

TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS APLICADAS A LA VALUACIÓN MASIVA DE LA TIERRA URBANA: EL CASO DE LA CIUDAD DE RIO CUARTO, PROVINCIA DE CÓRDOBA

Geostatistic Techniques Applied to Mass Appraisal of Urban Land: The Case of the City of Rio Cuarto - State of Córdoba -

Federico Monzani

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Economía y Finanzas

Marcos Gaspar Montenegro

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Economía y Finanzas

Mario Andrés Piumetto

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Centro de Estudios Territoriales

Mariano Augusto Córdoba

CONICET, Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Micael Jeremías Salomón

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Ciencias Económicas

Juan Pablo Carranza

Universidad Siglo 21

Secretaría de Investigación

Resumen:

Con el fin de comprender las estructuras y el desarrollo de las ciudades y gestionar las políticas urbanas, resulta clave conocer el valor y funcionamiento del mercado del suelo. Esto posibilita, por ejemplo, a los hacedores de políticas pública tomar decisiones que bajo el principio de equidad mejore el bienestar de los ciudadanos o identificar oportunidades de financiamiento a partir de la misma valorización del suelo. Por ello, en el presente trabajo, se utilizan técnicas geoestadísticas, que tienen en cuenta la estructura espacial para la valuación masiva de la ciudad de Río Cuarto, Córdoba. Estas técnicas resultaron satisfactorias al estimar el valor unitario de la tierra. Los modelos de kriging universal (con deriva y con regresión) fueron los que mejor predicción obtuvieron. Sin embargo, la técnica de kriging ordinario, al contemplarse el principio de parsimonia, resultó también ser adecuada.

Palabras claves: Kriging, Valuación Masiva, Geoestadística

Abstract:

In order to understand the structures and development of the cities and manage urban policies, it is of great importance to know the value of the land and how its market works. This enables policy makers, for example, to take decisions that improve the welfare of citizens under the principle of equity or to identify financing opportunities from this mass appraisal. Therefore, in this paper, geostatistical techniques were used while trying to take into account the spatial structure in the mass appraisal of the city of Rio Cuarto, Córdoba. These techniques were found to be reasonable to estimate the unit's land value. The models of universal kriging (with drift and regression) provided the best prediction. However, the ordinary kriging technique, when contemplating the parsimony principle, was also considered adequate.

Key words: *Kriging, Mass Appraisal, Geostatistic*

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del valor de la tierra urbana resulta crucial para comprender las estructuras de las ciudades e interpretar el territorio. Para este fin, es posible implementar instrumentos de gestión económica, financiera, fiscal, de desarrollo y de ordenamiento urbano. Respecto a las políticas económicas -fiscales y financieras- relacionadas al impuesto inmobiliario o predial, fuente de financiamiento del núcleo urbano, surge el problema de determinar si la base imponible guarda o no relación con el valor de mercado de los inmuebles. Cuando esta relación no es manifiesta, se produce un quiebre en la noción de equidad impositiva y, en consecuencia, afecta el bienestar de los ciudadanos. En el mismo sentido, se desfinancia la ejecución de las políticas públicas y la valorización del suelo sólo beneficia a los propietarios, al no participar el Estado en la recuperación y movilización de una parte de aquella, a través de instrumentos como el impuesto inmobiliario. En relación a las políticas de desarrollo urbano, la cuantificación de los valores de los inmuebles permite implementar mejores políticas de uso del suelo y ordenamiento territorial. El conjunto de estas promueven: a) que el Estado mejore la recuperación de la inversión pública (cambios de uso de suelo desde agrícola a urbano, ejecución de la obra pública, modificaciones normativas, grande proyectos urbanos, entre otros) que generan un incremento de la renta del suelo; b) un mayor control sobre prácticas especulativas que impacten en el incremento del precio del suelo; c) identificar zonas con mayor o menor valor que definan intervenciones estatales que conlleven a una mayor equidad urbana y un mejor financiamiento de las ciudades.

Asimismo, conocer el valor de la tierra urbana facilita el diseño de políticas públicas orientadas a favorecer el acceso a la propiedad de diversos sectores sociales evitando la gentrificación. Además, permite al Estado conocer el impacto social de las obras de infraestructura pública y posibilita el diseño de herramientas de financiación público-privada internalizando los beneficios sociales generados por estos proyectos.

En suma, el diseño de herramientas de valuación masiva que permitan conocer el valor de la tierra con un nivel elevado no sólo es una etapa clave de la política fiscal de los gobiernos locales, sino que genera información de relevancia para el diseño de políticas de desarrollo urbano y de acceso al suelo para diversos sectores de la población.

A los fines de lograr conocer el valor unitario de la tierra urbana (en adelante VUT) se han desarrollado diferentes enfoques metodológicos (Guerrero, D., 1994):

- **Método Comparativo – Relativo-**: consiste en la comparación de las valuaciones de las viviendas cercanas o de similares características respecto a una vivienda tipo, ajustando las mismas a través del uso de un conjunto de coeficientes. Así denominado, se aplica mayormente en tasaciones individuales.

● **Método de la Renta:** se basa en el cálculo esperado de las rentas futuras de un inmueble expresadas en valor presente, mediante el uso de una tasa de descuento. A diferencia de otros métodos, tiene en cuenta el tiempo. Frecuentemente utilizado en inmuebles no residenciales y para tasaciones particulares.

● **Método de Valuación Masiva:** mediante el uso de un conjunto de técnicas estadísticas, se interpolan precios de mercado de los inmuebles, en algunos casos, acompañado también de otras variables que revisten cierta relevancia para la estimación. Según Mora Esperanza (2008) los métodos de predicción más utilizados son: redes neuronales, análisis de multinivel, coeficientes de variación espacial, regresiones con pesos geográficos, métodos geoestadísticos, entre otros. Algunas de estas técnicas incorporan la información espacial en el análisis; otras, las relaciones no lineales.

En el presente trabajo se ilustra la aplicación de técnicas geoestadísticas -Kriging Ordinario, Co-Kriging y Kriging Universal- que contemplan la información espacial en la estimación del valor de suelo en la ciudad de Río Cuarto, Provincia de Córdoba, Argentina. Desde 1992, el Catastro Provincial no había ejecutado estudios de mercado para actualización de valores de la tierra urbana y la localidad exhibía una relación de valores catastrales respecto del mercado, del 5%. El trabajo presenta en la sección 2, los materiales y métodos utilizados y en la sección 3, el modelo aplicado; la sección 4 exhibe los resultados y propone una breve discusión, mientras que la última sección presenta las conclusiones principales.

Son escasas en Argentina las investigaciones orientadas al diseño de herramientas para la valuación masiva de la tierra urbana, y mucho más aquellas que han logrado materializarse en una política pública sostenida. Un antecedente relevante en este sentido, en donde se registra la aplicación de técnicas geoestadísticas para la valuación masiva de la tierra urbana es el esfuerzo realizado por el Catastro Municipal de la ciudad de Córdoba, que desde 2008 mantiene una actualización periódica de los valores catastrales mediante la aplicación de la técnica conocida como Kriging Ordinario.

Actualmente el gobierno provincial se encuentra embarcado en un ambicioso proyecto de actualización del valor del suelo en todo el territorio, implementando avances en el diseño de la investigación, sumando al análisis otras características territoriales que acompañen al valor de mercado de la tierra y una variedad de métodos que, además de las técnicas geoestadísticas mencionadas, consisten en técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*) cuya aplicación a las valuaciones masivas no registra antecedentes en la región. El presente artículo se enmarca en los esfuerzos realizados dentro de este proyecto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Región de Estudio

El área de estudio corresponde a la ciudad de Río Cuarto¹, Provincia de Córdoba, Argentina, (Grafico 1), con una población de 170.000 habitantes y 72,2 km² de extensión su área urbana (mancha urbana). Se caracteriza por una estructura territorial e inmobiliaria monocéntrica, con un crecimiento desde su centro a la periferia (característico de las ciudades latinoamericanas), contenida por un anillo de circunvalación conformado por rutas nacionales (N°158, N°8) y una autopista (N°36).

¹ Se consideran dentro de la mancha urbana del conglomerado Río Cuarto, las localidades de Río Cuarto propiamente dicha, Las Higueras y Santa Catalina (Holmberg).

Su centro comercial y administrativo es el espacio por excelencia que reúne un conjunto significativo de atributos urbanísticos (espacios públicos, equipamiento, servicios, infraestructura, mixtura de usos). Asimismo, la ciudad se encuentra dividida en sentido norte-sur por el Rio Cuarto, atravesado por una serie de puentes que conectan con vías principales hacia el noreste, intensificando estas el desarrollo en sectores próximos.

En la base catastral, se registran en total de 67.267 parcelas con valuación urbana y 81.625 cuentas con valuación urbana. Como aproximación del volumen del mercado inmobiliario, considerando datos desde 2014 hasta la fecha, en el área de estudio se producen en promedio 2.207 compra-venta de inmuebles por año, es decir el 2,70% del total de cuentas.

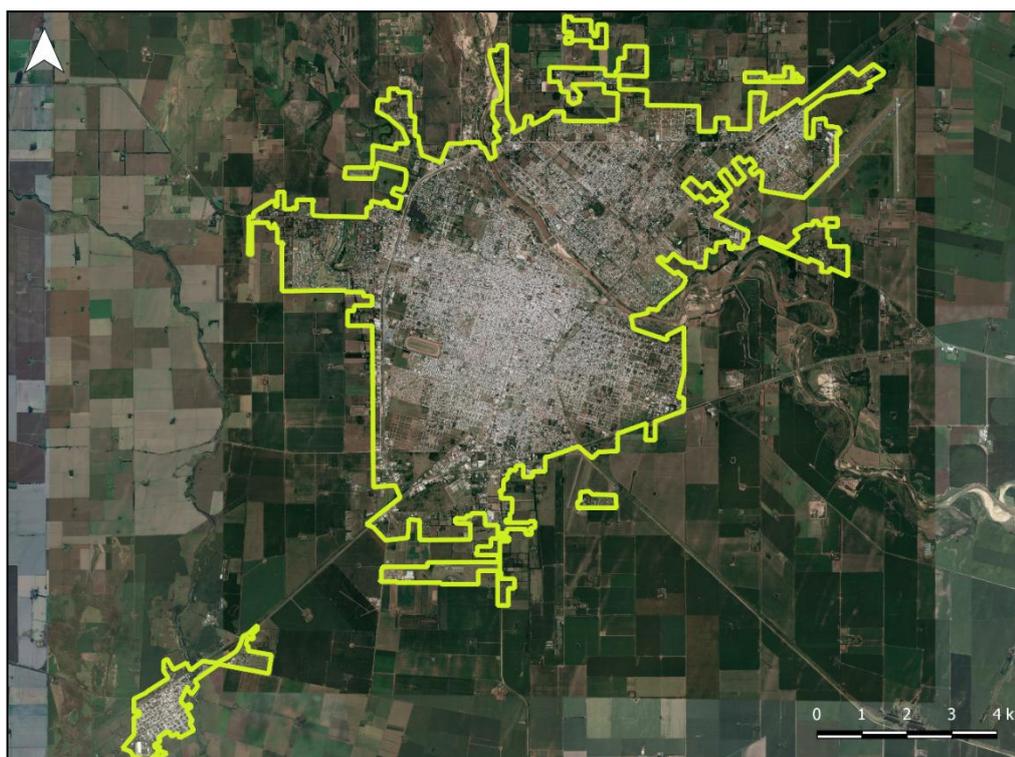


Figura 1. Ejido de la ciudad de Rio Cuarto

2.2. Datos

La elaboración de la base de datos, equipo de trabajo y desarrollo de las actividades que se describen es parte del proyecto Estudio Territorial Inmobiliario de la Provincia de Córdoba, actualmente en ejecución.

Los datos relevados se corresponden a terrenos baldíos urbanos, recolectados entre agosto y octubre de 2017 por un equipo multidisciplinario de agentes locales y especialistas en tasaciones.² Se realizaron, en forma complementaria, visitas a campo para constatar la información recolectada. Adicionalmente, se incorporaron datos de valuaciones declaradas para el cálculo de impuestos aplicado a contratos u operaciones onerosas (Impuesto de

² Parte del equipo se abocó a la realización de trabajos de campo, dirigiéndose a la ciudad y relevando precios de mercado personalmente. En tanto que, otros miembros del equipo, obtuvieron información a través de llamadas telefónicas, páginas web y comunicación con el agente referente de la ciudad.

Sellos)³. Los datos fueron sistematizados y cargados en una aplicación web para su gestión y control de calidad cualitativo por parte de un grupo técnico de expertos. A partir de la base de datos conformada, se procedió al cálculo de diferentes variables geográficas con potencialidad para la predicción del VUT. Para ello, se utilizó el software libre QGIS. Las variables relevadas para cada punto evaluado fueron las siguientes:

- Distancia respecto a sitios con potencial influencia sobre el VUT: barrios cerrados, barrios populares, centro, espacios verdes, equipamientos urbanos, grandes superficies comerciales, parques industriales, río, vías de ferrocarril, vías principales, vías secundarias, cementerio, cárcel, basural, planta cloacal, entre otras.

- Presencia de servicios e infraestructura: agua, cloaca, gas y pavimento.

- Entorno: porcentaje de superficie baldía por manzana en un radio promedio de 500 m, porcentaje de superficie edificada por manzana en un radio promedio de 500 m, cantidad de ventas de parcelas que surgen del impuesto a los sellos en un radio de 500 m y cantidad de comercios en un radio de 100 m.

La cantidad total de observaciones en la base de datos fue de 283 terrenos baldíos urbanos, que representan el 0,4% del total de parcelas de la ciudad. La muestra está conformadas de la siguiente manera: 197 observaciones de ofertas y tasaciones, 30 valores estimados a partir de viviendas, 8 tasaciones ad-hoc, 3 remates y 45 ventas declaradas en el Impuesto de Sellos. En todos los casos, los valores de la tierra se homogeneizaron a un terreno tipo de 10 m x 30 m, a partir de la aplicación de coeficientes de frente/fondo, superficie y de caso, según normativas y procedimientos del catastro provincial. Asimismo se contempló para los casos de ofertas el 87%⁴ del valor pretendido, con el objeto de aproximarse al valor probable de venta, el cual se considera que representa el margen de negociación.

Los datos relevados se presentan en la Figura 2. Los puntos rojos pertenecen a la base elaborada por el equipo de relevamiento, donde el tamaño de cada punto refleja la magnitud del VUT. En tanto que los puntos azules provienen de la base del Impuesto de Sellos. Además, se representan las vías principales, espacios verdes, ríos, puentes y ejido municipal.

³ Dados los fuertes incentivos a eludir el pago del impuesto, sub-declarando el monto real de las ventas, se tomaron aquellos datos que mostraran una fuerte correlación espacial con los datos de mercados relevados en el entorno. El criterio establecido para la permanencia de los datos originados en el impuesto de sellos fue un índice de Moran local mayor a 0,4 en relación a los datos de mercado del vecindario, definido como un entorno de 500 metros a la redonda.

⁴ Porcentaje determinado en base a una regresión espacial en donde la variable dependiente es logaritmo natural del valor unitario de la tierra, y las variables independientes son: una variable categórica que informa sobre si la observación es oferta o venta, el rezago espacial de la variable dependiente y el rezago espacial del residuo.

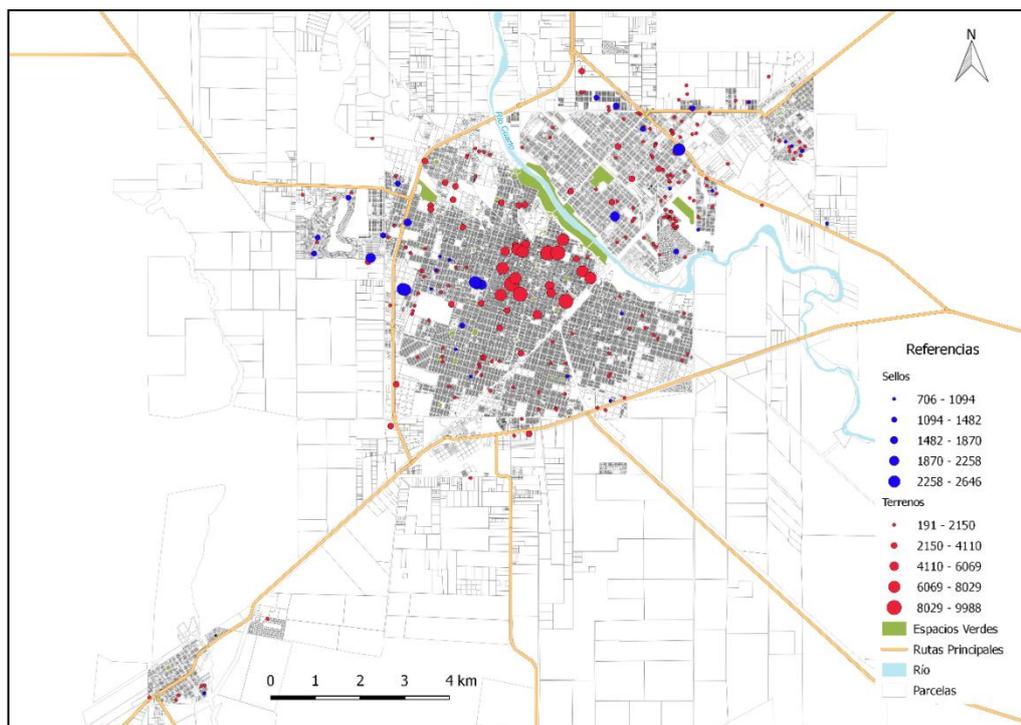


Figura 2. Plano de la ciudad de Rio Cuarto

2.3. Pre-procesamiento de datos

Se procedió a la depuración de las muestras georreferenciadas a través de la identificación de valores de VUT atípicos (*outliers*). Para ello se eliminaron los datos con valores por fuera del intervalo igual a la media ± 3 desvíos estándar. Luego, se eliminaron datos considerados como *outliers* espaciales (*inliers*) (Anselin, 2001), *i.e.* datos que difieren significativamente de puntos considerados como pertenecientes a su vecindario. Para esto se calculó el índice de Moran local utilizando una matriz de ponderación espacial, construida a través de la inversa de la distancia euclidiana y definiendo los vecindarios en un radio de 500 metros.

● **Identificación de outlier:** La Tabla 1 muestra los estadísticos de posición y dispersión del VUT en su versión original ($n=283$) y luego del proceso de depuración de datos ($n=282$). Para el primer caso, los valores del VUT se ubicaron en el intervalo [\$ 191; \$ 9.988], siendo su media y mediana igual a \$ 1.793 y \$ 1.340, respectivamente. Esta diferencia entre media y mediana muestra la existencia de una asimetría positiva en la distribución de la variable, lo que refleja la necesidad de depurar los datos para corregir la muestra, pero evitando interferir en la dependencia espacial. El resultado de tal proceso se aprecia en la tercer columna de la tabla donde se observa que los nuevos valores del VUT se encuentran en el intervalo [\$ 191; \$ 8.073], siendo menor al del primer caso (las observaciones que se eliminaron resultaron aquellas cercanas al límite superior). El valor medio de esta nueva distribución disminuyó a \$ 1.666 al igual que lo hizo su mediana a \$ 1.327. Es interesante apreciar la disminución del 12% que ocurrió en el coeficiente de variación (CV).⁵

⁵ En el proceso de depuración se priorizó conservar un conjunto de datos con el propósito de no sesgar el valor de la tierra hacia abajo, debido a las imperfecciones existentes propias del mercado del suelo.

Tabla 1

Estadística Descriptiva VUT

Nº Obs.	283	282
Mínimo	191	191
1st Quartil	1000	1000
Mediana	1340	1327
Media	1793	1666
3rd Quartil	1946	1928
Maxima	9988	8073
Desv. Est.	1489	1190
CV	0,83	0,71

Fuente: en base a Observatorio del Mercado Inmobiliario

● **Identificación de Inliers:** Se calculó el índice de Morán global (IMG), el cual resultó ser significativo ($p=0,001$) e igual a 0,63, presentando de este modo que el VUT muestra una autocorrelación espacial positiva en toda el área de estudio. Este resultado justifica el uso de técnicas geoestadísticas para la caracterización de la estructura espacial del VUT y la identificación de datos atípicos en su entorno. En función de lo anterior, se procede al cálculo del índice de Moran local (IML) y se identifican aquellas observaciones atípicas en relación a sus respectivos vecindarios de puntos, definido por un radio de 500 metros.

● **Análisis de tendencia:** Además, se analizó la existencia de tendencia del VUT en relación a las coordenadas, dado el supuesto de estacionariedad que la variable objetivo debe preservar. La razón de este análisis consiste en verificar si la ubicación espacial (coordenadas) debe o no ser considerada como variable independiente. Se observó la inexistencia de tendencia en la variable VUT respecto a su localización (coordenadas X e Y).

Finalmente, se estimaron los modelos geoestadísticos de Kriging Ordinario, Co-Kriging y Kriging con tendencia (Kriging con Deriva Externa, Kriging con Regresión) para la predicción del VUT. Los parámetros de estos se calcularon a partir de la implementación de semivariogramas teóricos (Esférico, Exponencial y Gaussiano), seleccionándose uno, siguiendo a Oliver y Webster (2014), a partir de la suma del cuadrado del error (SCE). Para la validación de los modelos geoestadísticos se utilizaron las medidas de coeficiente de correlación de Pearson, R^2 y raíz cuadrada del error relativo medio (RMSER).

3. ESPECIFICACIONES DEL MODELO

3.1. Marco Epistemológico, Metodológico y Teoría Económica

La estructura del trabajo se basa en un positivismo metodológico, el cual implementa el razonamiento matemático basado en técnicas estadísticas que, por medio de la inducción, procura predecir los valores de mercado del suelo -objeto de estudio- y a través de la deducción, en base a la razón, comprender la estructura urbana. La concepción del trabajo se basa en la teoría económica neoclásica que mediante un análisis microeconómico estudia el comportamiento de los consumidores (individuos⁶) y por medio de una función de bienestar, pretende determinar el precio y cantidad de bienes que maximicen el concepto de utilidad del

⁶ Se considera individuo, la expresión mínima de una sociedad, a un ser libre e independiente.

individuo. Bajo esta cosmovisión surgen las leyes de oferta, demanda y la idea de mercado que, en suma, representa los valores a estimar para la variable suelo.

3.2. Modelos de Predicción Espacial

El método Kriging se basa en el principio de la Geografía descrito por el geógrafo Waldo Tobler en 1970, que establece que los puntos más próximos en el espacio tienen valores más parecidos que aquellos que están más alejados, lo que se conoce como autocorrelación espacial. Se supone que la variabilidad es aleatoria y dependiente del espacio, siendo el mismo estacionario, con media constante y varianza dependiente de la distancia y dirección.

Kriging es considerado un interpolador lineal, es decir, genera una combinación lineal de media móvil ponderada (Viera, 2002). La magnitud de estos pesos depende de la estructura de correlación espacial de los datos, estimada mediante el ajuste de una función denominada semivariograma y de la configuración de los puntos muestrales dentro del vecindario. Los estimadores obtenidos son considerados estimadores lineales insesgados óptimos (ELIO).

Suponiendo una variable aleatoria $Z(x_i)$, de la cual se han registrado puntos de muestreo, también llamados observaciones de posicionamiento (x_1, x_2, \dots, x_N) para N datos, donde Z distribuye normal con media (estacionaria) y covarianza dependiente de la distancia y dirección (ecuación 1).

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (1)$$

Y siendo λ_i las ponderaciones que surgen al minimizar la función de semivariograma a través del lagrangeano, para que el estimador resulte insesgado, **la suma de estas debe ser igual a 1.**

A través de un semivariograma empírico se identifica la función teórica que estiman los ponderadores λ_i , siendo las más utilizadas - por su forma funcional - la función Esférica, Gaussiana y Exponencial (Matheron, 1971). A partir de tal ajuste se estiman los parámetros de la función inferida, siendo los mismos el rango (distancia en la cual la varianza alcanza su valor máximo), *nugget* (ordenada al origen) y *sill* (valor de semivarianza máximo) (Figura 3).

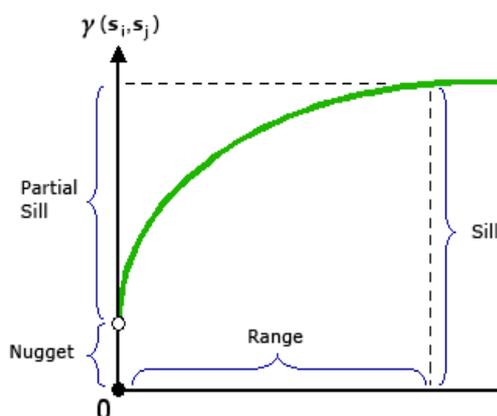


Figura 3: Semivariograma empírico

Fuente: tomado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.html>

Otras versiones basadas en kriging fueron implementadas. Entre ellas **Co-kriging** y **kriging universal (Kriging con tendencia en las coordenadas, Kriging con deriva externa y Kriging con regresión)**. La primera es una extensión de la técnica de kriging al caso multivariado, siendo su objetivo estimar el valor de una variable a partir no sólo de las mediciones de ésta, sino también de otras variables correlacionadas con ella. Estas variables representan una combinación lineal ponderada de los datos, sin sesgo y con una varianza del error mínima, que contribuyen en la predicción de la variable a estimar.

Suponiendo que se quiere estimar la variable $Z(x_0)$ en el sitio x_0 , se plantea un estimador resultante de una combinación lineal de los datos disponibles en la vecindad x_0 como el siguiente (ecuación 2):

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}^i z_i(x_{\alpha}^i) \quad (2)$$

donde el subíndice α denota las co-variables y el supraíndice i las observaciones.

Los métodos de Kriging ordinario y Co-Kriging requieren como supuesto que la variable a modelar sea estacionaria (al menos débilmente). Sin embargo, en muchas situaciones el supuesto de estacionariedad no se cumple. En estos casos es necesario modelar la variable respuesta en función a las variables que inducen la tendencia. Si se utilizan las coordenadas como conjunto de variables predictoras para inferir la variable respuesta, el tipo de kriging se denomina universal. Mientras que, si la tendencia es expresada por un conjunto de variables externas (en forma lineal), diferentes a las coordenadas, el método se denomina Kriging con deriva externa (*Kriging external drift* – KED-). Cuando la tendencia y los residuos resultantes del modelo lineal son ajustados por separados y luego sumados, se denomina kriging con regresión (*regression kriging* –RK-). Las predicciones que resultan de RK son las mismas que las de KED, siendo el predictor de ambas ELIO.

Definiendo entonces $Z(x)$ como (ecuación 3):

$$Z(x_i) = m(x_i) + e(x_i) \quad (3)$$

dónde $m(x)$ es la función determinística que describe la tendencia, más un componente estocástico de media cero; la tendencia puede expresarse tal y como se muestra a continuación (ecuación 4):

$$m(x_i) = \sum_{l=1}^p a_l f_l(x_i) \quad (4)$$

Siendo la función $f_i(x)$ conocida y p el numero de variables predictoras. Resultando entonces el predictor kriging universal:

$$Z(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

4. Resultados y Discusión

4.1. Kriging Ordinario

Se presenta en la Figura 4 el semivariograma empírico del VUT para la ciudad de Rio Cuarto, el cual resultó ajustarse a una función teórica Gaussiana, siendo sus parámetros: rango (1831,94), nugget (48125,66) y psill (1368505,87).

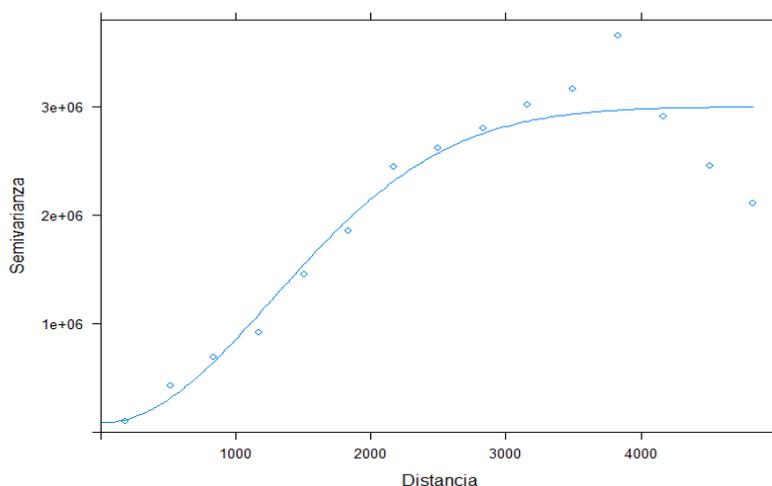


Figura 4: Semivariograma Gaussiano

4.2. Co-Kriging

Con el propósito de identificar las co-variables que se relacionan con el VUT, en un primer paso, se estimó una regresión lineal que vincula a estas con la variable objetivo, para luego, por medio de la técnica paso a paso (*stepwise*), determinar un grupo de las mismas de acuerdo a su influencia en el VUT, resultando seleccionadas 10, de un total de 25.⁷ Además, se avaló la relación por medio de una matriz de diagrama de dispersión, a partir de la cual se seleccionaron tres variables, las cuales obtuvieron un coeficiente mayor al 0,60 en valores absolutos.

En la Figura 5 se muestran los semivariogramas de las tres variables finalmente seleccionadas (VUT - % edificado - % Comercio) en la diagonal principal, y los covariogramas de la misma. Los semivariogramas fueron modelados por medio de un modelo Gaussiano resultando coherente para los ajustes.

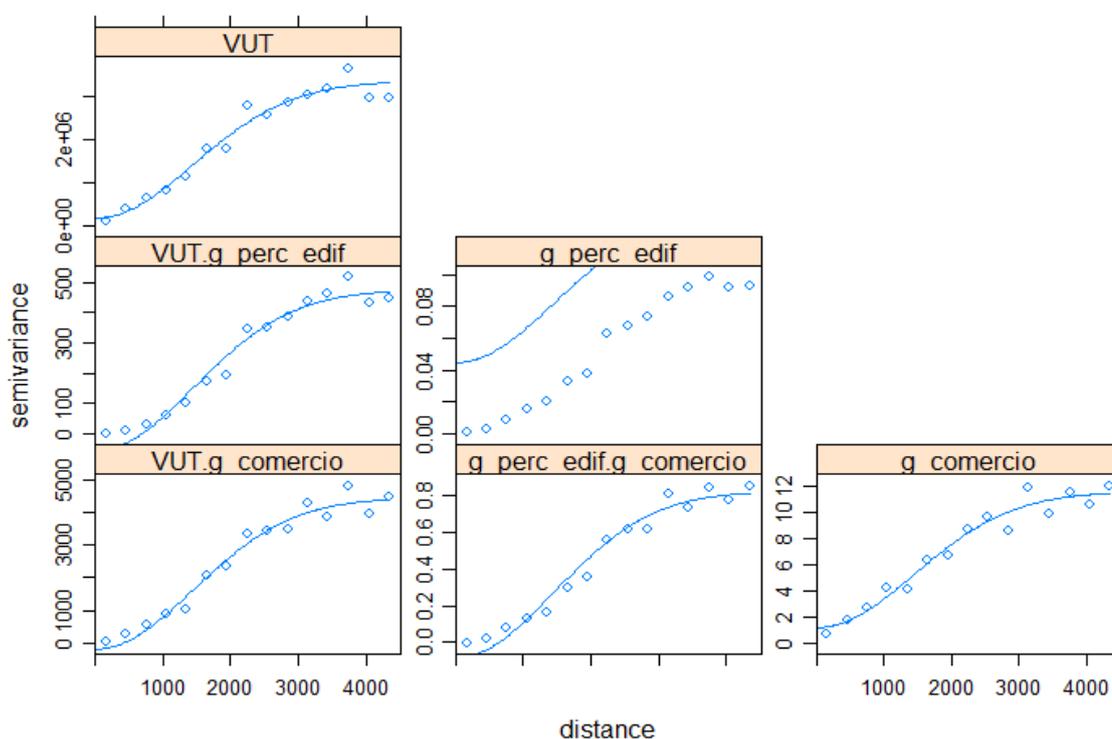


Figura 5: Semivariograma Co-Kriging

⁷ Estas variables son: porcentaje de parcelas con disponibilidad de agua dentro de un radio de 500 metros, porcentaje de terrenos baldíos dentro de un radio de 500 metros, porcentaje de edificación dentro de un radio de 500 metros, porcentaje de comercios dentro de un radio de 500 metros, distancia a centros educativos, distancia al área céntrica, distancia a la ruta nacional N° 38, distancia a vías principales, distancia a puentes, distancias a barrios privados.

4.3. Kriging con deriva externa

En una primera instancia y siguiendo los pasos del modelo co-kriging, a través de la técnica de selección paso a paso, se escogieron un conjunto de co-variables que van a ser utilizadas en el modelo KED, el cual resultó ajustarse a una función teórica esférica, identificándose los siguientes parámetros, rango (4141), nugget (0) y psill (2814662). La Figura 6 refleja el semivariograma producto de los parámetros expuestos arriba, donde se percibe un ajuste coherente con la función estimada (esférica).

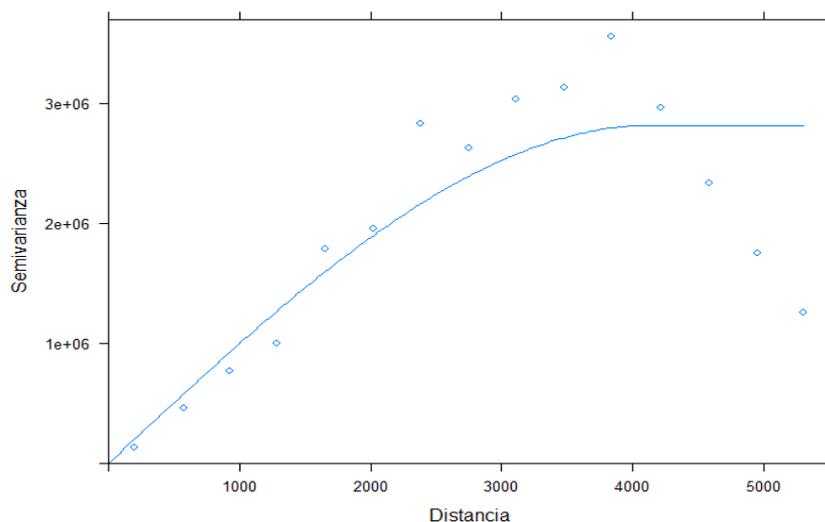


Figura 6: Semivariograma Esférico

4.4. Kriging con regresión

Por último, se aplicó la técnica de Kriging con regresión (RK), la cual es semejante a la técnica de KED (Hengl. T et.al., 2003), pero en este caso la tendencia y los residuos son modelados por separados y luego sumados. La estimación se hizo a través de una función teórica esférica siguiendo lo observado en KED.

La Tabla 2 resume la bondad de ajuste de los distintos modelos, resultando ser los modelos KED y RK los que mejor ajustan al observar las 3 medidas utilizadas, en concordancia a lo que establece la teoría (Hengl. T et.al. op. cit.). Sin embargo, si se piensa en el principio de parsimonia, el modelo KO pareciera comportarse adecuadamente. Finalmente, y debido a una mínima diferencia a favor en el RMSE, **se escogió la técnica de kriging con tendencia (RK)** por sobre las demás.

Tabla 2

Comparación de Modelos

Modelos	KO	C-K	KED	RK
Correlación	0,8600	0,7700	0,8850	0,8860
R ²	0,7400	0,5300	0,7820	0,7830
RMSER	0,3900	0,5200	0,3562	0,3548

Fuente: en base a Observatorio del Mercado Inmobiliario

4.5. Mapa de variabilidad espacial del VUT

Los valores del suelo en la ciudad de Rio IV resultantes de la estimación por el modelo elegido (RK) se muestran en la Figura 7, donde los mayores valores se encuentran en el área central, lo que se correlaciona con la estructura urbana radio-céntrica de esta localidad, y estos se incrementan a medida que se aproximan a las vías principales. Asimismo, las áreas periféricas se ven irradiadas de valores del suelo altos a medio altos, lo que se explica en la dinámica de renovación urbana y mayores potencialidades de edificación de esas áreas.

Un tercer escalón de valores se localiza en áreas periféricas con diferentes grados de consolidación y usos. Por un lado, la periferia sur con mayor antigüedad y grado de consolidación, pero con una renovación urbana incipiente. Por el otro, la periferia norte y noreste que, si bien tienen un nivel de consolidación menor, concentran la expansión urbana de los nuevos loteos. Esto ha sido potenciado, además, por la presencia de los puentes que atraviesan el río Cuarto (que divide a la ciudad en sentido Norte-Sur) y conectan con vías principales hacia el noreste, las cuales intensifican el desarrollo en sectores próximos a estas.

Sin embargo, es notoria la relación de los valores próximos al río y su desvalorización homogénea, correspondida con el deterioro y degradación de la zona costera, principalmente por la presencia de ocupaciones informales. Estos menores valores se encuentran también en zonas de concentración de planes de vivienda social (suroeste) y periferia con mayor grado de deterioro (sureste).

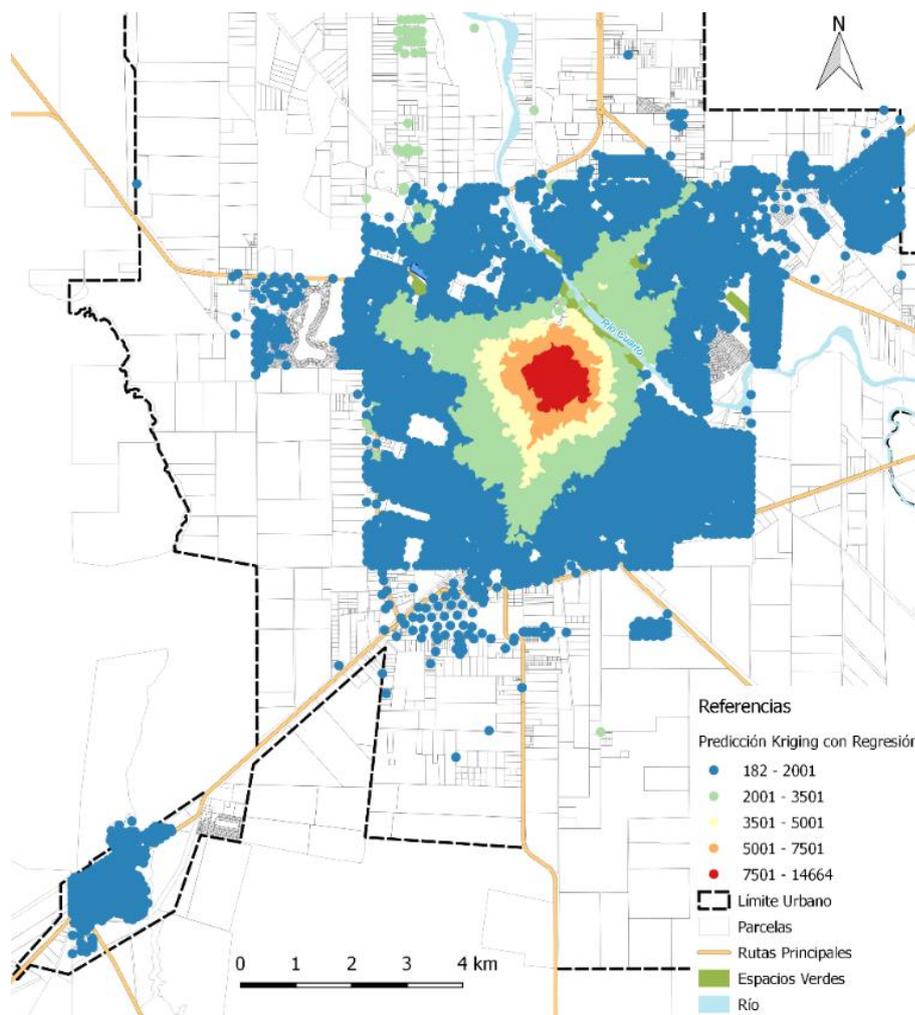


Figura 7: Ciudad de Rio Cuarto – Modelo Regresión Kriging-

5. CONCLUSIONES

La metodología utilizada en este trabajo es de gran utilidad al momento de implementar planes de revalúos masivos en ciudades, dado que los resultados de ellos son un gran instrumento para la toma de decisión de los hacedores de políticas en todos sus niveles.

Para tal fin, se aplicaron las técnicas geoestadísticas de kriging a la ciudad de Rio Cuarto, Córdoba, Argentina. Los resultados demostraron que los modelos kriging con tendencia (KED - RK) fueron los de mejor ajuste, destacándose, entre ellos, el modelo RK debido a que presentó menor error de predicción (RMSE), aunque estimamos que con una mejor distribución y cantidad de observaciones, éste sería menor. Sin embargo, el modelo de KO, el cual representa una técnica menos compleja, obtuvo valores de predicción que fueron similares a RK y KED por lo que no se desestima su aplicación basándose en el principio de parsimonia.

Por último, el uso de estas técnicas geoestadísticas nos provee de una adecuada estimación del VUT, en este caso para la ciudad de Rio Cuarto, permitiendo obtener y elaborar planes de valuación que sirvan de base para varios fines y aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS.

La información utilizada en el presente escrito fue generada en el marco del **Estudio Territorial Inmobiliario de la Provincia de Córdoba, Argentina**, financiado en conjunto por el Programa de Naciones Unidas para el desarrollo (Programa PNUD AR/16/005) y el gobierno provincial. El proyecto, coordinado por la Secretaría de Ingresos Públicos y la Dirección General de Catastro, ambas dependientes del Ministerio de Finanzas, tiene por objetivo de actualizar entre mediados de 2017 y fines de 2018 las valuaciones catastrales de más de 2 millones de inmuebles urbanos y rurales, en una extensión de 165.000 km²; así mismo, modernizar los procesos de actualización, brindando un marco apropiado y sustentable de información y herramientas para la gestión de políticas territoriales en la provincia. Entre las estrategias implementadas, se conformó un equipo de trabajo multidisciplinario de alto nivel y se desarrolló un Observatorio del Mercado Inmobiliario (OMI) que a julio de 2018 cuenta con más de 7.000 datos georreferenciados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSELIN L. (1995). **Local indicators of spatial association – LISA**. *Geographical Analysis*, 27: 93 -115.
- ANSELIN L. (2001). **Spatial Effects in Economics Practice in Environmental and Resource Economics**. *Am. J. Agric. Economics*. 83 (3): 705 – 710.
- BORRERO, O., & OSCAR, A. (2007). **Avalúos de inmuebles y garantías**. Bogotá: Multiletras Editores Ltda.
- BONET, J., MUÑOZ MIRANDA, A., PINEDA MANNHEIM, C., ET.AL. (2014). **El potencial oculto: Factores determinantes y oportunidades del impuesto a la propiedad inmobiliaria en América Latina**.
- BUITRAGO REYES. (2011). **Estudios sobre la dinámica inmobiliaria de Bogotá: LA CIUDAD VISTA DESDE EL CATASTRO**. Recuperado de https://www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/06-2_1.pdf
- CACCIAMANO, G (2017). **Estudio de correlación del valor del suelo urbano con variables y rasgos del territorio, tesina de grado**, UNC, FCEF.N.
- DE CESARE, C. M. (2012). **Mejoramiento del desempeño del impuesto sobre la propiedad inmobiliaria en América Latina**.
- GUERRERO, D. (1994). **Manual de tasaciones**. Propiedades urbanas y rurales. *Alsina*.
- HENGL T., GEUVELINK, G.B.M. AND STEIN A. (2003). **Comparison of kriging with external drift and regression-kriging**. *Technical note*, ITC, Available on-line at http://www.itc.nl/library/Academic_output/
- HENGL, T., HEUVELINK, G. B., Y ROSSITER, D. G. (2007). **About regression-kriging: from equations to case studies**. *Computers & geosciences*, 33(10), 1301-1315.
- MATHERON G. (1971) **The theory of regionalized variables and its applications**. *Cahiers du centre de Morphologies Mathématique de Fontainebleau*, No. 5, Paris, 211 pp.
- MONAYAR, V., CISTERNA, C., & PEDRAZZANI, C. (2017). **Estructura urbana y estructura de precios del suelo. Análisis de las transformaciones del espacio urbano en la zona noroeste de la ciudad de Córdoba-Argentina**. *Breves Contribuciones del IEG-Instituto de Estudios Geográficos 'Dr. Guillermo Rohmeder'-*, 23(23).
- MORA ESPERANZA, J. G. (2008). **“Modelos de valoración automatizada”**. *CT: Catastro*, (62), 7-26.

MORAN P., (1948) **The interpretation of statistical map.** *J. Roy. Stat. Soc. B. Method.* 10, 243 – 51.

OLIVER, M. A., Y WEBSTER, R. (2014). **A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging.** *Catena*, 113, 56-69.

VIERA, M. A. D., & GONZÁLEZ, R. C. (2002). **Geoestadística aplicada.** Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba: México DF, México, 31-57.

ANEXO

A modo de ejemplo se presentan en las Figura 8 y 9 los nuevos planos de valores la ciudad de Rio Cuarto. En la primera figura se observa la distribución general de valores en la ciudad, mientras que en la segunda se hace foco a una determinada zona, exhibiendo los valores a nivel de eje de cuadra.

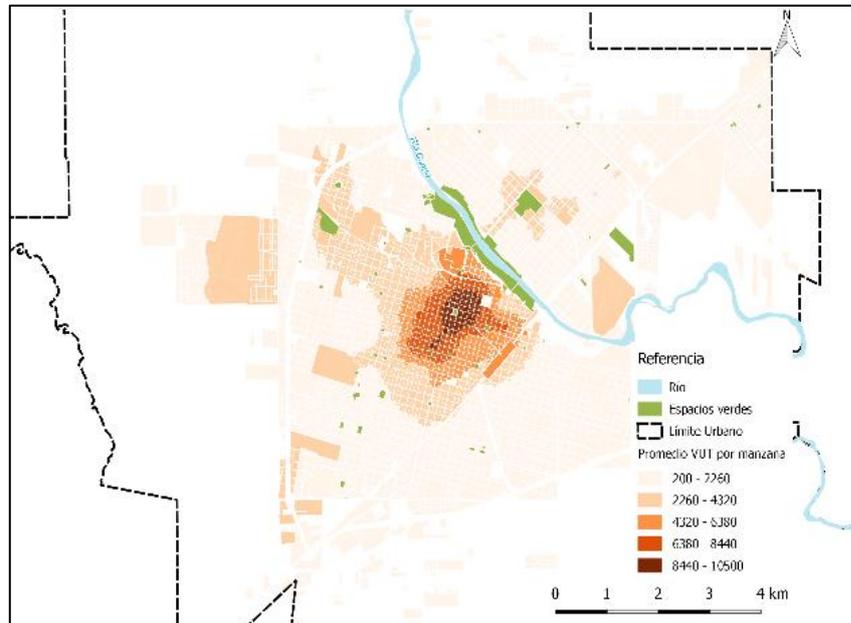


Figura 8: Mapa Distribución VUT en la Ciudad de Rio Cuarto



Figura 9: Ciudad de Rio Cuarto, VUT por Línea Municipal