# Estimación de precios hedónicos de arrendamiento para apartamentos administrados por la sociedad de activos especiales (SAE) en estratos socioeconómicos 4, 5 y 6 ubicados en la localidad de Usaquén, Bogotá.

Maria Camila Ruiz Rocha

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Catastral y Geodesia

Director: Jaime Vergara Hincapié

# Estimación de precios hedónicos de arrendamiento para apartamentos administrados por la sociedad de activos especiales (SAE) en estratos socioeconómicos 4, 5 y 6 ubicados en la localidad de Usaquén, Bogotá

Trabajo de grado en modalidad de Pasantía para optar por el título de:
Ingeniera Catastral y Geodesta

Maria Camila Ruiz Rocha

Director Interno

Economista Jaime Vergara Hincapié

Director Externo

Ingeniero Catastral y Geodesta y Especialista en Avalúos Diego Edinson Correa

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Catastral y Geodesia

Bogotá D.C. 2025

*Saber pensar el espacio,*

*para saber organizarse en él,*

*para saber combatir en él*

***Yves Lacoste***

***Agradecimientos***

El llamado efecto mariposa nos recuerda que un pequeño movimiento puede generar transformaciones significativas en el tiempo y en el espacio, por lo que todo aprendizaje aporta a la toma de decisiones y de acciones que con llevan a futuros distintos.

De la misma manera, cada palabra, cada gesto y cada coincidencia que acompañaron este proceso tuvieron un impacto profundo en el resultado de este trabajo. Reconocerlo es también una forma de agradecer a quienes, con su presencia o su ejemplo, contribuyeron a que este camino tuviera un sentido.

Por ello agradezco a la Universidad Pública, por enseñarme tanto, por mostrarme lo que es el amor, la empatía y las ganas de querer un país mejor.

Al profesor Jaime Vergara Hincapié por su confianza, comprensión y por la pasión con la que enseña; su interés genuino en cada clase me enseñó que el compromiso y el gusto por lo que se hace puede ser cambio.

A mi director externo Diego Correa por el acompañamiento, la disposición y la paciencia.

A mis papas, que desde siempre han sido nido, calor y abrigo. Gracias por darme voz, por ser esencia y ser motivo.

A mis hermanas, por impulsarme a coger vuelo.

A Paco, mi niño, por la ternura, el amor y la paz.

A Juliana, que desde pequeña me ha enseñado a planear en el aire, a asombrarme por las cosas pequeñas y a atreverme a lo desconocido.

A Nicolas, mi muchachito, por dejarme ser pájaro, por ser luz y sombra en el proceso de volver a ser quien soy, por la confianza, los consejos y el cuidado.

A mi abuelita Rosa, que, aunque la siento lejana siempre me dio por su fuerza.

A mi tía Carmenza, gracias por el amor que se quedó pegado aquí y en las montañas.

A mis amigas de la universidad, a Vanessa, infinitas gracias por su amistad y por su bondad; a Lesly, por ser verdad, por la escucha y la sororidad; a Natalia, por dejarme volar alto, y a Lina, por recordarme siempre cómo volver a la tierra.

## Resumen

El presente trabajo se desarrolla en el marco de la pasantía realizada en la Sociedad de Activos Especiales (SAE), entidad encargada de la administración y gestión de bienes inmuebles con vocación económica y social. El objetivo principal de esta investigación es estimar el valor de la renta de los apartamentos localizados en la localidad de Usaquén (Bogotá D.C.) mediante la aplicación de un modelo de precios hedónicos, incorporando técnicas de econometría espacial para identificar la influencia de los atributos físicos y de ubicación en el valor del arriendo.

Para la construcción de la base de datos se implementaron técnicas de web scraping con el fin de recopilar información del mercado inmobiliario, la cual posteriormente fue georreferenciada y complementada con capas espaciales (shapefiles) que permitieron integrar variables de entorno urbano, accesibilidad y dotación de servicios. Inicialmente, se estimó un modelo de regresión lineal múltiple (OLS) para establecer una línea base y posteriormente se evaluaron diferentes modelos de regresión espacial, seleccionándose finalmente el modelo general de anidación espacial (GNS) por su mejor ajuste y capacidad explicativa frente a la autocorrelación espacial detectada en los residuos. Finalmente, se aplicó un modelo geográficamente ponderado (GWR) con el propósito de identificar la variabilidad espacial de los coeficientes locales y comprender la heterogeneidad espacial del mercado de arriendo en la zona de estudio.


***Palabras clave:*** Modelos de precios hedónicos; econometría espacial; autocorrelación espacial; heterogeneidad espacial; modelo GNS; modelo GWR; renta inmobiliaria.

## Abstract

This study was conducted as part of an internship at the Special Assets Society (SAE), an entity responsible for the administration and management of real estate with economic and social purposes. The main objective of this research is to estimate the rental value of apartments located in the Usaquén neighborhood (Bogotá D.C.) by applying a hedonic pricing model, incorporating spatial econometric techniques to identify the influence of physical and location attributes on rental value.

To build the database, web scraping techniques were implemented to collect information on the real estate market, which was then georeferenced and supplemented with spatial layers (shapefiles) that allowed for the integration of variables related to the urban environment, accessibility, and service provision. Initially, a multiple linear regression model (OLS) was estimated to establish a baseline, and then different spatial regression models (SAR, SEM, SDM, SARAR, and GNS) were evaluated, finally selecting the general spatial nesting model (GNS) for its better fit and explanatory power in the face of the spatial autocorrelation detected in the residuals. Finally, a geographically weighted regression (GWR) model was applied to identify the spatial variability of local coefficients and understand the spatial heterogeneity of the rental market in the study area.


***Keywords:*** Hedonic pricing models; spatial econometrics; spatial autocorrelation; spatial heterogeneity; GNS model; GWR model; real estate rental.

**Tabla de contenido**

Introducción ..... 15

Planteamiento del problema ..... 16

Justificación ..... 18

Objetivos ..... 21

Objetivo General ..... 21

Objetivos Específicos ..... 21

Estado del arte ..... 21

Marco legal ..... 25

Sociedad de Activos Especiales (SAE) S.A.S. ..... 28

Marco de referencia ..... 40

Modelo de precios hedónicos ..... 40

Estadística y Econometría Espacial ..... 41

Econometría Espacial ..... 42

Autocorrelación Espacial ..... 43

Heterogeneidad Espacial ..... 43

Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) ..... 44

Matriz de Pesos Espaciales ..... 44

Contrastes de Autocorrelación Espacial ..... 44

Modelos de Regresión Lineal ..... 48

Modelos de Regresión Espacial ..... 49

Modelo de Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) ..... 53

Metodología ..... 53

Zona de estudio ..... 57

Materiales ..... 58

Estimación de Radio de Accesibilidad por Categorías ..... 61

Descripción de las variables ..... 64

Softwares utilizados ..... 66

Análisis ..... 66

Analisis exploratorio clásico ..... 67

Análisis exploratorio de datos espaciales ..... 72

Selección de Matriz de Pesos Espaciales ..... 74

Análisis Exploratorio Global ..... 75

Resultados ..... 78

Modelo Regresivo Clásico ..... 78

Modelo Regresivo Espacial ..... 83

Multiplicadores de Lagrange ..... 85

Selección del modelo espacial ..... 85

Impactos ..... 90

Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) ..... 93

Comparación y Validación del Modelo Frente a los Valores de Arriendo Estimados por la SAE ..... 100

Comparación ..... 102

Recomendaciones ..... 105

Conclusiones ..... 106

Referencias Bibliográficas ..... 108

## Tabla de ilustraciones

Ilustración 1: Diagrama de flujo Metodología ..... 56

Ilustración 2: Localidad de Usaquén ..... 58

Ilustración 3: Comportamiento del arriendo en estratos 4, 5 y 6 ..... 70

Ilustración 4: Histograma del área construida en estratos 4, 5 y 6 ..... 71

Ilustración 5: Histograma de parqueaderos en estratos 4, 5 y 6 ..... 71

Ilustración 6: Arriendo por cuantiles Usaquén ..... 73

Ilustración 7: Histograma, Boxplot y Q-Q plot del Arriendo ..... 74

Ilustración 8: R2 Local ..... 96

Ilustración 9: Coeficiente estimado de la variable área ..... 97

Ilustración 10: Coeficiente estimado de la variable antigüedad ..... 97

Ilustración 11: Coeficiente estimado de la variable habitación ..... 98

Ilustración 12: Coeficiente estimado de la variable parqueadero ..... 98

Ilustración 13: Coeficiente estimado de la variable movilidad ..... 99

Ilustración 14: Coeficiente estimado de la variable dotación pública ..... 99

## Lista de tablas

Tabla 1 : Variables de la base de datos suministrada por la SAE. ..... 59

Tabla 2: Capas espaciales ..... 60

Tabla 3: Agrupación de capas por categoría ..... 61

Tabla 4: Análisis de correlaciones estrato 4 ..... 68

Tabla 5: Análisis de correlaciones estrato 5 ..... 69

Tabla 6: Análisis de correlaciones estrato 6 ..... 70

Tabla 7: Parámetros de selección matriz W ..... 74

Tabla 8: I de Moran ..... 76

Tabla 9: C de Geary ..... 77

Tabla 10: G de Getis y Ord ..... 78

Tabla 11: Join-Counts ..... 78

Tabla 12: Estimadores del Modelo Regresivo Clásico ..... 80

Tabla 13: Supuestos del Modelo Regresivo Clásico ..... 80

Tabla 14: Factor de Inflación de la Varianza del Modelo regresivo clásico ..... 81

Tabla 15: Estimadores del Modelo Robusto ..... 82

Tabla 16: Supuestos del Modelo Robusto ..... 82

Tabla 17: Multiplicadores de Lagrange ..... 85

Tabla 18: Resultados AIC de modelos espaciales ..... 87

Tabla 19: Parámetros estimados del Modelo Espacial GNS ..... 89

Tabla 20: Impactos.....91

Tabla 21: Estimación de parámetros Regresión Geográficamente Ponderada .....95

Tabla 22: Métricas de desempeño por Estrato y Barrio.....102

Tabla 23: Comparación de arriendo GNS vs SAE por estrato y barrio .....103

Tabla 24: Métricas de desempeño por m2 y 70m .....104

Tabla 25: Comparación de arriendo GNS vs SAE, Segmentos equivalentes a 70 m2 .....104

Tabla 26: Comparación de arriendo GNS vs SAE, Segmentos equivalentes COP/ m2 .....105

## Índice de abreviaturas

AIC Criterio de Información de Akaike

AEDE Análisis Exploratorio de Datos Espaciales

BIC Criterio de Información Bayesiano

BID Banco Interamericano de Desarrollo

CAI Centro de Atención Inmediata

CV Validación cruzada

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística

DAPD Departamento Administrativo de Planeación Distrital

DNP Departamento Nacional de Planeación

ESRI Environmental Systems Research Institute (empresa desarrolladora del software ArcGIS)

FRISCO Fondo para la Rehabilitación, Inversión Social y Lucha contra el Crimen Organizado

GNS Modelo Espacial de Anidación General

GWR Regresión Geográficamente Ponderada

IDECA Infraestructura de datos espaciales de Bogota

IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IPS Institución Prestadora de Servicios de Salud

KNN K-Nearest Neighbors (K Vecinos Más Cercanos)

LISA Indicadores Locales de Asociación Espacial

LM Multiplicador de Lagrange

MAE Error Medio Absoluto

MAPE Error Porcentual Medio Absoluto

MCO / OLS Mínimos Cuadrados Ordinarios

ML Máxima Verosimilitud

NPH No Propiedad Horizontal

POS Plan Obligatorio de Salud

RMSE Raíz del Error Cuadrático Medio

ROM Requerimientos de Mantenimiento o Adecuación

SAE Sociedad de Activos Especiales

SAR Modelo Autorregresivo Espacial

SARAR Modelo Autorregresivo Espacial con Errores Autorregresivos

SDEM Modelo de Error Espacial de Durbin

SDM Modelo Espacial de Durbin

SEM Modelo de Error Espacial

SLX Modelo de Rezago Espacial de las Variables Exógenas

sMAPE Error Porcentual Medio Absoluto Simétrico

VIF Factor de Inflación de la Varianza

# Introducción

El mercado inmobiliario urbano se caracteriza por una alta complejidad derivada de la interacción entre factores estructurales del inmueble, condiciones del entorno y atributos socioeconómicos del espacio geográfico en el que se localiza. En este contexto, el modelo de precios hedónicos se consolida como una herramienta metodológica idónea para descomponer el arriendo de los bienes raíces en función de las características que los determinan, permitiendo identificar el valor implícito de cada atributo.

El presente trabajo plantea como propósito estimar el valor de la renta de los apartamentos en la localidad de Usaquén, con el fin de generar un referente metodológico que contribuya a la toma de decisiones en materia de administración y valorización de activos.

Para alcanzar este objetivo, se diseñó una base de datos a partir de información recolectada por técnicas de web scraping, la cual fue georreferenciada y cruzada con capas espaciales provenientes de fuentes cartográficas oficiales. La metodología adoptada siguió un proceso escalonado: en primer lugar, se estimó un modelo de regresión lineal (OLS) para identificar las variables más relevantes y verificar los supuestos clásicos; posteriormente, se implementaron modelos de econometría espacial (SAR, SEM, SDM, SARAR y GNS) con el fin de capturar la dependencia espacial y mejorar el ajuste global del modelo; y finalmente, se aplicó un modelo geográficamente ponderado (GWR) para analizar la variación local de los coeficientes y detectar la heterogeneidad espacial presente en el mercado de arriendo.

El enfoque adoptado permite comprender cómo los efectos espaciales influyen en la formación de precios de renta y aporta evidencia empírica sobre la necesidad de incorporar la dimensión geográfica en los procesos de análisis y gestión inmobiliaria. Este estudio, además de aportar un caso aplicado para la localidad de Usaquén, ofrece insumos metodológicos y técnicos para fortalecer los procesos de valoración de bienes administrados por la SAE,

contribuyendo a una gestión más eficiente, sustentada en información empírica y modelos econométricos robustos.

## Planteamiento del problema

En Colombia, La Sociedad de Activos Especiales (SAE) es una entidad de economía mixta vinculada al Ministerio de Hacienda, encargada de gestionar, administrar y liberar activos afectados con medidas cautelares y con extinción de dominio, los cuales han pasado a ser propiedad del Estado debido al vínculo con actividades ilícitas, (SAE, 2019). En su rol de administración, la SAE utiliza diversos mecanismos, incluyendo la enajenación, la contratación, la destinación provisional, el depósito provisional y en algunos casos la destrucción o chatarrización, (Ley 1708, 2014, Art. 10). Estos mecanismos permiten a la entidad agilizar el proceso de monetización de los activos, sin embargo, para que el proceso sea más optimo es necesario tener eficiencia en la gestión de los Bienes, incluyendo la elaboración y el sostenimiento del inventario, el mantenimiento del activo, la correcta administración y disposición de los bienes que va junto a la necesidad de maximizar su valor en el mercado por medio de procesos de venta y/o arriendo.

Para el año 2024 la SAE se propuso recaudar 1 billón de pesos tanto en arrendamientos como en ventas, aunque se han realizado avances en esta meta, algunos procesos como el saneamiento de los bienes, la valoración y precio de mercado han retrasado su cumplimiento. A medida que estos procesos se desarrollan, la sociedad se enfrenta a la necesidad de mejorar sus estrategias de monetización, ajustando no solo los tiempos de saneamiento y valoración, sino también enfocándose en las proyecciones financieras; esto implica un análisis continuo de los activos para así maximizar su rentabilidad y cumplir con los objetivos de recaudación establecidos.

En este contexto, la entidad enfrenta el desafío de determinar el valor adecuado de arrendamiento de los inmuebles bajo su gestión, dado que un desconocimiento de las dinámicas y variables del mercado inmobiliario podría resultar en una subutilización de estos activos o en ingresos que estén por debajo de su potencial.

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda realizado en el año 2018 (DANE, 2019, CNPV), Bogotá es la ciudad con mayor población en Colombia, albergando alrededor de 7.412.566 personas en 2,5 millones de hogares. Se estima que para el año 2024, esta cifra crecerá a 7.929.539 habitantes (DANE, 2019, Proyecciones de Población), lo que indica que la presión sobre el mercado inmobiliario incrementará.

Según la encuesta Nacional de Calidad de vida (DANE, 2023, ECV), el 51,6% de los hogares bogotanos viven en arriendo, indicando que el arriendo es la tenencia de vivienda predominante en la actualidad; este crecimiento demográfico y las proyecciones de demanda habitacional sugieren una oportunidad para optimizar el uso de los inmuebles que cuenten con características específicas y que se ubiquen en zonas con alta demanda, ya que la alta proporción de hogares en arriendo refleja la necesidad de opciones de vivienda asequibles en una ciudad en constante crecimiento.

Una de las zonas estratégicas de Bogotá es la localidad de Usaquén, debido a diferentes factores como lo es su ubicación, al estar situada en el nororiente de la ciudad, limita con la localidad de Chapinero y con los municipios de Chía, Sopó y La Calera, esta ubicación genera que tenga mayor accesibilidad con vías importantes; asimismo la localidad ha experimentado un crecimiento comercial y residencial en los últimos años promovido por los Planes Parciales de Renovación Urbana como lo son el Plan Parcial ‘El Pedregal’ (Decreto 188, 2014,) y el Plan Parcial No. 10 ‘El Rosario’ (Decreto 376, 2023); este desarrollo dispone de una composición de estratos socioeconómicos que van desde el 3 hasta el 6, donde se presentan especialmente

inmuebles de mayor valor. La combinación de estos factores ha generado una demanda considerable de inmuebles en los estratos altos, generando rentabilidades elevadas y a su vez atrayendo inversiones en el sector inmobiliario.

La SAE, al encargarse de gestionar los inmuebles extintos, cuenta con una mayor concentración de predios urbanos ubicados en los estratos socioeconómicos altos, principalmente en la clasificación 4, 5 y 6. Esta distribución proporciona a la entidad una oportunidad para enfocar su estrategia en inmuebles de estratos altos, aprovechando las características y el valor de mercado que estos representan en una zona de alta demanda, como lo es en Usaquén.

Para maximizar los ingresos y optimizar la utilización de estos activos, es necesario que los procesos se agilicen, por lo que se propone por medio de la presente pasantía el desarrollo de un modelo de precios hedónicos, considerando variables de tipo espacial que permita calcular el valor de arriendo en esta zona y de esta manera la estimación de rentas tome menos tiempo.

## Justificación

La gestión eficiente de los inmuebles extintos por la SAE es esencial para maximizar su valor y garantizar su aprovechamiento productivo en el mercado, conforme a la Ley 1708 de 2014.

Esta ley establece como propósito central la administración y disposición efectiva de bienes extintos, permitiendo que estos, previamente vinculados a actividades ilícitas, se reintegren a la economía de manera productiva; en este sentido la sociedad busca una comercialización efectiva pues el fin de los bienes es que sean vendidos, sin embargo, debido

a la demora en los trámites, es necesario arrendar los predios temporalmente para asegurar su uso optimo y evitar pérdidas.

La ciudad de Bogotá es la segunda ciudad con un inventario mayor de inmuebles en administración de la SAE, en la localidad de Usaquén existe una alta concentración de inmuebles de propiedad horizontal arrendados y por arrendar especialmente en los estratos 4, 5 y 6, esto requiere una optimización adecuada en los procesos de renta ya que al realizarlos de manera manual los retrasa generando así que no se cumplan con los objetivos de la entidad, además la falta de precisión en la valoración de estos bienes puede llevar a una subutilización de los mismos o a la generación de ingresos inferiores a su potencial, afectando negativamente la recaudación estatal proyectada.

De acuerdo con Wing & Chin (2003), en el artículo "*A Critical Review of Literature on the Hedonic Price Model*", un modelo de precios hedónicos es un método econométrico que se utiliza para explicar el precio de un bien en función de sus diferentes atributos, como lo es la vivienda, lo que permite estimar la influencia individual de factores como la ubicación, las características físicas y los precios de inmuebles vecinos similares.

Los precios conforme a los atributos se calculan fácilmente a través de parámetros de regresión, lo que hace del método una herramienta práctica y eficiente para analizar las preferencias de los consumidores y las dinámicas del mercado inmobiliario. Sin embargo, debido a la naturaleza de los datos que, al ser geográficos, se plantea la incorporación de un enfoque de econometría espacial.

La econometría espacial, término acuñado por Paelinck & Klassen (1979), es un conjunto de técnicas que buscan cuantificar los efectos de la interacción espacial de unidades susceptibles de ser referenciadas por medio de un sistema de ubicación geográfica (SIG) usando herramientas de análisis estadístico y econométrico; se incorpora cuando hay evidencia de que las observaciones en ubicaciones cercanas están correlacionadas entre sí.

En entornos urbanos como Usaquén, los precios del arriendo no solo están determinados por las características físicas de cada inmueble, sino que también se toman en cuenta otros factores que reflejan las relaciones e interacciones entre ubicaciones cercanas.

Este modelo se puede realizar utilizando el software R por medio de la interfaz RStudio que proporciona un conjunto de herramientas y funcionalidades integradas para el lenguaje de programación R y es utilizado en análisis, estadísticas y visualización de datos (RStudio, 2024).

La SAE cuenta con un proceso de recopilación de información por medio de Web Scrapping en donde se capturan los datos de los inmuebles de las páginas Finca raíz, Metro cuadrado y Cien cuadras, con el fin de recibir ofertas para ajustar la solución que permite a la entidad determinar el canon de arrendamiento de los inmuebles administrados; por medio de este proceso se obtiene la ubicación, el valor de la administración, el estrato socioeconómico, el precio del arriendo, las coordenadas y las características estructurales del inmueble a través del uso de una base de datos.

Entonces así, teniendo en cuenta la necesidad de optimizar los procesos, la aglomeración de apartamentos ubicados en la localidad de Usaquén en administración de entidad, la disponibilidad de la información y el software R que al ser de código abierto y fácil acceso, se propone la realización de un modelo de precios hedónicos que permita estimar el valor de arrendamiento para apartamentos en estrato socioeconómico 4, 5 y 6 ubicados en Usaquén, complementándolo con un análisis espacial por el tipo de datos.

La implementación de este modelo no solo mejorará la capacidad de la SAE para optimizar sus ingresos por medio de arriendo, sino que también brindará una base sólida para una toma de decisiones informada y alineada al comportamiento del mercado inmobiliario, la cual se respalda por datos reales y actualizados. Además, los resultados de este estudio podrán ser un referente para gestionar otros bienes inmuebles extintos en otras localidades o estratos que tengan comportamientos similares.

# Objetivos

## Objetivo General

Estimar el valor de la renta de los apartamentos en la localidad de Usaquén, para los estratos socioeconómicos 4, 5 y 6 en el año 2024, considerando las características de los inmuebles, mediante el desarrollo de un modelo de precios hedónicos que permita optimizar la gestión de los bienes extintos bajo la administración de la SAE y facilite la toma de decisiones estratégicas en su comercialización.

## Objetivos Específicos

Estructurar una base de datos que integre las características físicas de los apartamentos, los estratos socioeconómicos en que se ubican y el valor de administración, para identificar las variables que influyen en el valor de la renta de los apartamentos en la localidad de Usaquén.

Desarrollar y calibrar un modelo de precios hedónicos que permita estimar el valor de arriendo de los apartamentos en Usaquén para estratos socioeconómicos 4, 5 y 6, utilizando las variables identificadas.

Analizar los resultados obtenidos del modelo hedónico con el fin de generar recomendaciones que optimicen la gestión y comercialización de los inmuebles extintos destinados a rentas por parte de la SAE.

# Estado del arte

La A finales del siglo pasado, el análisis de la rentabilidad se enfocaba en la toma de decisiones para soluciones a problemáticas presentadas en la época, (Colwell, 1976), examino

los factores de mercado que influyen en las decisiones de abandono y rehabilitación de viviendas, con el objetivo de identificar las características esenciales de estos problemas y analizar cómo ciertos programas sociales han afectado estas decisiones.

Debido a la visión de (Griliches, 1991), la investigación se orientó a la evolución y aplicación de los índices de precios hedónicos en la medición del capital y la productividad, siendo claves en los mercados dinámicos como los son las rentas.

El estudio sobre los efectos de la regulación del uso del suelo sobre el precio de la vivienda de (Quigley & Rosenthal, 2005) analiza cómo las regulaciones sobre el uso del suelo afectan los precios de la vivienda proponiendo así una clasificación para describir la influencia y consecuencias de estas regulaciones en los mercados inmobiliarios.

Siete años después en España se realizó una publicación sobre la estimación de la renta bruta disponible municipal mediante técnicas de econometría espacial (Buendía, Yago & Sánchez de la Vega, 2012), en donde se empleaba un modelo espacial para la estimación de la renta, por medio de características de interdependencia y heterogeneidad espacial, lo que le proporciono un gran avance en comparación con las técnicas de econometría convencionales.

Para el año 2019 se publica un análisis sobre los precios de bienes raíces en Brasil, utilizando modelos de precios hedónicos para las ciudades de Lajeado y Montenegro; gracias a un análisis de regresión lineal se generaron ecuaciones para los datos recolectados, concluyendo que los modelos contaban con una gran capacidad de explicación sobre los precios. (Poeta, Gerhardt, & Stumpf González, 2019).

En el caso de Colombia, la renta ha sido indagada con trabajos asociados al sector inmobiliario, (Melo Martínez & Melo Martínez, 2003) realizaron la estimación de precios hedónicos para propiedades residenciales y comerciales en la ciudad de Bogotá, basado en una regresión econométrica para descomponer el precio de los bienes inmuebles en función de sus atributos físicos y ubicación.

Para el año siguiente, (Jaramillo, 2004) analiza los precios de arriendos de vivienda en Bogotá hacia los años 1970 a 2004, utilizando datos del DANE y ofertas de alquiler publicadas en periódicos, esto lo realiza por medio de series de tiempo en donde compara los cánones de alquiler con los precios de compraventa.

Bajo la alcaldía de Luis Eduardo Garzón se realizó una publicación llamada "La estratificación en Bogotá D.C. y estudios relacionados 1983- 2004, que señala como la implementación de la estratificación socioeconómica actúa en fomentar políticas públicas en Bogotá. Esto lo realizan por medio de un modelo estadístico diseñado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) para realizar la asignación los estratos socioeconómicos en Bogotá. Este modelo emplea una metodología basada en la evaluación de características físicas de las viviendas, su entorno inmediato y su contexto urbanístico, clasificando las viviendas en estratos del 1 al 6. (Alcaldía Mayor de Bogotá & DAPD, 2005).

Para el 2011 se difunde el articulo estimación de tasas de capitalización de rentas de vivienda urbana estrato 3 sometidas al régimen de propiedad horizontal en Bogotá, en el cual se emplea modelos econométricos para la estimación de las tasas a partir de las variables físicas de un inmueble. (Medrano, Perlaza & Fuentes, 2011).

Enseguida se publicó un estudio sobre el mercado de arrendamiento de vivienda en Colombia, (Torres, 2012) el cual analiza estructuras del mercado de arrendamientos de vivienda en Colombia, enfocándose en las dinámicas económicas y sociales que han generado que los sectores de ingresos bajos opten por el arrendamiento para vivir y también que en la medida en que las capitales empiezan a expandirse surgen viviendas en arriendos en estratos más altos.

Durante el plan de desarrollo Bogotá humana liderado por el alcalde Gustavo Francisco Petro Urrego, se imprime el documento "Segregación socioeconómica en el espacio urbano de Bogotá" (Secretaria Distrital de Planeación & Universidad Nacional de Colombia, 2013) el

cual emplea modelos hedónicos para construir el índice integrado de segregación en donde se consideran las características de los bienes públicos, las externalidades, los precios de la vivienda teniendo en cuenta avalúos y arriendos. Estos modelos permiten definir los factores que contribuyen de mayor manera a los valores catastrales y costos de alquiler. En el caso de las rentas, se concluye que la calidad y cantidad de bienes públicos cercanos impactan directamente en el precio, generando así diferencias entre localidades y estratos socioeconómicos.

En cuanto al enfoque espacial, para el año 2016 se analizó el proceso de formación de precio de la vivienda urbana en las localidades de Kennedy, Fontibón y Engativá de Bogotá durante los años 2015 a 2016; en donde implementaron la econometría espacial para determinar las variables que influyen en el precio de la vivienda como las características físicas y de localización, aplicando técnicas de regresión geográfica ponderada (WGR) y análisis de mapas temáticos en un sistema de información geográfica (SIG). (Martínez, 2016).

(Jaramillo y Agudelo, 2018) evidenciaron que las tasas de capitalización son más altas en viviendas de estratos bajos debido a la alta demanda de alquiler y escasa oferta, lo que genera una mayor rentabilidad en comparación con los estratos altos donde la oferta excede a la demanda.

En el mismo año, (Chaux, 2018) explora la relación entre los precios de la vivienda y la calidad de vida en Bogotá mediante modelos econométricos espaciales; para la obtención de los datos de las viviendas utiliza técnicas de web scraping en páginas inmobiliarias, complementando con información sobre amenidades urbanas.

Mas adelante se publica el documento "Formulación de un Modelo Econométrico Espacial para la Valoración de Apartamentos en la Ciudad de Medellín" (Hernández, 2021) el cual se centra en el desarrollo de un modelo econométrico espacial para estimar el valor de

apartamentos en Medellín, abordando variables intrínsecas, extrínsecas y espaciales que influyen en el valor comercial.

En el mismo periodo se desarrolla un análisis empleando técnicas de econometría espacial para investigar cómo diversos factores afectan el precio de la vivienda nueva en Bogotá, (Toloza, Melo & Azcarate, 2021). En esta investigación se implementó un modelo de regresión semiparamétrico que capturo los efectos lineales, no lineales y heterogeneidad espacial, aplicado a un modelo hedónico de precios de viviendas.

Adicionalmente, (Heredia Barbosa & Cifuentes Vásquez, 2024) señalan los determinantes del precio de arriendo en Bogotá, Medellín y Cali para el año 2023. Utilizando un modelo de precios hedónicos y datos de arriendos descubre que las características propias del inmueble y las características espaciales impactan positivamente en el precio del arriendo de las viviendas.

## Marco legal

*Ley 1708 de 2014:* "Por medio de la cual se expide el Código de Extinción de Dominio". Regula el proceso para declarar la extinción de dominio sobre bienes adquiridos o utilizados en actividades ilícitas. Establece que estos bienes, una vez extinguidos, son administrados por la Sociedad de Activos Especiales (SAE), que se encarga de su manejo a través del Fondo para la Rehabilitación, Inversión Social y Lucha contra el Crimen Organizado (FRISCO). (Ley 1708 del 2014, art. 90).

*Ley 1849 de 2017:* "por medio de la cual se modifica y adiciona la Ley 1708 de 2014 "Código de Extinción de Dominio" y se dictan otras disposiciones".

Sus modificaciones incluyen la creación de un marco legal para la enajenación temprana de bienes objeto de la acción de extinción de dominio bajo siete condiciones, la

modificación del proceso de extinción de dominio y la regulación del manejo de bienes del FRISCO (Fondo Especial para la Administración de Bienes) (Ley 1849 del 2017, art. 93).

*Resolución 620 de 2008:* "Por la cual se establecen los procedimientos para los avalúos ordenados dentro del marco de la Ley 388 de 1997".

*Método de capitalización de rentas o ingresos:*

Es la técnica valuatoria que busca establecer el valor comercial de un bien, a partir de las rentas o ingresos que se puedan obtener del mismo bien, o inmuebles semejantes y comparables por sus características físicas, de uso y ubicación, trayendo a valor presente la suma de los probables ingresos o rentas generadas en la vida remanente del bien objeto de avalúo, con una tasa de capitalización o interés. Este método excluye montos relacionados con servicios públicos y cuotas de administración y se centra únicamente en las rentas asociadas al inmueble, sin considerar la rentabilidad de actividades económicas que puedan desarrollarse en él (Resolución 620 de 2008, art. 2 y 16).

*Tasa de capitalización:*

Procede de la relación calculada entre el canon de renta y el valor comercial de las propiedades similares al inmueble objeto de avalúo, en función del uso o usos existentes en el predio y de localización comparable. (Resolución 620 de 2008, art. 16).

*Ley 675 del 2001:* "Por medio del cual se expide el régimen de propiedad horizontal".

Regula el régimen de propiedad horizontal en Colombia, estableciendo normas para la administración, uso y manejo de bienes privados y comunes en edificios y conjuntos residenciales, comerciales o mixtos. Define la manera de calcular coeficientes de copropiedad

y expensas comunes al establecer parámetros sobre el uso y conservación de los bienes. (Ley 675 de 2001).

*Ley 820 de 2003:* "Por la cual se expide el régimen de arrendamientos de vivienda urbana y se dictan otras disposiciones".

Establece el régimen de arrendamiento de vivienda urbana en Colombia, regulando aspectos como los contratos de arriendo, las condiciones de los cánones y los derechos de los arrendatarios y arrendadores. Define que el precio del arriendo no debe exceder el 1% del valor comercial del inmueble, basado en el avalúo catastral. (Ley 820 de 2003).

*Decreto 1420 de 1998:* "Por el cual se reglamentan parcialmente el artículo 37 de la Ley 9 de 1989, el artículo 27 del Decreto-ley 2150 de 1995, los artículos 56, 61, 62, 67, 75, 76, 77, 80, 82, 84 y 87 de la Ley 388 de 1997 y, el artículo 11 del Decreto-ley 151 de 1998, que hacen referencia al tema de avalúos".

Tiene por objeto señalar las normas, procedimientos, parámetros y criterios para la elaboración de los avalúos por los cuales se determinará el valor comercial de los bienes inmuebles, dentro de la ejecución de la adquisición de predios mediante expropiación por vía judicial ya administrativa. (Decreto 1420 de 1998, art. 1).

*Decreto 422 de 2000:* "Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 50 de la Ley 546 de 1999 y los artículos 60, 61 y 62 de la Ley 550 de 1999".

Se especifican los criterios a los que deben sujetarse los avalúos y el Contenido mínimo del informe de avalúo. (Decreto 422 de 2000, art. 1 y 2).

*Ley 1673 de 2013:* "Por la cual se reglamenta la actividad del avaluador y se dictan otras disposiciones".

Establece las funciones del avaluador enmarcada en el desarrollo de la valuación de todo tipo de inmuebles, venta o compra, administración, construcción, alquiler y/o arrendamiento de inmuebles, promoción, comercialización de proyectos y consultoría inmobiliaria. (Ley 1673 de 2013)

**Sociedad de Activos Especiales (SAE) S.A.S.**

La Sociedad de Activos Especiales (SAE) es una entidad pública de carácter comercial, constituida como sociedad por acciones simplificada y de economía mixta, es decir, con participación estatal y capital propio, que administra bienes provenientes de procesos de extinción de dominio y actividades ilícitas.

Sus funciones principales son:

i. Elaborar y mantener actualizado el inventario de los bienes afectados con medida cautelares y con extinción de dominio.

ii. Velar por la correcta administración y disposición de los bienes afectados con medidas cautelares y con extinción de dominio, a través de los mecanismos definidos por la ley 1708 de 2014.

iii. Supervisar la utilización de los bienes por parte de los destinatarios o depositarios provisionales.

iv. Colaborar con las autoridades judiciales en el cumplimiento de las órdenes de devolución o de destinación definitiva de los bienes.

v. 5. La enajenación temprana de bienes con medidas cautelares ya sean muebles sujetos a registro, de género, fungibles consumibles, perecederos, los semovientes, los que amenacen ruina, pérdida, deterioro medioambiental, o los que sean materia de expropiación

por utilidad pública, o servidumbre, o aquellos que de acuerdo con un análisis de costo - beneficio se concluya que su administración o custodia ocasionan perjuicios o gastos desproporcionados, previa autorización del fiscal de conocimiento o juez de extinción de dominio. (SAE, 2019)

**Contexto institucional**

En los últimos años, la sociedad ha fortalecido su enfoque operativo hacia una gestión más comercial y estratégica de los bienes inmuebles que administra, incorporando procesos de arrendamiento, venta y destinación provisional orientados a optimizar el aprovechamiento económico de los activos bajo su custodia; este enfoque ha implicado la articulación entre distintas direcciones, principalmente la Dirección Comercial, encargada de definir precios y condiciones de mercado, y la Dirección de Bienes o Dirección Técnica, responsable de la valoración, mantenimiento y disposición física de los inmuebles.

En el marco de estas funciones, una parte fundamental de la gestión institucional de la SAE corresponde a la administración de los bienes del Fondo para la Rehabilitación, Inversión Social y Lucha contra el Crimen Organizado (FRISCO), cuya finalidad es garantizar la adecuada destinación, mantenimiento y aprovechamiento económico de los activos afectados con medidas cautelares o con extinción de dominio. A continuación, se presenta la metodología de administración de los bienes FRISCO:

- Recepción de Bienes
    - Los bienes ingresan al sistema de administración de la SAE por aplicación de medidas cautelares dentro de los procesos de extinción de dominio. Una vez recibida la orden judicial o fiscal, la entidad realiza la entrega material y

documental e incorpora la información al Sistema Integrado de Administración de Bienes del FRISCO.

- Los activos se clasifican según su naturaleza: inmuebles urbanos y rurales, muebles, semovientes, vehículos, sociedades, establecimientos de comercio, dinero, títulos valores o activos
- Cada bien se registra en el inventario central, asignándole un código único y verificando su ubicación, estado físico, situación jurídica y antecedentes de propiedad.
- Cuando los bienes presentan riesgo de deterioro, pérdida o inviabilidad de administración, la SAE puede solicitar ante la autoridad competente su enajenación temprana, conforme al artículo 90 de la Ley 1708 de 2014 y al Decreto 2136 de 2015.

- Administración de los Bienes
  - Una vez incorporado, el bien es objeto de una evaluación integral que comprende diagnóstico técnico, avalúo preliminar, verificación jurídica y análisis económico.
  - Según los resultados, la SAE determina la modalidad de administración más adecuada:
    i. *Depósito Provisional:* Se asigna un depositario provisional para la gestión temporal del bien.
    ii. *Destinación Provisional:* Se entrega a entidades públicas o privadas sin ánimo de lucro bajo condiciones específicas.
    iii. *Enajenación Temprana:* Figura de comercialización de bienes cautelados que cumplan con una de las siguientes causales:
      - Sea necesario u obligatorio dada su naturaleza.

- Representen un peligro para el medio ambiente.
- Amenacen ruina, pérdida o deterioro.
- Su administración o custodia ocasionen, de acuerdo con un análisis de costo-beneficio, perjuicios o gastos desproporcionados a su valor o administración.
- Muebles sujetos a registro, de género, fungibles, consumibles, perecederos o los semovientes.
- Los que sean materia de expropiación por utilidad pública, o servidumbre.
- Aquellos bienes cuya ubicación geográfica o condiciones de seguridad implique la imposibilidad de su administración.

iv. *Venta Directa o Subasta:* Se comercializan los bienes a través de procesos de subasta o negociación con entidades públicas.

- Valoración Diagnóstico y Saneamiento
  - La SAE practica avalúos comerciales actualizados sobre los bienes con vocación de venta o arriendo, aplicando metodologías técnicas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la normativa vigente
  - Se revisan los pasivos y cargas asociados a cada bien (impuestos, embargos, hipotecas, procesos judiciales o limitaciones de dominio) y se gestionan los saneamientos necesarios.
  - Determinación de viabilidad económica, legal y operativa de la comercialización, transferencia o destinación del bien.
- Gestión comercial y de Disposición
  - Los bienes se pueden enajenar, arrendar o donar, de acuerdo con su naturaleza y vocación:

i. Venta de bienes a través de subastas públicas o venta directa a entidades estatales.
ii. Venta Directa o Donaciones a entidades públicas para el fortalecimiento de infraestructura estatal.
iii. Arrendamiento: Cuando el bien no es objeto de venta inmediata, se arrienda a terceros para preservar su uso productivo y generar ingresos al FRISCO.
iv. Comodatos: Cesión temporal a entidades sin ánimo de lucro para su uso en actividades de interés social.

- Gestión de Ingresos, Cartera y Control Operativo
    - Los ingresos provenientes de arrendamientos, ventas o contratos se registran en la contabilidad del FRISCO y se destinan a los fines previstos en la Ley 1849 de 2017.
    - La SAE realiza seguimiento y evaluación periódica de la gestión de depositarios y destinatarios provisionales mediante reportes, auditorías y visitas de inspección.
- Supervisión Institucional y Control de Gestión
    - La Oficina Asesora de Planeación y la Gerencia del FRISCO supervisan el cumplimiento de los procedimientos, actualizan la metodología y consolidan los indicadores de eficiencia, eficacia y transparencia de la administración.
    - Se realizan auditorías internas y externas sobre los procesos de recepción, comercialización y enajenación, con el fin de garantizar la correcta destinación de los recursos y bienes públicos.
- Transferencia Final

- Los bienes con vocación social o rural se transfieren gratuitamente a la Agencia Nacional de Tierras (ANT) u otras entidades públicas, en cumplimiento de la política de Reforma Rural Integral.
- Se procede a la regularización, titulación o adjudicación de predios rurales, garantizando la seguridad jurídica y la función social de la propiedad.
- Cuando existan decisiones judiciales en firme, la SAE ejecuta la devolución de bienes a sus propietarios legítimos
- Finalmente, se realiza el cierre administrativo y contable, dejando constancia en el Sistema Integrado del FRISCO y archivando toda la trazabilidad del ciclo de vida del bien.(Sociedades de activos especiales, 2023)

**Aportes de las direcciones funcionales de la SAE**

En la gestión de los bienes del FRISCO, diversas direcciones funcionales de la SAE intervienen de manera coordinada a lo largo del ciclo de administración, en cumplimiento de las funciones asignadas por su estructura orgánica y por la normatividad vigente

i. Dirección de Bienes Inmuebles y Dirección de Bienes Muebles

Estas direcciones lideran la gestión operativa de los activos físicos (inmuebles, muebles y semovientes). Se encarga de coordinar la recepción, diagnóstico, clasificación, avalúo y saneamiento de los bienes ingresados al FRISCO, verificando su estado físico y jurídico antes de definir su destinación o comercialización. Además, consolida la información técnica para el inventario nacional y coordina con los depositarios provisionales la custodia, mantenimiento y conservación de los activos

ii. Dirección de Analítica Alistamiento y Valoración

Garantiza la rigurosidad técnica en los procesos de valoración y administración de los bienes. Valida los avalúos comerciales de inmuebles mediante el procedimiento P-DP2-047 y estima el valor de las sociedades bajo el procedimiento P-DP2-041, realizados por peritos registrados. Participa en la estructuración y aprobación de estudios de viabilidad económica, en la estimación de rentas para contratos de arrendamiento y en la definición de lineamientos para la explotación productiva de los activos. También elabora conceptos técnicos sobre mantenimiento, adecuaciones o intervenciones estructurales (ROM), fundamentales para la toma de decisiones sobre arrendamiento, destinación provisional o disposición final. Su gestión garantiza que las decisiones técnicas se alineen con la sostenibilidad y la eficiencia patrimonial.

iii. Vicepresidencia Jurídica – Gerencia de Contratos

Tiene a su cargo la revisión y validación jurídica de los actos y contratos relacionados con la administración y disposición de bienes. Analiza y aprueba contratos de arrendamiento, explotación económica o enajenación, asegurando que se ajusten al régimen de derecho privado aplicable a la SAE y cumplan con las disposiciones normativas internas y externas. Además, incorpora cláusulas de cumplimiento normativo, ética, prevención del lavado de activos (SARLAFT), integridad contractual y garantías. Su labor es esencial para salvaguardar la legalidad, transparencia y seguridad jurídica de las operaciones de la entidad.

iv. Dirección de Comercialización o Gerencia Comercial

Interviene en la fase de disposición y transferencia de bienes mediante procesos de enajenación, subasta o venta directa. Define estrategias comerciales, establece los precios base de venta o arrendamiento, coordina la publicación de ofertas y gestiona los procesos de

escrituración y entrega. Además, opera el portal “Activos por Colombia”, que centraliza la oferta pública de bienes de la SAE y fortalece la transparencia y el acceso ciudadano.

v. Dirección Financiera

Gestiona los recursos económicos derivados de la administración del FRISCO. Supervisa la contabilización de ingresos por arrendamientos, ventas o donaciones, así como el cumplimiento del marco fiscal y presupuestal. También realiza seguimiento a la ejecución financiera, controla los flujos de caja y elabora reportes contables y de rentabilidad del portafolio de activos, asegurando la sostenibilidad del fondo y el uso eficiente de los recursos públicos.

vi. Dirección de Planeación y Control

Se encarga de la implementación, seguimiento y actualización de la Metodología de Administración de Bienes del FRISCO. Define indicadores de gestión, coordina auditorías internas y externas, consolida informes de desempeño institucional y verifica el cumplimiento de los procedimientos establecidos. Su función es asegurar la coherencia operativa y la trazabilidad institucional, velando porque todos los procesos se ajusten al marco legal y a los principios de la administración pública.

vii. Dirección de Tecnología o Sistemas de Información

Diseña, implementa y mantiene los sistemas tecnológicos que soportan la gestión del FRISCO. Entre ellos se destacan el Sistema Integrado de Administración de Bienes (SIAB) y el módulo de asignación automatizada de depositarios y liquidadores, los cuales permiten

optimizar procesos, garantizar trazabilidad y fortalecer la interoperabilidad entre dependencias. También desarrolla herramientas digitales de control documental, seguimiento financiero y transparencia pública.

viii. Dirección de Riesgos, Ética y Cumplimiento

Vigila la debida diligencia institucional sobre todos los actores que participan en la administración o comercialización de bienes. Verifica que los depositarios, contratistas, compradores y destinatarios no estén vinculados a listas restrictivas o actividades ilícitas, en cumplimiento del Sistema de Administración del Riesgo de Lavado de Activos y Financiación del Terrorismo (SARLAFT). Además, promueve políticas de ética, transparencia e integridad corporativa, garantizando la mitigación de riesgos reputacionales y legales.

ix. Direcciones Territoriales / Agencias Regionales

Estas direcciones representan la descentralización operativa de la SAE en el territorio nacional. Se encargan de coordinar la ejecución de los procesos de recepción, administración y comercialización de bienes en su jurisdicción, y de fortalecer la presencia institucional en el país. Actúan como enlace entre la sede central y las autoridades locales para facilitar trámites, inspecciones y atención ciudadana. Actualmente, la SAE cuenta con las siguientes sedes territoriales:

- Dirección Territorial Centro Oriente (Bogotá D.C.)
- Dirección Territorial Occidente (Medellín, Antioquia)
- Dirección Territorial Sur (Cali, Valle del Cauca)
- Dirección Territorial Caribe (Barranquilla, Atlántico)

x. Comités de Negocios (Regionales y del Nivel Central)

Son instancias colegiadas que integran representantes de las direcciones técnicas, jurídicas, comerciales y financieras. Evalúan y aprueban decisiones estratégicas relacionadas con enajenaciones, destinaciones provisionales, arrendamientos, liquidación de sociedades y planes de comercialización. Su labor garantiza la coherencia institucional y la aplicación uniforme de los criterios técnicos y legales a nivel nacional (Sociedades de activos especiales, 2023).

**Aportes de las direcciones funcionales de la SAE en la administración de predios con incidencia directa en la gestión de arriendos**

En la administración de predios arrendados pertenecientes al portafolio del FRISCO, diversas direcciones funcionales de la Sociedad de Activos Especiales (SAE) intervienen de forma coordinada para garantizar la legalidad, eficiencia y aprovechamiento económico de los activos. Aunque todas las áreas de la entidad cumplen un rol dentro del ciclo de administración de bienes, las que se describen a continuación tienen una participación directa en el proceso de arrendamiento.

1. Dirección de Bienes Inmuebles

Esta dirección cumple un papel operativo fundamental en la gestión de predios arrendados. Supervisa la identificación, clasificación, diagnóstico técnico y registro de los inmuebles disponibles para arriendo, verificando su estado físico y jurídico antes de ser ofrecidos en el mercado. También define, en coordinación con la Dirección de Analítica Alistamiento y Valoración, las condiciones de habitabilidad, uso y mantenimiento, asegurando que los bienes cumplan con los estándares de conservación y seguridad requeridos. Además,

monitorea el cumplimiento de las obligaciones por parte de los arrendatarios y coordina las visitas de inspección o verificación en caso de incumplimiento.

2. Dirección de Analítica Alistamiento y Valoración

Aporta la base analítica para la fijación de precios y condiciones de arriendo. Valida los avalúos comerciales y los estudios de estimación de renta, elaborados bajo el procedimiento P-DP2-047, que permiten establecer valores justos de arrendamiento conforme a las condiciones del mercado. También emite conceptos técnicos de viabilidad de uso y define los requerimientos de mantenimiento o adecuación (ROM) que deben ejecutarse antes de arrendar un predio.

Como antecedente institucional, la dirección desarrollo un ejercicio de estimación de rentas y agrupación de inmuebles mediante técnicas de clúster, en el año 2023. El proyecto fue orientado a determinar valores de referencia de arriendo en la localidad de Usaquén debido a dos razones, la primera era que para el momento las ciudades que vendían la mayor cantidad de predios eran Cali y Bogotá y la segunda que los predios de mayor venta eran los apartamentos y los locales, enseguida se observó que en la capital habia una mayor concentración de apartamentos en estratos altos y además eran los inmuebles que contaban con menos avaluos. Este ejercicio consistió en la selección y procesamiento de información catastral y espacial, aplicando un enfoque de análisis geográfico por barrios, entre ellos:

La Carolina, Santa Bárbara, Santa Bibiana, Molinos Norte y San Patricio. (Sociedad de Activos Especiales, 2023).

3. Dirección Jurídica

Garantiza la seguridad jurídica de los contratos de arrendamiento. Redacta, revisa y avala los documentos contractuales, asegurando que se ajusten al régimen de derecho privado

aplicable a la SAE. Además, tramita las autorizaciones judiciales cuando el inmueble se encuentra en litigio o bajo medidas especiales, y coordina los procesos de cobro jurídico o desalojo en caso de incumplimiento. Su aporte es esencial para mantener la legalidad y proteger el patrimonio público administrado

4. Dirección de Comercialización

Es la dependencia encargada de la estrategia de colocación y seguimiento comercial de los inmuebles. Publica las ofertas disponibles, gestiona las solicitudes de interesados y lidera la negociación de condiciones de arriendo con base en los avalúos técnicos. También elabora y aprueba los contratos de arrendamiento tipo, define los mecanismos de seguimiento a cartera y consolida los informes mensuales de desempeño de los contratos activos. En conjunto con la Dirección Jurídica, impulsa la recuperación de predios en mora o con incumplimientos contractuales.

5. Dirección Jurídica – Gerencia de Contratos

Garantiza la seguridad jurídica de los contratos de arrendamiento. Redacta, revisa y avala los documentos contractuales, asegurando que se ajusten al régimen de derecho privado aplicable a la SAE. Además, tramita las autorizaciones judiciales cuando el inmueble se encuentra en litigio o bajo medidas especiales, y coordina los procesos de cobro jurídico o desalojo en caso de incumplimiento. Su aporte es esencial para mantener la legalidad y proteger el patrimonio público administrado

6. Dirección Financiera

Gestiona los ingresos derivados de los arrendamientos, garantizando la correcta contabilización de los cánones, anticipos y depósitos de garantía. Supervisa la recaudación,

controla la cartera y aplica mecanismos de seguimiento financiero en conjunto con la Dirección Comercial. Asimismo, proyecta el rendimiento económico de los predios arrendados y reporta los resultados al FRISCO, asegurando que los recursos sean reinvertidos conforme a la normatividad vigente

7. Dirección de Riesgos, Ética y Cumplimiento

Participa en la verificación de antecedentes de los arrendatarios y depositarios antes de la firma de los contratos, asegurando que no estén incluidos en listas restrictivas nacionales o internacionales. Su función preventiva evita que los bienes públicos sean utilizados con fines ilícitos y fortalece la transparencia en los procesos de vinculación contractual.

## Marco de referencia

### Modelo de precios hedónicos

El modelo de precios hedónicos es una herramienta econométrica utilizada para analizar cómo las características de un bien influyen en su precio de mercado. Su aplicación más común se da en el ámbito inmobiliario, donde el valor de un inmueble depende de un conjunto de atributos estructurales, locacionales y ambientales.

La formulación teórica del modelo fue desarrollada por Rosen (1974), quien planteó que los precios de los bienes diferenciados reflejan la suma del valor implícito de sus características. En el contexto inmobiliario, el precio o canon de arriendo de un inmueble ($P_i$) puede expresarse como una función de sus atributos:

$$P_i = f(Si, Li, Ni, \varepsilon i) \quad (1)$$

Donde:

- $Si$ representa las características estructurales del inmueble
- $L_i$ corresponde a las características de localización
- $N_i$ incluye los atributos del entorno o características de vecindario como el estrato socioeconómico
- $\varepsilon_i$ es el término de error aleatorio.

Al asumir que la función $f(\,)$ es diferenciable y continua, puede aproximarse mediante una forma funcional lineal o log-lineal. En la práctica, se usa frecuentemente el modelo log-lineal, dado que permite interpretar los coeficientes como efectos porcentuales:

$$\ln(P_i) = \beta_0 + \sum_{k=1}^{K} \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \qquad (2)$$

Donde $\ln(P_i)$es el logaritmo natural del precio o canon de arriendo, $\beta_0$ es el intercepto, $\beta_k$ los precios implícitos de las características $X_{ik}$, y $\varepsilon_i$el término de error.

El parámetro $\beta_k$ indica la variación porcentual del precio del arriendo ante un cambio marginal en la característica $X_k$, manteniendo las demás constantes:

$$\frac{\partial \ln(P_i)}{\partial X_{ik}} = \beta_k \qquad (3)$$

**Estadística y Econometría Espacial**

La estadística espacial tiene como propósito describir, explorar y visualizar patrones espaciales, permitiendo determinar si los valores de una variable se distribuyen de manera

aleatoria, agrupada o dispersa. Para un conjunto de observaciones espaciales $\{y_i\}$ en ubicaciones $i = 1,2, \dots, n$, la dependencia espacial implica que:

$$E[y_i \mid y_j] \neq E[y_i] \quad (4)$$

lo que significa que el valor esperado de $y_i$ depende de los valores de $y_j$ en sus vecindades espaciales ($j \in N(i)$).

**Econometría Espacial**

La econometría espacial, por su parte, amplía los modelos econométricos clásicos incorporando explícitamente las interdependencias espaciales en la variable dependiente o en los errores. De acuerdo con Cressie (1993), existen dos grandes fuentes de dependencia espacial:

i. Dependencia exógena o lag espacial, que ocurre cuando el valor de una variable en una unidad geográfica depende directamente de los valores de las unidades vecinas.

ii. Dependencia endógena o error espacial, que se manifiesta cuando los errores no son independientes, sino que muestran correlación espacial estructurada.

Un modelo de regresión lineal espacial puede expresarse como:

$$y = \rho W y + X\beta + \varepsilon, \ \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I) \quad (5)$$

Donde:

- $y$ es el vector de la variable dependiente
- $X$ es la matriz de variables explicativas

- $W$ es la matriz de pesos espaciales que refleja las relaciones de vecindad
- $\rho$ es el coeficiente de autocorrelación espacial
- $\beta$ representa los efectos de las variables independientes,
- $\varepsilon$ es el vector de errores aleatorios.

**Autocorrelación Espacial**

Describe el grado de dependencia o similitud entre los valores de una variable observados en ubicaciones próximas en el espacio (Anselin, 1995). En otras palabras, mide si los inmuebles cercanos presentan valores de arriendo similares o distintos, en comparación con los que se encuentran más alejados.

Si los valores cercanos tienden a ser similares existe autocorrelación positiva; si son opuestos se trata de autocorrelación negativa; y si no hay relación sistemática, la distribución se considera aleatoria (Getis, 2008).

**Heterogeneidad Espacial**

La heterogeneidad espacial hace referencia a la variación sistemática de las relaciones entre variables en diferentes ubicaciones geográficas, es decir que los parámetros del modelo pueden diferir según el lugar del espacio en el que se observe (Fotheringham, Brunsdon & Charlton, 2002).

## Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE)

El AEDE constituye la primera etapa del estudio de la estructura espacial de un fenómeno. Su objetivo es identificar patrones de asociación, concentración o dispersión presentes en los datos georreferenciados antes de la estimación de un modelo.

De acuerdo con Haining (2003), el AEDE permite detectar dependencia espacial, heterogeneidad local y valores atípicos, combinando métodos estadísticos y visualización cartográfica.

## Matriz de Pesos Espaciales

La matriz de pesos espaciales ($W$) constituye el elemento estructural fundamental en la econometría espacial, ya que representa la forma en que las unidades geográficas están conectadas o se influyen entre sí (Chasco, 2003).

La matriz de pesos espaciales $W = [w_{ij}]$ es una matriz cuadrada de dimensión $n \times n$, cuyos elementos $w_{ij}$indican el grado de interacción o influencia entre la unidad $i$ y la unidad $j$:

$$w_{ij} = \begin{cases} > 0, & si\ i\ y\ j\ son\ vecinos\ espaciales \\ 0, & en\ caso\ contrario \end{cases}$$

Por convención, los elementos de la diagonal principal son nulos ($w_{ii} = 0$), ya que una unidad no puede ser vecina de sí misma.

## Contrastes de Autocorrelación Espacial

Los contrastes de autocorrelación espacial, como los índices de Moran, Geary y los indicadores locales de asociación (LISA), se aplican posteriormente sobre la estructura definida por la matriz de pesos espaciales, con el propósito de validar la existencia de dependencia

espacial entre las observaciones. Estos estadísticos funcionan como pruebas de diagnóstico dentro del análisis exploratorio y del modelamiento econométrico, ya que permiten determinar si los residuos del modelo lineal presentan correlación espacial significativa.

### *Índice de Moran (I)*

Es el estadístico más común para medir la autocorrelación espacial global, propuesto por Moran (1950). Su fórmula es:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\Sigma_i \Sigma_j w_{ij}(y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Donde:

- $n$ es el número total de observaciones
- $w_{ij}$ son los elementos de la matriz de pesos espaciales $W$ que definen las relaciones de vecindad
- $y_i$ es el valor observado en la unidad $i$
- $\bar{y}$ es la media de la variable
- $S_0 = \Sigma_i \Sigma_j w_{ij}$, es decir, la suma de los pesos espaciales.

El valor esperado de $I$ bajo la hipótesis nula de aleatoriedad espacial es:

$$E[I] = -\frac{1}{n-1} \quad (7)$$

Interpretación:

- $I > E[I]$: existe autocorrelación positiva (valores similares se agrupan).
- $I < E[I]$: existe autocorrelación negativa (valores opuestos se agrupan).
- $I \approx E[I]$: ausencia de patrón espacial significativo.

***Geary's C***

El índice de Geary (C) es una alternativa al de Moran, más sensible a las diferencias locales entre observaciones contiguas. Su expresión es:

$$C = \frac{(n-1)}{2S_0} \frac{\Sigma_i \Sigma_j w_{ij}(y_i - y_j)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

En este caso:

- $C < 1$ indica autocorrelación positiva (valores similares entre vecinos).
- $C > 1$ sugiere autocorrelación negativa (vecinos con valores disímiles).
- $C = 1$ refleja distribución aleatoria.

***Test G de Getis y Ord***

El estadístico G de Getis y Ord (1992) constituye un indicador local alternativo para medir la autocorrelación espacial de una variable, especialmente útil para detectar concentraciones de valores extremos o agrupaciones de valores bajos dentro de un conjunto de datos geográficos.

A diferencia del índice de Moran o del LISA, que identifican similitudes en todo el rango de valores, el estadístico G local evalúa si las unidades espaciales próximas a una observación $i$presentan valores significativamente altos o bajos de la variable de interés (Getis & Ord, 1992)

El estadístico se define como:

$$G_i = \frac{\sum_j w_{ij} x_j}{\sum_j x_j} \quad (9)$$

Donde:

- $x_j$ es el valor observado de la variable en la unidad $j$;
- $w_{ij}$ es el elemento de la matriz de pesos espaciales que define la relación de vecindad entre las unidades $i$y $j$;
- $G_i$ mide el grado de concentración local de valores altos o bajos alrededor de la unidad $i$.

Para eliminar el efecto del valor propio $x_i$ y normalizar la escala, se utiliza la versión estandarizada del estadístico $G_i^*$:

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij}x_j - \bar{X}\sum_j w_{ij}}{S\sqrt{\frac{[n\sum_j w_{ij}^2 - (\sum_j w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (10)$$

Donde:

- $\bar{X}$ es la media de la variable
- $S$ es la desviación estándar
- $n$ es el número total de observaciones

El valor resultante de $G_i^*$se interpreta en términos del estadístico Z (z-score):

- $G_i^* > 0$ y significativo
- $G_i^* < 0$ y significativo
- No significativo (distribución aleatoria local).

### *Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA)*

Para identificar agrupamientos o valores atípicos locales, Anselin (1995) desarrolló los LISA (Local Indicators of Spatial Association), que descomponen el índice global de Moran en contribuciones individuales para cada observación:

$$I_i = (y_i - \bar{y}) \sum_j w_{ij}(y_j - \bar{y}) \tag{11}$$

Cada $I_i$ indica la fuerza y dirección de la autocorrelación espacial en torno a la unidad $i$. Su representación cartográfica permite distinguir cuatro tipos de clústeres:

i. Alto–Alto (High–High): Zonas con valores altos rodeadas de valores altos.
ii. Bajo–Bajo (Low–Low): Zonas con valores bajos rodeadas de valores bajos.
iii. Alto–Bajo (High–Low): Valores altos rodeados de valores bajos.
iv. Bajo–Alto (Low–High): Valores bajos rodeados de valores altos.

## Modelos de Regresión Lineal

### *Modelo de Regresión Lineal (OLS)*

El modelo lineal ordinario se expresa de la siguiente manera:

$$y = X\beta + \varepsilon \tag{12}$$

Donde:

- $y$ es el vector $n \times 1$ de la variable dependiente
- $X$ es la matriz $n \times k$ de variables explicativas
- $\beta$ es el vector $k \times 1$ de parámetros desconocidos;

- $\varepsilon$ es el vector de errores aleatorios, con $E[\varepsilon] = 0$y $Var(\varepsilon) = \sigma^2 I_n$.

El modelo OLS supone que las observaciones son independientes e idénticamente distribuidas. Si existe autocorrelación espacial entre los errores o entre las observaciones, los estimadores $\hat{\beta}$ siguen siendo insesgados, pero pierden eficiencia y los errores estándar se vuelven incorrectos, lo que afecta la inferencia estadística.

**Modelos de Regresión Espacial**

Los modelos espaciales incorporan explícitamente la interacción entre observaciones vecinas mediante la matriz de pesos espaciales $W$, permitiendo capturar el efecto de vecindad o difusión en el espacio. Su fórmula se expresa como:

$$y = \rho W y + X\beta + WX\theta + u \quad (13)$$

$$u = \lambda W u + \varepsilon$$

Donde:

- $y$ es el vector de la variable dependiente
- $Wy$ es el retardo espacial de la variable dependiente
- $X$ es la matriz de variables independientes no rezagadas espacialmente.
- $\beta$ es el vector de parámetros desconocidos
- $\theta$ es la matriz de variables independientes rezagadas espacialmente.
- $\lambda$ y $\rho$ son los parámetros que miden el grado de dependencia espacial
- $\varepsilon$ es el vector de errores aleatorios

Entre los modelos más conocidos para el estudio del comportamiento de variables con distribución espacial son:

- Modelo Autorregresivo Espacial (SAR): El modelo SAR asume que el valor de la variable dependiente en una unidad espacial depende directamente de los valores en las unidades vecinas:

$$y = \rho W y + X\beta + \varepsilon \quad (14)$$

donde:

  - $\rho$ es el coeficiente de dependencia espacial;
  - $Wy$ representa el promedio ponderado de los valores vecinos de la variable dependiente

- Modelo de Error Espacial (SEM): La dependencia no ocurre en la variable dependiente, sino en los errores del modelo:

$$y = X\beta + u, u = \lambda W u + \xi \quad (15)$$

donde:

  - $\lambda$ mide la autocorrelación espacial de los errores;
  - $\xi$ es un vector de perturbaciones independientes con varianza constante.

- Modelo Durbin Espacial (SDM): Generaliza al SAR incorporando los retardos espaciales de las variables explicativas:

$$y = \rho W y + X\beta + WX\theta + \varepsilon \quad (16)$$

Donde:

- $WX\theta$ representa los efectos indirectos de las características de los vecinos.

- Modelo espacial rezagado en X (SLX): Asume que la variable dependiente no presenta autocorrelación espacial directa, pero sí lo hacen las variables explicativas.

$$y = X\beta + WX\theta + \varepsilon \quad (17)$$

Donde:

- $WX\theta$ representa el retardo espacial de las variables explicativas, es decir, el efecto que las variables de las zonas vecinas ejercen sobre el valor local
- $\theta$ mide la influencia espacial indirecta de los atributos de los vecinos

- Modelo Autorregresivo Espacial con Error Autorregresivo (SARAR): combina simultáneamente la autocorrelación en la variable dependiente y en los errores. Es uno de los modelos más generales y se expresa como:

$$y = \rho Wy + X\beta + u, u = \lambda Wu + \xi \quad (18)$$

Donde:

- $\rho$ mide la dependencia espacial directa de la variable dependiente
- $\lambda$ mide la dependencia espacial de los errores
- $\xi$ Son perturbaciones independientes y homocedásticas.

- Modelo de error espacial de Durbin (SDEM): Es una extensión del modelo SEM que incluye retardos espaciales en las variables explicativas, pero no en la dependiente. Se formula como:

$$y = X\beta + WX\theta + u, u = \lambda Wu + \xi \quad (19)$$

Donde:

  - $WX\theta$ representa los efectos indirectos de las variables explicativas vecinas
  - $u = \lambda Wu + \xi$ captura la autocorrelación espacial de los errores.

- Modelo general de anidación (GNS): Este modelo es la forma más completa de especificación en la familia de modelos espaciales lineales, ya que integra simultáneamente los efectos autorregresivos en la variable dependiente, en las explicativas y en los errores.

Su ecuación es:

$$y = \rho Wy + X\beta + WX\theta + u, u = \lambda Wu + \xi \quad (20)$$

Donde:

  - $\rho$ capta la autocorrelación en la variable dependiente
  - $\theta$ capta los efectos espaciales indirectos de las variables explicativas
  - $\lambda$ representa la autocorrelación en los errores.

**Modelo de Regresión Geográficamente Ponderada (GWR)**

El modelo GWR extiende los modelos anteriores al permitir que los coeficientes de regresión varíen localmente, captando la heterogeneidad espacial de los parámetros (Fotheringham, Brunsdon & Charlton, 2002).

Su fórmula general:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^{K} \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \qquad (21)$$

Donde $(u_i, v_i)$ son las coordenadas espaciales de la observación $i$, y $\beta_k(u_i, v_i)$son los coeficientes locales estimados para cada punto.

El modelo utiliza una función kernel que asigna mayor peso a las observaciones cercanas:

$$w_{ij} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right] \qquad (22)$$

## Metodología

La identificación del problema surgió a partir de la necesidad de optimizar los procesos relacionados con la estimación de rentas en administración por parte de la SAE. Hasta el momento, dichos estimados se realizaban de manera manual, lo cual implicaba un mayor consumo de tiempo y recursos, dificultando la eficiencia en la toma de decisiones. Bajo esta perspectiva, se hizo evidente la importancia de desarrollar un modelo automatizado y soportado en técnicas de análisis espacial, que permitiera agilizar los cálculos y mejorar la precisión de los resultados.

Para delimitar el objeto de estudio, se escogió la ciudad de Bogotá, dado que es la segunda ciudad con mayor cantidad de predios administrados por la entidad; para el año 2024, la SAE habia gestionado alrededor de 37.000 predios en el país, de los cuales cerca de 3900 correspondían a la ciudad de Bogotá y específicamente el 20% de ellos correspondían a apartamentos. Teniendo claro que por la homogeneidad que representa un apartamento y no una vivienda NPH se optó por utilizar el modelo para este tipo de inmueble; posteriormente, se seleccionó la localidad de Usaquén como caso de análisis, esta decisión respondió, por un lado, a la correspondencia y disponibilidad de datos, y por otro, a las características socioeconómicas del territorio, ya que al tratarse de bienes incautados, una proporción significativa de los apartamentos se concentra en estratos altos, condición que coincide con el perfil socioeconómico de Usaquén al ser la localidad que concentra una mayor cantidad de predios de estrato 5 y 6.

Una vez definida el área de estudio, la dirección de Tecnologías y Sistemas de Informacion facilitó una base de datos consolidada por medio de técnicas de Web Scrapping, que contenía la informacion física de apartamentos en arriendo recolectada el 12 de octubre del 2024 a partir de tres plataformas inmobiliarias: Finca Raíz, Metro Cuadrado y Cien cuadras. Esta base fue depurada y complementada con procesos de georreferenciación, de modo que pudiera aplicarse de manera coherente al contexto de Usaquén.

Para la complementación, al tenerla georreferenciada se procedió a cruzar los puntos (apartamentos) con diferentes capas temáticas obtenidas en la Infraestructura de Datos Espaciales de Bogotá (Ideca). Este procedimiento se llevó a cabo mediante la herramienta de *buffer* en el software QGIS, lo que permitió establecer áreas de influencia alrededor de cada apartamento en función de distintas variables territoriales: movilidad, educación, dotación pública y ocio.

De acuerdo con lo mencionado en el apartado de materiales y descripción de variables, el radio del *buffer* no se definió de manera uniforme, sino que se estableció una distancia específica para cada capa en función de la naturaleza del servicio o infraestructura representada. Por ejemplo, la proximidad a vías principales se evaluó con un rango distinto al utilizado para instituciones educativas o espacios recreativos, de modo que cada variable conservara coherencia con su impacto real en la valorización de los predios.

El resultado de este procedimiento fue la conversión de las capas en variables tipo *dummy*. De esta manera, cuando un apartamento quedaba dentro del área de influencia de una capa determinada, se le asignaba el valor de 1, mientras que aquellos que no presentaban cruce con el *buffer* recibían el valor de 0. Esta codificación binaria permitió integrar al modelo econométrico información espacial en relación con factores del entorno urbano.

Enseguida se realizó la respectiva depuración de los datos que desde las páginas mencionadas no tenían coherencia, además de quitar el valor de la administración del valor del arriendo para luego realizar un primer modelo. Sin embargo, al ejecutarlo existían variables con un comportamiento atípico a como se pensaba desde lo técnico que se debían comportar, por lo que se procedió a realizar una visita de campo con el propósito de observar directamente cuáles variables incidían en el valor del arriendo. En esta fase, además de identificar variables determinantes en el precio, se constató que algunas que en principio parecían relevantes no tenían un impacto significativo en el contexto real, por lo que se terminó de depurar la base de datos.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis exploratorio de carácter tradicional y espacial, con el propósito de observar el comportamiento de los datos. Se evaluó la presencia de autocorrelación espacial tanto global como local, considerando la variable dependiente y las independientes. Con base en estos resultados, se procedió a la construcción de diferentes

modelos espaciales y, finalmente, a la selección del modelo más adecuado, acompañado de su interpretación para medir el impacto de las variables en el valor de los arriendos.

Asimismo, se realizó la Regresión Geográficamente Ponderada, la cual permite obtener una perspectiva local de la problemática y conocer en qué grado varían las relaciones espaciales entre la variable *Arriendo* y cada una de las variables explicativas.

Finalmente, se generaron los impactos producidos por el modelo que permiten exponer un diagnóstico del valor de los arriendos en la localidad de Usaquén para el periodo seleccionado a partir de las variables determinantes, para proceder a la comparación con el método manual de estimados de renta y asi generar las recomendaciones correspondientes con la entidad.

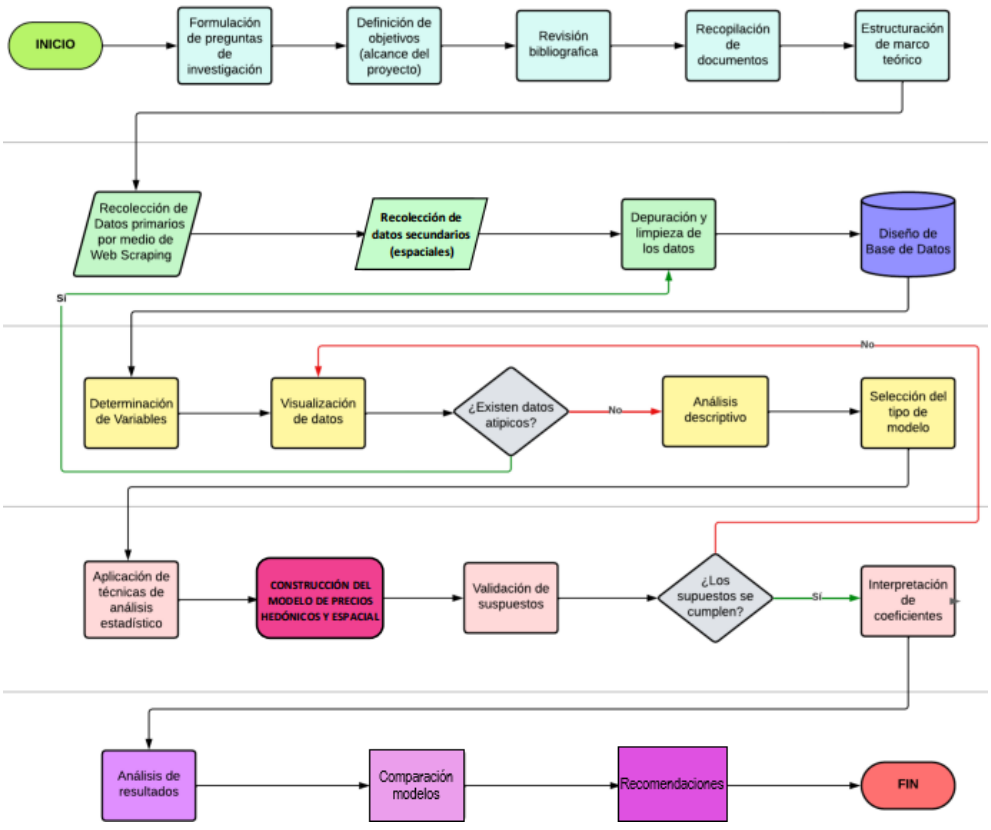



*Ilustración 1: Diagrama de flujo Metodología*

*Fuente: Elaboración propia*

## Zona de estudio

El área geográfica analizada corresponde a la localidad de Usaquén ubicada en la capital colombiana Bogotá y perteneciente al departamento de Cundinamarca. Inicialmente, se seleccionó a partir de un criterio de los datos, a diferencia de viviendas unifamiliares o NPH, los apartamentos presentan mayor homogeneidad constructiva y tipológica, lo que reduce ruido en las variables físicas y facilita la comparabilidad. Dado lo anterior, la unidad de análisis debía situarse en una ciudad con suficiente inventario administrado por la SAE y con incidencia en estratos altos (característica asociada a bienes extintos), condiciones que se cumplen en Bogotá.

Dentro de Bogotá, se optó por delimitar la zona por tres razones metodológicas:

(i) La disponibilidad y correspondencia de datos

(ii) El perfil socioeconómico del territorio, con una presencia significativa de estratos medio alto y alto, lo que es congruente con los bienes incautados.

(iii) La heterogeneidad intraciudad: el comportamiento de los estratos socioeconómicos no es el mismo en todas las localidades asi sea el mismo, por lo que la delimitación acotada reduce sesgos por composición territorial.

Para contextualizar el territorio, Usaquén se caracteriza por concentrar una población amplia y una oferta de servicios que supera el promedio en distintos ámbitos. De acuerdo con el Observatorio de Salud de Bogotá, para el año 2024 la localidad registraba una población estimada de 594.611 habitantes, lo que confirma su relevancia dentro de la ciudad (Observatorio de Salud de Bogotá – SaluData, 2024). Además, cumple un papel estratégico en la provisión de servicios especializados en el norte de Bogotá, aspectos que se ven reflejados en su atractivo residencial. Por otro lado, diversos perfiles económicos evidencian la alta participación de estratos medios y altos en su inventario de predios, condición que hace de

Usaquén un escenario especialmente pertinente para el análisis del mercado de arriendo de apartamentos.

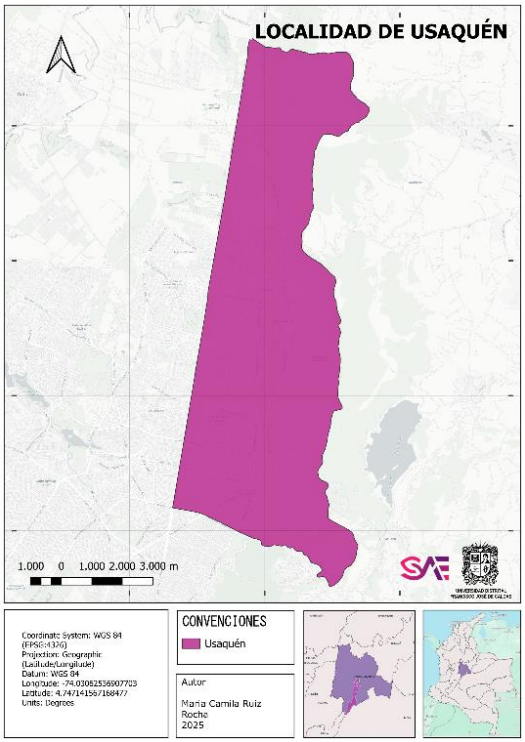



*Ilustración 2: Localidad de Usaquén*

*Fuente: Elaboración propia*

## Materiales

La base inicial fue facilitada por la Dirección de Tecnologías y Sistemas de Información de la SAE, que recopiló mediante técnicas de *web scraping* datos publicados en octubre del 2024 por los portales inmobiliarios: Finca Raíz, Metrocuadrado y Ciencuadras.

Si bien los portales inmobiliarios permiten capturar información masiva y reciente del mercado, sus datos no representan el universo completo de los arriendos o ventas de bienes inmuebles, ni están libres de sesgos. En primer lugar, existe un sesgo de selección, ya que no todos los propietarios o agentes publican sus inmuebles en línea dejando por fuera canales tradicionales (Hernández-García, 2023; Ramírez, 2012).

Adicionalmente, se ha documentado que los listados presentan omisiones y errores en atributos claves como área, edad o características de los inmuebles, lo cual limita su uso directo (Gordon, Rutherford & Yavas, 2020).

En este contexto, resulta claro que una fracción relevante del mercado de arriendo sigue operando mediante canales informales o no digitalizados, lo que genera subestimación de la oferta real en las bases obtenidas solo de portales. Por lo tanto, la base construida en este estudio se depuró y complementó, y sus resultados se interpretan reconociendo estas limitaciones.

En relación con la información, se contaba inicialmente con el total de los apartamentos en arriendo para el periodo de octubre del 2024 en un archivo Excel, que posteriormente fue sometida a un proceso de depuración donde se eliminaron registros duplicados, inconsistentes o incompletos, y se ajustaron variables clave para lograr una mayor coherencia entre los datos, obteniendo así un total de 1491 datos.

Las variables que se eligieron de la base inicial se exponen a continuación

*Tabla 1 : Variables de la base de datos suministrada por la SAE.*

| Variable | Descripción |
|---|---|
| Arriendo | Valor del canon mensual de arrendamiento en pesos colombianos |
| Antigüedad | Edad de la construcción en años |
| Habitación | Número de habitaciones |
| Parqueadero | Número de parqueaderos |
| Estrato | Clasificación socioeconómica |
| Área construida | Área construida en metros cuadrados |
| Baños | Número de baños |
| Latitud | Coordenada geográfica |
| Longitud | Coordenada geográfica |

*Fuente: Finca Raíz, Metrocuadrado, Ciencuadras*

Al tratarse de un modelo de precios hedónicos se debía complementar la base de datos con el componente espacial, para ello en primer lugar se transformó el archivo Excel a formato Shapefile para realizar el respectivo cruce con la integración 8 capas temáticas de la Ideca y de ESRI las cuales se presentan en la Tabla 2.

*Tabla 2: Capas espaciales*

| Capas | Fuente | Entidad |
|---|---|---|
| Cicloruta. Bogotá D.C | Datos Abiertos Bogotá (2021) | Secretaría Distrital de Movilidad |
| Malla Vial Integral. Bogotá D.C | Datos Abiertos Bogotá (2017) | Secretaría Distrital de Movilidad |
| Colegios. Bogotá D.C. | Datos Abiertos Bogotá (2024) | Secretaría de Educación |
| Sedes Educativas | ESRI (2013) | Secretaría de Educación |
| Sistema Distrital de Parques y Escenarios Públicos Deportivos | Datos Abiertos Bogotá (2020) | Instituto Distrital de Recreación y Deporte |
| Instituciones Prestadoras de Salud Bogotá | Datos Abiertos Bogotá (2024) | Secretaría Distrital de Salud |
| Dotacional publico | Datos Abiertos Bogotá (2020) | Instituto Distrital de Recreación y Deporte |
| Comandos de Atención Inmediata (CAI) | Datos Abiertos Bogotá (2025) | Secretaría Seguridad, Convivencia y Justicia |

*Fuente: Datos abiertos Bogotá*

Mediante la herramienta de *buffer* en el software QGIS, se construyeron áreas de influencia específicas para cada capa, de esta manera, la información espacial se transformó en variables dummy, asignando un valor de 1 a los apartamentos que se encontraban dentro del radio de influencia y 0 en caso contrario. Posteriormente fueron agrupadas en cuatro categorías, con el objetivo de reducir la colinealidad y sintetizar factores del entorno urbano que inciden en el valor del arriendo; el coeficiente resultante refleja el efecto promedio de cada infraestructura adicional dentro de la categoría.

- Movilidad, construida a partir de la cercanía a ciclorrutas y vías principales.
- Educación, calculada con base en la proximidad a colegios y sedes educativas.
- Dotación pública, integrada con la ubicación de parques, instituciones prestadoras de salud (IPS) y demás dotaciones públicas.
- Seguridad, definida a partir de la cercanía a Comandos de Atención Inmediata (CAI).

*Tabla 3: Agrupación de capas por categoría*

| Variable agrupada | Capas | Variable |
|---|---|---|
| Movilidad | Cicloruta. Bogotá D.C | CicloRuta |
| | Malla Vial Integral. Bogotá D.C | Vias |
| Educación | Colegios. Bogotá D.C. Sedes Educativas | Colegios CentroEdu |
| Dotación pública | Sistema Distrital de Parques y Escenarios Públicos Deportivos | Parques |
| | Instituciones Prestadoras de Salud Bogotá | Ips |
| | Dotacional publico | DotacionPu |
| Seguridad | Comandos de Atención Inmediata (CAI) | CAI |

*Fuente: Datos abiertos Bogotá*

## *Estimación de Radio de Accesibilidad por Categorías*

### Movilidad.

#### *Cicloruta.*

Con la capa Cicloruta. Bogotá D.C se definió un *buffer* de 400 m como radio de accesibilidad peatonal, hacia la infraestructura ciclista, este rango es análogo al principio de los 5 minutos en la planificación urbana que consiste en la idea de que las personas deberían acceder a servicios y comodidades a una distancia aproximada de 400 metros, para fomentar la movilidad sostenible y reducir la dependencia del automóvil y con lineamientos de transporte urbano que usan 400–800 m como umbrales de captura peatonal (Daniels & Mulley, 2013; Tennøy, 2022). Además, los efectos de ciclovías reportan impactos en precios de vivienda dentro de radios del orden de menores a 500 m, que pueden variar de acuerdo con el contexto vial (Headwaters Economics, s. f.; Doucet, 2020).

### *Vías.*

Utilizando la Malla Vial Integral. Bogotá D.C, se aplicó un *buffer* de 100–300 m, debido a que la proximidad inmediata a ejes arteriales mejora accesibilidad y conectividad (Aziz, 2023); pero la vecindad muy cercana también introduce ruido y contaminación que deprimen precios (Kim et al., 2007; Guijarro et al., 2019).

## Educación.

### *Colegios.*

Para los colegios se estableció un *buffer* de 500 m, considerado un rango óptimo para las familias con hijos en edad escolar, teniendo en cuenta el tiempo en llegar a la academia. En el contexto urbano latinoamericano la proximidad a instituciones educativas básicas incide de forma positiva en el valor del arriendo dentro de este rango (Rodríguez & Mojica, 2009).

### *Sedes educativas.*

Con la capa de sedes educativas se aplicó igualmente un *buffer* de 500 m, con base en la influencia de la proximidad a universidades en la demanda de arrendamiento, particularmente por parte de estudiantes (Debrezion, Pels, & Rietveld, 2007; Li & Joh, 2017).

**Dotación pública.**

***Parques.***

Se adoptó un *buffer* de 500 m para capturar el efecto de accesibilidad peatonal a áreas verdes y su capitalización en el mercado de arriendo. La proximidad a parques se asocia con primas de valor, no solamente dentro de radios cortos, sino tambien del tamaño y la calidad del parque (Chen, 2022; Li, 2024; Bottero et al., 2022).

***IPS.***

Se empleó un *buffer* de 500 m con el fin de captar accesibilidad efectiva a servicios médicos de primer contacto, coherente el principio de los 5 minutos en la planificación urbana y la función de las IPS como prestadoras directas de servicios de salud en Bogotá (Secretaría Distrital de Salud–IDECA, 2024).

***Dotacional público.***

Además de las capas parques e IPS se utilizó una capa de dotación pública consolidada, proveniente de Datos abiertos Bogotá, que integra diferentes equipamientos urbanos de carácter público y comunitario, como bibliotecas, centros culturales, equipamientos deportivos y sociales. Al igual que las demás la distancia radial fue de 500 m; esta variable busca complementar el análisis espacial capturando la accesibilidad a servicios públicos en un sentido más amplio, ya que la proximidad a equipamientos urbanos de uso colectivo puede mejorar la calidad de vida y, en consecuencia, reflejarse en los precios de arriendo (UN-Habitat, 2020; Talen, 2018).

**Seguridad.**

***CAI.***

La proximidad a instalaciones policiales puede influir en el valor de arriendo en cuanto a la percepción de seguridad, ya que muestra que mayor presencia/visibilidad policial reduce delitos y puede mejorar resultados urbanos locales (Blesse & Diegmann, 2022). En este estudio se adoptó un *buffer* de 500 m para el respectivo cruce.

***Descripción de las variables***

- *Arriendo:* Es la variable endógena del modelo, tipo continua, corresponde al canon mensual de arrendamiento de los apartamentos en la localidad de Usaquén sin incluir el valor de la administración, expresado en pesos colombianos.
- *Antigüedad*: Variable discreta que expresa la edad del apartamento en años. Su inclusión permite capturar posibles efectos de depreciación por el tiempo de construcción, así como valorizaciones ligadas a construcciones nuevas.
- *Habitación*: Variable discreta que indica el número de cuartos del apartamento, asociada con la capacidad habitacional de la vivienda.
- *Parqueadero*: Variable discreta que registra la cantidad de parqueaderos incluidos en el inmueble.
- *Estrato*: Variable discreta que corresponde a la clasificación socioeconómica oficial establecida en Bogotá, utilizada como aproximación a la capacidad de pago de los hogares y al nivel de servicios urbanos disponibles.
- *Área construida*: Variable continua que representa la superficie del apartamento en metros cuadrados.
- *Baños*: Variable discreta que recoge el número total de baños en cada apartamento.

- *Latitud*: Variable continua que representa la coordenada geográfica en el eje norte-sur.
- *Longitud*: Variable continua que representa la coordenada geográfica en el eje este-oeste.
- *Movilidad*: Variable dicotómica construida a partir de la proximidad a ciclorrutas y vías principales. Las ciclorrutas se definen como calzadas destinadas de manera permanente a la circulación de bicicletas, ubicadas en andenes, separadores o segregadas de la calzada vehicular, siempre señalizadas y delimitadas. Por su parte, las vías principales corresponden al conjunto de líneas que definen los ejes viales de la ciudad, con atributos de nomenclatura, sentido del tránsito y clasificación según el POT. Dentro de esta clasificación se encuentra la malla vial arterial principal, destinada a tráficos de media y larga distancia, y la malla vial arterial complementaria, que articula los subsistemas de la red urbana.
- *Educación*: Variable dicotómica que agrupa la cercanía a colegios y sedes educativas. Estos equipamientos se encuentran consolidados desde el nivel preescolar hasta la educación superior.
- *Dotación pública*: Variable dicotómica que integra la proximidad a equipamientos urbanos de carácter público y comunitario, como bibliotecas, centros culturales, parques, equipamientos deportivos y sociales; estos espacios se organizan en red para asegurar cobertura urbana. Asimismo, contempla la cercanía a IPS, que pueden ser públicas, privadas o de economía mixta, habilitadas para prestar servicios parciales o totales en el marco del Plan Obligatorio de Salud (POS).
- *Seguridad*: Variable dicotómica que corresponde a la proximidad a Centros de Atención Inmediata (CAI). Estos equipamientos funcionan como unidades policiales de orden menor con personal y recursos asignados a un mando, en coordinación con la comunidad, para dar respuesta a problemáticas de seguridad y promover la convivencia.

***Softwares utilizados***

*R Studio v4.3.3:* Se trata de un entorno de programación de código abierto especializado en análisis estadístico y visualización de datos, que trabaja con el lenguaje R. Este software ofrece una consola interactiva, un editor de sintaxis y herramientas de trazado, depuración y administración del espacio de trabajo. Gracias a su flexibilidad, puede ampliarse fácilmente mediante librerías y funciones definidas por el usuario. En este trabajo se utilizó para la ejecución de procesos clave como el cálculo de matrices de pesos espaciales, el análisis exploratorio de datos, la estimación de modelos clásicos y espaciales, así como la interpretación estadística de los resultados y mapas generados.

*QGis:* Es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto que permite visualizar, editar, analizar y gestionar datos espaciales. Ofrece múltiples herramientas para crear mapas temáticos, realizar operaciones de geoprocesamiento y trabajar con gran variedad de formatos de datos georreferenciados. Se empleó para integrar y cruzar capas de información provenientes de Ideca y de la base de datos construida mediante web scraping, mediante buffers. Asimismo, se utilizó para producir algunas salidas gráficas del análisis.

## Análisis

Esta sección corresponde al examen y descripción de los datos por medio de la estadística descriptiva y la estadística espacial desde un enfoque cuantitativo. Para la organización y desarrollo del análisis se tomó como referencia la estructura metodológica propuesta en (Heredia Barbosa & Cifuentes Vásquez, 2024) cuyo trabajo aborda un estudio sobre factores determinantes del precio del arriendo en Medellín.

A lo largo del capítulo se presenta, en primer lugar, patrones básicos de distribución en el mercado de arriendos mediante un análisis exploratorio clásico por estratos

socioeconómicos. Posteriormente, se incorporan técnicas de análisis espacial, a través de las cuales es posible inferir el comportamiento geográfico de los arriendos y explorar su relación con variables urbanas y socioeconómicas, tales como movilidad, educación, dotación pública y seguridad.

No solo se busca describir la información disponible, sino también identificar posibles correlaciones espaciales que den cuenta de cómo los atributos de localización y proximidad a equipamientos urbanos inciden directamente a la formación del valor de los arriendos. De esta manera, se justifica la aplicación de modelos econométricos espaciales que complementen el análisis clásico y permitan una interpretación más precisa.

## Analisis exploratorio clásico

En primera instancia se planteó realizar un análisis descriptivo general de las variables incluidas en el modelo. Sin embargo, al examinar los resultados se evidenció un alto nivel de sesgo debido a la heterogeneidad de la muestra, los valores presentan comportamientos diferentes según el estrato socioeconómico de las viviendas.

Por esta razón, se optó por desarrollar un análisis clásico diferenciado por estrato socioeconómico, lo que permite observar de manera más clara las particularidades de cada segmento socioeconómico y evitar que las medidas de tendencia central y dispersión quedaran distorsionadas por la mezcla de grupos.

### *Estrato Cuatro*

El estrato 4 cuenta con 423 observaciones; se observa un mercado de arriendo moderado, con valores concentrados en torno a $1,8 millones, aunque con presencia de casos extremos que alcanzan cifras considerablemente más altas. La mayoría de los apartamentos son

de tamaño medio, entre 56 y 85 m², con 3 habitaciones y al menos un parqueadero, indicando que alrededor del 90% de las viviendas cuentan con espacio de estacionamiento.

Referente a la antigüedad, el promedio es de 13,9 años; un 25% de las viviendas supera los 23 años, lo que muestra coexistencia de edificaciones nuevas y antiguas.

*Tabla 4: Análisis de correlaciones estrato 4*

| Variable | Arriendo | Área construida | Antigüedad | Habitación | Parqueadero |
|---|---|---|---|---|---|
| Arriendo | 1 | 0,552434987 | -0,14463129 | 0,194646022 | 0,464402703 |
| Área construida | 0,552434987 | 1 | 0,171442081 | 0,678683709 | 0,556696032 |
| Antigüedad | -0,144631289 | 0,171442081 | 1 | 0,263129591 | 0,083401508 |
| Habitación | 0,194646022 | 0,678683709 | 0,263129591 | 1 | 0,28811772 |
| Parqueadero | 0,464402703 | 0,556696032 | 0,083401508 | 0,28811772 | 1 |

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 4 se observa el análisis de correlaciones que indica que el valor del arriendo está fuertemente relacionado con el área construida (r = 0,55), el número de parqueaderos (r = 0,46) y el número de habitaciones (r = 0,19). La antigüedad muestra una relación negativa (-0,14), lo que sugiere que las viviendas más antiguas tienden a tener arriendos menores, aunque la magnitud del efecto es baja.

### *Estrato Cinco*

El estrato 5 presenta 382 observaciones, donde observamos que el arriendo tiene valores más altos y dispersos que en el estrato cuatro, la mediana es de $3 millones, con un rango intercuartílico entre $2.154.500 y $4.300.000, lo que refleja una mayor amplitud de precios y presencia de viviendas de alto valor que llegan hasta $12.000.000.

Los apartamentos en este estrato son considerablemente más grandes ya que el 25% supera los 130 m² y el promedio es de 107 m². La antigüedad común es de 12 años, con variaciones que van desde edificaciones nuevas hasta inmuebles de tres décadas.

En cuanto a características internas, los apartamentos tienen alrededor de 2 a 3 habitaciones y 2 parqueaderos, lo que muestra un acceso más extendido a espacios de estacionamiento en comparación con el estrato cuatro.

*Tabla 5: Análisis de correlaciones estrato 5*

| Variable | Arriendo | Área construida | Antigüedad | Habitación | Parqueadero |
|---|---|---|---|---|---|
| Arriendo | 1 | 0,776870627 | 0,065138339 | 0,522133239 | 0,618870679 |
| Área construida | 0,776870627 | 1 | 0,331711952 | 0,746997912 | 0,708453752 |
| Antigüedad | 0,065138339 | 0,331711952 | 1 | 0,366867981 | 0,165725 |
| Habitación | 0,522133239 | 0,746997912 | 0,366867981 | 1 | 0,567529958 |
| Parqueadero | 0,618870679 | 0,708453752 | 0,165725 | 0,567529958 | 1 |

*Fuente: Elaboración propia*

En la Tabla 5 se evidencia que el valor del arriendo se asocia fuertemente con el área construida (r = 0,77), seguido del número de parqueaderos (r = 0,61) y habitaciones (r = 0,52). En leste estrato la antigüedad deja de ser negativa, pero es débil (r = 0,06), lo que sugiere que en este estrato no constituye un factor determinante en la fijación del precio.

### *Estrato Seis*

En el estrato 6 se analizaron 685 observaciones, caracterizadas por los valores de arriendo más altos de toda la muestra. La mediana se ubica en $4.4 millones, con un rango intercuartílico que va desde $2.832.000 hasta $6.656.300, y casos extremos que alcanzan los $15 millones. Esto refleja un mercado altamente heterogéneo y propio de apartamentos con mejores equipamientos.

Respecto a el área, los apartamentos tienen una superficie mayor, el área construida alcanza una mediana de 142 m², y un 25% de las unidades supera los 212 m², acerca de las características internas, predominan 3 habitaciones y 2 parqueaderos.

*Tabla 6: Análisis de correlaciones estrato 6*

| Variable | Arriendo | Área construida | Antigüedad | Habitación | Parqueadero |
|---|---|---|---|---|---|
| Arriendo | 1 | 0,795356265 | 0,057918569 | 0,557265651 | 0,628230107 |
| Área construida | 0,795356265 | 1 | 0,237232892 | 0,771166349 | 0,721089973 |
| Antigüedad | 0,057918569 | 0,237232892 | 1 | 0,321247754 | 0,084323688 |
| Habitación | 0,557265651 | 0,771166349 | 0,321247754 | 1 | 0,574168443 |
| Parqueadero | 0,628230107 | 0,721089973 | 0,084323688 | 0,574168443 | 1 |

*Fuente: Elaboración propia*

El análisis de correlaciones presentado en la Tabla 6 indica que el valor del arriendo se relaciona fuertemente con el área construida (r = 0,79), seguido del número de parqueaderos (r = 0,62) y habitaciones (r = 0,55) y de la misma manera que en el estrato cinco, la antigüedad sigue siendo débil (r = 0,05).

### *Comparación entre estratos 4, 5 y 6*

Como era de esperarse, los valores de arriendo muestran un patrón ascendente, en el estrato 4 predominan precios aproximados de $1,6 millones, en el estrato 5 el valor asciende a $3 millones y en el estrato 6 supera los $4,4 millones, con una dispersión mayor y casos que alcanzan los $15 millones. Esto refleja un salto progresivo en los niveles de arriendo a medida que se asciende el estrato socioeconómico.

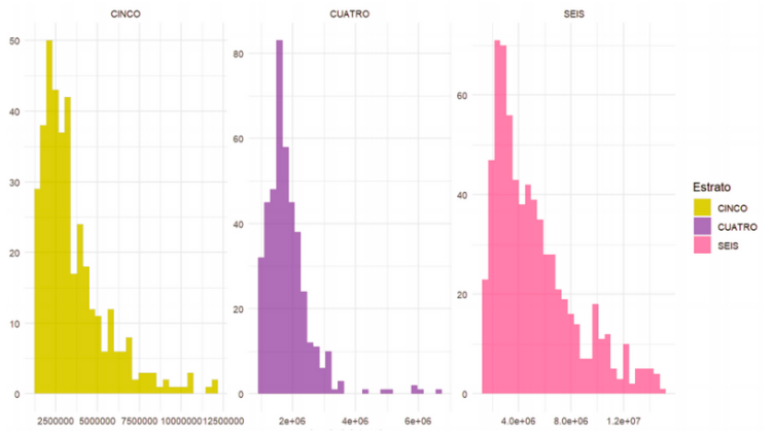



*Ilustración 3: Comportamiento del arriendo en estratos 4, 5 y 6*

*Fuente: Elaboración propia*

Con relación al tamaño de los apartamentos, se evidencia un crecimiento notable. En el estrato 4 la mayoría de los apartamentos se concentra entre 55 y 85 m², en el estrato 5 la mediana aumenta a 93 m², mientras que en el estrato 6 la mediana alcanza los 142 m². La progresión confirma que el área construida es el atributo más valorado en todos los estratos.

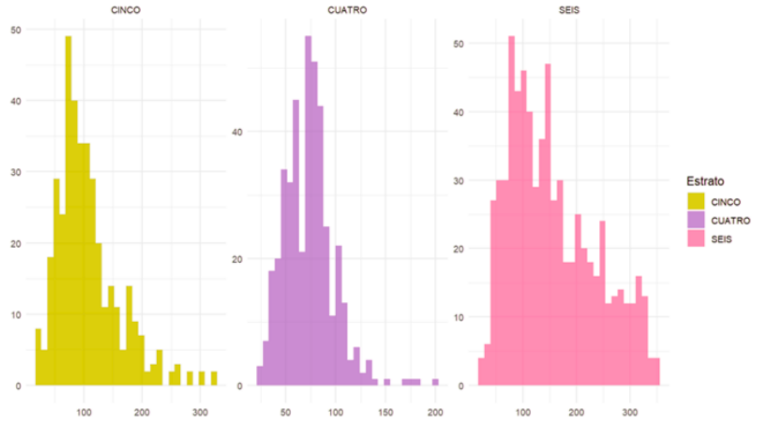



*Ilustración 4: Histograma del área construida en estratos 4, 5 y 6*

*Fuente: Elaboración propia*

Respecto a las comodidades internas, se observa un cambio especialmente en el acceso a parqueaderos. En el estrato 4 predomina la disponibilidad de un parqueadero, en el estrato 5 lo más común es contar con dos, y en el estrato 6 la mayoría disponen de al menos dos y hasta cuatro.

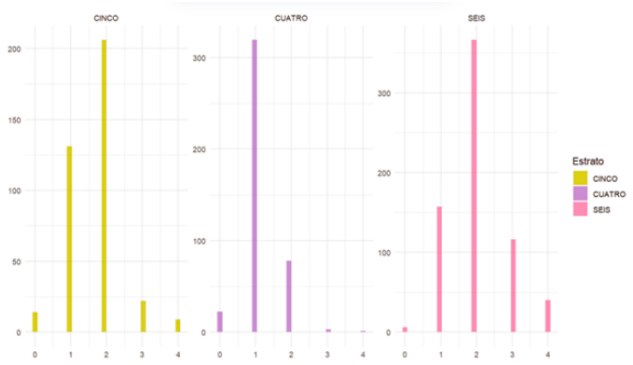



*Ilustración 5: Histograma de parqueaderos en estratos 4, 5 y 6*

*Fuente: Elaboración propia*

**Análisis exploratorio de datos espaciales**

El Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE) permite identificar patrones de concentración, heterogeneidad y autocorrelación en las variables; este análisis es complementario ya que incorpora la dimensión espacial, reconociendo que las observaciones no son independientes, sino que pueden estar relacionadas con su localización en el territorio (Anselin, 1995).

En el presente trabajo, el AEDE se aplica para evaluar la distribución espacial de los valores de arriendo en la localidad de Usaquén, Bogotá, lo que posibilita detectar áreas con comportamientos diferenciados para posteriormente, fundamentar la aplicación de modelos econométricos espaciales.

Con el fin de explorar la distribución espacial de los valores de arriendo en la localidad de Usaquén, se elaboró un mapa de cuantiles, que clasifica los inmuebles en cinco grupos de acuerdo con su valor de arrendamiento mensual. Esta metodología permite dividir los datos en intervalos que contienen la misma proporción de observaciones; el mapa mostrado en la figura evidencia que los arriendos más bajos hasta aproximadamente $1,6 millones se concentran en la parte norte y noroccidental de la localidad, mientras que los valores intermedios se ubican en sectores de transición hacia la zona central. Por su parte, los arriendos más altos superiores a $5,5 millones se concentran principalmente en la franja sur de Usaquén, lo que sugiere la existencia de áreas con fuerte diferenciación espacial en el arriendo de apartamentos.

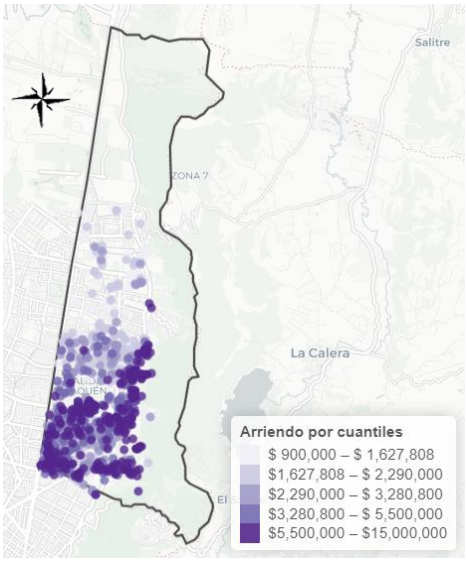



*Ilustración 6: Arriendo por cuantiles Usaquén*

*Fuente: Elaboración propia, R*

Para examinar la distribución de la variable principal, se calcularon medidas de tendencia central y se representaron gráficamente mediante la ilustración 7. El histograma muestra que la mayoría de los arriendos se concentran entre $1 y $4 millones, con asimetría positiva, esto quiere decir que existen muchos apartamentos en rangos bajos e intermedios y un número reducido de viviendas con arriendos muy altos, que generan una cola alargada hacia la derecha; para confirmar esta situación en la ilustración 7 se observa que la mediana se encuentra por debajo de los $3 millones, mientras que se identifican valores atípicos en el extremo superior, correspondientes a viviendas cuyo arriendo supera el rango intercuartílico. En cuanto a la distribución, el Q-Q plot confirma que no sigue una normalidad; si bien los valores centrales se aproximan a línea roja de referencia, las colas se desvían notablemente, los valores bajos se ubican por debajo de lo esperado y los altos por encima, lo cual justifica el uso de transformaciones logarítmicas que se presentan en los modelos posteriores.

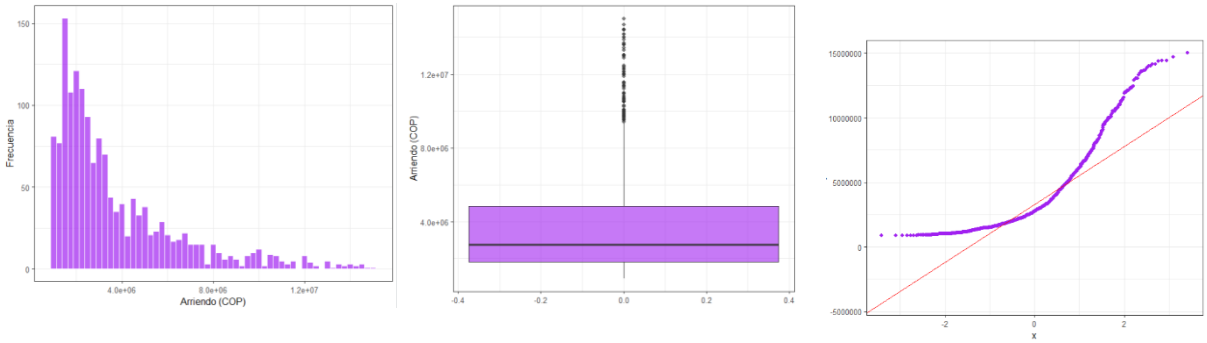



*Ilustración 7: Histograma, Boxplot y Q-Q plot del Arriendo*

*Fuente: Elaboración propia, R*

### *Selección de Matriz de Pesos Espaciales*

Una matriz de pesos espaciales constituye la representación matemática de la interacción entre las observaciones en función de su localización geográfica. En términos simples, esta matriz define quién es vecino de quién y con qué intensidad lo es (Anselin, 1988). Su papel central radica en capturar la dependencia espacial, es decir, la posible relación entre los valores de una variable en una ubicación con respecto a los valores observados en otras ubicaciones cercanas.

Existen diferentes criterios de vecindad para elegir cual es la matriz que se acopla a la naturaleza de los datos. Al tratarse de datos puntuales de la ubicación de apartamentos en arriendo, se probaron distintas configuraciones de matrices de pesos espaciales, incluyendo k-vecinos más cercanos (KNN) con distintos valores de k, distancias fijas y grafos geométricos como Gabriel y vecinos relativos.

*Tabla 7: Parámetros de selección matriz W*

| Criterio | p_valor | R2_ajus |
|---|---|---|
| KNN (k=4) | <0,001 | 0,7903 |
| KNN (k=5) | <0,001 | 0,7942 |
| KNN (k=8) | <0,001 | 0,7909 |
| Gabriel | <0,001 | 0,7903 |
| Vecinos relativos | <0,001 | 0,7894 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

En los cuatro casos, los p-valores son altamente significativos, lo que confirma la presencia de autocorrelación espacial en los datos de arriendo. Sin embargo, se observaron diferencias en el nivel de ajuste del modelo según la matriz utilizada; la matriz de vecinos cercanos con k=5 presentó un $R^2$ ajustado más alto de aproximadamente 0,794 siendo la más adecuada.

### *Análisis Exploratorio Global*

Con el fin de llevar a cabo un análisis exhaustivo en esta sección se analiza la dependencia espacial de las variables en el espacio geográfico, haciendo uso de los estadísticos globales, como el Índice de Moran, el Índice C de Geary y el estadístico G de Getis-Ord para las variables físicas y las variables espaciales agrupadas *Movilidad, Educación* y *Dotación pública* que se consideraron de naturaleza de conteo discreto (0, 1, 2, …) y el estadístico de Join-Counts aplicado a la variable dicotómica *Seguridad*, los cuales proporcionan evidencia cuantitativa sobre la existencia de estructura espacial en las variables analizadas (Anselin, 1995). La variable *Estrato* no se incluyó dentro de este análisis debido a su naturaleza categórica ordinal; aunque los valores numéricos representan niveles socioeconómicos, las diferencias entre ellos no son equidistantes ni lineales, el salto entre estrato 4 y 5 no necesariamente implica el mismo cambio socioeconómico que entre 5 y 6.

- **Índice de Moran**

Se utiliza para medir la autocorrelación espacial global, es decir, el grado en que los valores de una variable están correlacionados con los valores de las observaciones vecinas en el espacio. Su valor oscila entre -1 y 1: un valor positivo indica una agrupación espacial de valores similares, mientras que un valor negativo refleja una proximidad de valores disímiles; en cambio, un valor cercano a cero sugiere un patrón aleatorio (Cliff & Ord, 1981).

Para este caso se utilizó la matriz de pesos espaciales tipo KNN (k = 5) seleccionada previamente, con el fin de establecer si los valores altos o bajos de las variables tienden a concentrarse espacialmente dentro de la zona de estudio; los resultados presentados en la Tabla 8, muestran que todas las variables presentan valores positivos del estadístico I, las zonas con altos valores de arriendo, área construida, baños o dotación pública tienden a estar rodeadas de zonas con valores igualmente altos; las variables educación, dotación pública y movilidad muestran los niveles más altos de autocorrelación, evidenciando una marcada concentración espacial de estas características urbanas. Por su parte la antigüedad y habitaciones muestran una autocorrelación menor, aunque estadísticamente significativa.

*Tabla 8: I de Moran*

| Variable | Moran I | P- Valor |
|---|---|---|
| Arriendo | 0.591 | 1x10-4 |
| Antigüedad | 0.277 | 1x10-5 |
| Habitación | 0.307 | 1x10-4 |
| Parqueadero | 0.380 | 1x10-7 |
| Área construida | 0.485 | 1x10-8 |
| Baños | 0.376 | 1x10-4 |
| Movilidad | 0.709 | 1x10-4 |
| Educación | 0.815 | 1x10-4 |
| Dotación pública | 0.794 | 1x10-4 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

- **C de Geary**

Posteriormente, se calculó el estadístico C de Geary que oscila entre 0 y 2: valores inferiores a 1 indican similitud entre unidades próximas, valores cercanos a 1 ausencia de autocorrelación, y valores superiores a 1 disimilitud espacial.

Los resultados presentados en la Tabla 9 evidencian que todas las variables presentan valores de C inferiores a 1, confirmando la existencia de autocorrelación espacial positiva significativa. Las variables educación, dotación pública y movilidad presentan los valores más bajos, lo que indica una fuerte similitud espacial entre unidades vecinas; por su parte, las

variables antigüedad y habitación muestran un patrón de dependencia más débil, aunque igualmente significativo.

*Tabla 9: C de Geary*

| Variable | Geary C | P- Valor |
|---|---|---|
| Arriendo | 0.410 | 0.0002 |
| Antigüedad | 0.724 | 0.0015 |
| Habitación | 0.689 | 0.0008 |
| Parqueadero | 0.617 | 0.0003 |
| Área construida | 0.512 | 0.0001 |
| Baños | 0.618 | 0.0005 |
| Movilidad | 0.291 | 0.0001 |
| Educación | 0.186 | 0.0001 |
| Dotación pública | 0.206 | 0.0001 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

- **G de Getis-Ord**

El estadístico global G de Getis y Ord (Getis & Ord, 1992) permite identificar la existencia de agrupamientos espaciales de altas o bajas magnitudes de las variables analizadas.

En la Tabla 10 se observa que los resultados evidencian valores positivos y estadísticamente significativos en todas las variables, lo que confirma la presencia de agrupamientos espaciales de valores altos, especialmente en educación, movilidad y dotación pública; en contraste, variables como arriendo y área construida muestran un nivel menor de concentración, aunque igualmente significativo. En conjunto, el estadístico G refuerza la evidencia de patrones espaciales estructurados, donde las zonas con mayor desarrollo y dotación tienden a agruparse territorialmente, lo cual es consistente con la localidad.

*Tabla 10: G de Getis y Ord*

| Variable | Getis-Ord G | P- Valor |
|---|---|---|
| Arriendo | 4.12 | 0.0040 |
| Antigüedad | 15.0 | 0.0010 |
| Habitación | 13.0 | 0.0012 |
| Parqueadero | 19.6 | 0.0007 |
| Área construida | 8.83 | 0.0020 |
| Baños | 17.5 | 0.0008 |
| Movilidad | 39.1 | 0.0002 |
| Educación | 46.6 | 0.0001 |
| Dotación pública | 27.9 | 0.0003 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

- **Join-Counts**

Para la variable dicotómica *seguridad*, se aplicó el estadístico Join-Counts (Cliff & Ord, 1981), que permite identificar patrones de autocorrelación espacial en variables binarias. En la Tabla 11 se evidencian valores de JC (1–1) = 907 y JC (0–0) = 3914, con niveles de significancia $p < 0.0001$, lo que indica la existencia de un patrón de agrupamiento espacial significativo tanto en la presencia como en la ausencia de CAI. Estos resultados sugieren que las unidades espaciales con características similares tienden a concentrarse geográficamente, confirmando un proceso de dependencia espacial positiva.

*Tabla 11: Join-Counts*

| Variable | Valor_JC(1–1) | Valor_JC(0–0) | P- Valor |
|---|---|---|---|
| seguridad | 907 | 3914 | 0.0001 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

## Resultados

### Modelo Regresivo Clásico

Para iniciar el proceso de estimación, se aplicó el modelo clásico de regresión lineal múltiple mediante el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS, *Ordinary Least*

*Squares*), el cual permite analizar la relación entre la variable respuesta *Arriendo* y las variables estructurales, físicas y de ubicación de los apartamentos en la localidad.

Este modelo constituye el punto de partida del análisis, ya que asume independencia espacial y permite verificar los supuestos clásicos de la regresión antes de proceder a modelos espaciales más complejos, para así escoger cuales son las variables postulantes que hagan parte del modelo. (Gujarati & Porter, 2009).

Por lo expuesto en el apartado anterior, tanto la variable dependiente *Arriendo* como la variable explicativa *Área construida* fueron transformadas mediante el logaritmo natural, con el propósito de corregir la asimetría positiva observada en la distribución de ambas variables. La variable *Estrato* se incorporó mediante variables dummy, dejando como referencia el estrato cinco, por ello aparece el cuatro y el seis.

En la Tabla 12 se observa los estimadores del modelo regresivo clásico con todas las variables incluidas, la variable con mayor peso explicativo es el logaritmo del área construida *ln_Área*, la cual presenta un coeficiente positivo de 0.8154, al igual que parqueadero, estrato seis, movilidad y dotación pública. Por el contrario, antigüedad, habitación, estrato cuatro, educación y seguridad presentan coeficientes negativos, lo cual podría reflejar características específicas del mercado local.

Por otra parte, las variables movilidad y dotación pública no resultaron estadísticamente significativas, pese a no tener un p-valor inferior al 5%, se incluyó la parte dotacional en el modelo ya que aporta en la explicación de la variabilidad del valor del arriendo.

Finalmente, el $R^2$ ajustado de 0.772, indica que aproximadamente el 77% de la variabilidad del arriendo puede ser explicada por las variables incluidas, además, el estadístico F es altamente significativo ($p < 2.2\times10^{-16}$), confirmando que, en conjunto, las variables independientes contribuyen de manera significativa a explicar la variable dependiente.

*Tabla 12: Estimadores del Modelo Regresivo Clásico*

| Variable | Estimado | *p-valor* |
|---|---|---|
| Intercepto | 11.4439799 | $< 2x10^{-16}$ |
| ln_Área | 0.8147382 | $< 2x10^{-16}$ |
| Antigüedad | -0.0099230 | $< 2x10^{-16}$ |
| Habitación | -0.0940427 | $7.46x10^{-10}$ |
| Parqueadero | 0.0963833 | $2.66x10^{-10}$ |
| Estrato_Cuatro | -0.2516083 | $< 2x10^{-16}$ |
| Estrato_Seis | 0.0912802 | $1.2x10^{-05}$ |
| Educación | -0.0715772 | $2.14x10^{-06}$ |
| Dotacion_pública | 0.0235996 | 0.0723 |
| Seguridad | -0.0517935 | 0.0199 |
| $R^2$ | 0.7736 | |
| $R^2$ *Ajustado* | 0.772 | |
| *p-valor* | $< 2.2x10^{-16}$ | |

*Fuente: Elaboración propia, R*

La siguiente expresión representa el modelo regresivo lineal, los valores de los parámetros $\beta_k$ corresponden a los estimados en la Tabla 12.

$$Ln(Arriendo) = \beta_0 + \beta_1 ln(Área) + \beta_2 Antiguedad + \beta_3 Habitación + \beta_4 Parqueadero$$

$$+\beta_5 Estrato_Cuatro + \beta_6 Estrato_Seis + \beta_7 Educación + \beta_8 Dotación_pública$$

$$+\beta_9 Seguridad + \varepsilon \qquad (23)$$

Después de seleccionado el modelo, se procede a verificar el cumplimiento de los supuestos para validar su confiabilidad. Se puede observar en la Tabla 13 que el modelo no cumple los supuestos, pues su *p-valor* es inferior a un nivel de significancia del 5%.

*Tabla 13: Supuestos del Modelo Regresivo Clásico.*

| Supuesto | Test | Contraste | *p-valor* |
|---|---|---|---|
| Normalidad | Shapiro-Wilk | 0.99672 | 0.00305 |
| Homoscedasticidad | Breusch-Pagan | 42.28 | $2.921x10^{-03}$ |
| Especificación y Linealidad | RESET | 40.17 | $< 2.2x10^{-16}$ |

*Fuente: Elaboración propia, R*

Enseguida se realizó la prueba de multicolinealidad con el Factor de Inflación de la Varianza (VIF). Los valores entre 5 y 10 indican multicolinealidad moderada y los valores

inferiores a 5 multicolinealidad baja. La variable logaritmo del área es la que presenta un mayor resultado, lo cual puede indicar una correlación moderada entre una variable predictora dada y otras variables presentes en el modelo.

*Tabla 14: Factor de Inflación de la Varianza del Modelo regresivo clásico*

| Variable | VIF |
|---|---|
| ln_Área | 5.259 |
| Antigüedad | 1.165 |
| Habitación | 2.936 |
| Parqueadero | 2.513 |
| Estrato | 2.076 |
| Educación | 1.090 |
| Dotacion_pública | 1.254 |
| Seguridad | 1.230 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

Con el fin de corregir estas desviaciones, se implementaron tres estrategias complementarias. Primero, se estimó el modelo con una Transformación Box-Cox a la variable respuesta, en segundo lugar, con errores estándar robustos (HC1), que ajustan la varianza de los estimadores OLS para mantener inferencias válidas aun en presencia de heterocedasticidad. Sin embargo, dado que los residuos seguían mostrando asimetría y los supuestos seguían sin cumplirse, se optó finalmente por un modelo robusto de tipo M–estimador, implementado mediante la función lmrob() del paquete robustbase.

Este modelo reduce la influencia de valores atípicos y no requiere normalidad estricta de los errores, garantizando así una estimación más estable y confiable; en la Tabla 15 se encuentran los estimadores del modelo robusto, al eliminar la variable de dotación publica, se obtuvo un mejor $R^2 Ajustado$.

*Tabla 15: Estimadores del Modelo Robusto*

| Variable | Estimado | *p-valor* |
|---|---|---|
| Intercepto | 11.511435 | $< 2x10^{-16}$ |
| In Area | 0.813522 | $< 2x10^{-16}$ |
| Antigüedad | -0.010059 | $< 2x10^{-16}$ |
| Habitación | -0.098461 | $1.49x10^{-10}$ |
| Parqueadero | 0.105013 | $8x10^{-12}$ |
| Estrato Cuatro | -0.267812 | $< 2x10^{-16}$ |
| Estrato Seis | 0.098574 | $2.34x10^{-06}$ |
| Educación | -0.066445 | $9.93x10^{-06}$ |
| Seguridad | -0.056825 | 0.00694 |
| $R^2$ | 0.7818 | |
| $R^2$ *Ajustado* | 0.7806 | |

*Fuente: Elaboración propia, R*

En consecuencia, el modelo final adoptado corresponde a una regresión robusta log-lineal, los valores de los parámetros $\beta_k$ corresponden a los estimados en la Tabla 10

$$Ln(Arriendo) = \beta_0 + \beta_1 ln(\text{Área}) + \beta_2 Antiguedad + \beta_3 Habitación + \beta_4 Parqueadero$$

$$+\beta_5 estrato + \beta_6 Educación + \beta_8 Seguridad + \varepsilon \qquad (24)$$

Al evaluar los supuestos, de la misma manera indicaron desviaciones respecto a los supuestos clásicos del modelo OLS, sugiriendo que los valores de arriendo no son independientes entre sí, sino que pueden presentar autocorrelación espacial, producto de la interacción entre las zonas vecinas dentro de la localidad.

*Tabla 16: Supuestos del Modelo Robusto*

| Supuesto | Test | Contraste | *p-valor* |
|---|---|---|---|
| Normalidad | Shapiro-Wilk | 0.99648 | 0.001751 |
| Homoscedasticidad | Breusch-Pagan | 38.224 | $6.843x10^{-3}$ |
| Especificación y Linealidad | RESET | 10.253 | $< 2.2x10^{-16}$ |

*Fuente: Elaboración propia, R*

En este contexto, el modelo estimado mediante OLS, aun en su versión robusta, no constituye el modelo óptimo para representar el fenómeno, ya que ignora la espacialidad de los datos.

**Modelo Regresivo Espacial**

El análisis de fenómenos territoriales como los precios de arriendo requieren métodos estadísticos capaces de reconocer la influencia del espacio geográfico en los datos. Los modelos de regresión lineal tradicionales, aunque útiles para explorar relaciones entre variables, asumen independencia entre las observaciones. Esta suposición se cumple pocas veces en contextos espaciales; en la línea de la econometría, la violación de esta independencia implica que los residuos de un modelo clásico pueden estar correlacionados espacialmente, produciendo estimadores sesgados (LeSage & Pace, 2009).

Por lo tanto, cuando existe evidencia de autocorrelación espacial, como se confirmó mediante los índices de Moran en el análisis exploratorio, los modelos estimados por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) o incluso sus versiones robustas no resultan óptimos para describir el fenómeno en estudio.

Frente a esta limitación, surge la econometría espacial, un campo de la econometría que incorpora explícitamente la dimensión espacial en los modelos de regresión. Su objetivo es capturar las interacciones espaciales entre las unidades de análisis, reconociendo que el valor de una variable en un punto puede depender de los valores de la misma variable o de otras variables en los puntos cercanos (Elhorst, 2014).

En los modelos regresivos espaciales, esta interdependencia se introduce mediante una matriz de pesos espaciales (W), que especifica la estructura de vecindad entre las observaciones. Dicha matriz define qué unidades son consideradas vecinas y con qué

intensidad se relacionan; como se estableció en el AEDE, la matriz se definió a partir del método de los cinco vecinos más cercanos (KNN = 5), esta elección permite garantizar que cada observación tenga al menos cinco vecinos considerados en el análisis, evitando problemas de aislamiento espacial y asegurando una estructura de conectividad homogénea entre los puntos de observación. La matriz resultante fue posteriormente estandarizada por filas, de modo que la suma de los pesos de cada observación fuera igual a uno, conforme a las recomendaciones metodológicas de Cliff y Ord (1981).

Una vez definida la matriz de pesos espaciales, se procedió a calcular el índice global de autocorrelación espacial de Moran para cada una de las variables incluidas en el estudio. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 8, donde se observa que todas las variables presentan valores positivos y estadísticamente significativos, confirma la existencia de autocorrelación espacial positiva.

Es importante señalar que el AEDE se realizó sobre las variables en su forma original (sin transformaciones logarítmicas), dado que el objetivo de esta fase es identificar la presencia de dependencia espacial en los datos geográficos, independientemente de la forma funcional del modelo econométrico que se empleará posteriormente. Las transformaciones logarítmicas se aplican únicamente en la etapa de modelización para estabilizar la varianza y facilitar la interpretación de los coeficientes.

Considerando lo expuesto, los resultados del AEDE proporcionan evidencia suficiente para avanzar hacia la estimación de modelos econométricos espaciales, en los cuales se incorpora explícitamente la estructura de dependencia espacial observada en los datos mediante la matriz de pesos definida.

La elección del modelo más adecuado se realizará a partir de los contrastes de Lagrange Multiplicador (LM) para identificar el tipo de dependencia predominante, ya sea en la variable

dependiente, en los errores o en ambas y posteriormente, se estimarán los modelos comparando sus resultados a través de criterios de información de Akaike (AIC) y la significancia de sus parámetros espaciales.

### *Multiplicadores de Lagrange*

Los test de LM permiten determinar si la autocorrelación espacial se manifiesta en la variable dependiente, en los términos de error o en ambas estructuras. Estos contrastes, calculados a partir de los residuos del modelo estimado por Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) y la matriz de pesos espaciales KNN = 5, ayudan a definir el modelo econométrico espacial más adecuado. Por lo tanto, sus hipótesis son:

$$H_0: \text{Ausencia de autocorrelación espacial}$$

$$H_a: \text{Presencia de autocorrelación espacial}$$

De acuerdo con lo presentado en la Tabla 17 observamos que Los cuatro contrastes LM resultaron altamente significativos por lo que se rechaza la hipótesis nula. En consecuencia, es necesario calcular todos los posibles modelos espaciales y determinar cuál es el más apropiado según el valor de AIC.

*Tabla 17: Multiplicadores de Lagrange*

| Contraste | ML | *p-Valor* |
|---|---|---|
| Modelo del Error Espacial (LMerr) | 307.19 | $< 2.2 \times 10^{-16}$ |
| Modelo del Rezago Espacial (LMlag) | 209.60 | $< 2.2 \times 10^{-16}$ |
| Modelo de Lagrange Robusto para el Error (RLMerr) | 130.25 | $< 2.2 \times 10^{-16}$ |
| Modelo de Lagrange Robusto para el Rezago (RLMlag) | 32.65 | $1.10 \times 10^{-8}$ |

*Fuente: Elaboración propia, R*

### *Selección del modelo espacial*

Una vez identificada la presencia de dependencia espacial significativa mediante los contrastes de Lagrange, se procedió a estimar y comparar diferentes especificaciones de

modelos regresivos espaciales, con el fin de determinar cuál describe de manera más adecuada la estructura de los precios de arriendo en la localidad de Usaquén.

Los modelos estimados incluyen las versiones clásicas de dependencia espacial

- SAR (Spatial Autoregressive Model)
- SEM (Spatial Error Model)
- SDM (Spatial Durbin Model)
- SLX (Spatial Lag of X Model)
- SARAR (Spatial Autoregressive Model with Autoregressive Errors)

Así como extensiones más generales, que incorporan a su vez rezago y de error espacial:

- SDEM (Spatial Durbin Error Model)
- GNS (General Nesting Spatial Model)

Para comparar el desempeño de cada modelo se utilizaron los criterios de información de Akaike (AIC) y de Bayes (BIC), los cuales permiten evaluar la calidad del ajuste penalizando la complejidad del modelo. De acuerdo con estos criterios, el modelo con los valores más bajos de AIC y BIC se considera el más eficiente (Elhorst, 2014).

Las variables eliminadas en el modelo OLS se agregaron nuevamente en la estimación de los modelos espaciales ya que al incluirlas mejoraban los resultados de los criterios de información. En la Tabla 18, se muestran los resultados del AIC y BIC y se observa que el mejor corresponde al Modelo Espacial GNS; aunque la diferencia en el AIC respecto al modelo SDEM es mínima, el GNS logra capturar de manera simultánea los efectos de dependencia espacial en la variable dependiente $(\rho)$ y en los errores $(\lambda)$, ofreciendo una representación más realista del comportamiento del arriendo.

*Tabla 18: Resultados AIC de modelos espaciales*

| Modelo | AIC | BIC |
|---|---|---|
| GNS | 394,135772 | 521,492525 |
| SDEM | 394,223468 | 516,27369 |
| SDM | 395,682921 | 517,733144 |
| SARAR | 409,331841 | 483,62328 |
| SEM | 425,531798 | 494,516706 |
| SAR | 465,703152 | 534,68806 |
| SLX | 584,628865 | 701,372556 |
| OLS | 642,437336 | 706,115713 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

El Modelo GNS simultáneamente el rezago de la variable dependiente ($\rho Wy$), los rezagos espaciales de las variables explicativas ($WX\theta$) y la dependencia espacial en los errores ($\lambda$), de modo que combina los efectos del modelo SAR, SEM y SDM. Obteniendo la siguiente ecuación:

$$ln(Arriendo) = \rho W ln(Arriendo) + X\beta + WX\theta + \varepsilon \qquad (25)$$

Donde $\rho$ representa el coeficiente de autocorrelación espacial de la variable dependiente, $W$ la matriz de pesos espaciales construida mediante el criterio de los cinco vecinos más cercanos (KNN = 5), $X\beta$ corresponde al conjunto de parámetros estimados para las variables explicativas del modelo, $WX\theta$ hace referencia a los rezagos espaciales de dichas variables en las áreas vecinas y $\varepsilon$ representa el término de error espacial autocorrelacionado, cuya intensidad está determinada por el parámetro $\lambda$.

El parámetro $\rho = -0.2577$, con un *p-valor* = 0.031788 muestra una dependencia espacial negativa leve en la variable dependiente, lo que indica un fenómeno de competencia espacial entre zonas, es decir que un aumento en las rentas de una zona puede inducir ajustes o desplazamientos de la demanda hacia áreas cercanas. El parámetro $\lambda = 0.6049$, con un *p-valor* = $2.22x10^{-16}$ indica una autocorrelación positiva en los errores, lo cual evidencia la interdependencia no observada entre zonas vecinas.

En cuanto a las variables estructurales, como el área construida, el coeficiente = 0.7232, con un *p-valor* = $2.22x10^{-16}$ indica que un incremento del 1 % en el área se asocia a un aumento promedio del 0.72 % en el valor del arriendo. La antigüedad ejerce un efecto negativo –0.0099, con un *p-valor* = $2.22x10^{-16}$ reflejando la depreciación del inmueble con el paso del tiempo. Asimismo, el número de habitaciones –0.0443, con un *p-valor* = $2.22x10^{-16}$ presenta un efecto inverso, posiblemente porque al mantener constante el tamaño, más divisiones reducen la percepción de amplitud y comodidad. El contar con parqueadero incrementa la renta en aproximadamente 8.4 %; en relación con los estratos socioeconómicos, el estrato seis se asocia con valores de renta superiores respecto al estrato base (estrato cinco) con un coeficiente de 0.0545, mientras que el estrato cuatro presenta precios significativamente menores con un coeficiente de –0.1601.

Finalmente, las variables espaciales como movilidad, educación y dotación pública resultaron significativas, confirmando que una mejor accesibilidad incide positivamente sobre el valor del arriendo. Aunque para la educación, el valor de p se encuentra ligeramente por encima del 5 %, su signo y magnitud son coherentes con la teoría económica del suelo urbano, que sugiere que las áreas con infraestructura educativa generan externalidades positivas percibidas por los hogares. Por ello, se consideró conveniente mantenerla en el modelo para conservar la interpretación territorial de la localidad. En contraste, la variable seguridad no resultó estadísticamente significativa, por lo que fue excluida del modelo final, al no aportar información adicional, esta decisión se tomó porque su efecto se encuentra representado indirectamente en las demás variables (estrato y dotación pública) y en la estructura espacial del modelo.

*Tabla 19: Parámetros estimados del Modelo Espacial GNS*

| Variable | Estimado | *p-valor* |
|---|---|---|
| Intercepto | 14.01659591 | $< 2x10^{-16}$ |
| In Area | 0.72322463 | $< 2x10^{-16}$ |
| Antigüedad | -0.00995458 | $< 2x10^{-16}$ |
| Habitación | -0.04424376 | 0.0033375 |
| Parqueadero | 0.08377450 | $7.887x10^{-9}$ |
| Estrato Cuatro | -0.16001592 | $5.579x10^{-5}$ |
| Estrato Seis | 0.05542988 | 0.0182831 |
| Movilidad | 0.05031067 | 0.0183927 |
| Educación | 0.05610412 | 0.0534562 |
| Dotación publica | 0.10123061 | 0.0495913 |
| W In Area | 0.43658932 | 0.0005115 |
| W Antigüedad | -0.00599708 | 0.0245747 |
| W Habitación | -0.14992760 | 0.0001764 |
| W Parqueadero | 0.02893390 | 0.4832359 |
| W Estrato Cuatro | -0.20242550 | 0.0047334 |
| W Estrato Seis | 0.02725600 | 0.05977698 |
| W Movilidad | 0.00248102 | 0.0584520 |
| W Educación | -0.12178084 | 0.0424340 |
| W Dotación publica | 0.07920412 | 0.0449906 |
| $\rho$ | -0.25777 | 0.03178 |
| $\lambda$ | 0.6049 | $< 2x10^{-16}$ |

*Fuente: Elaboración propia, R*

Acerca de los rezagos se confirman la existencia de efectos indirectos entre zonas vecinas, el rezago del área construida evidencia un efecto de contagio positivo, donde el tamaño promedio de los inmuebles de las áreas colindantes influye en el valor del arriendo, el de la antigüedad muestra que inmuebles antiguos en zonas cercanas tienden a reducir el valor del arriendo en el sector.

Otros rezagos, como el parqueadero, estrato seis y movilidad, no resultaron estadísticamente significativos, pero se mantuvieron en el modelo dada su relevancia conceptual.

El diagnóstico del modelo confirma que el p-valor global tiene un ajuste significativo al 1%, el modelo explica el 82.7% de la variabilidad del logaritmo del valor de arriendo, los residuos no presentan autocorrelación espacial significativa, según el test de Moran I =

0.00065; con un p valor = 0.465, lo que demuestra que la especificación espacial GNS corrigió la dependencia identificada mediante los multiplicadores de Lagrange en el modelo OLS.

En la etapa de validación del modelo GNS ponderado, se evaluaron los supuestos clásicos de normalidad, homocedasticidad e independencia espacial de los residuos. La prueba de Shapiro–Wilk ($W = 0.9419$, $p < 0.05$) evidenció que los residuos no siguen una distribución normal, mientras que la prueba de Breusch–Pagan ($BP = 100.85$, $p < 0.001$) mostró presencia de heterocedasticidad, indicando que la varianza de los errores no es constante entre observaciones.

Sin embargo, ambos resultados son esperables en modelos de naturaleza espacial estimados por máxima verosimilitud (ML), ya que este método produce estimadores consistentes y eficientes aun sin cumplir estrictamente estos supuestos (Anselin, 1988; LeSage & Pace, 2009). Por otro lado, la prueba de Moran ($p = 0.465$) confirmó la ausencia de autocorrelación espacial en los residuos, lo que demuestra que el modelo logra capturar adecuadamente la dependencia espacial presente en los datos. En consecuencia, aunque los supuestos de normalidad y homocedasticidad no se cumplen de forma estricta, el modelo GNS ponderado se considera válido y robusto para la estimación del valor de arriendo en la localidad de Usaquén, dado que explica de manera significativa la variabilidad espacial observada y cumple el objetivo de la investigación.

***Impactos***

En los modelos de regresión espacial, los coeficientes estimados no pueden interpretarse de manera directa como en los modelos clásicos, ya que las variables explicativas influyen no solo en la observación donde se mide el cambio, sino también en las observaciones vecinas. Esto se debe a la estructura de dependencia espacial introducida por el término de

rezago espacial de la variable dependiente ($\rho Wy$) y el posible rezago de las variables independientes ($WX\theta$). Para capturar adecuadamente estas interrelaciones, se calcula la descomposición de impactos espaciales, la cual permite distinguir entre efectos directos, indirectos y totales.

El impacto directo representa el efecto promedio de una variable explicativa sobre la misma unidad espacial; el impacto indirecto mide cómo los cambios en una unidad afectan los valores de las unidades vecinas, mientras que el impacto total refleja la suma de ambos efectos.

De acuerdo con LeSage y Pace (2009), esta descomposición permite cuantificar la magnitud de las externalidades espaciales, proporcionando una visión más realista de los fenómenos urbanos donde la interdependencia entre áreas es inherente.

Los impactos se estimaron a partir del modelo GNS, el cual combina el rezago espacial de la variable dependiente y de las variables explicativas, además del componente de error espacial. Este enfoque permite capturar simultáneamente los procesos de difusión espacial y los efectos locales propios de las características de cada unidad de análisis.

*Tabla 20: Impactos*

| Variable | Directo | Indirecto | Total |
|---|---|---|---|
| In Area | 0.7151 | 0.2070 | 0.9221 |
| Antigüedad | -0.0098 | -0.0028 | -0.0127 |
| Habitación | -0.0398 | -0.1146 | -0.1544 |
| Parqueadero | 0.0835 | 0.0061 | 0.0896 |
| Estrato Cuatro | -0.1548 | -0.1334 | -0.2882 |
| Estrato Seis | 0.0550 | 0.0107 | 0.0657 |
| Movilidad | 0.0506 | -0.0087 | 0.0420 |
| Educación | 0.0605 | -0.1127 | -0.0522 |
| Dotación publica | 0.1050 | -0.0954 | 0.0096 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

El análisis de los impactos obtenidos en la Tabla 20 evidencia la existencia de efectos espaciales significativos en la determinación del valor de arriendo en la localidad de Usaquén. En términos generales, las variables estructurales de los inmuebles presentan efectos tanto locales como de propagación hacia zonas vecinas, lo que confirma que los precios de arriendo

están determinados no solo por las características del bien, sino también por el contexto espacial en el que se ubica.

En primer lugar, el área construida (ln_area) presenta un impacto directo positivo de 0.7151 y un impacto indirecto de 0.2069, esto significa que un aumento del 1% en el área de una vivienda incrementa el valor del arriendo en 0.72% en la misma zona y en 0.21% en las zonas colindantes, reflejando un claro efecto de contagio espacial positivo: las viviendas más amplias generan un proceso de valorización tanto interna como vecinal.

La antigüedad y el número de habitaciones muestran impactos negativos en ambas dimensiones, sugiriendo que las viviendas más antiguas o con una distribución menos eficiente tienden a depreciarse, y esta tendencia se extiende, aunque en menor medida, a los sectores cercanos. De igual manera, el estrato cuatro evidencia una relación negativa tanto directa como indirecta, lo cual podría estar asociado a diferencias estructurales en la calidad o el atractivo del entorno urbano respecto a zonas de estrato seis.

Por su parte, las variables parqueadero, movilidad y estrato seis presentan impactos directos positivos y efectos indirectos reducidos, indicando que los beneficios derivados de mejores condiciones de accesibilidad o nivel socioeconómico son principalmente locales y no generan externalidades significativas sobre las zonas vecinas. La variable educación muestra un comportamiento mixto: su efecto directo es positivo pero el indirecto negativo, lo que puede interpretarse como un fenómeno de competencia espacial, donde la concentración de equipamientos educativos tiende a atraer demanda de vivienda en ciertas zonas, desplazándola desde áreas cercanas.

Finalmente, la dotación pública tiene un impacto directo positivo (0.105) y total casi nulo, lo que sugiere que la infraestructura y los servicios públicos mejoran la renta en la propia zona, pero sin efectos apreciables en el entorno adyacente.

**Regresión Geográficamente Ponderada (GWR)**

La Regresión Geográficamente Ponderada es una extensión del modelo de regresión lineal clásica que permite capturar la variación espacial en las relaciones entre una variable dependiente y un conjunto de variables explicativas. A diferencia de los modelos globales, que asumen una relación constante en todo el espacio geográfico, la GWR permite que los coeficientes de regresión varíen localmente, reconociendo que las asociaciones pueden diferir según la ubicación (Fotheringham, Brunsdon y Charlton, 2002).

La GWR se formula ajustando un modelo local para cada observación georreferenciada, ponderando las observaciones vecinas mediante una función de decaimiento espacial, generalmente de tipo gaussiano, que otorga mayor peso a las observaciones más cercanas y menor a las más lejanas.

En este contexto, este enfoque permite identificar cómo los determinantes del arriendo, como el área construida, el estrato socioeconómico o la cercanía a equipamientos urbanos, influyen de manera diferenciada según la zona.

Para la aplicación del modelo se realizó la transformación de las coordenadas, del sistema WGS84 al sistema proyectado UTM zona 18N (EPSG:32618), con el fin de expresar las distancias en metros y asegurar la coherencia espacial de los cálculos.

El modelo se especificó de manera que los coeficientes pudieran variar espacialmente, permitiendo identificar cómo las características del inmueble y del entorno afectan el valor del arriendo de forma diferenciada según la ubicación dentro de Usaquén. Para ello, se utilizó un kernel de tipo *bisquare*, el cual asigna pesos decrecientes a las observaciones más lejanas y un peso máximo a las más cercanas, eliminando la influencia de aquellas que se encuentran fuera del rango definido por el ancho de banda. Este tipo de kernel ha demostrado ser eficiente para estudios urbanos con alta concentración de puntos, ya que atenúa los efectos de observaciones

distantes y mejora la estabilidad de la estimación local (Brunsdon, Fotheringham y Charlton, 1996).

El ancho de banda (*bandwidth*), que controla el tamaño del vecindario considerado en cada regresión local, se seleccionó de forma adaptativa, es decir que el tamaño del vecindario varía según la densidad de puntos en el espacio, esto se hizo porque la distribución espacial de las observaciones no es homogénea. La selección se realizó en tres etapas sucesivas:

i. Mediante validación cruzada (CV) para minimizar el error de predicción.
ii. Se aplicó el criterio de información corregido de Akaike (AIC) cuando la CV no converge o resulta inestable.
iii. En caso de persistir dificultades, se efectuó una búsqueda manual por rejilla sobre un conjunto de valores candidatos, reteniendo aquel que minimizaba el AIC.

Durante la estimación del modelo, el proceso de selección automática del ancho de banda determinó un valor adaptativo de 360, lo que implica que en cada regresión local se consideró un vecindario que abarca aproximadamente el 36 % de las observaciones más cercanas a cada punto.

El modelo principal se estimó con la función *gwr.basic* del paquete GWmodel en R, debido a posibles problemas de colinealidad local se utilizó la variante *gwr.lcr*, que incorpora un ajuste tipo *ridge local* para estabilizar los coeficientes sin eliminar la variación espacial. Enseguida se procedió a calcular los parámetros del modelo que se observan en la Tabla 21, las variables fueron depuradas según su p-valor inferior 10%, por lo que seguridad y educación no fueron incluidas.

*Tabla 21: Estimación de parámetros Regresión Geográficamente Ponderada*

| Variable | Estimado | *t-valor* | *p-valor* |
|---|---|---|---|
| Intercepto | 11.381371 | 57.353 | <0.010 |
| In Area | 0.78141 | 15.434 | $9.668x10^{-54}$ |
| Antigüedad | -0.00967 | -6.462 | $1.036x10^{-10}$ |
| Habitación | -0.05904 | -2.459 | 0.01392 |
| Parqueadero | 0.08569 | 3.651 | 0.0002616 |
| Estrato Cuatro | -0.15083 | -2.457 | 0.01401 |
| Estrato Seis | 0.06452 | 2.164 | 0.03046 |
| Movilidad | 0.05024 | 1.912 | 0.05586 |
| Dotación publica | 0.040231 | 0.565 | 0.09721 |
| $R^2$ | | 0.770 | |
| $R^2$ *Ajustado* | | 0.769 | |

*Fuente: Elaboración propia, R*

Las variables resultantes se observan en la Tabla 21, con un coeficiente de determinación ajustado de 0.769, lo que indica que el 77 % de la variabilidad del arriendo es explicado por las variables del modelo. Los coeficientes locales muestran variación espacial, confirmando la presencia de no estacionariedad en los determinantes del valor del arriendo en la localidad de Usaquén. En términos generales, el logaritmo del área construida, el parqueadero y los estratos socioeconómicos fueron las variables con mayor influencia positiva y significativa en la mayoría de los sectores, mientras que el número de habitaciones tuvo efectos negativos. Las variables espaciales movilidad y dotación pública presentaron significancia marginal, pero mantienen signos coherentes con la teoría de precios hedónicos, indicando que el acceso a vías, servicios y equipamientos urbanos contribuye a mejorar el valor de los arriendos.

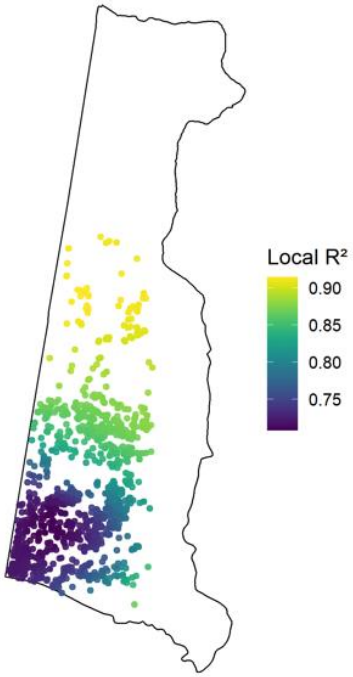
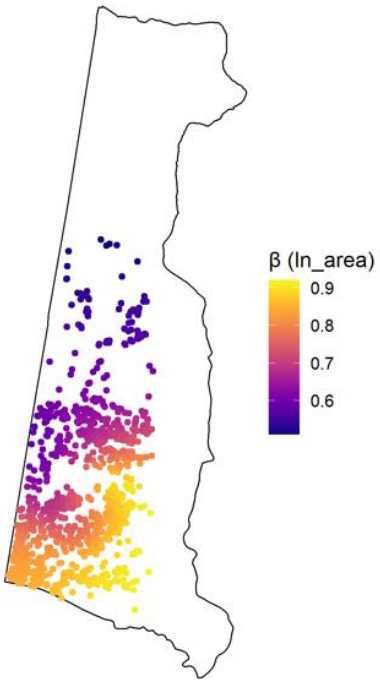


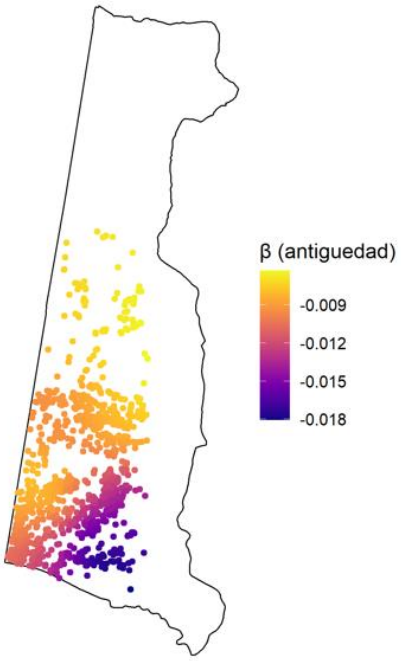

*Ilustración 8: R2 Local.*

*Fuente: Elaboración propia en R*

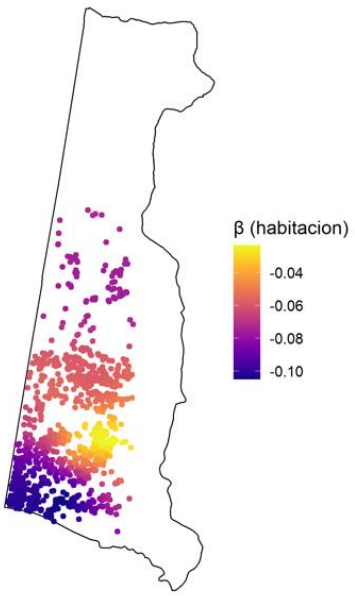
En la Ilustración 8, se muestra el comportamiento del $R^2$en la localidad de Usaquén. La parte norte de la localidad presenta los valores más altos entre el 90% y el 85%, lo que indica que el modelo explica mejor la variación de los arriendos en estos sectores. En contraste, hacia el suroccidente los valores de disminuyen a un 75%, lo que sugiere la presencia de factores locales no capturados por las variables del modelo. Sin embargo, al ser un porcentaje alto se deduce que la variabilidad del arriendo se explica por la variabilidad de las variables exógenas a partir de la Regresión Geográficamente Ponderada.

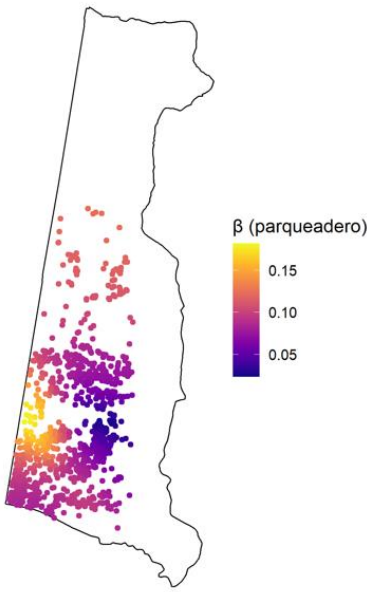
En este orden de ideas, se muestra de forma gráfica el comportamiento de los coeficientes locales expuestos a continuación:

<table>
<tr><th colspan="2">COEFIECIENTES LOCALES</th></tr>
<tr><th>Coeficiente local de área</th><th>Coeficiente local de antigüedad</th></tr>
<tr><td>

<br>Ilustración 9: Coeficiente estimado de la variable área<br><br>Fuente: Elaboración propia</td><td>

<br>Ilustración 10: Coeficiente estimado de la variable antigüedad<br><br>Fuente: Elaboración propia</td></tr>
<tr><td>En las zonas del sur y suroriental se tienen valores del 80% al 90% mientras que en el norte se acentúa entre el 60% y el 70%; se observa entonces que el mismo aumento en área produce mayores incrementos de precio en las zonas con menor densidad y oferta inmobiliaria, y un impacto más moderado en las zonas consolidadas del norte.</td><td>Los valores negativos confirman la relación inversa entre los años de construcción y el arriendo; a mayor antigüedad, menor precio. Sin embargo, no es uniforme espacialmente ya que en las zonas sur y suroriental se observan los coeficientes más negativos, indicando una depreciación más marcada del arriendo conforme pasan los años.</td></tr>
<tr><th>Coeficiente local de Habitación</th><th>Coeficiente local de Parqueadero</th></tr>
</table>

<table>
<tr>
<td>

<br>Ilustración 11: Coeficiente estimado de la variable habitación<br><br>Fuente: Elaboración propia</td>
<td>

<br>Ilustración 12: Coeficiente estimado de la variable parqueadero<br><br>Fuente: Elaboración propia</td>
</tr>
<tr>
<td>El mapa muestra una relación negativa entre el número de habitaciones y el valor del arriendo, lo que sugiere que un mayor número de habitaciones está asociado a una reducción del precio. Este comportamiento se explica porque un mayor número de habitaciones dentro de un mismo tamaño de vivienda implica espacios más pequeños, por tanto, un valor de arriendo inferior.<br>En términos espaciales, los valores más negativos se concentran en la zona sur y suroccidental; en contraste, en el centro y norte se muestra una menor penalización.</td>
<td>El mapa evidencia un efecto positivo del acceso a este atributo sobre el valor del arriendo en toda la localidad de Usaquén, lo que indica que disponer de parqueadero incrementa el precio del inmueble<br>En las zonas suroccidentales, se observan los valores más altos del coeficiente, lo que sugiere que en estos sectores la disponibilidad de parqueadero constituye un factor diferenciador y de mayor valorización. En contraste, hacia el norte y nororiente los valores del coeficiente disminuyen.</td>
</tr>
<tr>
<td>Coeficiente local de Movilidad</td>
<td>Coeficiente local de Dotación publica</td>
</tr>
</table>

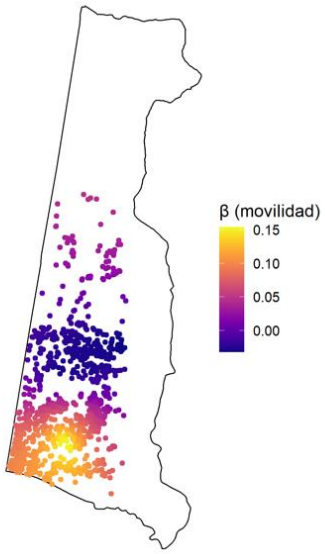



*Ilustración 13: Coeficiente estimado de la variable movilidad*

*Fuente: Elaboración propia*

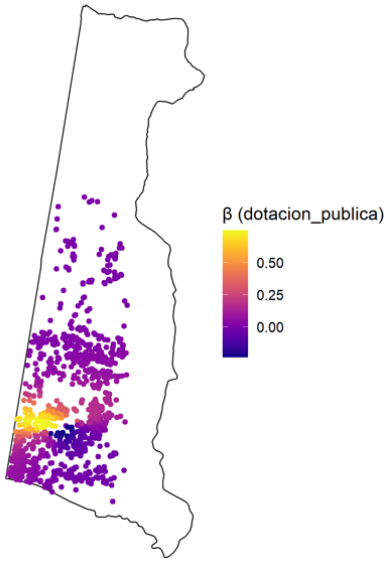



*Ilustración 14: Coeficiente estimado de la variable dotación pública*

*Fuente: Elaboración propia*

Los valores más altos se concentran en la zona suroccidental, donde la infraestructura vial y de transporte ofrece mayor conectividad con otras localidades de la ciudad. Hacia el centro y norte de la localidad, el efecto de la movilidad sobre el valor del arriendo disminuye. Esto puede explicarse porque en estas zonas predominan áreas residenciales consolidadas, con menor variabilidad en la accesibilidad y una menor dependencia del transporte público como factor de valorización.

En la zona suroccidental de la localidad casi central, el efecto positivo es más alto, en estos sectores, la cercanía a espacios de recreación, atención médica o servicios comunitarios incrementa la valoración residencial. En cambio, hacia la zona norte y nororiental, se tiende a valores más bajos, este resultado puede atribuirse a que las viviendas de mayor estrato ya cuentan con mejores condiciones de servicios complementarios, por lo que la dotación pública no constituye un factor diferenciador en la determinación del precio.

En conjunto, los mapas de los coeficientes locales del modelo GWR mostrados en este capítulo evidencian una marcada heterogeneidad espacial en los determinantes del valor del arriendo dentro de la localidad de Usaquén. Aunque la dirección de los efectos se mantiene coherente con la teoría de precios hedónicos, la magnitud de estos efectos varía significativamente entre zonas.

Los sectores suroccidentales concentran los mayores valores absolutos de los coeficientes, reflejando una mayor sensibilidad del precio a las características físicas y de entorno del inmueble, mientras que en el norte los efectos tienden a estabilizarse, sugiriendo un mercado más homogéneo. Esta variación espacial confirma que los factores estructurales, de accesibilidad y de entorno urbano influyen de forma diferenciada según la localización.

## Comparación y Validación del Modelo Frente a los Valores de Arriendo Estimados por la SAE

Con el fin de validar la aplicabilidad del modelo desarrollado, se realizó una comparación y validación entre los valores de arriendo estimados mediante el modelo econométrico espacial GNS y los estimados de renta desarrollados en la Dirección de Analítica Alistamiento y valoración, con el propósito de evaluar su capacidad predictiva y la pertinencia de su eventual implementación dentro del procedimiento institucional de estimados de renta. Esta comparación permite establecer el grado de coherencia entre las predicciones del modelo espacial y los resultados obtenidos mediante el procedimiento técnico actualmente adoptado por la entidad, así como evidenciar los beneficios de incorporar criterios econométricos y geoespaciales al proceso.

De acuerdo con el Procedimiento de Estimados de Renta para Bienes Inmuebles Urbanos y Rurales (Código P-DP2-046, 2023), la SAE determina el valor probable del canon

de arrendamiento de sus bienes urbanos y rurales mediante estudios técnicos que consideran variables como tipo de predio, sector de localización, vocación, condición jurídica, uso, áreas, estrato, antigüedad y estado de conservación que se elaboran a partir de información recolectada en campo y visitas técnicas obligatorias.

Bajo este contexto, la comparación con el modelo econométrico desarrollado durante la pasantía se plantea como un ejercicio complementario que busca contrastar la precisión de los estimados manuales de la SAE frente a un modelo espacial reproducible, capaz de incorporar relaciones de dependencia geográfica y variaciones locales de los precios de arriendo. El análisis se apoya en el modelo GNS, que integra efectos espaciales en la variable dependiente y en los errores, y permite obtener una estimación más estable y consistente del valor de renta.

Adicionalmente, se calculan indicadores de precisión y ajuste, tales como el error absoluto medio (MAE), el error porcentual medio absoluto (MAPE), el coeficiente de determinación ($R^2$) e intervalos de confianza para las predicciones, con el fin de establecer criterios para la posible incorporación práctica del modelo dentro de los procesos institucionales de estimación de renta.

Es importante señalar que la base de datos utilizada en el estudio integra observaciones de los estratos 4, 5 y 6, con el fin de dotar de mayor robustez estadística al modelo. No obstante, la comparación directa con los valores de renta de la SAE se restringe únicamente a los estratos 5 y 6, que corresponden a los segmentos de mercado en los que la entidad dispone de registros de arrendamiento válidos y con valores de referencia comparables.

Aunque el SIG institucional se utiliza para el registro de coordenadas y la delimitación física de los predios, no se emplea con fines analíticos para modelar la influencia de la localización o la proximidad a servicios sobre el valor del arriendo. Por ello, el presente modelo

se propone como un complemento técnico que permitiría a la SAE fortalecer sus estimaciones de renta, incorporando evidencia espacial cuantificable sin alterar la estructura operativa de su procedimiento vigente.

***Comparación***

Como primer contraste se agregaron las observaciones a nivel barrio – estrato usando la mediana de cada fuente (modelo GNS vs. estimados SAE), mediante las siguientes métricas:

- *MAE (Mean Absolute Error)*: Promedio de las diferencias absolutas. Expresa el error típico en pesos
- *RMSE (Root Mean Squared Error):* Penaliza más los errores grandes que el MAE.
- *MAPE (Mean Absolute Percentage Error)*: Error porcentual medio respecto al valor de referencia.
- *sMAPE (Symmetric MAPE):* Versión simétrica que divide por el promedio de las magnitudes de modelo y de los datos de los estimados de renta de la SAE.
- $R^2$*:* Proporción de varianza explicada en un ajuste lineal simple.

La comparación se restringió a estratos 5 y 6, que son los segmentos para los que la SAE dispone de estimados verificables. No obstante, el modelo se estimó con información de estratos 4, 5 y 6 para mejorar la identificación y la robustez de la base.

Las métricas obtenidas se presentan en la Tabla 22:

*Tabla 22: Métricas de desempeño por Estrato y Barrio*

| MAE | RMSE | R2 | sMAPE | MAPE_filtrado |
|---|---|---|---|---|
| 918364 | 1038684,654 | -1,549184373 | 23,62342264 | 27,70512464 |

*Fuente: Elaboración propia, R*

En términos globales, las métricas obtenidas muestran un desempeño moderado del modelo frente a los estimados manuales de la SAE, además el $R^2$ agregado resulta negativo, lo que indica que, en este subconjunto y a este nivel de agregación, la variabilidad de los estimados de la SAE no es capturada de forma lineal por el modelo con la misma eficacia que un promedio simple, sin embargo el $R^2$ no es un indicador robusto bajo agregación y con diferencias sistemáticas de escala por zona; por ello se reporta también sMAPE, que es menos sensible a valores extremos y escalas heterogéneas. Esto se debe al emparejamiento muchos-a-muchos que mezclan inmuebles heterogéneos dentro del mismo segmento y distorsionan los promedios.

En cuanto a los segmentos se establecieron tres banderas:

- Coincidente: Con un porcentaje de error ≤ 20 %
- Revisión sugerida: Con un porcentaje de error entre el 20 y el 35 %
- Revisión prioritaria: Con un porcentaje de error > 35 %

A nivel de segmentos, se obtuvieron los siguientes hallazgos:

*Tabla 23: Comparación de arriendo GNS vs SAE por estrato y barrio*

| Barrio | Estrato | Arriendo GNS | Unidades GNS | Arriendo SAE | Unidades SAE | Error % | Bandera |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| La Carolina | 6 | $ 5.679.722 | 41 | $ 4.220.000 | 13 | 34.50% | Revisión sugerida |
| Molinos Norte | 5 | $ 3.479.417 | 1 | $ 2.830.000 | 7 | 22.94% | Revisión sugerida |
| San Patricio | 6 | $ 4.695.533 | 51 | $ 3.475.000 | 4 | 35.12% | Revisión prioritaria |
| Santa Barbara | 6 | $ 3.828.136 | 149 | $ 2.670.000 | 15 | 43.37% | Revisión prioritaria |
| Santa Bibiana | 6 | $ 4.075.988 | 19 | $ 4.180.000 | 7 | 2.48% | Coincidente |

*Fuente: Elaboración propia, R*

Como el modelo tiende a sobreestimar respecto a la mediana de los estimados SAE en varias micro zonas de estrato 6, se procedió a realizar el ajuste de compatibilidad por tamaño y corrección de área mediante dos criterios:

i. Comparación por $m^2$: se contrastó COP/$m^2$ para neutralizar la mezcla de tamaños.

ii. Estandarización a 70 $m^2$: se llevó cada arriendo a un tamaño de referencia mediante

$$\tilde{R} = R(\frac{70}{A})^{\beta_{\ln A}}, \quad (26)$$

usando el coeficiente estimado del modelo $\beta_{\ln A} \approx 0{,}723$, dado que el área es el principal determinante del canon.

Donde se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 24:

*Tabla 24: Métricas de desempeño por m2 y 70m*

| MAE_m2 | RMSE_m2 | sMAPE_m2 | MAE_70 | RMSE_70 | sMAPE_70 |
|---|---|---|---|---|---|
| 8497,261315 | 11273,98492 | 24,23% | 659159,7924 | 756817,937 | 24,75% |

*Fuente: Elaboración propia, R*

Que resultaron ser más coherentes con un error moderado para datos de mercado con heterogeneidad entre barrios.

A nivel de segmentos, se obtuvieron los siguientes hallazgos:

*Tabla 25: Comparación de arriendo GNS vs SAE, Segmentos equivalentes a 70 m2*

| Barrio | Estrato | Arriendo GNS | Unidades GNS | Arriendo SAE | Unidades SAE | Error % | Bandera |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| La Carolina | 6 | $ 2.871.496,00 | 41 | $ 2.556.798,00 | 13 | 12,3 % | Coincidente |
| Molinos Norte | 5 | $ 3.553.131,00 | 1 | $ 2.358.048,00 | 7 | 50,7 % | Revisión prioritaria |
| San Patricio | 6 | $ 3.014.997,00 | 51 | $ 2.481.747,00 | 4 | 21,5 % | Revisión sugerida |
| Santa Barbara | 5 y 6 | $ 2.820.272,00 | 149 | $ 1.828.143,00 | 15 | 54,3 % | Revisión prioritaria |
| Santa Bibiana | 6 | $ 2.831.534,00 | 19 | $ 2.570.895,00 | 7 | 10,1 % | Coincidente |

*Fuente: Elaboración propia, R*

A nivel de segmentos en la Tabla 25 las diferencias fueron bajas en La Carolina y Santa Bibiana y altas en Molinos Norte y Santa Bárbara, que corresponden a los casos de *revisión prioritaria* los cuales se concentran en barrios con alta heterogeneidad interna y posible mezcla de subzonas/amenidades no observadas por las covariables, además de la cantidad de unidades en comparación como lo es en Molinos norte.

*Tabla 26: Comparación de arriendo GNS vs SAE, Segmentos equivalentes COP/ m2*

| Barrio | Estrato | Arriendo GNS (COP/m²) | Unidades GNS | Arriendo SAE (COP/m²) | Unidades SAE | Error % | Bandera |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| La Carolina | 6 | $ 33.431 | 41 | $ 29.843 | 13 | 12,0 % | Coincidente |
| Molinos Norte | 5 | $ 51.168 | 1 | $ 29.484 | 7 | 73,5 % | Revisión prioritaria |
| San Patricio | 6 | $ 35.958 | 51 | $ 31.923 | 4 | 12,6 % | Coincidente |
| Santa Barbara | 5 y 6 | $ 35.321 | 149 | $ 23.764 | 15 | 48,6 % | Revisión prioritaria |
| Santa Bibiana | 6 | $ 33.004 | 19 | $ 31.380 | 7 | 5,2 % | Coincidente |

*Fuente: Elaboración propia, R*

En cuanto a la Tabla 26 que compara el valor del metro cuadrado, se obtuvieron mejores resultados, los barrios La Carolina, San Patricio y Santa Bibiana coinciden y Molinos Norte y Santa Bárbara tienen revisión prioritaria.

Con base en lo anterior, se concluye que el modelo es utilizable por la SAE como línea base de valoración en estratos 5 y 6, siempre que se apliquen dos salvaguardas:

i. Control sistemático de calidad de datos (área)
ii. Lectura operativa por COP/m² y equivalente a 70 m² para neutralizar la mezcla de tamaños.

***Recomendaciones***

Se recomienda a la SAE utilizar el GNS como referente operativo para estratos 4 5 y 6, reportando de forma sistemática el canon total, el COP/m² y el valor equivalente a 70 m², y adoptando la banderización por umbrales para la toma de decisiones. Este uso debe acompañarse de controles de calidad de datos, en especial sobre el área y de una retroalimentación trimestral con casos nuevos para recalibrar el modelo y actualizar una tabla de subzonas.

En cuanto al modelo GWR, puede ser utilizado para complementar el modelo con un ajuste local derivado del mismo calculado offline y aplicado solo donde exista soporte muestral suficiente y se demuestre una mejora sostenida del error en los sectores localizados.

## Conclusiones

- El análisis evidenció que el modelo GNS supera el desempeño de los modelos tradicionales de regresión lineal aplicados a los valores de arriendo en Usaquén. El modelo GNS, al incluir tanto la autocorrelación en la variable endógena como en los errores y en las variables rezagadas, logra capturar dependencias espaciales globales que el modelo clásico no contempla. Por su parte, el modelo GWR permitió representar de manera más precisa la heterogeneidad local de los precios, reflejando cómo las variables explicativas varían en intensidad según la localización. En conjunto, ambos enfoques demostraron que la incorporación de efectos espaciales es indispensable para modelar con rigor el comportamiento del mercado de arrendamientos urbanos.

- El modelo GNS incorporó tanto variables socioeconómicas (estrato, área, antigüedad, dotación pública, educación, movilidad) como los efectos espaciales rezagados de las variables independientes (WX), los cuales explicaron variaciones entre zonas interconectadas, reflejadas en la significancia de los coeficientes $\rho$ y $\lambda$. En contraste, el modelo GWR, aunque no incluye explícitamente los rezagos espaciales, permitió estimar coeficientes locales diferenciados para cada punto geográfico, generando un $R^2$ local promedio de 0.77, indicador de un excelente ajuste. Esta diferencia metodológica muestra que el GNS es más apropiado para análisis globales de política o planeación, mientras que el GWR es ideal para diagnósticos territoriales detallados y para priorizar zonas con mayor dinamismo en el mercado inmobiliario.

- La comparación y validación realizada demostró que la implementación de modelos econométricos espaciales es viable y útil para la sociedad. En particular, la automatización de la estimación mediante el modelo GNS por metro cuadrado facilita la generación de valores de renta de referencia sin depender exclusivamente de métodos

directos, reduciendo tiempos y costos. Asimismo, al integrarse con procesos de web scraping y capas geográficas, la herramienta puede actualizar periódicamente los valores de arrendamiento, ofreciendo una visión dinámica del mercado. Su uso complementario al procedimiento P-DP2-046 permitiría establecer umbrales de verificación: por ejemplo, marcar para revisión aquellos inmuebles donde la diferencia entre el valor estimado y el modelo supere el 15 %. Esto habilitaría a la SAE para pasar de una valoración manual a una gestión técnica basada en modelos replicables y evidencia espacial, fortaleciendo la transparencia y eficiencia institucional.

## Referencias Bibliográficas

Alcaldía Mayor de Bogotá & Departamento Administrativo de Planeación Distrital (DAPD). (2005). *La estratificación en Bogotá: 1983-2004.*

Anselin, L. (1995). *Local indicators of spatial association—LISA. Geographical Analysis,* 27(2), 93–115.

Anselin, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Aziz, A. (2023). *Assessing the impact of road traffic externalities on real estate prices: An evaluation through the hedonic pricing model*. Land, 12(4), 859.

Blesse, S., & Diegmann, A. (2022*). The place-based effects of police stations on crime*. *Journal of Public Economics, 208*.

Buendía, J. D., Yago, M. E., & Sánchez de la Vega, J. C. (2012). *Estimación de la renta bruta disponible municipal mediante técnicas de econometría espacial. Un ejercicio de aplicación*.

Chasco, C. (2003). *Econometría espacial aplicada a la predicción-extrapolación de datos espaciales*. Editorial Comunidad de Madrid. Madrid, España.

Chaux Guzmán, F. J. (2018). *Precios de la vivienda y calidad de vida: un análisis espacial utilizando información de Internet.*

Chen, K. (2022). Review of the impact of urban parks and green spaces on housing prices. *Buildings, 12*(9), 1330.

Cliff, A. D., & Ord, J. K. (1981). *Spatial Processes: Models and Applications*. Pion.

*Código Civil de Colombia.* 1887.

Colwell, P. F. (1976). *An Economic Analysis of Residential Abandonment and Rehabilitation*. National Bureau of Standards.

Cressie, N. (1993). *Statistics for spatial data New York*.

Daniels, R., & Mulley, C. (2013). *Explaining walking distance to public transport: The dominance of public transport supply.* Journal of Transport and Land Use, 6(2), 5–20

Debrezion, G., Pels, E., & Rietveld, P. (2007). *The impact of railway stations on residential and commercial property value: A meta-analysis.*

Decreto 188 de 2014. *"Por el cual se adopta el Plan Parcial de Renovación Urbana 'El Pedregal' en la localidad de Usaquén*." Mayo 14 de 2014.

Decreto 376 de 2023. *"Por medio del cual se adopta el Plan Parcial No. 10 'El Rosario' ubicado dentro del ámbito del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte - 'Ciudad Lagos de Torca' y se dictan otras disposiciones."* Agosto 25 de 2023.

Decreto 422 de 2000. *"Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 50 de la Ley 546 de 1999 y los artículos 60, 61 y 62 de la Ley 550 de 1999".* Marzo 8 de 2000.

Decreto 1420 de 1998. **"***Por el cual se reglamentan parcialmente el artículo 37 de la Ley 9 de 1989, el artículo 27 del Decreto-ley 2150 de 1995, los artículos 56, 61, 62, 67, 75, 76, 77, 80, 82, 84 y 87 de la Ley 388 de 1997 y, el artículo 11 del Decreto-ley 151 de 1998, que hacen referencia al tema de avalúos".* Julio 24 de 1998.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2017). *Manual de recuento - GEIH: Gran Encuesta Integrada de Hogares* (Versión 11). Dirección de Metodología y Producción Estadística.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Recuperado de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Proyecciones de población basadas en el Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. Recuperado de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020). *Decreto 148 de 2020: Por el cual se reglamentan parcialmente los artículos 79, 80, 81 y 82 de la Ley 1955 de 2019, y se modifica parcialmente el Título 2 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1170 de 2015.* 7 de febrero de 2020.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2024). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2023*. Recuperado de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2023

Elhorst, J. P. (2014). *Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels.* Springer.

Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. Chichester: Wiley

Getis, A. (2008). *A history of the concept of spatial autocorrelation: A geographer's perspective. Geographical Analysis, 40*(3), 297–309

Gila, G. A., & Novás, F. M. (2012). *El uso del método hedónico para ajustar los cambios de calidad: la experiencia del IPV.*

Gordon, B. L., Rutherford, R., & Yavas, A. (2020). *The omission of house age in MLS database listings.*

Griliches, Z. (1991). *Hedonic Price Indexes and the Measurement of Capital and Productivity: Some Historical Reflections.*

*Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). Basic Econometrics (5th ed.). McGraw-Hill.*

*Guijarro, F., et al. (2019). Assessing the impact of road traffic externalities on housing prices.* Sustainability, 11(24), 7183.

*Haining, R. (2003). Spatial Data Analysis: Theory and Practice.* Cambridge University Press

Headwaters Economics. (s. f.). *Property value/desirability effects of bike paths adjacent to residential areas*

Heredia Barbosa, A., & Cifuentes Vásquez, F. (2024). *Factores Determinantes del Precio de Arriendo de Viviendas en Ciudades Colombianas: Un Enfoque de Modelos Hedónicos.*

Hernández del Valle, J. D. (2021). *Formulación de un Modelo Econométrico Espacial para la Valoración de Apartamentos en la Ciudad de Medellín.*

Hernández-García, J. (2023). Prácticas informales de arrendamiento en barrios populares en Bogotá y Cali. En *Vivienda en arriendo en América Latina* (pp. 187–212). Instituto de Estudios Urbanos UC.

Jaramillo, S. A., & Agudelo, J. E. (2018). *Rentabilidad de la inversión en vivienda en Medellín durante 2016.*

Jaramillo, S. G. (2004). *Precios inmobiliarios en el mercado de vivienda en Bogotá 1970-2004.*

LeSage, J., & Pace, R. K. (2009). *Introduction to Spatial Econometrics.* CRC Press.

Ley 142 de 1994. "*Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones".* Julio 11 de 1994.

Ley 675 de 2001. *"Por la cual se expide el régimen de propiedad horizontal".* Agosto 3 de 2001.

Ley 820 de 2003. **"***Por la cual se expide el régimen de arrendamientos de vivienda urbana y se dictan otras disposiciones"*. Julio 10 de 2003.

Ley 1673 de 2013. *"Por la cual se reglamenta la actividad del avaluador y se dictan otras disposiciones"*. Julio 19 de 2013.

Ley 1708 de 2014. *"Por la cual se expide el Código de Extinción de Dominio".* Enero 20 de 2014.

Ley 1849 del 2017. "*Por medio de la cual se modifica y adiciona la Ley 1708 de 2014 "Código de Extinción de Dominio" y se dictan otras disposiciones".* Julio 19 del 2017.

LeSage, J., & Pace, R. K. (2009). *Introduction to Spatial Econometrics. CRC Press.*

Martínez Barreto, J. A. (2016). *Análisis de la formación del precio de la vivienda urbana en Bogotá: localidades de Kennedy, Fontibón y Engativá en el último bienio 2015-2016.*

Melo Martínez, C. E., & Melo Martínez, Ó. O. (2003). *Estimación de precios hedónicos para propiedades residencial y comercial en la ciudad de Bogotá*. Ciencia, Investigación, Academia y Desarrollo Ingeniería, 8(1), 10-17.

Medrano, J. A., Perlaza, M., & Fuentes, H. J. (2011). *Estimación de tasas de capitalización de rentas de vivienda urbana estrato 3 sometidas al régimen de propiedad horizontal en Bogotá mediante modelos econométricos.*

Observatorio de Salud de Bogotá – SaluData. (2024). *Construimos territorios de Bien-Estar en Usaquén (diagnóstico 2023-2024)*. SaluData

Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica.*

Paelinck, J. H, & Klassen, L. H. (1979). *Spatial Econometrics.*

Poeta, S., Gerhardt, T., & Stumpf Gonzalez, M. (2019). *Análisis de precios hedónicos de viviendas.* Revista ingeniería de construcción, *34*(2), 215-220.

Quigley, J. M, & Rosenthal, L. A. (2005). *The Effects of Land Use Regulation on the Price of Housing: What Do We Know? What Can We Learn?*

Ramírez, J. E. T. (2012). *Estudio sobre el mercado de arrendamiento de vivienda en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo.*

*Real Academia Española (2001).* Diccionario de la lengua española.

Resolución número 620 de 2008. *"Por la cual se establecen los procedimientos para los avalúos ordenados dentro del marco de la Ley 388 de 1997".* 23 de septiembre de 2008.

Rodríguez, D. A., & Mojica, C. H. (2009). *Capitalization of BRT network expansions effects into prices of non-expansion areas. Transportation Research Part A, 43(5), 560–571.*

Rosen, S. (1974). *Hedonic prices and implicit markets: Product differentiation in pure competition.* Journal of Political Economy, 82(1), 34–55

RStudio. (2024). *RStudio IDE*. Posit. https://posit.co/

Sanpedro (1959). *Realidad Económica y Análisis Estructural.*

Secretaría Distrital de Planeación & Universidad Nacional de Colombia. (2013). *Segregación socioeconómica en el espacio urbano de Bogotá.*

*Secretaría Distrital de Salud – IDECA. (2024). Instituciones Prestadoras de Salud Bogotá (IPS).* https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/instituciones-prestadoras-de-salud-bogota

Sinche, J. U., & Torres, J. C. (2021). *Análisis de sentimientos en los mensajes recibidos en el entorno virtual de aprendizaje de la modalidad abierta y a distancia de la UTPL.*

SAE. (2019). *Misión, Visión, Valores, Funciones y Deberes.* Recuperado de https://www.saesas.gov.co/?idcategoria=32825

SAE. (2023). *Metodología de Administración de los Bienes del FRISCO* (Versión 17, 30 de diciembre de 2023). Bogotá: Sociedad de Activos Especiales S.A.S.

Sociedad de Activos Especiales (2023). *Informe de gestión: Estimados de renta – Proyecto Clúster.*

Toloza Delgado, J. D., Melo-Marínez, O. O., & Azcarate-Romero, J. S. (2021). *Determinantes del precio de la vivienda nueva en Bogotá para el año 2019: una aproximación a través de un modelo semiparamétrico de regresión espacial.*

Torres, J. E. (2012). *Estudio sobre el mercado de arrendamiento de vivienda en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo.*

UN-Habitat. (2020). *Public Space Site-Specific Assessment: Guidelines to achieve quality public spaces at neighbourhood scale*. United Nations Human Settlements Programme.

Wing, C. K., & Chin, T. (2003). *A Critical Review of Literature on the Hedonic Price Model.*