



Análisis de clúster de predios proveedores de servicios ambientales para implementar un esquema de pagos urbano

Análise de agrupamento de propriedades que fornecem serviços ambientais para implementar um esquema de pagamento urbano

Cluster analysis of landowners that provide environmental services to implement an urban payment scheme

Luisa Fernanda DÍEZ-ECHAVARRÍA^{1*}, Diana Carolina RÍOS-ECHEVERRI¹, Claudia Helena HOYOS-ESTRADA², Jhon Freddy BENJUMEA-ARIAS²

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Antioquia, Colombia.

² Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín, Antioquia, Colombia.

* E-mail de contato: luisadiez@itm.edu.co

Artículo recibido el 5 de febrero, 2021, versión final aceptada el 1 de junio, 2022, publicado el 5 de abril, 2023.

RESUMEN: Los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) son esquemas voluntarios diseñados para dar incentivos por la provisión de servicios ambientales (SA) en predios en los que podrían desarrollarse actividades productivas. Los PSA han sido implementados, en su mayoría, en contextos rurales, y su extensión a contextos urbanos requiere ajustes en el diseño del esquema tradicional; sobre esa necesidad, no hay avances suficientes reportados en la literatura. Para diseñar un esquema PSA en zona urbana (PSAU), se busca entender la heterogeneidad que caracteriza a los propietarios y a los predios donde está el SA. Este trabajo presenta un agrupamiento de 111 predios seleccionados para ser parte de un PSAU en Colombia, con el fin de identificar características afines entre los grupos, que faciliten el diseño de estrategias de pago. El agrupamiento se hizo teniendo en cuenta variables específicas del contexto urbano y con el algoritmo de análisis de clúster k-prototypes, dando como resultado la división de los predios en tres grupos. Se encontró que dos de los tres grupos tienen características más diferenciadoras: el primero es en su mayoría privado, con áreas totales más pequeñas y costosas; mientras que el otro es principalmente público, con mayor área total y a menor costo. Se concluyó que el pago a reconocer para el primer grupo debería ser muy atractivo si se quiere tener una buena adopción, ya que el costo de oportunidad representado por la disponibilidad y valor de la tierra es mayor. El otro grupo podría ser el que adopte más fácilmente por tener más cantidad de área y un valor económico más bajo, dado que en este los predios son principalmente de dominio público son fundamentales las acciones

de apropiación social con la comunidad. El método de agrupamiento resultó ser un proceso adecuado para abordar la heterogeneidad presente en el contexto urbano.

Palabras clave: agrupamiento; algoritmo k-prototypes; análisis de clúster; área urbana; pagos por servicios ambientales.

RESUMO: Pagamentos por Serviços ambientais (PSA) são esquemas voluntários desenhados para a provisão de serviços ambientais (SA) em prédios nos quais poderiam ser desenvolvidas atividades produtivas. Os PSA foram implementados principalmente em contextos rurais, e sua extensão aos contextos urbanos precisa um ajuste no desenho do esquema tradicional; e sobre essa necessidade, não há avanços suficientes relatados na literatura. Para projetar um esquema PSA em áreas urbanas (PSAU), buscamos entender a heterogeneidade que caracteriza os proprietários de terras e seus prédios, onde o ecossistema provedor de SA está localizado. Este trabalho apresenta um agrupamento de 111 prédios selecionados para fazer parte de um PSAU na Colômbia, a fim de identificar características comuns entre os grupos, que facilitem o desenho de estratégias de pagamento. O agrupamento foi feito levando em conta variáveis específicas do contexto urbano, e com o algoritmo de análise de clusters k-prototypes, resultando na divisão dos prédios em três grupos. Constatou-se que dois dos três grupos têm características muito diferenciadoras: o primeiro é majoritariamente privado, com áreas totais menores e mais caras; enquanto o outro é principalmente público, com maior área total e menor custo. Concluiu-se que o pagamento a ser reconhecido para o primeiro grupo deve ser bastante atrativo caso se queira ter uma boa adoção, pois o custo de oportunidade representado pela disponibilidade e valor do terreno é maior. O outro grupo poderia ser aquele que adota com mais facilidade por ter maior área e menor valor econômico, visto que neste grupo as propriedades são majoritariamente de domínio público, ações de apropriação social com a comunidade são fundamentais. O método de agrupamento revelou-se um processo adequado para abordar a heterogeneidade presente no contexto urbano.

Palavras-chave: agrupamento; algoritmo k-protótipo; análise de cluster; área urbana; pagamentos por serviços ambientais.

ABSTRACT: Payments for Environmental Services (PES) are voluntary schemes designed to provide incentives for providing environmental services (ES) on lands with the potential to develop productive activities. The PES have been implemented, for the most part, in rural contexts, and their extension to urban contexts requires adjustments in the design of the traditional scheme. On that need, there are not enough advances reported in the literature. To design a PES in urban areas (PSAU), we pretend to understand the heterogeneity that characterizes the landholders and their properties, where the ecosystem provider of the ES is located. This article presents a grouping exercise of 111 selected properties to be part of a PSAU in Colombia, in order to identify similar characteristics between the groups, which facilitate the design of payment strategies. The grouping was done considering specific variables of the urban context and with the k-prototypes cluster analysis algorithm, resulting in the division of the properties into three groups. We found that two of the three groups have more differentiating characteristics: the first is mostly private, with smaller and more expensive total areas; while the other is mainly public, with a larger total area and at a lower cost. We concluded that the payment to be recognized for the first group should be very attractive if you want to have a good adoption, since the opportunity cost represented by the availability and value of the land is higher. The other group could be the one that adopts more easily because it has a larger area and a lower economic value, because of in this group the properties are mainly public domain, social appropriation actions with the community are fundamental. The clustering method turned out to be an adequate process to address the heterogeneity present in the urban context.

Keywords: grouping; k-prototype algorithm; cluster analysis; urban area; payments for environmental services.

1. Introducción

Los servicios ambientales (SA) son los diferentes beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). En las zonas urbanas, estos servicios pueden provenir de árboles en calles, parques y zonas de césped, bosques urbanos, tierras cultivadas, humedales, lagos, costas y arroyos. Ejemplos de los SA provistos por ecosistemas localizados en zonas urbanas pueden ser: regulación del flujo de agua y mitigación de la escorrentía, regulación de la temperatura (isla de calor), reducción de ruido, purificación del aire, moderación de eventos naturales extremos, tratamiento de residuos, regulación del clima, polinización y dispersión de semillas, desarrollo recreacional y avistamiento de fauna (Bolund & Sven, 1999; Gómez-Baggethun & Barton, 2013).

Los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) se pueden definir conforme a cinco condiciones:

- i) son transacciones voluntarias,
- ii) donde un servicio ambiental bien definido (o un uso de la tierra que aseguraría ese servicio)
- iii) es comprado por al menos un comprador de servicio ambiental,
- iv) a por lo menos un tenedor de tierra donde está el ecosistema proveedor del SA,
- v) solo si el proveedor asegura la provisión del SA transado (condicionamiento) (Wunder, 2005; Engel, 2016).

Si bien los esquemas PSA han sido ampliamente implementados en contextos rurales, en contextos urbanos apenas están emergiendo (Cerra, 2017; Richards & Thompson, 2019) y se hace ne-

cesario identificar características distintivas, necesarias para el diseño de los esquemas de Pago por Servicios Ambientales Urbanos (PSAU). Las cinco condiciones mencionadas sobre PSA podrían cumplirse a partir de predios en suelo urbano, o de una porción de estos, que aseguran la provisión de SA.

Las diferencias respecto al contexto rural radican principalmente en las características de los usos del suelo, de los tenedores y de las actividades productivas. Así, el suelo urbano difiere del rural en varios aspectos, por ejemplo, el precio del primero suele ser más alto; hay fragmentación, esto es, parcelas más pequeñas y dispersas, por lo que puede haber mayor densidad de propietarios dueños de áreas más pequeñas. Los tenedores o proveedores pueden ser públicos o privados, con motivaciones de administración del suelo comerciales y no comerciales (Richards & Thompson, 2019).

Por otro lado, como los pagos generalmente se hacen por conservación o por restauración, esto genera unos costos de oportunidad por renunciar a actividades económicas productivas. En contextos rurales, la actividad productiva típica es la agricultura (Ozdemiroglu *et al.*, 2006), y se estima principalmente a partir de dos enfoques, uno basado en flujos de caja y otro en la renta de la tierra (Rendon *et al.*, 2016), para ello, se identifican renglones productivos como agricultura, ganadería y otros. En contextos urbanos, las actividades económicas de los predios son principalmente de los sectores secundario (transformación y fabricación) y terciario de la economía (servicios), donde, los predios pueden tener potencial para la transformación urbana y la redensificación. Eso con lleva a identificar aspectos clave del uso del suelo y de la configuración del territorio que no aparecen en los esquemas PSA rurales, como: la presencia de redes de servicios

públicos domiciliarios en la malla urbana, costos asociados a su instalación y desuso, las intervenciones urbanísticas proyectadas, la estratificación, entre otros. Así entonces, en contextos urbanos, el costo de oportunidad habría de considerar la destinación económica de los predios (mayoritariamente de uso residencial, comercial, industrial, servicios y otros) y su potencial urbanístico, particularmente, la presión de usos del suelo motivada por el crecimiento demográfico y la expansión urbana.

La presión urbanística debe considerarse no solo en términos de costo, sino también en el efecto que tiene sobre los ecosistemas y su capacidad de proveer SA (Niemelä *et al.*, 2010). Por ejemplo, entre los años 1992 y 2015, el valle de Aburrá ha convertido 1845 hectáreas de bosque y 108 hectáreas de humedales en suelo urbano (AMVA & Eafit, 2018). Entonces, a medida que las ciudades van creciendo y ganando mayor densidad poblacional, pierden espacios verdes y aumentan los efectos negativos para el bienestar humano (Davies *et al.*, 2018). Con un esquema PSAU es posible identificar los ecosistemas estratégicos según la provisión de SA, para poder tomar acciones de protección y mitigar los efectos de la presión urbanística.

A pesar de que los aprendizajes logrados con los esquemas rurales se pueden extrapolar a contextos urbanos, uno de los mayores desafíos es homologar el funcionamiento operativo del esquema tradicional para atender las necesidades, condiciones y características de las zonas urbanas. Se entiende que la forma en que se otorguen los pagos (valor, frecuencia y forma) determina, en gran medida, la adopción y eficiencia de un PSA (Wunder, 2005), por lo que deben resultar atractivos para los tenedores de tierra donde está el ecosistema proveedor de SA. Siendo entonces el pago uno de

los elementos claves en el diseño de un esquema PSAU, es necesario analizar cómo hacer su cálculo, de modo que se tengan en cuenta los distintos intereses, características y usos que se dan al suelo en el contexto urbano. El primer paso para ese análisis es entender la heterogeneidad que caracteriza a los tenedores de tierra donde está el ecosistema proveedor de SA y sus predios, y que genera alto nivel de complejidad.

Para dar línea a la problemática, la pregunta de investigación de este trabajo es ¿cómo abordar la heterogeneidad de un conjunto de tenedores de tierra y sus predios, susceptibles de participar en un esquema de PSAU? La respuesta servirá de guía para diseñar estrategias de operación y pago para esos tenedores de tierra y sus predios, teniendo en cuenta su heterogeneidad de condiciones e intereses. De esta manera, proponemos afrontar ese reto mediante el uso de metodologías de agrupación, entendidas como una manera de simplificación de diversidad y reducción de complejidad (Smajgl *et al.*, 2011; Mayer *et al.*, 2014).

Como caso de estudio se tomará el valle de Aburrá, zona del departamento de Antioquia que reúne 10 municipios asociados bajo la figura de Área Metropolitana, quien además ejerce la autoridad ambiental urbana y quien pretende implementar un esquema PSAU, acorde a la normatividad vigente. Para tal fin, esta entidad priorizó un conjunto de predios verdes urbanos, tanto públicos como privados, que además deservan suelos de protección ambiental, hacen parte de redes ecológicas identificadas para la movilidad de la avifauna y que principalmente están asociadas a redes hídricas municipales. El artículo está organizado así: en la sección 2 se presenta el esquema metodológico, la sección 3 presenta los

resultados y finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones del estudio.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El área de estudio es el valle de Aburrá en el departamento de Antioquia (Colombia) (ver Figura 1). Esta zona es parte de la cuenca hidrográfica del río Aburrá-Medellín, tiene una población de más de 4 millones de personas y un área de 1,165.5 km² (DANE, 2019; Medellín-Cómo-Vamos, 2020). La

presencia de PSA no ha sido ajena en esta región, pues en el año 2017 el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) inició su implementación a través del esquema BancO2 a nivel metropolitano, en las áreas rurales de los 10 municipios, donde además se han vinculado los entes territoriales y la autoridad ambiental rural (Corantioquia), logrando no sólo el aporte voluntario de empresas y ciudadanos, sino también de recursos de ley que se han destinado para el pago por conservación de bosques a cerca de 500 familias campesinas que poseen predios en cuencas abastecedoras. Con esta experiencia el AMVA inició en 2018 la formulación del esquema para las áreas urbanas, donde ejerce la autoridad ambiental (AMVA, 2018a; 2018b; 2019).



FIGURA 1 – División político-administrativa del valle de Aburrá.

FUENTE: Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, 2015.

En Colombia, existe normatividad desde el 2013 que permite destinar recursos públicos para PSA en cumplimiento del Artículo 111 de la ley 99 de 1993, e incluso, las compensaciones por pérdida de biodiversidad asociadas al desarrollo de obras de infraestructura (MADS, 2013).

Debido a la heterogeneidad y fragmentación de la propiedad en los suelos urbanos, los esquemas PSAU pueden ser intervenciones relativamente pequeñas que, cuando se amplían a un gran número de propietarios, podrían mejorar el funcionamiento ecológico y la provisión de SA (Richards & Thompson, 2019). En este sentido, se busca que en el valle de Aburrá se maximice la participación de propietarios de predios susceptibles a un mejoramiento ambiental (predios privados) y que requieran de acciones de apropiación social (predios públicos).

El AMVA, mediante diferentes contratos con MASBOSQUES (Corporación para el Manejo Sostenible de los Bosques que opera el esquema de PSA BancO2 en Colombia), realizaron un proceso de estructuración del esquema de PSA Urbano, con una selección inicial 111 predios que conforman redes ecológicas y están asociados a suelos de protección ambiental y a redes hídricas municipales. El área total de dichos predios es de 2,082,497.68 m², de los cuales 1,182,512.087 m² son objeto de intervención por tener un porcentaje de área de interés (suelo de protección) para implementar un PSAU.

2.2. Selección de variables de interés

Los 111 predios seleccionados inicialmente por su potencial de participación en el PSA urbano, fueron caracterizados por el AMVA según varios atributos, en adelante llamados *variables*. De estas, se seleccionaron nueve que se consideran relevantes

para el agrupamiento; y que, además, resultaron ser las más sensibles en el análisis exploratorio de la información. Así, las variables de análisis para diferenciar los grupos con el algoritmo *k-prototypes*: seis variables son de tipo socioeconómico (SE) y tres de tipo ambiental (AM), como se describe a continuación y en la TABLA 1.

- (SE) Destinación o uso que se le da al predio.
- (SE) Carácter: tipo de propiedad del predio, pública o privada.
- (SE) Calidad jurídica: si el propietario se registra como persona natural o persona jurídica
- (AM) Índice de calidad biótica: valoración relacionada con la función ecológica y ambiental de un sistema de espacios verdes.
- (AM) Cobertura: Describe las características de cobertura del suelo, ya sean naturales o artificiales.
- (AM) Acciones potenciales: acciones previstas para implementar en los predios que participen en el PSAU, estas pueden ser de mejoramiento ambiental (MA) y/o de apropiación social (AS). La TABLA 1 amplía estas acciones potenciales, aquellas de mejoramiento ambiental son intervenciones que garantizan el aprovisionamiento de servicios ecosistémicos de regulación: regulación del clima, de la temperatura y purificación del aire. Las acciones de apropiación social buscan la provisión de servicios culturales en los predios conservados o restaurados: recreación, inspiración, educación y estética del paisaje.
- (SE) Área total del predio.
- (SE) Proporción de área de interés: Proporción de área del polígono que es de interés para aplicar el esquema PSAU por estar en suelo de protección.
- (SE) Valor del m²: valor monetario por m² del predio.

TABLA 1 – Variables que representan los predios.

Variable	Valores/categorías
(SE) Destinación	1) Dominio público, 2) Uso público, 3) Comercial, 4) Cultural, 5) Educativo, 6) Habitacional, 7) Industrial, Institucional, 8) No urbanizable, 9) Urbanizado, 10) Urbanizado no construido, 11) Recreacional.
(SE) Carácter	1) Público, 2) Privado.
(SE) Calidad jurídica	1) Persona natural, 2) Persona jurídica
(AM) Índice de calidad biótica - ICB	1) Alta, 2) Media, 3) Baja
(AM) Cobertura	Se establecieron 20 categorías distintas que combinan vegetación arbustiva, arbórea, y herbácea; infraestructura gris, suelo forestal protector, entre otras.
(AM) Acciones potenciales	MA - Hacer mantenimiento/limpieza de malezas MA - Restauración y enriquecimiento MA - Siembra de especies nativas MA - Mantenimiento de zonas verdes existentes AS - Hacer adecuación de espacios públicos con manejo de taludes AS - Manejo de residuos sólidos AS - Sensibilización/ apropiación social conocimiento de fauna y flora AS - Senderos peatonales AS - Dinamización del espacio AS - Educación, conocimiento y valoración de servicios ambientales AS - Mejoramiento/mantenimiento de la infraestructura/mobiliario Sin recomendación por falta de información, de permiso de ingreso o por desconocimiento de situación final de interés para el esquema Se hace mantenimiento permanente, no se recomiendan acciones
(SE) Área total	[m ²]
(SE) Proporción de área de interés	[%]proporción del predio en suelo de protección
(SE) Valor del m ²	[COP/Valor correspondiente a la zonas homogéneas geoeconómicas

NOTA: Variables categóricas: destinación, carácter, calidad jurídica, índice de calidad biótica, cobertura y acciones potenciales. Variables numéricas: área total, proporción de área de interés y valor del m².

2.3. Algoritmo de clúster K-prototypes

Se empleó el análisis clúster o de conglomerados para agrupar el conjunto de predios por características similares. Con esta técnica estadística se organizan objetos en grupos cuyos miembros son similares en alguna característica. Así, un clúster o grupo es una colección de objetos que son

"similares" entre ellos y "diferentes" a los objetos que pertenecen a otros grupos (Sarada & Kumar, 2013). Uno de los métodos de agrupamiento más utilizados para este procedimiento estadístico es *k-means* (Mayer *et al.*, 2014), empleado para agrupar conjuntos de datos numéricos a partir de distancias numéricas. Para el tratamiento de datos que tienen, además, información categórica, se

emplea el algoritmo *k-prototypes* de Huang, quien reemplazó las medias (valor medio) de agrupamiento utilizados en el algoritmo *k-means* por modos (moda estadística), y utilizó un método basado en la frecuencia para actualizar los modos en el proceso de agrupamiento para minimizar la función objetivo de agrupamiento, además, definió una medida de disimilitud que toma en cuenta los atributos numéricos y categóricos (Huang, 1998). Dado que se tienen variables numéricas y categóricas (ver nota en Tabla 1), el método empleado para agrupar los 111 predios es *k-prototypes*.

El algoritmo *k-prototypes* es un problema de optimización: asigna los objetos al centro del clúster más cercano. La división de los objetos en clústeres se hace de acuerdo con una función de costo, siendo la traza de la matriz de dispersión dentro del grupo.

Para minimizar la función de costo es necesario calcular la distancia entre los objetos. Asumiendo un conjunto $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, cada objeto i tiene un vector de atributos m , así, $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}\}$, de estos atributos, unos son numéricos $m_r = \{1, \dots, p\}$ y otros son categóricos $m_c = \{p+1, \dots, m\}$.

El algoritmo de agrupamiento divide los n objetos en k grupos distintos. El parámetro k se determina previamente. La distancia entre dos objetos X_1 y X_2 de distinto tipo se calcula como (Huang, 1998):

$$d(X_1, X_2) = \sum_{j=1}^p (x_{1j} - x_{2j})^2 + \gamma * \sum_{j=p+1}^m \delta(x_{1j}, x_{2j}) \quad \text{Ecuación 1}$$

El primer término es la medida de disimilitud entre los atributos numéricos, definida por el cuadrado de la distancia Euclidiana; el segundo término es la medida de disimilitud entre atributos categóricos definida por el número de incoinciden-

cias (mismatches) de categorías entre objetos, y γ es el peso de los atributos categóricos, esto es, un peso usado para equilibrar las dos partes (Huang, 1997). Así, un pequeño valor de γ indica que el agrupamiento está dominado por los atributos numéricos, mientras que un valor grande implica que los atributos categóricos dominan el agrupamiento.

La estimación de la distancia se acopla a la función de costo del algoritmo *k-means* original que se desea minimizar, la cual se expresa como:

$$\text{Minimizar } P(W, Q) = \sum_{i=1}^k \sum_{l=1}^n w_{i,l} d(X_i, Q_l) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^k w_{i,l} = 1, 1 \leq l \leq n$$

$$w_{i,l} \in [0, 1], 1 \leq i \leq n, 1 \leq l \leq k$$

W es una matriz de partición $n \times k$, donde n es el número total de objetos y k es el parámetro de clústeres, previamente dado. $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_k\}$ es un conjunto de objetos en el mismo dominio de objetos. Incorporando la Ecuación 1 en la 2, se tiene que el algoritmo busca minimizar la siguiente función de costo (Huang, 1998):

$$P(W, Q) = \sum_{i=1}^k \left(\sum_{l=1}^n w_{i,l} \sum_{j=1}^p (x_{1j} - x_{2j})^2 + \gamma * \sum_{l=1}^n w_{i,l} \sum_{j=p+1}^m \delta(x_{1j}, x_{2j}) \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

El algoritmo *k-prototypes* fue implementado en Python 3.

3. Resultados

Al aplicar el método *k-prototypes*, una de las cuestiones más importantes es saber cuál será ese

número óptimo de grupos k . Para identificar ese parámetro, usamos el *método del codo* (Ketchen Jr. & Shool, 1996). Para eso, se ejecuta el algoritmo de agrupamiento en el conjunto de datos para un rango de valores de k (por ejemplo, k de 1 a 10), para cada valor de k se calcula la suma de los errores al cuadrado (costo), como se muestra en la

Figura 2. Así, se debe seleccionar un k tal que, la gráfica muestre una estabilización de la variación de la función de costo, es decir, que las diferencias entre grupos (costo) sean mínimas al aumentar su número. Para este caso, se observa que el número ideal de grupos es 3.

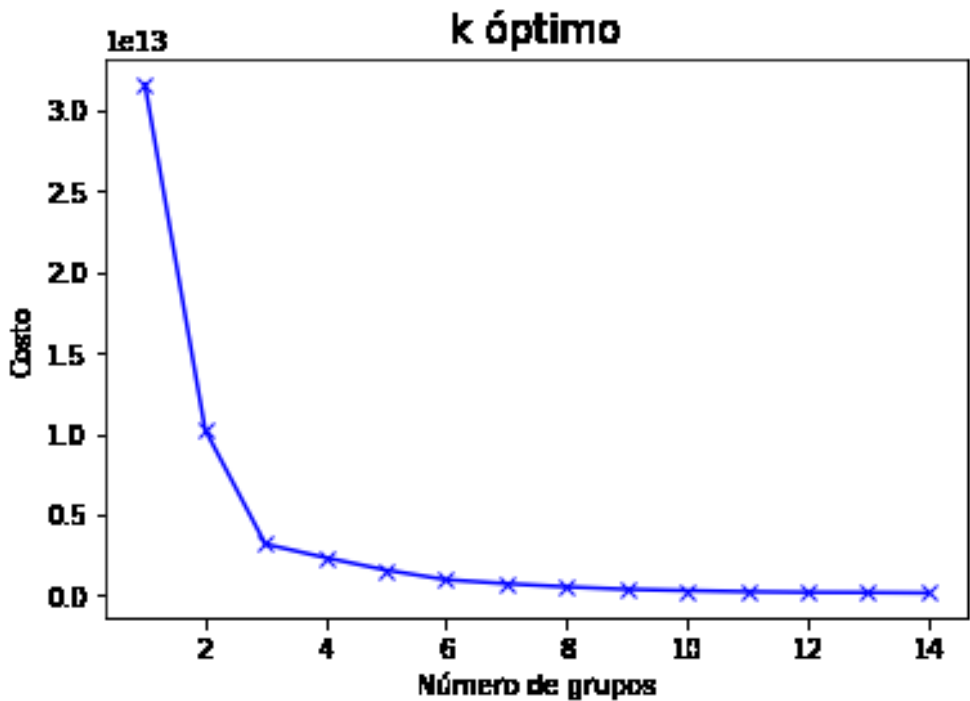


FIGURA 2 – Método del codo para identificar el k óptimo.

Al ejecutar el algoritmo, se obtuvo que el grupo 0 recoge 37 predios (33.3%), el grupo 1 recoge 25 (22.5%) y el grupo 2 recoge 49 (44.1%). Para describir las características de los grupos en cuanto a sus variables numéricas, se compara cada uno de ellos con el resultado del total de los datos.

La Figura 3 presenta una matriz simétrica de la correlación entre las tres variables numéricas: área total, proporción de área de interés y valor del m² y la Figura 2 presenta un resumen descriptivo de las mismas.

Todos los datos

	Proporción AI	Valor \$
Área	-0,39	0,06
Proporción AI		-0,10

Grupo 1

	Proporción AI	Valor \$
Área	-0,53	0,40
Proporción AI		-0,35

Grupo 0

	Proporción AI	Valor \$
Área	-0,21	-0,11
Proporción AI		-0,27

Grupo 2

	Proporción AI	Valor \$
Área	-0,27	0,42
Proporción AI		-0,38

FIGURA 3 – Matriz simétrica de correlación entre variables numéricas.

Se puede observar que, hay presencia de correlación negativa entre casi todas las variables numéricas. Según trabajos como Zbinden & Lee (2005) y Bremer *et al.* (2014), es más probable que un propietario decida participar en un esquema mientras el área sea más grande y la proporción de área de interés para el esquema sea más pequeña, puesto que podrá disponer de su terreno para otros usos. Es interesante ver en la Figura 3 que hay una correlación negativa entre estas dos variables para todos los grupos. Esto quiere decir que, a mayores valores de área, menor la proporción de área de interés, sobre todo en el caso del grupo 1, donde la correlación es de -0,53 (Figura 3c).

Los resultados de la Tabla 2 muestran que los propietarios del grupo 0 tienen en promedio menor área (11.688 m²) con un valor económico muy alto (1.710.582 COP/m²), respecto a los otros grupos. Por el contrario, los propietarios del grupo 2 tienen áreas considerablemente más grandes (23.372 m²) y con un valor económico muy bajo (43.851 COP/m²). De acuerdo con los resultados en las variables numéricas, se puede inferir que un esquema diseñado para el grupo 0 debería ser mucho más atractivo, contundente y tal vez mejor pago que para los otros dos grupos, ya que el costo de oportunidad representado por la disponibilidad y valor de la tierra es mayor.

Se puede observar que, hay presencia de correlación negativa entre casi todas las variables numéricas. Según trabajos como Zbinden & Lee (2005) y Bremer *et al.* (2014), es más probable que un propietario decida participar en un esquema mientras el área sea más grande y la proporción de área de interés para el esquema sea más pequeña, puesto que podrá disponer de su terreno para otros usos. Es interesante ver en la Figura 3 que hay una correlación negativa entre estas dos variables para todos los grupos. Esto quiere decir que, a mayores valores de área, menor la proporción de área de interés, sobre todo en el caso del grupo 1, donde la correlación es de -0,53 (Figura 3c).

Los resultados de la Tabla 2 muestran que los propietarios del grupo 0 tienen en promedio menor área (11.688 m²) con un valor económico muy alto (1.710.582 COP/m²), respecto a los otros grupos. Por el contrario, los propietarios del grupo 2 tienen áreas considerablemente más grandes (23.372 m²) y con un valor económico muy bajo (43.851 COP/m²). De acuerdo con los resultados en las variables numéricas, se puede inferir que un esquema diseñado para el grupo 0 debería ser mucho más atractivo, contundente y tal vez mejor pago que para los otros dos grupos, ya que el costo de oportunidad representado por la disponibilidad y valor de la tierra es mayor.

TABLA 2 – Resumen de estadísticas de las variables numéricas.

Todos los datos			Grupo 0		
Variable	Media	Desv. Est.	Variable	Media	Desv. Est.
Área	18.761,24	37.794,08	Área	11.688,13	22.274,26
Proporción AI	0,74	0,30	Proporción AI	0,74	0,27
Valor del m²	1.587.697,13	673.441,49	Valor del m²	1.710.582,43	233.718,27
Grupo 1			Grupo 2		
Variable	Media	Desv. Est.	Variable	Media	Desv. Est.
Área	20.193,32	48.034,74	Área	23.371,51	39.933,27
Proporción AI	0,71	0,31	Proporción AI	0,75	0,31
Valor del m²	765.332,2	251.948,11	Valor del m²	43.851,51	44.522,93

NOTA: Área: [m²], Valor del m²: [\$COP]. Desv. Est.: desviación estándar.

La Tabla 3 presenta las variables categóricas que resultaron ser diferenciadoras de los grupos. En los tres grupos se pueden encontrar observaciones o predios con cualquier valor de las variables, pero se indica el que valor que más proporción tiene por grupo. El grupo 0 se destaca por tener predios que en su mayoría son privados y están destinados a

uso institucional, además de tener un ICB alto, es decir que hace parte de áreas para la conservación y preservación del sistema hídrico. El grupo 2 por su parte, se destaca por tener en su mayoría predios de carácter público, destinados a uso comercial, cultural, educativo, industrial y recreacional.

TABLA 3 – Variables categóricas diferenciadoras.

		Grupo		
Variable	Valor	0	1	2
Carácter	Privado	x		
	Público			x
Destinación	Comercial			x
	Cultural			x
	Educativo			x
	Industrial			x
	Institucional	x		
	Recreacional			x
Índice de calidad biótica – ICB	Alto	x		

La Tabla 4 presenta las acciones potenciales de mejoramiento ambiental y apropiación social que han sido identificadas por el AMVA, y que resultaron diferenciadoras para los grupos. Tanto el grupo 0 como el grupo 1 requieren de acciones de manejo ambiental. Particularmente, el grupo 0 demanda acciones orientadas a la *plantación de especies nativas y mantenimiento de zonas verdes*, mientras que el grupo 2 demanda acciones orientadas a la *limpieza de malezas, la restauración y el enriquecimiento*.

TABLA 4 – Acciones de manejo diferenciadoras.

Variable	Valor	Grupo		
		0	1	2
Acción de manejo ambiental	Limpieza de malezas		x	
	Restauración y enriquecimiento		x	
	Plantación de especies nativas	x		
	Mantenimiento de zonas verdes	x		
Acción de apropiación social	Sensibilización sobre manejo de residuos sólidos		x	
	Sensibilización/ apropiación social conocimiento de fauna y flora		x	
	Educación, conocimiento y valoración de servicios ambientales		x	

Es de esperarse que las acciones de apropiación social estén asociadas principalmente al grupo 2, que tiene predios mayoritariamente públicos, donde es muy importante *la sensibilización sobre el manejo de residuos sólidos y el conocimiento de fauna y flora*. La otra acción de apropiación social diferenciadora es la *educación, conocimiento y valoración de servicios ambientales* con la comunidad, orientado principalmente al grupo 1.

4. Conclusiones

Los tenedores de tierra urbana donde está el ecosistema proveedor de SA y sus predios tienen características altamente heterogéneas, haciendo casi imposible generar un esquema de PSAU para cada caso de manera individual. En este artículo presentamos un ejercicio de agrupamiento usando el algoritmo *k-prototypes* con el fin de entender la heterogeneidad y simplificar la caracterización. Dicho algoritmo resulta muy apropiado en el sentido de tener la capacidad de trabajar con variables numéricas y categóricas.

Obtuvimos tres grupos (0, 1 y 2), donde las características más diferenciadoras resultaron para los grupos 0 y 2, siendo estos grupos los más grandes. El grupo 0 se considera el “más complejo” porque es en su mayoría privado, con áreas totales más pequeñas, gran proporción de área de interés y un valor económico más alto. Las acciones a emprender en estos predios son más enfocados al *mejoramiento ambiental*, involucrando directamente al propietario. Y el valor monetario reconocido para este grupo debe ser bastante atractivo para aumentar la tasa de adopción.

Por su parte, el grupo 2 podría ser el que adopte “más fácilmente” el esquema por tener, predominantemente, más cantidad de área y un valor económico bajo. Aquí cobra mucho interés el papel que juegan las instituciones públicas, las cuales deben tener una estructura de acción y gobierno que facilite estas iniciativas. Además, aparte de las acciones de *mejoramiento ambiental*, para este grupo son fundamentales las acciones de *apropiación social* con la comunidad, puesto que estos predios son principalmente de dominio y uso público.

Al intentar pensar cómo homologar el funcionamiento operativo del esquema tradicional para atender las necesidades, condiciones y características de las zonas urbanas, se observa que una de las grandes diferencias entre el esquema rural y urbano está en la pregunta ¿a quién pagar? En el caso rural, entre los criterios de selección de los propietarios, aparte de la provisión del SA, está la contribución a la reducción de pobreza. En el caso de los PSAU, ese criterio no es prioridad, y por eso, dentro de las variables que se consideraron para hacer el agrupamiento, no hay ninguna asociada a la riqueza o pobreza del propietario. Preguntas como ¿cómo pagar? y ¿cómo priorizar? cobran más importancia en los PSAU debido a la heterogeneidad existente en el contexto urbano.

El enfoque metodológico presentado en este trabajo es novedoso en el contexto de PSAU y muestra una forma útil de clasificar los predios para definir mejores estrategias de pago y operación. La importancia de este ejercicio no solo radica en identificar a cuál grupo pertenece un tenedor de tierra y su predio, sino también en el reconocimiento y entendimiento de los elementos que los caracterizan. Por eso, recomendamos que los siguientes pasos contemplen, simultáneamente, el diseño del

esquema que atienda a esas características y la validación del grupo al que hace parte cada tenedor de tierra y su predio. Lo anterior permitirá una mayor probabilidad de adopción del esquema, y que este sea efectivo y sostenible en el tiempo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la entidad Área Metropolitana del Valle de Aburrá por la provisión de información y de espacios para la discusión.

Referencias

AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Mapa del área metropolitana del Valle de Aburrá*, 2015. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mapa_del_área_metropolitana_del_Valle_de_Aburrá.svg

AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Informe final del proceso de ejecución del contrato interadministrativo n.º 1228 de 2018*: consolidar estrategias de pago por servicios ambientales y carbono forestal en el valle de Aburrá. Colombia, 2018a.

AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Informe final del proceso de ejecución del contrato interadministrativo n.º 750 de 2017*: implementar estrategias de pago por servicios ambientales – PSA para la conservación de ecosistemas estratégicos en el valle de Aburrá. Colombia, 2018b.

AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Informe final del proceso de ejecución del contrato interadministrativo n.º 689 de 2019*: avanzar en la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales en el valle de Aburrá. Colombia, 2019.

AMVA – Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Eafit. *Un modelo para analizar las capacidades de soporte de una ciudad-territorio con criterios de sostenibilidad*. Colombia, 2018. Disponible en: http://www.eafit.edu.co/centros/urbam/proyectos/Documents/20180621_taller_integran-

do_el_conocimiento_de_todos.pdf

Bolund, P.; Sven, H. Ecosystem services in urban areas, Suecia. *Ecological Economics*, 29, 293-301, 1999. Disponible en: http://www.fao.org/uploads/media/Ecosystem_services_in_urban_areas.pdf

Bremer, L. L.; Farley, K. A.; Lopez-Carr, D. What factors influence participation in payment for ecosystem services programs? An evaluation of Ecuador's SocioPáramo program. *Land Use Policy*, 36, 122-133, 2014. doi: 10.1016/j.landusepol.2013.08.002

Cerra, J. F. Emerging strategies for voluntary urban ecological stewardship on private property. *Landscape and Urban Planning*, 157, 586-597, 2017. doi: 10.1016/j.landurbplan.2016.06.016

MADS – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Decreto 0953 del 17 de mayo de 2013*. Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011. Bogotá: D.O, de 17/05/2013. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53140>

DANE – Departamento Administrativo Nacional de Estadística. *Resultados censo nacional de población y vivienda 2018 - valle de Aburrá*, 2019. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/cnpv-2018-presentacion-3ra-entrega.pdf>

Davies, H. J.; Doick, K. J.; Hudson, M. D.; Schaafsma, M.; Schreckenber, K.; Valatin, G. Business attitudes towards funding ecosystem services provided by urban forests. *Ecosystem Services*, 32(March), 159–169, 2018. doi: 10.1016/j.ecoser.2018.07.006

Engel, S. The devil in the detail: A practical guide on designing payments for environmental services. *International Review of Environmental and Resource Economics*, 9(1-2), 131-177, 2016. doi: 10.1561/101.000000076

Gómez-Baggethun, E.; Barton, D. N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235-245, 2013. doi: 10.1016/j.ecolecon.2012.08.019

Huang, Z. Clustering large data sets with mixed numeric and categorical values. In: *Proceedings of the 1st Pacific-Asia*

Conference on knowledge discovery and data mining (PAKDD), 21-34, 1997. Disponible en: http://reference.kfupm.edu.sa/content/c/1/clustering_large_data_sets_with_mixed_nu_362883.pdf

Huang, Z. Extensions to the k-means algorithm for clustering large data sets with categorical values. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2, 283-304. 1998. doi: 10.1023/A:1009769707641

Ketchen Jr., D.; Shool, C. The application of cluster analysis in strategic management research: an analysis and critique. *Strategic Management Journal*, 17(6), 441-458, 1996. doi: 10.1002/(sici)1097-0266(199606)17:6<441::aid-sm-j819>3.0.co;2-g

Mayer, A.; Winkler, R.; Fry, L. Classification of watersheds into integrated social and biophysical indicators with clustering analysis. *Ecological Indicators*, 45, 340-349, 2014. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.04.030

Medellín-Cómo-Vamos. Valle de Aburrá: población por municipio, 2020. Medellín Cómo Vamos, 2020. Disponible en: <https://www.medellincomovamos.org/node/18687>

Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: opportunities and challenges for business and industry. *Millennium Ecosystem Assessment, General Synthesis Report*, 5, 2005. doi: 10.1196/annals.1439.003

Niemelä, J.; Saarela, S. R.; Söderman, T.; Kopperoinen, L.; Yli-Pelkonen, V.; Väre, S.; Kotze, D. J. Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study. *Biodiversity and Conservation*, 19(11), 3225-3243, 2010. doi: 10.1007/s10531-010-9888-8

Ozdemiroglu, E.; Tinch, R.; Johns, H.; Provins, A.; Powell, J. C.; Twigger-Ross, C. *Valuing our natural environment*, 2006. Disponible en: <https://iwlearn.net/resolveuid/31143e-1709af2d73752e773c6af552d9>

Rendon, O. R.; Dallimer, M.; Paavola, J. Flow and rent-based opportunity costs of water ecosystem service provision in a complex farming system. *Ecology and Society*, 21(4), 2016. doi: 10.5751/ES-08787-210436

Richards, D. R.; Thompson, B. S. Urban ecosystems: A new frontier for payments for ecosystem services. *People and*

Nature, 249-261, 2019. doi: 10.1002/pan3.20

Sarada, W.; Kumar, P. V. A review on clustering techniques and their comparison. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* (IJAR-CET), 2(11), 2806-2812, 2013. ISSN: 2278 – 1323.

Smajgl, A.; Brown, D. G.; Valbuena, D.; Huigen, M. G. A. Empirical characterisation of agent behaviours in socio-ecological systems. *Environmental Modelling and Software*, 26(7), 837-844, 2011. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.02.011

Wunder, S. Payments for environmental services: some nuts and bolts, Indonesia. *CIFOR Occasional Paper*, 42, 2005. Disponible en: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-42.pdf

Zbinden, S.; Lee, D. R. Paying for environmental services: an analysis of participation in Costa Rica's PSA program. *World Development*, 33(2), 255-272, 2005. doi: 10.1016/j.worlddev.2004.07.012