el término constante,  $p_{i,z}$ , es decir la variable dependiente, es el logaritmo natural del precio de la propiedad  $i$  en el código postal  $z$ ,  $VE_{i,z}$  son las características de la propiedad  $i$  que se encuentran en el código postal  $z$ ;  $VS_z$  es una matriz de las variables de condición social por AGEB con datos del Censo de población y vivienda 2010;  $PCA_z$  es el porcentaje de cobertura arbórea por código postal (se utiliza indistintamente Porcentaje de cobertura de árboles y Porcentaje de cobertura arbórea),  $VA_z$  es una matriz de variables del vecindario para factores presentes en el Censo de población y vivienda y el Sistema de información geográfica de la ciudad, en esta se incluyen la presencia de rutas de Trolebús y RTP y otra variable en la que se incluyen las estaciones de metro y metrobús del código postal.

Se estima un segundo modelo, que es una extensión del modelo presentado anteriormente

(Ver ecuación 3.5) agregando efectos fijos a cada uno de los 791 códigos postales considerados en el modelo. Esto debido a que si bien los efectos específicos del grupo (errores estandar robustos) controlarán parte de la correlación del error dentro del grupo, en general no controlarán completamente la correlación del error dentro del grupo. También este tipo de desarrollos ayudan a coadyuvar los problemas de heterocedasticidad (Cameron & Miller, 2015). De esta forma la especificación a estimar para el segundo modelo (MCO 2) es la siguiente:

$$\ln p_{i,z} = \alpha + \beta_1 VE_{i,z} + \gamma_1 VS_z + \eta_1 PCA_z + \eta_2 VA_z + \theta_z d_z + \epsilon_{i,z} \quad (3.6)$$

donde  $d_z$  representa la heterogeneidad no observada e invariante entre un CP y otro que no se explican o no se controlan en el modelo. En este caso en específico es el efecto que tiene los precios y características de un CP sobre el precio final de las propiedades y que no son considerados en el resto de las variables control.

Este segundo modelo, supone la pérdida de  $(Z - 1) = 790$  grados de libertad, sin embargo, permite controlar por los errores intra grupos, es decir los errores propios de cada CP, con esto se tiene una ganancia en la robustez de los valores estimados (Cameron & Miller, 2015). No obstante, al tener datos desagregados a nivel alcaldía es posible estimar una matriz de varianza robusta por conglomerados en donde los grupos son las alcaldías y así obtener resultados que controlen por grupos y sean robustos ante problemas de heterocedasticidad (Cameron & Miller, 2015), además al agregar tales variables dicotómicas por CP puede mitigar el sesgo de variables omitidas y mejorar la precisión de las estimaciones, pero aumenta la varianza al depender de una menor variación dentro del vecindario en el servicio de interés (Bishop y col., 2020).

El precio implícito de cualquier especificación es  $\frac{\partial p(\cdot)}{\partial L_i}$ . Es decir que el precio implícito para la forma funcional presentada en 3.5 es  $\eta p_i$ , lo que implica que es la proporción constante del

precio que la gente está dispuesta a pagar por  $L_z$  adicional, es decir por un mayor porcentaje de árboles (Phaneuf & Requate, 2019), para el análisis de bienestar deseamos obtener la disposición marginal a pagar de las personas, así para esta forma funcional en específico el precio implícito es igual a la DMP (Taylor, 2003).

### **3.3.2. Regresión espacial**

Suele existir problemas en precios hedónicos que tiene que ver con la dependencia espacial esta dependencia proviene principalmente de los errores espaciales y los rezagos espaciales (Mueller & Loomis, 2008), el uso de estas herramientas también tiende a disminuir el sesgo de variables omitidas, un sesgo común en las valoraciones hedónicas (Mueller & Loomis, 2008; Won Kim y col., 2003). Hay varias opciones disponibles para estimar modelos espaciales, pero la estimación de máxima verosimilitud (ML) sigue siendo la técnica más comúnmente aplicada en economía para la estimación espacial. Los modelos espaciales autorregresivos (SAR) incluyen ambas fuentes y se estiman a través del método de ML (Mueller & Loomis, 2008).

La prueba de dependencia espacial y la estimación de modelos corregidos espacialmente requieren el uso de una matriz de ponderaciones espaciales. La matriz de ponderaciones modela a las observaciones próximas y su relación dentro de las observaciones de las variables dependientes. Los pesos se pueden basar en contigüidad o en distancia. La matriz de ponderaciones  $W$  captura similitudes entre casas en un vecindario o área geográfica determinada que se ignorarían usando la estimación por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) además que se utiliza para la prueba de dependencia espacial y la estimación de modelos corregidos espacialmente (Mueller & Loomis, 2008; Pandit y col., 2013; Won Kim y col., 2003).

La selección de la matriz de ponderaciones, comúnmente depende del investigador, pero se debe considerar que la opción elegida tendrá efectos en los resultados, Mueller y Loomis (2008) desarrolla las formas más utilizadas en las valoraciones por precios hedónicos, estas

son  $k - vecinos$  y la inversa de la distancia. La forma del modelo SAR, se determina por los resultados de la prueba del multiplicador de Lagrange.

Como se mencionó anteriormente, debido a la la distribución de las propiedades y las condiciones geográficas suele existir una relación entre las variables estructurales y ambientales de las viviendas y las características de las propiedades vecinas; si bien el uso de variables dicotómicas para estimar las preferencias por vivir en un lugar u otro ayudan a obtener resultados más robustos aún pueden existir diferencias no observadas que un modelo que estima la relación entre las propiedades y sus vecinos evidenciarían. Sin embargo, al tener datos de la ubicación geográfica únicamente por CP se utilizan los promedios a este nivel en las variables estructurales de las viviendas teniendo una generalización mayor al hallar solo la correlación entre polígonos que son los CP.

Para esto es necesario estimar una matriz de ponderaciones espaciales  $W$  que sirve para la prueba de dependencia espacial y la estimación de modelos corregidos espacialmente (Mueller & Loomis, 2008). La matriz que se construye es una matriz de los  $k$  vecinos más cercanos a cada observación dada. El beneficio de estas matrices de ponderación de los vecinos más cercanos es que eliminan la posibilidad de islas y observaciones que no tienen vecino (Mueller & Loomis, 2008).

Para asegurarnos de que las estimaciones sean robustas a la elección de la matriz de ponderación, se usan dos matrices de ponderaciones espaciales diferentes para las estimaciones: cuatro vecinos más cercanos ( $k = 4$ ), ocho vecinos más cercanos ( $k = 8$ ) que tienen la forma estándar:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & w_{ij} & \cdots & w_{ij} \\ w_{ij} & 0 & \cdots & w_{ij} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{ij} & w_{ij} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

donde  $w_{ij}$  es igual a cero si  $i$  y  $j$  no son vecinos y diferente de 0 si  $i$  y  $j$  son vecinos. Cada matriz de ponderaciones se estandariza por filas, por lo que los elementos de cada fila suman

uno. Esto facilita la interpretación de los pesos espaciales como el promedio de valores vecinos. Los vecinos más cercanos para cada observación son aquellos identificando con la distancia euclidiana más pequeña (Mueller & Loomis, 2008). La matriz de ponderaciones de los cuatro vecinos más cercanos ( $k = 4$ ) tiene cuatro elementos distintos de cero en cada fila para los cuatro vecinos más cercanos de cada observación.

En el caso de una matriz con la ponderación de los ocho vecinos más cercanos ( $k = 8$ ) tiene ocho elementos distintos de cero en cada fila para los ocho vecinos más cercanos para cada observación. Por lo tanto, en la matriz de ponderaciones  $k = 4$ ,  $w_{ij} = \frac{1}{4}$  en los cuatro vecinos más cercanos de una casa dada, y cero en caso contrario; mientras que para la matriz  $k = 8$ ,  $w_{ij} = \frac{1}{8}$  con los ocho vecinos más cercanos de una casa dada, y cero en caso contrario (Mueller & Loomis, 2008).

De acuerdo con el procedimiento estándar, se estima la I de Moran para medir el nivel de autocorrelación espacial, luego se utiliza las pruebas de multiplicador de Lagrange (ML) para evaluar las formas particulares de autocorrelación espacial presentes (es decir, en el término de error, término de rezago o ambos) para identificar qué forma o formas eran fuentes significativas de autocorrelación espacial (Mueller & Loomis, 2008; Sander y col., 2010). Las pruebas ML prueban la hipótesis nula de ausencia de rezago espacial o dependencia del error espacial, mientras que las pruebas de multiplicador de lagrange robusto (MLR) se confirma la presencia de la correlación espacial entre las observaciones (Mueller & Loomis, 2008).

La autocorrelación espacial esta presente tanto en términos del error como en los rezagos espaciales, para esto se estima un modelo que combina ambas fuentes de dependencia se construye de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
p_z &= \rho W p_z + \beta X_z + \epsilon_z \\
\epsilon_z &= \lambda W \epsilon_z + \mu_z
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

donde  $\rho$  es el operador de rezago espacial,  $\lambda$  es un coeficiente de los errores correlacionados espacialmente,  $\beta$  es un vector de tamaño  $n$  de los coeficientes estimados,  $X_z$  es una matriz de  $N \times N$  que incluye el promedio de las variables estructurales de las viviendas, las características ambientales y del vecindario en el  $z$  - *esimo* CP,  $W$  es una matriz  $N \times N$  y por último  $\epsilon_i \sim N(0, \sigma)$ .

El impacto total de un cambio en el porcentaje de cobertura de árboles es  $[\frac{1}{1-\rho}]$  multiplicador espacial que es si se indujera un cambio de unidad en cada ubicación (Won Kim y col., 2003). Con esto se puede obtener los efectos inducidos del cambio de las características del CP con sus  $k$  vecinos, ya que los precios promedio de los otros códigos postales son una variable explicativa del  $z$  - *esimo* CP. Con el modelo de precios hedónicos por MCO no se captura esos efectos inducidos (Won Kim y col., 2003).

La disposición marginal a pagar en el modelo espacial resulta de la derivada de la ecuación 3.8:

$$DAP = \beta_{PCA} [I - \rho W] \sum_{z=1}^n \frac{P_z}{n}
\tag{3.9}$$

donde  $I$  es la matriz identidad,  $\beta_{PCA}$  es el valor del estimador para el PCA (para el desarrollo de este resultado ver Won Kim y col. (2003)).

## 4. Resultados y discusión

El *Cuadro 4.1* presenta los resultados de los precios de las propiedades agrupados por código postal con regresión sobre el nivel de porcentaje de cobertura arbórea (PCA) en ese mismo CP, el regresor es estadísticamente significativo, dado un estadístico  $F$  general de 34.41 con un  $p$ -valor de 0,000. Al mismo tiempo, gran parte de la variación no se explica con  $R^2 = 0.1243$  pero existe un grado de relación entre el valor de las viviendas y el porcentaje de cobertura arbórea que es lo que se busca encontrar con esta primera regresión.

Cuadro 4.1: *Coefficientes estimados del modelo semi-log*

Variable dependiente log de precios. ( $R^2 = 0.1243$  y  $N = 22,346$ )

Variable	Coefficientes	Errores estándar robustos *	p-valor	Efectos marginales **
PCA	3.65919	0.62376	0.000	\$ 42,847.93
Constante	13.2706	0.06303	0.000	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** \*Errores estándar robustos agrupados a nivel de código postal, \*\* Valores marginales evaluados con la media de la variable dependiente con la derivada que es  $\eta p_i$

En el *Cuadro 4.2* se observan los resultados de los precios de las propiedades agrupados por código postal con regresión sobre el nivel de cobertura arbórea, y los controles de las características socioeconómicas, acceso a una estación de metro o metrobús y el riesgo sísmico (MCO 1). El modelo en general resulta estadísticamente significativo, con una  $F$  de 332.53 y un  $p$ -value  $< 0.000$  significativo a un nivel de confianza del 5%, con un  $R^2 = 0.7851$  gran parte del valor de las viviendas se explica por las variables consideradas en el modelo, principalmente el contexto. Una segunda regresión en el *Cuadro 4.2* considera los efectos propios de

cada código postal, para esto se genero una variable dicotómica para cada CP tomando como base el código 01000 por lo tanto se incluye el valor de este en la ordenada al origen, MCO 2 resulta estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 5 %, con un  $R^2 = 0.8270$  y  $F = 128.90$

Cuadro 4.2: *Coefficientes estimados del modelo semi-log*

Variable	MCO 1			MCO 2		
	Coefficientes		Efectos marginales	Coefficientes		Efectos marginales
PCA	0.74787***	(0.14413)	\$ 8,757.31	5.29276***	(1.07724)	\$ 61,976.41
Céntrica	0.25574***	(0.02941)	\$ 299,467.32	0.15762***	(0.03402)	\$ 184,573.09
En expansión	0.15219*	(0.08839)	\$ 178,214.50	0.01888	(0.11799)	\$ 22,106.03
Periférica	0.24769***	(0.03152)	\$ 290,031.43	0.12230***	(0.03115)	\$ 143,207.86
Intermedia	0.24725***	(0.02845)	\$ 289,522.18	0.14868***	(0.02895)	\$ 174,104.88
log Superficie de terreno	0.00637*	(0.00363)	\$ 4.45	0.00975***	(0.00262)	\$ 6.81
log Superficie construida	0.86548***	(0.03665)	\$ 8,823.46	0.80941***	(0.06214)	\$ 8,251.90
log Superficie accesoria	0.03902***	(0.00636)	\$ 10,312.56	0.03217***	(0.00600)	\$ 8,501.48
Antigüedad	-0.55906***	(0.07077)	-\$ 328.01	-0.52650***	(0.08391)	-\$ 308.91
log NUE	0.03996***	(0.01414)	\$ 54.28	0.75691***	(0.14000)	\$ 1,028.20
Riesgo por sismo	-0.06931***	(0.02466)	-\$ 81,155.74	-0.63083***	(0.11321)	-\$ 738,677.72
log Población	2.24477***	(0.53411)	\$ 154.65	109.2877***	(12.86244)	\$ 7,529.25
PEA	2.87826***	(0.44201)	\$ 33,703.46	53.35455***	(4.69430)	\$ 624,764.17
Nivel promedio de estudios	0.12088***	(0.01822)	\$ 141,549.54	-0.68035***	(0.20681)	-\$ 796,664.82
Acceso a servicios de salud	0.15492	(0.23303)	\$ 1,814.05	-0.98883***	(0.07223)	-\$ 11,578.91
log Hogares totales	-2.29489***	(0.53452)	-\$ 522.14	-108.871***	(12.79379)	-\$ 24,770.59
Ocupantes promedio por hogar	-0.41926***	(0.15431)	-\$ 490,941.97	-22.7913***	(2.82800)	-\$26,687,836.77
Dos dormitorios o más	-1.02097***	(0.16133)	-\$ 11,955.22	1.47837***	(0.23425)	\$ 17,311.18
Viviendas habitadas	-0.12678***	(0.78551)	-\$ 1,484.57	-192.615***	(31.96767)	-\$ 2,255,462.77
Viviendas con acceso a agua	-0.80497	(0.56380)	-\$ 9,425.96	40.3147***	(7.19820)	\$ 472,071.83
Viviendas con acceso a drenaje	1.44465	(1.17522)	\$ 16,916.40	-137.782***	(25.42926)	-\$ 1,613,375.90
Viviendas con acceso a electricidad	0.14891	(1.10752)	\$ 1,743.72	270.2098***	(45.16101)	\$ 3,164,067.59
Metro	-0.05923**	(0.02816)	-\$ 69,352.39	0.32278***	(0.07187)	\$ 377,963.91
Metrobús	0.40632***	(0.05053)	\$ 475,782.51	0.30876***	(0.04195)	\$ 361,546.37
Constante	9.76268***	(0.82879)		-50.8531***	(2.92093)	
$R^2$	0.7851			0.8270		
$N$	22,346			22,346		

Fuente: Elaboración propia.

Nota:\*\*\* significativo al 1 %, \*\* significativo al 5 %, \* significativo al 10 %. MCO 1: Errores estándar robustos agrupados a nivel de código postal, MCO 2: Efectos fijos con errores estándar robustos agrupados a nivel de Alcaldía.

Además en el Cuadro 4.2 para el primer modelo se observa el coeficiente para el porcentaje de cobertura de árboles que puede interpretarse como un aumento en el porcentaje de cobertura de árboles en 1 % por código postal conduce a un aumento de entre 0.748 % para el primer

modelo (MCO 1) y 5.292 % del valor de las propiedades en MCO 2. Se estima el precio marginal, con el valor promedio de las propiedades que es de \$1, 170, 967.00 en la Ciudad de México, que tal como se mencionó anteriormente para la especificación que se utilizó en la regresión, este es igual a la Disposición marginal a pagar (DMP) por un mayor porcentaje cobertura de árboles. En términos monetarios la disposición marginal a pagar esta entre \$8, 757.31 y \$61, 976.41 pesos por vivienda, este se estimó al tomar la derivada de la especificación que es igual a  $\eta\bar{p}$ .

En el modelo con variables dicotómicas para cada CP se omiten 16 de estos debido a colinealidad, por lo tanto estos están incluidos en el intercepto, así como el código postal 01000 que es el valor base. Además 696 CP resultaron significativos con un nivel de confianza del 1 % mientras que para los niveles de confianza 5 % y 10 % resultaron estadísticamente significativos 19 y 14 códigos postales respectivamente. Mientras que los 46 CP restantes resultaron no significativos.

En conjunto, cuando se compara los coeficientes de PCA y las variable control se observa que al utilizar efectos fijos por CP (MCO 2) y comparando con el modelo MCO 1 (que utiliza solo las variables control que se muestran) aquellos resultados que mantuvieron la misma dirección con el logaritmo del precio de las viviendas incrementaron en magnitud, mientras que otras variables que también tuvieron un gran cambio en magnitud invirtieron la relación existente en el modelo MCO1 que no considera los efectos fijos por CP. Resulta evidente la diferencia entre el resultado de la variable de interés PCA en el modelo MCO 2 y el MCO 1, esta diferencia podría deberse a los efectos omitidos que tienen los árboles sobre el precio de las viviendas y que no se incluyen en el grupo de variables control.

Para el modelo espacial, la prueba de I de Moran con la matriz  $k = 4$  es igual a 0.43067 significativa con un nivel de confianza del 5 %. mientras que para los 8 vecinos más cercanos  $k = 8$  este valor es igual a 0.40819 que resulta estadísticamente significativo, y por lo tanto existe dependencia espacial entre las observaciones.

Cuadro 4.3: Prueba de dependencia espacial en el modelo MCO

Estadístico de prueba	k=4	k=8
<i>Autocorrelación espacial en el término de error</i>		
ML	352.1563***	613.35872***
MLR	4.9262*	0.49786
<i>Autocorrelación espacial en el término de rezagos</i>		
ML	462.2707***	759.63581***
MLR	115.0407***	146.77495***
<i>Error espacial y dependencia de los rezagos (SARMA)</i>		
LM	467.1970***	760.13367***

Fuente: Elaboración propia.

Nota: \*\*\* Significativo al 1 %, \* significativo al 10 %

Como las pruebas (ver Cuadro 4.3) indicaron que la autocorrelación espacial esta presente tanto en términos del error como en los rezagos espaciales, mientras que MLR muestra que la correlación presente en los residuos se explica mejor asumiendo la autocorrelación espacial en el término del sesgo, es decir, la autocorrelación espacial causada por una relación entre propiedades cercanas, que asumiendo dependencia espacial debido al error, también se observa que se puede asumir la autocorrelación en los términos del sesgo y el error.

Los resultados de la regresión espacial (Ver cuadro 4.4), se observa que el valor estimado de  $\lambda$  (error espacial) en ambos modelos es significativo así como el sesgo espacial. Utilizando el multiplicador espacial se observa que hay un impacto en el precio de las propiedades de un 7.91 % para el modelo con  $k = 4$  y de 8.37 % para el segundo modelo.

El modelo espacial utilizando los mismos controles que el modelo por MCO se presenta en el Cuadro 4.5. Los parámetros estimados del modelo para 8 vecinos resultan significativos con un  $R^2 = 0.8174$ , el efecto marginal del PCA sobre el precio de las viviendas del 1.07 % esto para un aumento del 1 % en el área que ocupan los árboles por CP. Sin embargo, en el primer modelo con  $k=4$  el parámetro de la dependencia debido al error es no significativa con un  $p - valor = 0.351$ , pero el valor estimado de  $\rho$  es estadísticamente significativo, se observa

Cuadro 4.4: *Coefficientes estimados del modelo semi-log espacial*

Variable dependiente log de precios.

Variable	<u>k=4</u>		<u>k=8</u>			
	Coefficientes	Efectos marginales <sup>1</sup>	Coefficientes	Efectos marginales <sup>1</sup>		
PCA	1.03253***	(0.14310)	\$ 100,326.76	1.22840***	(0.18100)	\$ 106,058.64
Constante	1.70031***	(0.25522)		1.90710***	(0.39570)	
Error espacial	-0.72472***	(0.07005)		-0.35467***	(0.12442)	
Sesgo espacial	0.86954***	(0.01904)		0.85318***	(0.02929)	
Pseudo R <sup>2</sup>	0.5354		0.5386			
N	791		791			

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** <sup>1</sup> Valores marginales evaluados con la media de la variable dependiente. \*\*\* significativo al 1 %, \*\* significativo al 5 %, \* significativo al 10 %

que hay un impacto por el PCA del 1.01 % en el precio.

Los coeficientes estimados para ambos modelos espaciales (k=4 y k=8) son similares, siendo para el modelo con 8 vecinos mayores, para la variable que aquí interesa, se observa incluso que tiene un mayor nivel de significancia cuando se considera un mayor número de vecinos.

En general, los cuatro modelos que aquí se presentan, difieren en el valor implícito del porcentaje de árboles, pero tienen en común que en todos es positivo y estadísticamente significativo. Se observa que el resultado de ambos modelos espaciales se encuentra entre el rango de los modelos por mínimos cuadrados ordinarios, esto podría deberse a que mientras uno (MCO 1) ignora cualquier interacción entre los CP, el segundo modelo (MCO 2) considera las preferencias que existen por ciertas ubicaciones y coincide con las zonas con mayor porcentaje de arbolado.

#### 4.1. Discusión de resultados

Se encontraron evidencias que indican que las personas en la Ciudad de México valoran positivamente los árboles, este hallazgo concuerda con los resultados encontrados por Cruz Martínez (2016) y Martínez-Cruz y Sainz-Santamaría (2017) quienes también encuentran que las

Cuadro 4.5: *Coefficientes estimados del modelo semi-log espacial*

Variable dependiente log de precios.

Variable	k=4		k=8			
	Coefficientes	Efectos marginales <sup>1</sup>	Coefficientes	Efectos marginales <sup>1</sup>		
PCA	0.61853***	(0.13793)	\$ 12,816.61	0.60141***	(0.14044)	\$ 13,566.74
log Superficie de terreno	-0.00402	(0.00798)	-\$ 7.57	-0.00868	(0.00797)	-\$ 17.78
log Superficie construida	0.46899***	(0.02273)	\$ 6,288.74	0.48785***	(0.02195)	\$ 7,121.68
log Superficie accesoria	0.10682***	(0.01088)	\$ 46,824.62	0.10204***	(0.01076)	\$ 48,695.17
log NUE	0.00095	(0.01106)	\$ 4.47	0.00063	(0.01108)	\$ 3.22
Riesgo por sismo	-0.02457	(0.02515)	-\$ 50,919.15	-0.00215	(0.02738)	-\$ 4,860.90
log Población	2.18629***	(0.70109)	\$ 446.46	1.96445***	(0.72114)	\$ 436.72
PEA	1.33459***	(0.48083)	\$ 27,653.94	1.23141**	(0.50019)	\$ 27,778.17
Nivel promedio de estudios	0.13134***	(0.01853)	\$ 272,149.73	0.13367***	(0.01893)	\$ 301,542.80
Acceso a servicios de salud	0.43619**	(0.19032)	\$ 9,038.24	0.30455	(0.20449)	\$ 6,870.03
log Hogares totales	-2.18527***	(0.69934)	-\$ 1,626.47	-1.96166***	(0.71944)	-\$ 1,589.48
Ocupantes promedio por hogar	-0.33274*	(0.19435)	-\$ 689,462.73	-0.25595	(0.19998)	-\$ 577,369.34
Dos dormitorios o más	-0.83456***	(0.19333)	-\$ 17,292.93	-0.86296***	(0.19840)	-\$ 19,466.75
Viviendas habitadas	-1.21137	(0.84437)	-\$ 25,100.71	-1.13390	(0.87689)	-\$ 25,578.62
Viviendas con acceso a agua	-0.15960	(0.61769)	-\$ 3,306.98	-0.40329	(0.61321)	-\$ 9,097.51
Viviendas con acceso a drenaje	-0.10868	(1.58532)	-\$ 2,251.98	0.34314	(1.57730)	\$ 7,740.57
Viviendas con acceso a electricidad	1.65381	(1.66193)	\$ 34,268.53	1.32853	(1.67622)	\$ 29,968.96
Metro	-0.05760***	(0.02475)	-\$ 119,353.87	-0.03820	(0.02712)	-\$ 86,175.87
Metrobús	0.15329	(0.09687)	\$ 317,639.73	0.15610	(0.09634)	\$ 352,128.46
Constante	2.53139***	(0.64053)		1.92463***	(0.67652)	
Error espacial	-0.24142***	(0.07372)		-0.08840	(0.09578)	
Sesgo espacial	0.38824***	(0.03505)		0.43806***	(0.03676)	
Pseudo R <sup>2</sup>	0.80844		0.81744			
N	791		791			

Fuente: Elaboración propia.

Nota: <sup>1</sup> Valores marginales evaluados con la media de la variable dependiente. \*\*\* significativo al 1 %, \*\* significativo al 5 %, \* significativo al 10 %

personas ven positivamente la vegetación urbana arbórea para la Ciudad. Las evidencias que se encuentran en el presente trabajo es que hay un impacto implícito en el precio de las viviendas que va del 0.748 % al 5.292 % ante un incremento del 1 % en el PCA para los modelos con efectos fijos por CP y semi-log. Mientras que los modelos espaciales muestran que el precio implícito de esta amenidad ambiental es de entre un 1.01 % y 1.07 %.

Esto en comparación con otras amenidades para las que se ha estimado la DMP en la Ciudad de México, se encuentra que Gonzalez y col. (2013) muestra que las viviendas varían su precio entre un -6 % y -7 % ante un aumento en los niveles de PM10, esto es que la DMP por una mayor calidad del aire está entre, mientras que Chakraborti y col. (2019) encuentra evidencias que la

DMP por una mayor calidad del aire es en promedio por cada uno de los gases contaminantes que considera del 5.59 % del ingreso medio en la CDMX. Es decir que los beneficios que tienen los árboles es similar al beneficio de una mayor calidad del aire. Una amenidad similar para la que se estimó los precios implícitos se encuentra en Cruz Martínez (2016), quien encuentra evidencias para mostrar que las propiedades en la CDMX incrementan su valor un 0.18 % en promedio al incrementar el tamaño de las áreas verdes cercanas.

Otros estudios para distintas ciudades en Estados Unidos han encontrado que por un mayor porcentaje de cobertura arbórea las personas están dispuestas a pagar positivamente, este resultado también está en concordancia con los hallazgos de Sander y col. (2010) quien encuentra para la Ciudad de Minnesota que las personas verán un incremento en el valor de su propiedad del 0.477 % si se incrementa el porcentaje de árboles en un 10 % en un radio de 100 metros respecto de la propiedad, mientras que Donovan y Butry (2009) estiman un incremento para la ciudad de Portland, Oregon en el valor de las viviendas del 3 % con la combinación de dos variables relacionadas con los árboles que son el que las viviendas tengan un árbol enfrente y el área de cobertura de árboles en metros.

La disposición a pagar de los hogares por un mayor porcentaje de cobertura de árboles está entre \$8,757.31 y \$61,976.41 pesos mexicanos para el modelo por MCO, mientras que en el modelo de dependencia espacial la  $DMP = \$12,816.61$  pesos mexicanos para la especificación con 4 vecinos y de \$13,566.74 con 8 vecinos, en términos porcentuales la DMP estimada para las primeras especificaciones es del 0.748 % al 5.292 %, mientras que las especificaciones espaciales es del 1.095 % al 1.159 %.

Los valores estimados por modelos que consideran dependencia espacial se encuentran entre los resultados que arrojaron los modelos por MCO, se debe tomar en cuenta que para este modelo se tomaron los promedios por CP, también los resultados podrían estar subestimados al no tomar en cuenta, debido a la disponibilidad de los datos, vecinos con un alto porcentaje de cobertura

arbórea, tales como bosques y zonas de conservación que o bien no están consideradas entre las AGEBS urbanas o en los datos de Cobertura arbórea al ser zonas de conservación. Así los modelos espaciales, aunque solo se estimaron con promedios, resultaron significativos y serían suficientes para estimar la Disposición marginal a pagar.

Es importante mencionar que los valores que se estimaron de la DMP representan el valor capitalizado de los beneficios del aumento del PCA. Se debe tener en cuenta que esta es una medida marginal que no se esperaría que fuera válida para un cambio no marginal en el porcentaje de cobertura arbórea. Tal cambio no marginal probablemente cambiaría la disposición de cada individuo a pagar por un incremento en el PCA y posiblemente también provocaría un nuevo equilibrio del precio de la vivienda que tendría que calcularse antes de poder estimar los beneficios (Gonzalez y col., 2013; Won Kim y col., 2003).

Existe además concordancia con la relación esperada entre la variable dependiente y los controles que se utilizaron, que suman al análisis presente; existe una relación positiva entre el tamaño del terreno y el precio de las viviendas y lo mismo sucede con la superficie construida y la variable endógena tal como se esperaría fuera la relación del precio y estas características de la vivienda.

Los resultados del modelo MCO 2, muestran que las personas están dispuestas a pagar una mayor cantidad por vivir en CP en zonas del centro de la Ciudad, mientras que hay un impacto negativo en el precio de las propiedades que se encuentran en las orillas de la ciudad, como CP que están en las delegaciones Iztapalapa e Iztacalco.

También se observa que existe una correlación entre el nivel de vida y la cantidad de árboles, a mayor porcentaje de personas con servicios de salud, menor número de ocupantes promedio por hogar, hay un mayor porcentaje de cobertura arbórea. No se puede concluir si las personas con mejores condiciones de vida llegaron a esos lugares dado un mayor número de árboles o estas personas han demandado mejores servicios públicos lo que lleva a una mejor conservación

de los espacios.

#### 4.1.1. Pruebas de robustez

Se pretende comprobar si el impacto del porcentaje de cobertura arbórea es robusto para controlar durante el tiempo posibles variables que cambian con el tiempo y dentro de cada CP. Para ello se estiman, una ecuación semilogarítmica y otra de efectos fijos por CP, para el 10 % de los CP (79 CP) con mayor porcentaje de cobertura arbórea y también en el caso contrario con el 10 % de los CP con menor porcentaje de cobertura de árboles, esto se replica para el 20 % de los CP (158 CP), controlando por las variables que se usaron para las especificaciones anteriores.

Cuadro 4.6: *Coefficientes estimados y DMP de los CP con más y menos PCA*

Variable dependiente log de precios.

Variables	Coefficientes	Efectos marginales <sup>1</sup>	Coefficientes	Efectos marginales <sup>1</sup>
	<u>10% de los CP con mayor PCA</u>		<u>10% de los CP con mayor PCA</u>	
<i>Semi-logarítmica</i>				
PCA	0.693607***	\$ 19,951.65	-4.07683	-\$ 33,584.03
<i>Efectos fijos</i>				
PCA	-2.571698	-\$ 73,975.05	-2.43662	-\$ 20,072.37
N	1493		1149	
	<u>20% de los CP con mayor PCA</u>		<u>20% de los CP con mayor PCA</u>	
<i>Semi-logarítmica</i>				
PCA	0.40327**	\$ 7,924.19	-1.39564	-\$ 10,159.98
<i>Efectos fijos</i>				
PCA	-4.585046	-\$ 90,095.56	10.64346	\$ 77,482.29
N	5,031		2,393	

**Fuente:** Elaboración propia.

**Nota:** <sup>1</sup> Valores marginales evaluados con la media de la variable dependiente. \*\*\* significativo al 1 %, \*\* significativo al 5 %, \* significativo al 10 %

El cuadro 4.6 muestra los coeficientes estimados y la Disposición marginal a pagar para los CP donde el PCA es mayor en comparación con los 712 CP que se descartaron, se observa que se valora positivamente el porcentaje de cobertura arbórea en las zonas con mayor cobertura, mientras que en las zonas con menor área cubierta por árboles estos no son significativos,

también se debe mencionar que las propiedades que en promedio tienen un precio más alto se encuentran en las zonas con mayor porcentaje y viceversa con las zonas de menor PCA, esto refuerza la idea que las personas de mayor ingreso llegaron a las zonas con mayor número de árboles desplazando a las personas con menor nivel de ingresos. Lo mismo se observa tomando el 20 % de los CP con mayor PCA y el 20 % con menor cobertura de árboles.

Además, se busca con esto, analizar los posibles choques externo en el PCA, tales como, campañas de reforestación o plagas, del Cuadro 4.6 se puede concluir que los habitantes de la Ciudad de México valoran, mientras más árboles haya, positivamente el PCA, en el caso contrario mientras menos área cubierta por árboles en un CP no se puede concluir que las personas se beneficien del poco arbolado. Entonces los resultados que aquí se obtuvieron si muestran la relación que existe entre la disposición a pagar y el PCA para el caso donde se incremente el número de árboles, mientras que en el caso contrario no existe evidencia que la relación se mantenga en el tiempo.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se encuentra evidencia que las personas valoran positivamente los árboles en su vecindario; en específico estarán dispuestos a pagar entre \$12,071.15 pesos mexicanos que es el resultado del modelo simple MCO y \$29,153.36 en el modelo con efectos fijos por un aumento del 1 % en el porcentaje de arbolado, esto representan entre un 0.748 % y 5.292 % del valor de las viviendas. En términos del ingreso de los individuos, como porcentaje del ingreso esta entre el 4.94 % al 34.99 % del ingreso medio anual en la Ciudad de México para el año 2008. En el contexto de una de las ciudades más grandes a nivel mundial y de un país en vías de desarrollo el habitante promedio de esta metrópoli está dispuesto a pagar un precio implícito en concordancia con lo observado en otros trabajos para otras ciudades por un mayor número de árboles.

Los hacedores de políticas públicas y la comunidad en general deben considerar el beneficio monetario que también tienen los árboles para una mejor regulación en el cuidado de los árboles en la ciudad y además considerarlo para los planes de desarrollo en infraestructura de la ciudad, procurando siempre el cuidado y preservación de estos espacios a través de regulaciones que incluyan aspectos fundamentales del mantenimiento de los árboles.

Sin embargo, se debe tomar en cuenta lo que mencionan Kenney y col. (2011) si bien el establecimiento de árboles efectivo es importante, es solo parte de una estrategia para el manejo forestal urbano sostenible. La protección y el mantenimiento de los árboles existentes que forman el dosel del bosque urbano de la comunidad es fundamental. Además, no se puede subestimar la importancia de planificar y financiar adecuadamente el mantenimiento y la protección

de los árboles a lo largo de la vida de estos tal como mencionan.

Los resultados obtenidos serían más robustos si no hubiera una limitante de la temporalidad de los datos sobre cobertura de árboles, también la existencia de datos comparables para otros años hubiera permitido desarrollar un modelo a través del tiempo que ofreciera información sobre cómo han cambiado las preferencias de las personas por este tipo de variables ambientales.

Para el desarrollo de trabajos futuros se pueden agregar modelos que utilicen datos panel permitiendo observar efectos temporales y geográficos, además se pueden agregar variables adicionales que analicen otros controles como delitos cometidos por localidad y riesgos ambientales como inundaciones.

## Referencias

- ALDF. (2017). Tala de árboles aumenta contaminación en atmósfera de CDMX:PVEM. *Parlamento Abierto*. <http://aldf.gob.mx/comsoc-tala-arboles-aumenta-contaminacion-atmosfera-cdmx-pvem--33324.html>
- Belcher, R. N. & Chisholm, R. A. (2018). Tropical Vegetation and Residential Property Value: A Hedonic Pricing Analysis in Singapore. *Ecological Economics*, 149, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.03.012>
- Bishop, K. C., Kuminoff, N. V., Banzhaf, H. S., Boyle, K. J., von Gravenitz, K., Pope, J. C., Smith, V. K. & Timmins, C. D. (2020). Best Practices for Using Hedonic Property Value Models to Measure Willingness to Pay for Environmental Quality. *Review of Environmental Economics and Policy*, 14(2), 260-281. <https://doi.org/10.1093/reep/reaa001>
- Bond, M. T., Seiler, V. L. & Seiler, M. J. (2002). Residential Real Estate Prices: A Room with a View. *Journal of Real Estate Research*, 23, 129-138.
- Bravo-Bello, J. C., Martínez-Trinidad, T., Valdez-Lazalde, J. R., Romero-Sánchez, M. E. & Martínez-Trinidad, S. (2020). Analyzing Potential Tree-Planting Sites and Tree Coverage in Mexico City Using Satellite Imagery. *Forests*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/f11040423>
- Cameron, A. & Miller, D. (2015). A Practitioner's Guide to Cluster-Robust Inference. *Journal of Human Resources*, 50, 317-372. <https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317>
- Cariñanos, P., Calaza-Martínez, L., P. and O'Brien & Calfapietra, C. (2017). *The Urban Forest, Future City 7*. Springer International Publishing AG.

- Chakraborti, L., Heres, D. & Hernandez, D. (2019). Are land values related to ambient air pollution levels? Hedonic evidence from Mexico City. *Environment and Development Economics*, 24(3), 252-270. <https://doi.org/10.1017/S1355770X18000542>
- Checa-Artasu, M. M. (2016). Las áreas verdes en la Ciudad de México. Las diversas escalas de una geografía urbana. *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, (1159).
- Clark, J., Matheny, N. & Wake, V. (1997). A model of urban forest sustainability. *Journal of Arboriculture*, 23.
- Cropper, M. L., Deck, L. B. & McConnell, K. E. (1988). On the Choice of Functional Form for Hedonic Price Functions. *The Review of Economics and Statistics*, 70(4), 668-675. <http://www.jstor.org/stable/1935831>
- Cruz Martínez, C. O. (2016). *Una aproximación al valor social y ambiental de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México*.
- DOF. (2012). *Modificación a las reglas de carácter general que establecen la metodología para la valuación de inmuebles objeto de créditos garantizados a la vivienda*. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5235316%5C&fecha=24/02/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5235316%5C&fecha=24/02/2012)
- Donovan, G. & Butry, D. (2009). Trees in the city: Valuing street trees in Portland, Oregon. *Landscape and Urban Planning*, 94, 77-83. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.07.019>
- FAO. (2014). *Urban and Peri-urban Forestry*. <http://www.fao.org/forestry/urbanforestry/87029/en/>
- Flores Xolocotzi, R., González-Guillén, M. d. J. & de los Santos-Posadas, H. M. (2010). Valoración económica del servicio recreativo del parque Hundido de la Ciudad de México. *Región y sociedad*, 22, 123-144. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext%5C&pid=S1870-39252010000100006%5C&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext%5C&pid=S1870-39252010000100006%5C&nrm=iso)
- Freeman III, A. M., Herriges, J. A. & Kling, C. L. (2014). *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. RFF Press.

- Geoghegan, J., Wainger, L. A. & Bockstael, N. E. (1997). Spatial landscape indices in a hedonic framework: an ecological economics analysis using GIS. *Ecological Economics*, 23, 251-26.
- Giergiczny, M., Czajkowski, M., Żylicz, T. & Angelstam, P. (2015). Choice experiment assessment of public preferences for forest structural attributes. *Ecological Economics*, 119, 8-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.032>
- Giergiczny, M. & Kronenberg, J. (2014). From Valuation to Governance: Using Choice Experiment to Value Street Trees. *Ambio*, 43, 492-501. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0516-9>
- Gonzalez, F., Mark, L. & Mazumder, D. (2013). How much are urban residents in Mexico willing to pay for cleaner air? *Environment and Development Economics*, 18, 354-379.
- Hamilton, S. E. & Morgan, A. (2010). Integrating lidar, GIS and hedonic price modeling to measure amenity values in urban beach residential property markets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(2), 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.10.007>
- INEGI. (2008). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). 2008 Nueva construcción*. <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/tradicional/2008/>
- INEGI. (2010). *Censo de Población y vivienda 2010*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Kenney, W., Wassenaer, P. & Satel, A. (2011). Criteria and indicators for strategic urban forest planning and management. *Arboriculture and Urban Forestry*, 37, 108-117.
- Kong, F., Yin, H. & Nakagoshi, N. (2007). Using GIS and landscape metrics in the hedonic price modeling of the amenity value of urban green space: A case study in Jinan City, China. *Landscape and Urban Planning*, 79(3-4), 240-252. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.02.013>

- Koo, J.-C., Park, M. S. & Youn, Y.-C. (2013). Preferences of urban dwellers on urban forest recreational services in South Korea. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(2), 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.02.005>
- Kwak, S.-J., Yoo, S.-H. & Han, S.-Y. (2003). Estimating the Public's Value for Urban Forest in the Seoul Metropolitan Area of Korea: A Contingent Valuation Study. *Urban Studies*, 40(11), 2207-2221. <https://doi.org/10.1080/0042098032000123259>
- Lara, J., Estrada, G., Zentella, J. & Guevara, A. (2017). Los costos de la expansión Urbana: Aproximación a partir de un modelo de precios hedónicos en la zona metropolitana del valle de México. *Estudios Demograficos y Urbanos*, 32(1), 37-63.
- Livesley, S. J., McPherson, E. G. & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Environmental Quality*, 45(1), 119-124.
- Majumdar, S., Deng, J., Zhang, Y. & Pierskalla, C. (2011). Using contingent valuation to estimate the willingness of tourists to pay for urban forests: A study in Savannah, Georgia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(4), 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.07.006>
- Martínez-Cruz, A. L. & Sainz-Santamaría, J. (2017). El valor de dos espacios recreativos periurbanos en la Ciudad de México. *El Trimestre Económico*, 336, 805-846.
- Martínez-Jiménez, E. T., Pérez-Campuzano, E. & Ibarra, A. A. (2017). Hedonic pricing model for the economic valuation of conservation land in Mexico City. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 223, 101-111. <https://doi.org/10.2495/SC170091>
- Mayor, K., Lyonsa, S., David, D. & Tol, R. S. (2012). A Hedonic Analysis of the Value of Rail Transport in the Greater Dublin Area. *Journal of Transport Economics and Policy*, 46, 239-261.
- More, T. A., Stevens, T. & Allen, P. (1988). Valuation of urban parks [Special Issue: Urban Forest Ecology]. *Landscape and Urban Planning*, 15(1), 139-152. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(88\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0169-2046(88)90022-9)

- Mueller, J. M. & Loomis, J. B. (2008). Spatial Dependence in Hedonic Property Models: Do Different Corrections for Spatial Dependence Result in Economically Significant Differences in Estimated Implicit Prices? *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 33(2), 212-231. <http://www.jstor.org/stable/41220624>
- Netusil, N. R., Chattopadhyay, S. & Kovacs, K. F. (2010). Estimating the Demand for Tree Canopy: A Second-Stage Hedonic Price Analysis in Portland, Oregon. *Land Economics*, 86(2), 281-293. <https://doi.org/10.3368/le.86.2.281>
- Núñez, H., Paredes, D. & Garduno-Rivera, R. (2017). Is crime in Mexico a disamenity? Evidence from a hedonic valuation approach. *The Annals of Regional Science*, 59, 171-187. <https://doi.org/10.1007/s00168-017-0823-8>
- Pandit, R., Polyakov, M., Tapsuwan, S. & Moran, T. (2013). The effect of street trees on property value in Perth, Western Australia. *Landscape and Urban Planning*, 110, 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.11.001>
- PAOT. (2010). *Sistema de Información del Patrimonio Ambiental y Urbano*. 189.204.244.143: 8008/mapguide/sig/siginterno.php
- PAOT. (2018). *Las áreas verdes de la Ciudad de México*. [http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/libro/3PAOT\\_AreasVerdes\\_2018.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/libro/3PAOT_AreasVerdes_2018.pdf)
- Parmeter, C. & C., P. J. (2012). *Handbook on Experimental Economics and the Environment*. J.A. List; M.K. Price.
- Phaneuf, D. J. & Requate, T. (2019). *A Course in Environmental Economics: Theory, Policy, and Practice*. Cambridge University Press.
- Romo-Lozano, J. L., Lopez-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J. & Avila-Angulo, M. L. (2017). Economic valuation of the forest biodiversity in Mexico, a review. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 23, 75-90. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext%5C&pid=S2007-40182017000100075%5C&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext%5C&pid=S2007-40182017000100075%5C&nrm=iso)
- Rosen, S. (1974). Hedonic Prices and Implicit Markets: Product Differentiation in Pure Competition. *Journal of Political Economy*, 82(1), 34-55.

- Sanchez, M. (2015). El DF pierde en 15 años 56 mil árboles por obras. *SinEmbargo*. <https://www.sinembargo.mx/24-05-2015/1353514>
- Sander, H., Polasky, S. & Haight, R. G. (2010). The value of urban tree cover: A hedonic property price model in Ramsey and Dakota Counties, Minnesota, USA. *Ecological Economics*, 69(8), 1646-1656. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.03.011>
- Saphores, J.-D. & Li, W. (2012). Estimating the value of urban green areas: A hedonic pricing analysis of the single family housing market in Los Angeles, CA. *Landscape and Urban Planning*, 104(3), 373-387. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.012>
- SHF. (2020). *Estadísticas e Investigación*. <https://www.gob.mx/shf/acciones-y-programas/estadisticas-e-investigacion>
- Silvera Seamans, G. (2013). Mainstreaming the environmental benefits of street trees. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12(1), 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.08.004>
- Sobrino, J. (2014). Housing prices and submarkets in Mexico City : A Hedonic assessment. *Estudios Económicos*, 29(1), 57-84.
- Taylor, L. O. (2003). *The Hedonic Method* (P. A. Champ, K. J. Boyle & T. C. Brown, Eds.). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0826-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0826-6_10)
- Tyrväinen, L. (2001). Economic valuation of urban forest benefits in Finland. *Journal of Environmental Management*, 62(1), 75-92. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0421>
- Tyrväinen, L. & Miettinen, A. (2000). Property prices and urban forest amenities. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39(2), 205-223. <https://doi.org/10.1006/jeem.1999.1097>
- Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K. & de Vries, S. (2005). *Benefits and Uses of Urban Forests and Trees* (C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup & J. Schipperijn, Eds.). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X\\_5](https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X_5)
- Tyrväinen, L. & Väänänen, H. (1998). The economic value of urban forest amenities: An application of the contingent valuation method. *Landscape and Urban Planning*, 43(1-3), 105-118. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(98\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(98)00103-0)

Won Kim, C., Phipps, T. T. & Anselin, L. (2003). Measuring the benefits of air quality improvement: a spatial hedonic approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45(1), 24-39. [https://doi.org/10.1016/S0095-0696\(02\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0095-0696(02)00013-X)