

Costo de diseño hidráulico en edificaciones: una propuesta de estimación asistida por análisis de regresión en Norte de Santander, Colombia

Cost of hydraulic design in buildings: a proposal for estimation assisted by a regression analysis in Norte de Santander, Colombia

Carlos Alexis Bonilla Granados¹, Liseth Yajaira Vaca Caicedo², Lina Gabriela Guerrero Verjel³

¹PhD(C) Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación Etenoha, Pamplona, Colombia.

^{2,3}Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Francisco de Paula Santander, Grupo de Investigación HYDROS, Cúcuta, Colombia
e-mail: carlos.bonilla@unipamplona.edu.co

Cite this article as: C. Bonilla Granados, L. Vaca Caicedo, L. Guerrero Verjel “Costo de diseño hidráulico en edificaciones: una propuesta de estimación asistida por análisis de regresión en Norte de Santander, Colombia”, *Prospectiva*, Vol. 22 N° 2 2024

Recibido: 05/01/2024 / Aceptado: 15/05/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v22i2.3422>

RESUMEN

Los proyectos hidrosanitarios en la edificación de viviendas desempeñan un papel esencial en garantizar el aprovisionamiento adecuado de agua potable y la gestión eficiente de aguas residuales. En el desarrollo integral de los procesos ingenieriles para estas construcciones, resulta crucial anticipar déficits económicos desde la fase de planeación mediante una evaluación precisa de los costos probables. Este estudio propone modelos de ecuaciones para realizar estimaciones tempranas de los costos de los estudios y diseños de proyectos hidrosanitarios, en la región de Norte de Santander. Se recopiló información presupuestal de 120 proyectos reales ejecutados en años recientes (2017-2021). Los proyectos se categorizaron en residencias unifamiliares, residencias multifamiliares y otros proyectos (urbanismo), y se agruparon en conjuntos de datos para analizarse mediante regresión lineal, no lineal, múltiple y polinómica. Se obtuvieron 8 ecuaciones de estimación de costo de diseño con valor p mínimo y $R^2 > 0.5$. La validación comparativa de valores estimados con costos reales de proyectos reveló una tendencia similar y correlación aceptable, demostrando la capacidad predictiva de las ecuaciones en la evaluación de costos. Estas ecuaciones proporcionan un respaldo valioso para los encargados de proyectos objetivo de este estudio, facilitando el análisis de costos y la evaluación de alternativas.

Palabras Clave: análisis de regresión, diseño hidráulico, edificaciones, estimación de costo, proyectos hidrosanitarios.

ABSTRACT

Hydrosanitary projects in residential construction play a crucial role in ensuring an adequate supply of potable water and efficient management of wastewater. In the comprehensive development of engineering processes for these constructions, it is critical to anticipate economic deficits from the planning phase through a precise assessment of probable costs. This study proposes equation models for early estimation of the cost of studies and design hydrosanitary projects in the Norte de Santander region. Budgetary information was gathered from 120 real projects executed in recent years (2017-2021). Projects were categorized into single-family residences, multifamily residences, and other projects (urbanism), and grouped into datasets for analysis using linear, non-linear, multiple, and polynomial regression. Eight cost estimation equations were obtained with minimum p-values and $R^2 > 0.5$. Comparative validation of estimated values against actual project costs revealed a similar trend and acceptable correlation, demonstrating the predictive capacity of the equations in cost evaluation. These equations provide valuable support for project managers targeted in this study, facilitating cost analysis and alternative evaluation.

Keywords: regression analysis, hydraulic design, buildings, cost estimation, hydrosanitary projects.

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones hidrosanitarias representan un componente crucial en cualquier proyecto constructivo y desempeñan un papel fundamental en el saneamiento básico de proyectos urbanísticos y edificaciones destinadas a viviendas. En estos proyectos, la edificación debe incorporar un sistema hidráulico integral para el suministro de agua potable, como un derecho básico fundamental [1], que satisfaga las actividades de consumo y garantice la evacuación adecuada de aguas residuales. El sistema hidráulico de plomería suele comenzar desde el medidor de agua del servicio de suministro municipal [2], [3], y culminar en la red de drenaje. En algunos casos, el sistema hidráulico finaliza en un sistema de tratamiento de aguas residuales, ya que estos residuos líquidos domésticos pueden contener diversos contaminantes [4].

La estimación de costos es un elemento crítico en la planificación de proyectos, como el de instalaciones hidrosanitarias en edificaciones, lo cual depende del diseño hidráulico propuesto para el proyecto en particular. El diseño de redes o instalaciones hidráulicas se configura como un sistema compuesto por tuberías, válvulas, ramales, conexiones, cajas de registro, entre otros elementos [5]. La estimación temprana de costos es de suma importancia para evaluar la viabilidad económica de la ejecución del proyecto. Además, ayuda a prevenir sobrecostos, retrasos de ejecución y disputas durante la construcción [6].

Para lograr estimaciones relativamente precisas de los costos que conllevaría la ejecución de un proyecto de saneamiento (acueducto, alcantarillado, sistemas de tratamiento, etc.), varios estudios han desarrollado funciones de costo con base en métodos matemáticos, siendo el análisis de regresión el método más utilizado, como se afirma en el trabajo de Juszczak y colaboradores [6]. Bester, Jacobs y Van Der Merwe se enfocaron en obtener ecuaciones de costo para distintos elementos de un sistema de alcantarillado como bombeo, cajas de registro, así como, tuberías de gravedad y elevación [7]. Posteriormente, un estudio realizado en Portugal por Marchionni y colaboradores, estableció y validó ecuaciones para estimar el costo de estos mismos elementos del sistema de alcantarillado, utilizando un análisis de regresión múltiple [8]. También, el análisis de regresión múltiple se aplicó para obtener funciones de costo a partir de datos de proyectos de construcción de sistemas de suministro de agua [9]. Así mismo, otros estudios han propuesto modelos de estimación de costos para estructuras de saneamiento utilizando diferentes enfoques de análisis de regresión, como lineal, no lineal y polinómico [10], [11].

Los diseños de redes hidráulicas en proyectos involucran diferentes variables que deben considerarse al estimar un costo que se acerque lo más posible a la realidad. Por tal motivo, este estudio desarrolló un modelo de ecuaciones asistida con análisis de regresión, tomando variables como la longitud de tubería, el número de apartamentos o viviendas, dependiendo el tipo de proyecto, y el área total de construcción. La función objetivo de este modelo es representada por los costos asociados a la red diseñada para el proyecto. Para esto se utilizaron datos de proyectos ejecutados en años recientes en el departamento de Norte de Santander, Colombia. Los modelos de estimación temprana de costos se desarrollaron para proporcionar a los profesionales a cargo de proyectos hidrosanitarios información confiable, facilitando la toma de decisiones, la gestión eficiente de recursos financieros y la comparación de alternativas.

2. METODOLOGÍA

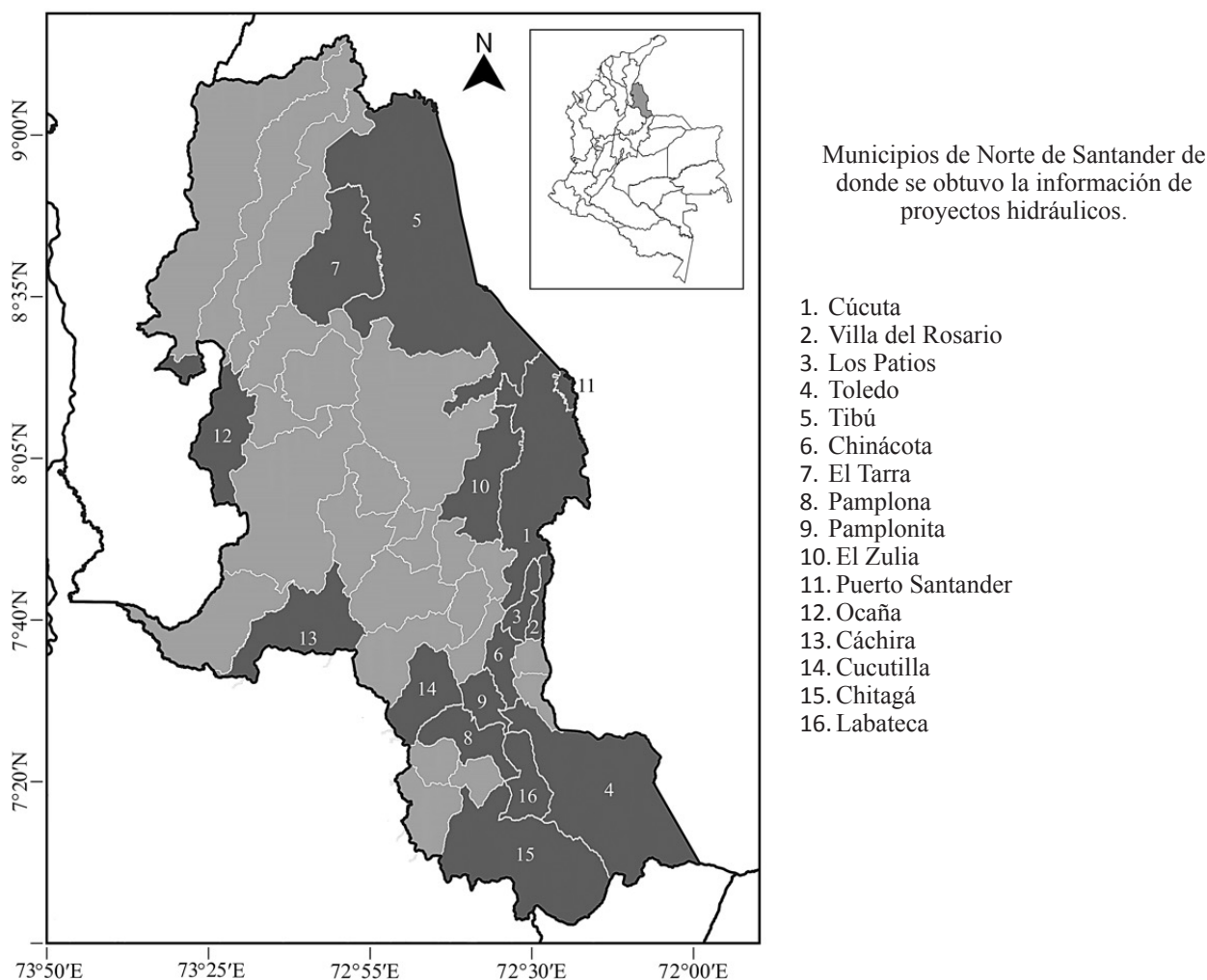
La metodología se centra en desarrollar un modelo de ecuaciones para realizar estimaciones tempranas del costo de un diseño hidráulico en proyectos de instalaciones hidrosanitarias en edificaciones y urbanismo. El desarrollo del modelo se realizó mediante el análisis de información presupuestal de proyectos ejecutados por entidades públicas o privadas en distintos municipios de Norte de Santander, Colombia. El departamento de Norte de Santander se sitúa al noroeste del país, entre los $06^{\circ}56'42''$ y $09^{\circ}18'01''$ N y los $72^{\circ}01'13''$ y $73^{\circ}38'25''$ O, con una extensión aproximada de 22.130 km² (Figura 1). A continuación, se describe a detalle la metodología.

Recolección de información

La recopilación de la información presupuestal abarcó los años de 2017 a 2021 e implicó la obtención de datos de diseños hidráulicos y sus costos netos correspondientes, centrándose exclusivamente en proyectos reales que involucraron instalaciones nuevas. Estos datos fueron suministrados directamente por empresas consultoras especializadas en trabajos de acueductos y alcantarillados en el departamento de Norte de Santander. Esta información se organizó en tres categorías principales: i) residencias unifamiliares (16 viviendas y 24 conjuntos de viviendas), ii) residencias multifamiliares (12 edificios y 28 conjuntos de edificios), y iii) otros proyectos comerciales e institucionales, como parques recreativos, canchas deportivas, colegios, entre otros (40 proyectos en total). En conjunto, se seleccionaron y recopilaron datos de 120 proyectos. En la Figura 1 se presenta la ubicación del departamento Norte de Santander, indicando los municipios de donde se obtuvo la información.

Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Figure 1. Location of the study area.



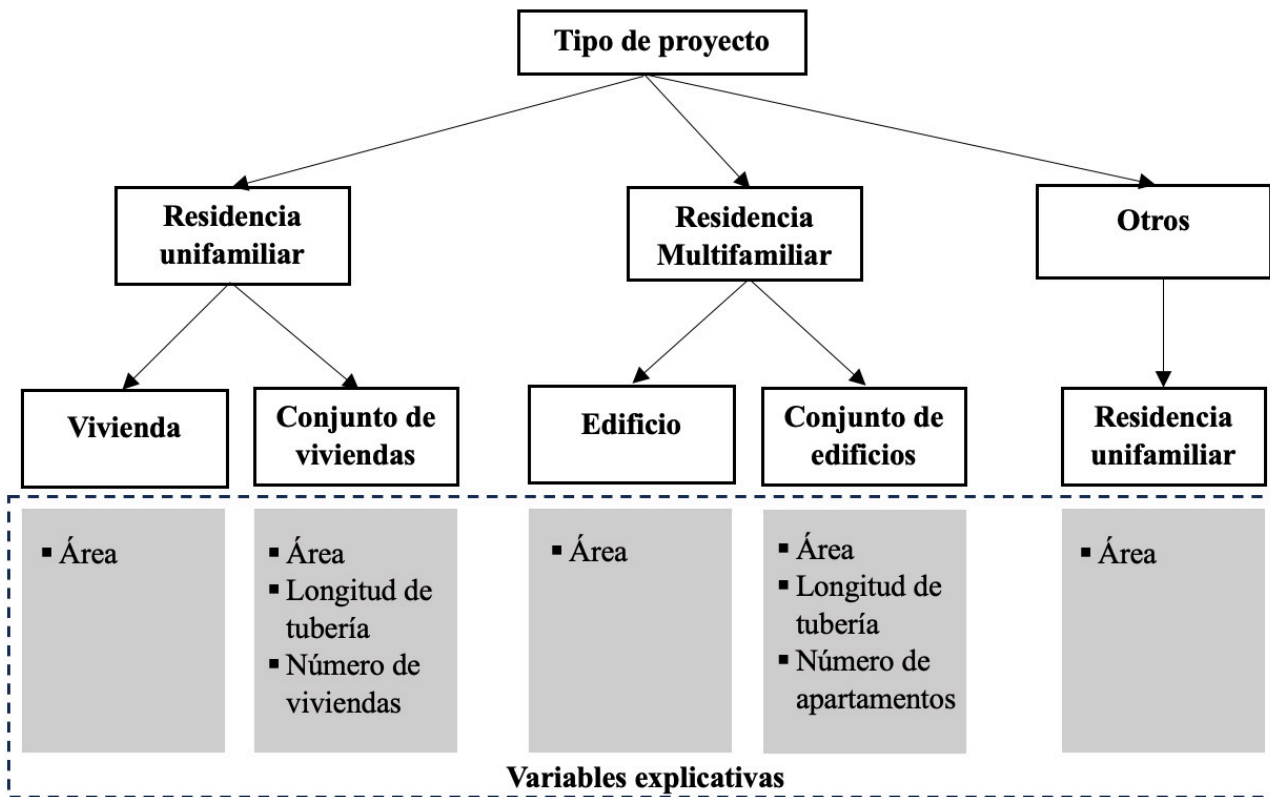
2.2. Análisis de datos y selección de variables explicativas

La obtención de modelos de ecuaciones específicos para cada categoría (residencias unifamiliares, residencias multifamiliares y otros proyectos) se realizó en sus respectivos grupos. Estos grupos se dividen según la naturaleza del proyecto, ya sea vivienda individual o conjunto de viviendas, así como, edificio o conjunto de edificios. Los datos

como el área del proyecto (hectáreas-Ha), longitud de tubería (metros-m), número de viviendas (unidades-Und.) y número de apartamentos (unidades-Und.), se establecieron como variables explicativas, como se muestra en la Figura 2. Estos datos corresponden con información básica y parámetros esenciales del proyecto, que se suministran en las fases iniciales del proceso de diseño hidráulico [6].

La información sobre los costos del proyecto y las variables explicativas se organizó en tablas de Excel [12] para facilitar su posterior análisis estadístico. Este análisis se realizó mediante el software R [13], que ofrece un conjunto de herramientas computacionales especializadas en el análisis de datos.

Figura 2. Variables explicativas de acuerdo con las categorías de los tipos de proyecto.
Figure 2. Explanatory variables according to the categories of project types.



2.3. Modelo matemático

El desarrollo de los modelos de ecuaciones se basó en diversos tipos de modelos de regresión, como lineal, polinomial, múltiple y no lineal. Las variables explicativas organizadas se utilizaron para el análisis estadístico que permitió la formulación de un conjunto de ecuaciones que reflejan los costos de diseño hidráulico en proyectos de instalaciones hidrosanitarias en edificaciones y urbanismo, en función de las características especificadas previamente. En el proceso, se seleccionaron únicamente aquellas ecuaciones que demostraron el mejor ajuste de significancia estadística. Estas ecuaciones formuladas se evaluaron a través de un análisis comparativo entre el costo real de proyectos y aquellos obtenidos a través de las ecuaciones, con el objetivo de verificar su eficacia.

2.3.1. Análisis de regresión

El análisis de regresión constituye un método estadístico empleado con el propósito de determinar una función que capture la tendencia general de los datos. La premisa fundamental de este análisis radica en la dependencia estadística de una variable (variable dependiente) con respecto a una o múltiples variables explicativas (variable independiente). La función matemática resultante se configura para representar la relación entre las variables, expli-

citando la forma funcional de dicha relación y ofreciendo la capacidad de realizar predicciones [14]. Este enfoque se materializa en un modelo que procura replicar de manera óptima el comportamiento del sistema real [15]. En este contexto, la aplicación del análisis de regresión lineal, múltiple, polinomial y no lineal se orientó hacia la estimación de los costos de diseño asociados a proyectos hidráulicos.

La regresión lineal es el ajuste de datos con funciones lineales que incluye una sola variable independiente. En la Ecuación 1 se presenta la función del análisis de regresión lineal, donde \hat{y} corresponde al valor de la variable dependiente estimada por el modelo de regresión, x es la variable explicativa, y $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ son coeficientes de regresión [11], [16], [17], [18], [19].

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (1)$$

En el caso del análisis de regresión con más de una variable independiente se le conoce como regresión lineal múltiple, lo cual se expresa en la Ecuación 2, donde y es la variable dependiente, $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$ son los coeficientes de regresión, y X_1, X_2, \dots, X_n son las variables explicativas [8], [9], [15], [16].

$$y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n \quad (2)$$

En cuanto a la regresión polinomial las variables independientes se modelan con una función polinomial de orden n [16], [20] (Ecuación 3).

$$\hat{y} = \beta + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_n x^n \quad (3)$$

Así mismo, los modelos que incorporan relaciones no lineales, como las ecuaciones potencial, exponencial, logarítmica y recíproca, pueden ser empleados en regresiones lineales mediante una previa transformación matemática [17]. La variable dependiente (y) y la variable explicativa (x) se transforman aplicándoles la expresión de logaritmo natural (\ln) para ser expresadas como y^* y x^* , respectivamente, según sea el caso del tipo de regresión no lineal. Para el modelo potencial se transforma tanto y como x , en el modelo exponencial se transforma solo y , y en el modelo logarítmico se transforma solo x , con lo cual se obtienen los modelos de regresión lineal transformados que se presentan en las Ecuaciones 4, 5 y 6, siguiendo el mismo orden. La transformación es diferente para el caso del modelo recíproco, donde solo se aplica a la variable x mediante el cálculo de su inverso ($1/x$), a partir de lo cual se obtiene el modelo lineal transformado de la Ecuación 6 [21].

$$y^* = \ln \alpha + \beta x^* \quad (4)$$

$$y^* = \ln \alpha + \beta x \quad (5)$$

$$y^* = \alpha + \beta x^* \quad (6)$$

Donde, α y β son los coeficientes estimados para la ecuación lineal conformada a partir de las variables transformadas. Los modelos de función no lineales potencial, exponencial, logarítmica y recíproco se presentan en las Ecuaciones 7 a la 10, respectivamente [21].

$$\hat{y} = \alpha x^\beta \quad (7)$$

$$\hat{y} = \alpha e^{\beta x} \quad (8)$$

$$\hat{y} = \alpha + \beta \ln x \quad (9)$$

$$\hat{y} = \alpha + \beta \ln \frac{1}{x} \quad (10)$$

2.3.2. Pruebas del modelo

La confiabilidad de los modelos desarrollados fue evaluada mediante pruebas estadísticas, como se realizó en la investigación de Pinheiro y colaboradores [11], para seleccionar las ecuaciones de mayor significancia estadística. La significancia estadística de las ecuaciones obtenidas mediante el análisis de regresión se confirmó a través de los siguientes parámetros: coeficiente de determinación, análisis de varianza ($p\text{-value} \leq 0.05$), error estándar (σ), prueba de normalidad y el gráfico de residuales. El coeficiente de determinación (R^2) cuantifica el porcentaje de variación total de la variable dependiente que es explicado por el modelo de regresión, siendo deseable un valor cercano a 1. La prueba de normalidad aplicada fue la de Shapiro-Wilk, utilizada especialmente cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 ($n < 50$) [21].

2.4. Proceso de desarrollo de ecuaciones

En la Figura 3 se explica el flujograma del proceso aplicado para obtener las ecuaciones de estimación de costo de diseño hidráulico en proyectos de edificaciones y urbanismo. Este proceso considera un inicio en el cual los datos están organizados en tablas de cualquier formato (*.xlsx, *.xls ó *.txt), para realizar el análisis estadístico de los datos en el lenguaje de programación de R. Los grupos de los tipos de proyectos (vivienda, conjunto de viviendas, edificio, conjunto de edificios y otros proyectos) se analizaron para las variables explicativas individuales o las variables explicativas en conjunto. Las variables explicativas individuales se sometieron a análisis asistido por regresión lineal, no lineal y polinómico, y las variables explicativas en conjunto se analizaron mediante regresión lineal múltiple. Finalmente, se obtuvieron varias ecuaciones de cada grupo proyectos para seleccionar solo aquellas que tuvieron una significancia estadística aceptable.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó el desarrollo de las ecuaciones de estimación de costo utilizando datos empíricos recolectados, sobre el supuesto de que una o más variables determinan el resultado de la función objetivo [22]. La dispersión de los datos correspondía a un comportamiento directamente proporcional entre las variables respecto a los costos. En el análisis de los datos se generó una línea de regresión de acuerdo con el tipo de modelo con lo cual se buscó una tendencia similar, como se muestra en la Figura 4. Además, se verificó que la varianza de los residuales sea constante por medio de gráficos de residuales de los valores estimados, donde se observó la variación aleatoria de los residuales con respecto a la media (Figura 4).

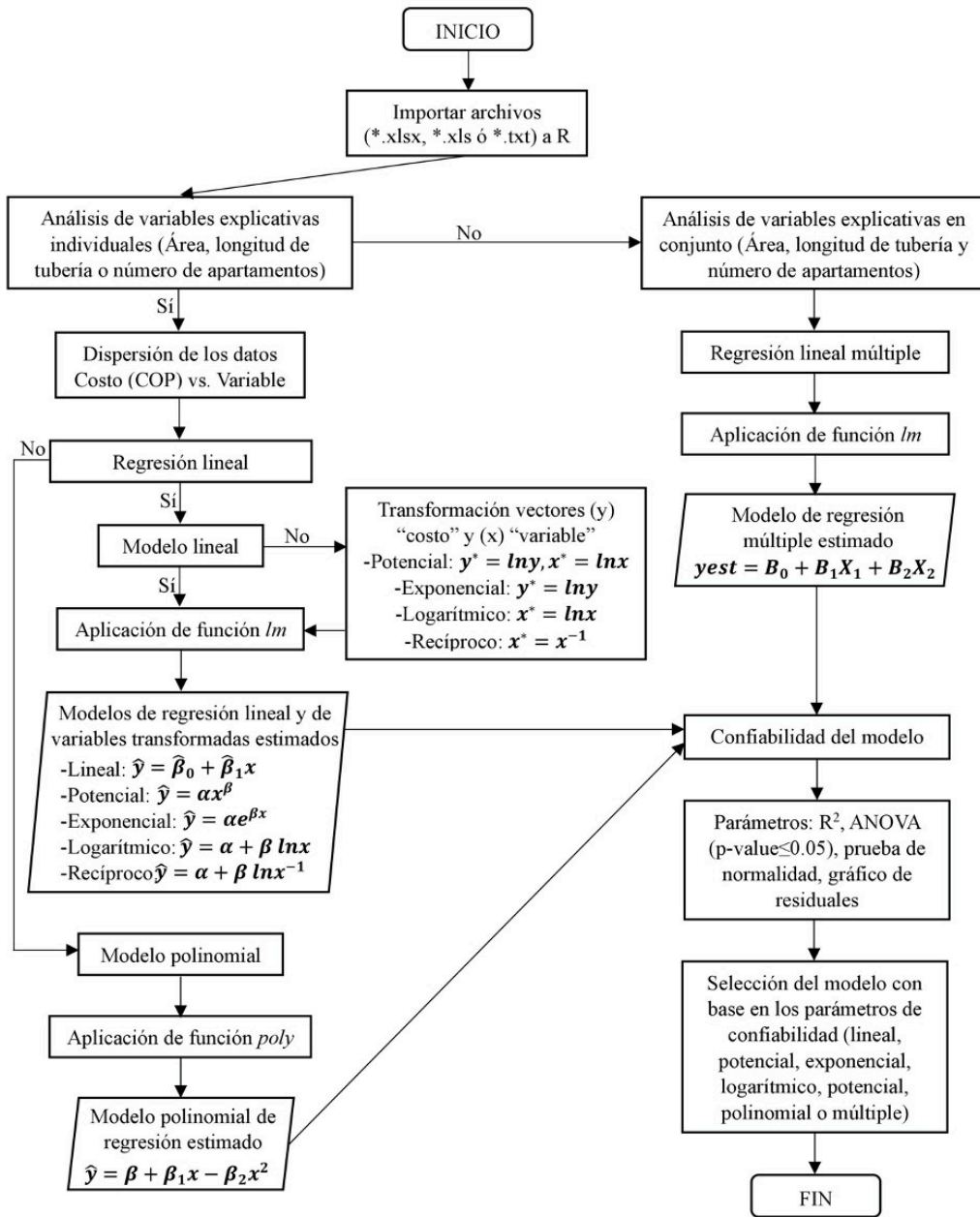


Figura 3. Diagrama de obtención de modelos asistido por análisis de regresión para estimar costos de diseño hidráulico en edificaciones.

Figure 3. Diagram of model acquisition assisted by regression analysis for estimating hydraulic design costs in buildings.

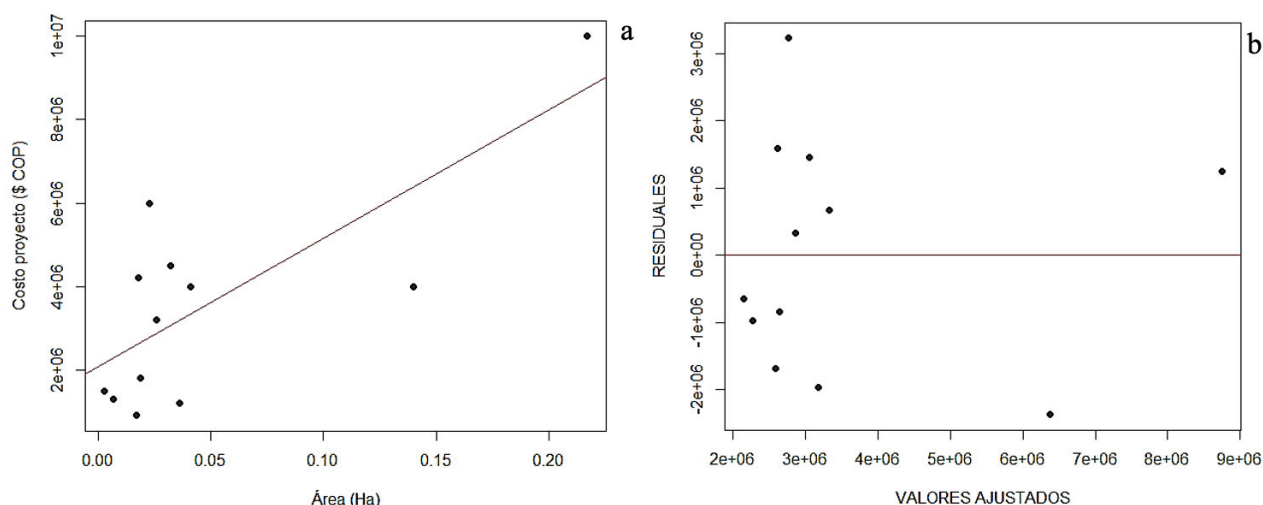


Figura 4. Diagramas: a) de dispersión y b) residuales obtenidos mediante el análisis de regresión lineal para el conjunto de datos correspondiente al tipo de proyecto de edificios y la variable de área.

Figure 4. Plots: a) scatterplots and b) residuals obtained through linear regression analysis for the dataset corresponding to the building project type and the area variable.

Los análisis realizados para cada conjunto de datos de acuerdo con el tipo de proyecto permitieron obtener las ecuaciones con el ajuste estadístico adecuado en un intervalo de aplicación. Las correlaciones de las ecuaciones obtenidas para estimar costos de diseño hidráulico en edificaciones fueron razonablemente buenas ($R^2 > 0.5$). Otros estudios han obtenido valores similares de coeficientes de determinación para sus ecuaciones de costo como en proyectos de alcantarillado, con R^2 de 0.54 para las tuberías y R^2 de 0.79 para el concreto [8]. También, en proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales se estableció un coeficiente aceptable de $R^2 \geq 0.6$ para las ecuaciones de costo [11]. Los análisis con mayor número de datos podrían posibilitar obtener correlaciones más cercanas a la unidad [8].

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los modelos obtenidos para realizar estimaciones de costos de diseños hidráulico de edificaciones. Se obtuvieron ocho modelos para distintos grupos: el grupo de vivienda (Cvi); el grupo de conjunto de viviendas, que incluye la variable de área (Ccva), longitud de tubería (Ccvl) y número de viviendas (Ccvn); el grupo de edificio (Ced); el grupo de conjunto de edificios con la variable de área (Ccea), y con las tres variables (Cce); y el grupo de otros proyectos (Cur). La mayoría de los grupos en los que se desarrollaron las ecuaciones de costos presentaron un mejor ajuste estadístico cuando se analizaron las variables individualmente. Los análisis de regresión no lineal como el potencial y polinómico sirvieron para obtener modelos de ecuaciones para los conjuntos de datos de los grupos: vivienda, conjunto de viviendas y otros proyectos. Los datos de la categoría de proyectos correspondiente a residencias multifamiliares encontraron una mejor relación con los modelos de regresión lineal y lineal múltiple.

El análisis de varianza de ANOVA permitió evaluar el nivel de significancia estadística de los datos estableciendo un valor $p \leq 0.05$ [17], [23], con el cual se comprueba que el modelo de regresión explica significativamente la variación observada en la variable dependiente. Los valores p para todas las ecuaciones de estimación de costo obtenidas cumplieron con el valor de significancia estadística. Además, se establecieron los intervalos de aplicación de las variables para cada ecuación obtenida (Tabla 2). Las ecuaciones derivadas de los análisis de regresión se validaron utilizando datos de varios proyectos reales de construcción de sistemas de alcantarillado para verificar la precisión de las predicciones de costos. En la Figura 5 se presentan los gráficos donde se comparan los valores de costo real de los proyectos y el costo estimado mediante las funciones obtenidas. Se observa que en general los valores estimados siguen la tendencia de los valores reales.

Tabla 1. Ecuaciones de estimación de costo de diseños hidráulicos (COP) según los grupos de tipos de proyectos, obtenidas a partir de los modelos de regresión.

Table 1. Equations for estimating the cost of hydraulic designs (COP) according to the groups of project types, obtained from regression models.

Grupos	VARIABLES explicativas	Modelo funcional	Ecuación ^d
Vivienda	Área (A) ^a	Potencial	(11)
Conjunto de viviendas	Área (A) ^a	Potencial	(12)
	Longitud de tubería (L) ^b	Polinómica	(13)
	No. viviendas (V) ^c	Potencial	(14)
Edificio	Área (A) ^a	Lineal	(15)
Conjunto de edificios	Área (A) ^a	Lineal	(16)
	Área (A) ^a , Longitud de tubería (L) ^b y No. apartamentos (N) ^c	Regresión lineal múltiple	(17)
Otros proyectos	Área (A) ^a	Potencial	(18)

^aLa unidad de área (A) para utilizar la ecuación es Ha.

^bLa unidad de longitud de tubería (L) para utilizar la ecuación es m.

^cLa unidad de número de viviendas (V) y número de apartamentos (N) para utilizar la ecuación es Und.

^dLas ecuaciones de costo (C) se estima en pesos colombianos (COP).

Tabla 2. Valores de significancia estadística e intervalo de aplicación de las ecuaciones de estimación de costos.

Table 2. Values of statistical significance and range of application of the cost estimation equations.

Ecuación	Variable (Intervalo de aplicación)	Valor p
	A (0.01 – 0.2 Ha)	0.001191
	A (0.1 – 3.0 Ha)	0.00001622
	L (50 – 3000 m)	0.001023
	V (5 – 250 Und.)	0.00001157
	A (0.003 – 0.3 Ha)	0.004304
	A (0.05 – 2.5 Ha)	0.02685
	A (0.05 – 2.5 Ha)	0.002967
	L (200 – 3500 Ha)	
	N (60 – 700 Und.)	
	A (0.003 – 110 Ha)	0.002313

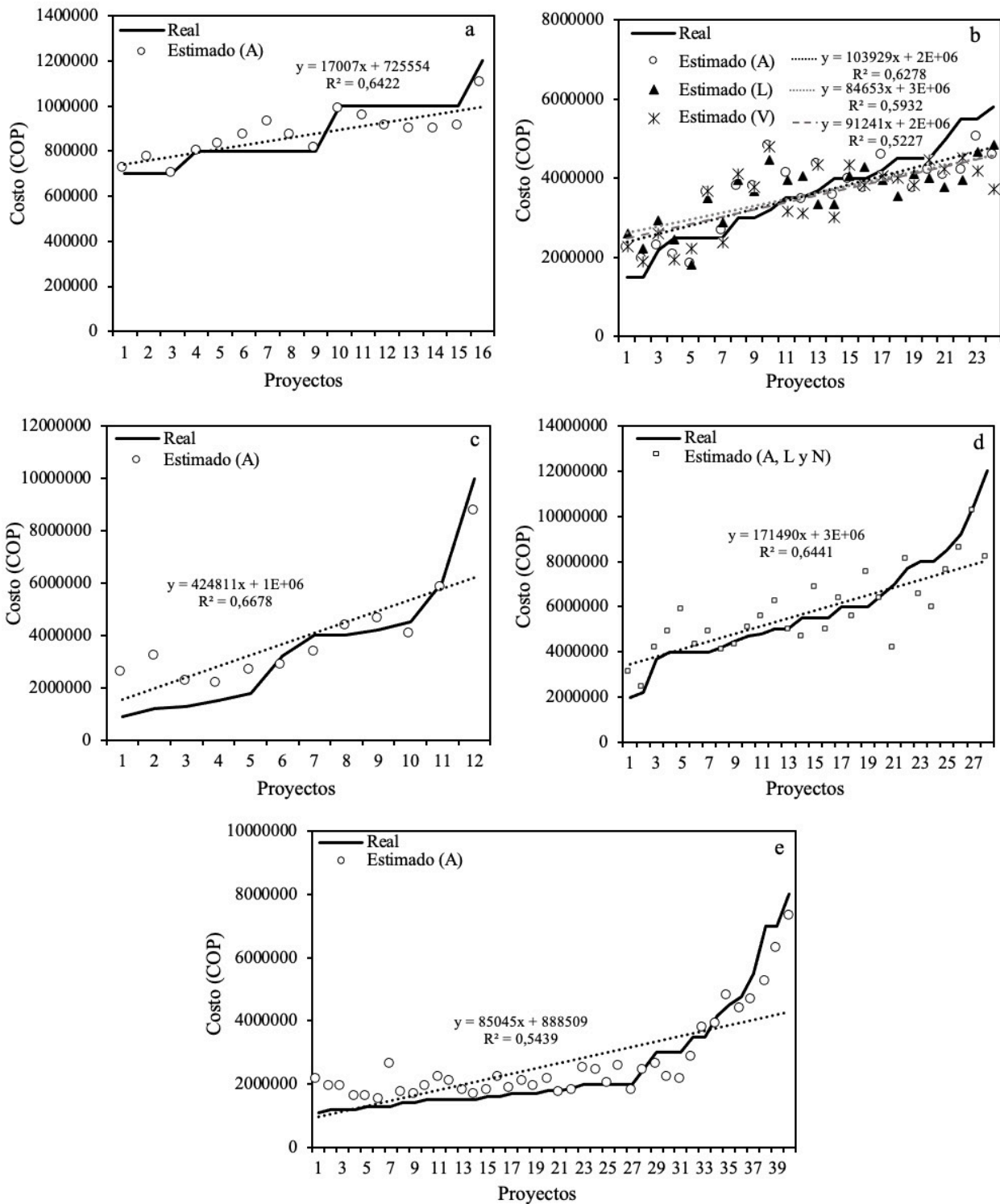


Figura 5. Comparación del costo real y costo estimado de proyectos: a) , b) , , c) , d) , y e) .
 Figure 5. Comparison of the real cost and estimated cost of projects: a) , b) , , c) , d) , y e) .

En la estimación del costo de los estudios de diseños hidráulicos de proyectos hidrosanitarios para edificaciones, se consideró el área (A) como una variable explicativa de gran relevancia, lo cual generó en el análisis de comparación entre el costo estimado y el costo real, una correlación significativa que alcanza hasta 0.67. Para otros proyectos de saneamiento como el de estaciones de bombeo de aguas residuales se identificó que los costos totales se componen

de costos unitarios de tuberías, válvulas, componentes electromecánicos y mecánicos, e instalaciones eléctricas [17]. Así mismo, en proyectos de alcantarillados los costos comúnmente se analizan en función del material, los diámetros de tuberías y la profundidad de excavación [8]. Los modelos de ecuaciones de estimación temprana facilitan el proceso de evaluación de alternativas y toma de decisiones [6], [24], respecto a la factibilidad de proyectos de saneamiento [25], [26].

4. CONCLUSIONES

Se desarrollaron ocho modelos de estimación destinados a prever de manera anticipada los costos asociados a los diseños de los proyectos hidrosanitarios en el ámbito de edificaciones y urbanismo, utilizando como base la información derivada del diseño hidráulico. Estos modelos, conformados por ecuaciones, se fundamentaron en datos reales provenientes de 120 proyectos ejecutados en años recientes (2017-2021), incorporando variables clave con significado físico inherente. Se aplicó una metodología robusta de análisis de regresión, segmentando los datos en categorías como residencias unifamiliares, residencias multifamiliares y otros proyectos. El objetivo era obtener funciones de costo diferenciadas según grupos específicos de características similares, tales como viviendas, conjuntos de viviendas, edificios, conjuntos de edificios y otros proyectos de urbanismo.

Los conjuntos de datos de cada grupo se sometieron a análisis mediante regresión lineal, no lineal y polinómico, con el propósito de seleccionar las ecuaciones que mostraran un mayor ajuste estadístico. Los modelos de ecuaciones exhibieron coeficientes de determinación superiores a 0.5, y los valores p fueron bajos para todos los tipos de proyectos, evidenciando la relevancia estadística de los modelos de regresión desarrollados. Además, la validación demostró que los valores estimados mediante las ecuaciones desarrolladas eran capaces de seguir las tendencias de los valores reales de costo de proyectos. Esto sugiere que el análisis estadístico de regresión puede generar estimaciones aceptables para las variables asociadas a proyectos hidrosanitarios.

El análisis de costos realizado en este estudio revela que los diseños hidráulicos en proyectos hidrosanitarios de la región de Norte de Santander están fuertemente influenciados por la extensión del área que abarcan. Para mejorar la representación de los costos, y obtener coeficientes de determinación más cercanos a 1, se recomienda incorporar en investigaciones futuras una mayor cantidad de datos procedentes de proyectos. Las ecuaciones derivadas en este estudio facilitan el análisis de costos para los responsables de proyectos hidrosanitarios en la región de estudio, al proporcionar información útil para la planificación de nuevas instalaciones hidráulicas en edificaciones. Aunque las ecuaciones de estimación de costos se fundamentan en datos específicos de Norte de Santander, la metodología aplicada podría extrapolarse para proyectos del mismo rubro en otras regiones del país.

5. REFERENCIAS

- [1] J. J. Arrieta Lozano, “Recomendaciones para Diseño y Optimización de Plantas de Tratamiento de Agua Potable, Considerando Aspectos De Funcionalidad Y Durabilidad”, *Prospectiva*, 17 (2), 47–52, jul. 2019. doi: 10.15665/rp.v17i2.1732.
- [2] A. A. M. Gad y A. E. M. Abd-Elaal, “Practical guidelines for a reliability-based design of building water supply systems”, *Urban Water J*, 13 (2), 94–107, feb. 2016. doi: 10.1080/1573062X.2014.993995.
- [3] R. D. Mangalekar y K. S. Gumaste, “Residential water demand modelling and hydraulic reliability in design of building water supply systems: A review”, *Water Science and Technology: Water Supply*, 21 (4), 1385–1397, jun. 2021. doi: 10.2166/WS.2021.021.

- [4] Z. M. Suarez Verdugo, S. Baudilio, y C. Pabón, “Presence of SARS-CoV-2 (COVID-19) in wastewater and the role of sewage treatment plants in its removal”, *Prospectiva*, 20 (1), 2216–1368, 2022. doi: 10.15665/rp.v20i1.2711.
- [5] A. E. M. Abd-Elaal y A. A. M. Gad, “Improvement of plumbing systems performance using looped water pipe networks within buildings”, *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 67 (7), 626–633, nov. 2018. doi: 10.2166/aqua.2018.027.
- [6] M. Juszczak, T. Hanák, M. Výskala, H. Pacyno, y M. Siejda, “Early Fast Cost Estimates of Sewerage Projects Construction Costs Based on Ensembles of Neural Networks”, *Applied Sciences*, 13 (23), 12744, nov. 2023. doi: 10.3390/app132312744.
- [7] A. J. Bester, H. E. Jacobs, y J. Van Der Merwe. (2010). “Unit Cost-Functions for Value Estimation of Waterborne Sewer Infrastructure”. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/266888377>
- [8] V. Marchionni, N. Lopes, L. Mamouros, y D. Covas, “Modelling Sewer Systems Costs with Multiple Linear Regression”, *Water Resources Management*, 28 (13), 4415–4431, oct. 2014. doi: 10.1007/s11269-014-0759-z.
- [9] V. Marchionni, M. Cabral, C. Amado, y D. Covas, “Estimating Water Supply Infrastructure Cost Using Regression Techniques”, *J Water Resour Plan Manag*, 142 (4), abr. 2016. doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000627.
- [10] B. Balaji, P. Mariappan, y S. Senthamilkumar, “A Cost Estimate Model for Sewerage System”, 10 (8), 3327-3332, may. 2015. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=15e9320d635f0d18265e8fa804311221b0a878c6>
- [11] A. Pinheiro, M. Cabral, S. Antunes, N. Brôco, y D. Covas, “Estimating capital costs of wastewater treatment plants at the strategical level”, *Urban Water J*, 15 (8), 732–740, sep. 2018. doi: 10.1080/1573062X.2018.1547409.
- [12] Microsoft, “Microsoft Excel”, Microsoft Corporation, 2024. Accessed: ene. 30, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.microsoft.com/es-co/microsoft-365/excel>
- [13] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, R Foundation for Statistical, 2024. Accessed: ene. 30, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
- [14] M. Sueri y M. Erdal, “Early Estimation of Sewerage Line Costs with Regression Analysis”, *Gazi University Journal of Science*, 35 (3), 822–832, sep. 2022. doi: 10.35378/gujs.949726.
- [15] D. Obradović, S. Marenjak, y M. Šperac, “Estimating Maintenance Costs of Sewer System”, *Buildings*, 13 (2), feb. 2023. doi: 10.3390/buildings13020500.
- [16] G. M. Fitzmaurice, “Regression”, *Diagn Histopathol*, 22 (7), 271–278, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mpdhp.2016.06.004>.
- [17] M. Cabral, D. Loureiro, y D. I. C. Covas. (2018). “Statistical modelling of wastewater pumping stations costs”. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/331224367>

- [18] M. Cabral, D. Loureiro, M. Do Céu Almeida, y D. Covas, “Estimation of costs for monitoring urban water and wastewater networks”, *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 68 (2), 87–97, 2019, doi: 10.2166/aqua.2019.043.
- [19] V. Marchionni, M. Cabral, C. Amado, y D. Covas, “Water supply infrastructure cost modelling”, *Procedia Engineering*, 119, 168-173, 2015. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.868.
- [20] M. Ardakani, A. Shokry, G. Saki, G. Escudero, M. Graells, y A. Espuña, “Imputation of Missing Data with Ordinary Kriging for Enhancing Fault Detection and Diagnosis”, *Computer Aided Chemical Engineering*, 38, 1377–1382, 2016. doi: 10.1016/B978-0-444-63428-3.50234-4.
- [21] D. N. Gujarati y D. C. Porter, *Essentials of econometrics*, 4th ed. McGraw Hill International, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://us.sagepub.com/en-us/nam/essentials-of-econometrics/book265624>
- [22] T. Sainati, F. Zakaria, G. Locatelli, P. A. Sleight, y B. Evans, “Understanding the costs of urban sanitation: Towards a standard costing model”, *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 10 (4), 642–658, 2020. doi: 10.2166/washdev.2020.093.
- [23] L. G. Obregon Quiñones, J. C. Pertuz Amaya, y R. A. Domínguez Rambal, “Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire”, *Prospectiva*, 15 (1), 42–52, feb. 2017. doi: 10.15665/rp.v15i1.820.
- [24] T. Shehab, E. Nasr, y M. Farooq, “Conceptual Cost Estimating Model for Water and Sewer Projects”, 4, 367-373, 2014. doi: 10.1061/9780784413692.03
- [25] G. K. Mislick y D. A. Nussbaum, *Cost Estimation: Methods and Tools*. John Wiley & Sons., 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.wiley.com/en-in/Cost+Estimation%3A+Methods+and+Tools-p-9781118536131>
- [26] A. A. Ketema, M. Lechner, S. A. Tilahun, y G. Langergraber, “Development of cost functions for water supply and sanitation technologies: Case study of Bahir Dar and Arba Minch, Ethiopia”, *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 5 (3), 502–511, ago. 2015. doi: 10.2166/washdev.2015.067.