

Predicción de la resistencia a compresión del hormigón simple usando un modelo de regresión lineal múltiple

Predicting the compressive strength of plain concrete using a multiple linear regression model

- ¹ Alisson Natalia Gatia Caiza  <https://orcid.org/0009-0000-2936-2687>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador
agatia8292@uta.edu.ec
- ² Mayra Viscaíno-Cuzco  <https://orcid.org/0000-0003-4987-7797>
Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador.
ma.viscaino@uta.edu.ec
- ³ Sergio Villacrés-Parra  <https://orcid.org/0000-0002-9497-9795>
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
sergio.villacres@esPOCH.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 11/02/2025

Revisado: 16/03/2025

Aceptado: 04/04/2025

Publicado: 30/04/2025

DOI: <https://doi.org/10.33262/ap.v7i2.1.604>

Cítese:

Gatia Caiza, A. N., Viscaíno Cuzco, M., & Villacrés Parra, S. (2025). Predicción de la resistencia a compresión del hormigón simple usando un modelo de regresión lineal múltiple. AlfaPublicaciones, 7(2.1), 6–31. <https://doi.org/10.33262/ap.v7i2.1.604>



ALFA PUBLICACIONES, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://alfapublicaciones.com>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Palabras claves:

Gamificación,
enseñanza-
aprendizaje,
ciencias naturales,
educación básica,
motivación.

Resumen

Introducción: Los métodos convencionales utilizados para determinar la resistencia del hormigón presentan importantes limitaciones en términos de tiempo, costos y eficiencia operativa. Para considerar que un espécimen esté listo para ser ensayado y medir su resistencia máxima, es necesario que transcurra un periodo de curado de 28 días. Además, estas técnicas tradicionales implican la destrucción de las muestras después del ensayo, lo que genera una pérdida irreparable de recursos materiales y económicos. Este procedimiento no solo incrementa los costos de los proyectos, sino que también provoca retrasos significativos en la ejecución de las obras, afectando su cronograma, calidad y viabilidad económica. **Objetivo:** Diseñar un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a compresión del hormigón simple de resistencias normales a los 7, 14 y 28 días. **Metodología:** Inicialmente se realizó la recopilación de información de variables que intervienen en la dosificación del hormigón y que influyen en la resistencia a compresión. Para la etapa de entrenamiento y testeo del modelo, se empleó la técnica hold-out. Las métricas que se emplearon para la evaluar la capacidad predictiva y la validación del modelo fueron R^2 , RMSE, MAPE. Para la etapa de validación se realizaron ensayos de laboratorio de los materiales y se elaboraron especímenes de hormigón con una resistencia de 240 kg/cm² a los 28 días, curados en laboratorio bajo condiciones controladas. **Resultados:** La edad del hormigón es la variable que presenta mayor valor de correlación lineal (0.648), de las 27 variables consideradas inicialmente para la construcción del modelo, 13 resultaron estadísticamente significativas para el modelo con un 90% de confianza. **Conclusión:** Los análisis demostraron que el modelo de Regresión Lineal Múltiple genera predicciones aceptables con un error porcentual absoluto medio del 7%. **Área de estudio general:** Ingeniería Civil. **Área de estudio específica:** Materiales. **Tipo de estudio:** Artículos originales.

Keywords:

Compressive
strength, simple
concrete,

Abstract

Introduction: Conventional methods used to determine the strength of concrete have significant limitations in terms of time, costs, and operational efficiency. A 28-day curing period is

prediction,
multiple linear
regression model,
predictors.

required for a specimen to be considered ready for testing and its maximum strength to be measured. In addition, these traditional techniques involve the destruction of the samples after testing, which generates an irreparable loss of material and economic resources. This procedure not only increases project costs but also causes significant delays in the execution of the works, affecting their schedule, quality, and economic viability. **Objective:** Design a multiple linear regression model to predict the compressive strength of plain normal strength concrete at 7, 14 and 28 days. **Methodology:** Initially, information was collected on variables involved in the dosage of concrete and which influence compressive strength. For the training and testing stage of the model, the hold-out technique was used. The metrics used to evaluate the predictive capacity and validation of the model were R², RMSE, MAPE. For the validation stage, laboratory tests of the materials were conducted, and concrete specimens were produced with a resistance of 240 kg/cm² at 28 days, cured in the laboratory under controlled conditions. **Results:** The age of the concrete is the variable that presents the highest linear correlation value (0.648), of the 27 variables initially considered for the construction of the model, 13 were statistically significant for the model with 90% confidence. **Conclusion:** The analyses showed that the Multiple Linear Regression model generates acceptable predictions with a mean absolute percentage error of 7%. **General Area of Study:** Civil Engineering. **Specific area of study:** Materials. **Type of study:** Original articles.

1. Introducción

Los métodos tradicionales para evaluar la resistencia a la compresión del hormigón se basan en ensayos destructivos que afectan de manera directa al cronograma y presupuesto de un proyecto ya que, para ensayar una probeta y conocer su resistencia máxima debe haber transcurrido 28 días (León & Rodríguez, 2022; Nistal et al., 2012), (Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2010), tras concluir el ensayo se lleva a cabo la destrucción de la muestra, lo cual inhabilita su uso posterior y lo transforma en escombros. Cabe destacar que, el volumen creciente de residuos del hormigón tiende a ser una grave amenaza para el medio ambiente. Por esta razón, es importante implementar métodos

alternativos no destructivos para predecir la resistencia a la compresión del hormigón, cuya metodología no requiera de procesos exhaustivos, lentos y costosos; entre estas alternativas, los modelos RLM destacan como una solución adecuada por su capacidad de establecer relaciones complejas entre las múltiples variables que influyen en la resistencia del hormigón para arrojar predicciones que contribuyan de manera anticipada a conocer la resistencia del hormigón simple (Contreras et al., 2023).

Es importante subrayar que la necesidad de desarrollar modelos predictivos para evaluar la resistencia a compresión a través de ensayos no destructivos es una demanda en aumento en el sector de la construcción (Contreras et al., 2023). Por lo tanto, los modelos RLM aplicados en esta investigación no solo sirven como una herramienta eficaz para estimar la resistencia a compresión, sino también permiten optimizar el diseño de mezclas, ya que, al conocer la relación entre la composición del hormigón y su resistencia, se puede ajustar las proporciones de los materiales para obtener las propiedades mecánicas deseadas, optimizando el uso de recursos y reduciendo tiempos y costos. En cuanto a la adaptabilidad, estos modelos pueden ser fácilmente ajustados y actualizados a medida que se dispone de nuevos datos, lo que garantiza que las predicciones se mantengan precisas a lo largo del tiempo. Asimismo, la Validación y Desempeño de los Modelos (RLM) se evaluaron mediante métricas, las cuales indican, en promedio, qué tan lejos están las predicciones que genera el modelo de los valores reales para ser considerados como válidos (Alabi & Mahachi, 2022). No solo los ingenieros civiles y estructurales pueden darle utilidad a este modelo para predecir la resistencia a compresión del hormigón a través de variables simples, sino también los productores de hormigón quienes al emplear este modelo de fácil compresión podrían optimizar y acelerar los procesos de fabricación, garantizando un mejor control de calidad en cada uno de sus productos (Iqtidar et al., 2021).

El tema de estudio ha sido objeto de diversas investigaciones, que han abordado desde diferentes enfoques los aspectos relacionados con la resistencia a la compresión en hormigón simple mediante un modelo de regresión lineal simple. Un ejemplo significativo de estos trabajos es el artículo publicado por Alabi & Mahachi (2022), quienes indican que muchos problemas de ingeniería demandan la interacción de dos o más parámetros, lo que hace imprescindible el empleo de técnicas estadísticas matemáticas que permitan modelar sistemas multivariados. Por esta razón la regresión lineal múltiple es una de las herramientas más poderosas para predecir la relación más probable entre la respuesta y diversos parámetros independientes. Asimismo, un trabajo experimental realizado por Yanchara (2022), examinó el comportamiento de los distintos parámetros que influyen en la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón, donde considera óptima la aplicación de modelos de regresión lineal múltiple RLM por medio de la estadística clásica. Además, indica que el desarrollo de modelos con alta capacidad predictiva puede conducir al ahorro de tiempo y dinero (Yanchara, 2022). En

esta investigación, para los modelos de RLM se recogieron diez variables tales como la relación agua y cemento, tipo de cemento y las cantidades de agua, cemento, humo de sílice, ceniza volante y árido fino. Por el contrario, para el modelo ANN se recogieron 13 variables para resistencias a la compresión en los 28 días tales como, la relación agua y cemento, tipo de cemento, cantidad de humo de sílice, ceniza volante, árido fino, árido grueso, cantidad de agua, entre otros.

Por otra parte Bakhoun et al. (2023) llevaron a cabo un análisis sobre modelos predictivos que estiman la resistencia a la compresión del concreto verde, utilizando polvo de horno de cemento y ceniza volante. Es importante resaltar que, los mismos consideraron este tema de gran impacto ya que, el concreto verde es uno de los recursos altamente utilizados en la construcción debido a sus ventajas ambientales. Por esta razón, para la construcción de los modelos RLM y ANN se utilizaron un rango de datos limitados de 156 puntos, además se consideró las propiedades químicas de los componentes del concreto y el entorno de los experimentos de laboratorio. Por otro lado, se desarrollaron muestras de entrenamiento, validación y prueba en los dos modelos, el primer modelo para concreto verde contiene polvo de horno de cemento en cambio, el segundo modelo para concreto verde contiene ceniza volante. En cuanto a los resultados, los modelos ANN mostraron una mejor predicción de la resistencia a la compresión del concreto verde con un valor de R^2 igual a 92,8% (Bakhoun et al., 2023).

Corroborando con estos estudios Carrasco (2020) también destaca el impacto que posee cada variable seleccionada en la resistencia a la compresión del hormigón a los 7 y 28 días de edad mediante el uso de instrumentos de regresión lineal múltiple o modelos RLM. Para esta investigación, se llevó a cabo un análisis estadístico para cada variable recopilada a partir de 709 ensayos; para la construcción de una base de datos, donde los modelos arrojados posteriormente a la matriz de datos fueron evaluados mediante métricas como el coeficiente de Pearson al cuadrado.

Los modelos ANN han presentado una clara ventaja en términos de capacidad predictiva en comparación a los modelos RLM. No obstante, una de las principales limitaciones que poseen los modelos ANN, es el requerimiento de grandes conjuntos de datos para entrenamiento, esto resulta ser un aspecto negativo debido a la complejidad que implica obtener inmensas cantidades de datos relevantes y de alta calidad; esto no ocurre con los modelos RLM ya que, con una cantidad menor de datos se puede llegar a obtener resultados aceptables a partir de una correcta selección de variables de entrada. Por otro lado, si se compara la interpretabilidad entre ambos modelos, los modelos RLM permiten una mejor comprensión en su uso, a diferencia de los modelos ANN, conocidos como modelos de caja negra, porque no son interpretables (Roque, 2021).

En este sentido el objetivo de esta investigación fue construir un modelo de regresión lineal múltiple para predecir la resistencia a compresión del hormigón simple de resistencias normales a los 7, 14 y 28 días.

2. Metodología

El enfoque de esta investigación fue cuantitativo y se estructuró en cuatro fases. En la fase preliminar, se empleó la técnica de revisión bibliográfica, para la recopilación de datos sobre las propiedades mecánicas y físicas de agregados fino y grueso, así como del cemento, que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón. En la primera fase, se determinaron los predictores para la construcción del modelo predictivo RLM. En la segunda fase, se evaluó la capacidad predictiva del modelo mediante métricas de evaluación como R^2 , RMSE, MAPE. Finalmente, en la tercera fase, se validó el modelo RLM comparando sus predicciones con los valores de resistencia a compresión obtenidos en cilindros de hormigón elaborados con materiales de la sierra central del Ecuador. A continuación, se detallan los métodos utilizados en cada una de las fases, así como las actividades realizadas.

2.1. Fase preliminar

Para cumplir con el propósito de esta fase se realizaron actividades como: búsqueda y recopilación de información mediante un método de análisis de documentos que exploran a profundidad el comportamiento del hormigón. Mediante el uso de artículos, fuentes escritas, sitios web y repositorios de las universidades, que se indican en la **Tabla 1**, con el propósito de recopilar los valores de potenciales variables predictoras, que se adaptan al contexto local.

Tabla 1

Repositorio de universidades ecuatorianas

Repositorios	URL
Universidad Técnica de Ambato	https://repositorio.uta.edu.ec
Escuela Politécnica Nacional	https://bibdigital.epn.edu.ec
Universidad Central del Ecuador	https://www.dspace.uce.edu.ec
Pontificia Universidad Católica del Ecuador	https://repositorio.puce.edu.ec
Universidad Espíritu Santo	http://repositorio.uees.edu.ec/

Para la selección de las variables preliminares, se empleó el método de revisión de literatura se identificaron y preseleccionaron las variables (**Tabla 2**), que fueron usadas por otros estudios con propósitos similares.

Tabla 2

Recopilación de las variables utilizadas en estudios previos

Recopilación de variables	Autores
Tipo y marca del cemento	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Roque (2021)
Asentamiento del hormigón (Cono Abrams)	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022)
Tipo de curado	Yancha (2022)
Código de la muestra	Yancha (2022), Roque (2021).
Humo Sílice	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022)
Ceniza volante de alta reactividad	Iqtidar et al. (2021)
Ceniza volante común	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022)
Granito Triturado	Iqtidar et al. (2021)
Escoria de horno de cuba	Iqtidar et al. (2021)
Solución alcalina	Iqtidar et al. (2021)
Relación Agua-Cemento (A/C)	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Carrasco (2020), Roque (2021).
Edad del hormigón	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022), Carrasco (2020)
Tipo de mezcla	Roque (2021)
Peso del cemento	Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Yancha (2022), Roque (2021)
Cantidad granulométricas de los áridos (fino y grueso)	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Carrasco (2020), Roque López (2021).
Pesos de los áridos (fino y grueso)	Iqtidar et al. (2021), Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Carrasco (2020), Roque (2021).
Cantidad de agua añadida a la mezcla	Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Carrasco (2020)
Peso de agua añadida a la mezcla	Roque (2021)
Porcentaje de humedad en cada uno de los tipos de áridos	Roque (2021)
Lugar de fabricación Mezcladora o Dosificadora	Roque (2021)
Mes del hormigonado	Roque (2021)
Descenso del cono de Abrams en laboratorio	Roque (2021)
Descenso del cono de Abrams en obra	Roque (2021)
Temperatura de agua de curado	Yancha (2022)
Temperatura del hormigón en laboratorio	Yancha (2022), Roque (2021)
Temperatura del hormigón en obra	Roque (2021)
Tiempo de traslado del hormigón a obra	Roque (2021)
Resistencia a compresión a los 28 días*	Yancha (2022), Bakhoun et al. (2023), Carrasco (2020), Roque (2021)
Resistencia a compresión a los 7 días*	Roque (2021)

Tabla 2

Recopilación de las variables utilizadas en estudios previos (continuación)

Recopilación de variables	Autores
Gravedad Específica de la muestra	Iqtidar et al. (2021)
Cantidad de superplastificantes	Bakhoun et al. (2023), Carrasco (2020)
Relación ripio-cemento	Yancha (2022)
Densidad del agregado	Yancha (2022)

La información recolectada fue tratada, en primera instancia se codificaron las variables, luego se realizó la transformación de las unidades, unificando las unidades de medida y formatos numéricos, así también se establecieron las edades a las que se evaluó la resistencia a la compresión del hormigón, las cuales fueron a los 7, 14 y 28 días, con la finalidad de obtener un modelo predictivo (Yancha, 2022).

2.2. Fase 1

En esta fase se buscó identificar correlación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente de interés que es la resistencia a compresión del hormigón simple. Para ello se evaluó la relación entre 28 variables predictoras y la resistencia a la compresión del hormigón como variable dependiente, utilizando un conjunto de 179 datos de especímenes de concreto. Para evaluar qué tan fuerte es la correlación se usó el software RStudio y los paquetes *readxl*, desarrollado por Wickham & Bryan (2025), *corrplot* desarrollado por Wei & Simko (2024), el paquete *GGally* desarrollado por Schloerke et al. (2024), el paquete *ggplot2* desarrollado por Wickham (2016). También se empleó el entorno *Tidyverse*, y el conjunto de paquetes diseñados para la ciencia de datos en R, desarrollado por Wickham et al. (2019). Una vez generados los resultados, se evaluó el valor de coeficiente de determinación (R^2), considerando valores superiores a 0.5 o inferiores -0.5, como valores que indican una alta correlación lineal.

2.3. Fase 2

Para construir y testear el modelo se empleó la técnica “Hold-out” la cual divide el conjunto de datos en dos subconjuntos uno de entrenamiento y otro de prueba (Fernández-Hernández et al., 2022). Primero se realizó la división del conjunto de datos, se asignó el 80% para datos de entrenamiento y el 20% para datos de prueba (Alabi & Mahachi, 2022). Para la construcción del modelo de regresión lineal múltiple, se empleó el método un paso hacia adelante y un paso hacia atrás. Este procedimiento iterativo consiste en agregar y eliminar variables del modelo de forma sucesiva hasta alcanzar un modelo final con un ajuste de manera óptima a los datos, sin necesidad de incluir variables que no mejoran la capacidad predictiva del modelo. Finalmente, se evaluó el error de predicción en el

modelo de regresión lineal múltiple, para lo cual se aplicó un conjunto de métricas para cuantificar la discrepancia entre los valores predichos por el modelo y los valores reales de la variable dependiente. Las métricas de evaluación aplicadas en esta investigación como el RMSE, RSE y el MAPE, han sido utilizadas ampliamente en investigaciones previas para evaluar la calidad de sus modelos predictivos (Alabi & Mahachi, 2022; (Yancha, 2022).

2.4. Fase 3

La validación del modelo de regresión lineal múltiple se llevó a cabo mediante la comparación entre las predicciones generadas por el modelo y los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. En esta etapa se realizaron tres cilindros de hormigón para cada edad, sometidos al ensayo de compresión de cilindros de hormigón a los 7, 14 y 28 días. En esta fase fue necesario realizar las siguientes actividades:

- Toma de muestras del agregado fino y grueso siguiendo la norma INEN 695 (INEN, 2010a). Seguidamente, las muestras fueron reducidas a tamaño de ensayo según la norma lo menciona (Valarezo, 2015).
- La determinación del cálculo de la densidad por medio del método del frasco volumétrico de Le Chatelier, se realizó según la norma INEN 156 (INEN, 2009). Para determinar la densidad real del cemento hidráulico, se sumergió una muestra de cemento en un frasco de Le Chatelier lleno de gasolina, donde, el volumen de gasolina desplazado por el cemento es directamente proporcional a su volumen. De esta manera, al conocer la masa del cemento y el volumen se calcula su densidad
- Análisis granulométrico en los áridos finos y gruesos según NTE INEN 696 (INEN, 2011a) y la verificación del cumplimiento de los requisitos según la norma NTE INEN 872 (INEN, 2011b).
- También, la determinación de la densidad, densidad relativa y porcentaje de absorción del árido fino según NTE INEN 856 (INEN, 2010b) y del árido grueso según NTE INEN 857 (INEN, 2010c). Además, de la determinación de la masa unitaria y porcentaje de vacíos según NTE INEN 858 (INEN, 2010d).
- Determinación de la dosificación óptima para un hormigón con resistencia a la compresión de 240 kg/cm^2 . Se empleó el método de la densidad óptima. Una vez determinadas las características físicas de los materiales empleados, se efectuaron los cálculos necesarios para obtener un hormigón con las resistencias requeridas a los 7, 14 y 28 días. Para determinar el contenido de humedad se utilizó la NTE INEN 862 (INEN, 2011c).

- Propiedades del hormigón en estado fresco mediante el ensayo de asentamiento según la NTE INEN 1578 (INEN, 2010e).
- Ensayo a la compresión según NTE INEN 1573 (INEN, 2010). La carga axial aplicada en el espécimen tenía una velocidad entre 0.25 y 0.05 MPa por segundo, los cilindros permanecieron durante los 7,14 y 28 días en condiciones de curado según lo establece la NTE INEN 1576 (INEN, 2011c) y NTE INEN 2528 (INEN, 2010f).

3. Resultados

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos en cada una de las fases de la investigación y se compararán con los valores establecidos en las diferentes normativas, cuando sea necesario.

3.1. Fase preliminar

A partir de la revisión bibliográfica, se seleccionaron las variables preliminares con mayor incidencia, que han sido empleadas en estudios similares. No obstante, se incorporaron variables adicionales, que se ajustan al contexto local. El enfoque de la metodología es estrictamente cuantitativo, considerando sólo las variables numéricas, lo que descarta a la variable “tipo de cemento”, por ser cualitativa. Las variables estandarizadas se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Variables estandarizadas codificadas

Nº	Nombre de las variables preliminares	U. medida	Codificación
1	Asentamiento	cm	Asent
2	Densidad del cemento	kg/m ³	Dens_Cem
3	Módulo de finura del agregado fino	-	Mod_fin_af
4	Tamaño máximo del agregado fino	cm	TM_af
5	Tamaño nominal máximo del agregado fino	cm	TMN_af
6	Densidad aparente suelta del agregado fino	kg/m ³	DAS_af
7	Densidad aparente compacta del agregado fino	kg/m ³	DAC_af
8	Porcentaje de humedad del agregado fino	%	Porcent_hum_af
9	Porcentaje de absorción del agregado fino	%	Porcent_absor_af
10	Módulo de finura del agregado grueso	-	Mod_fin_ag
11	Tamaño máximo del agregado grueso	cm	TM_ag

Tabla 3

Variables estandarizadas codificadas (continuación)

N°	Nombre de las variables preliminares	U. medida	Codificación
12	Densidad aparente suelta del agregado grueso	kg/m ³	DAS_ag
13	Densidad aparente compacta del agregado grueso	kg/m ³	DAC_ag
14	Porcentaje de humedad del agregado grueso	%	Porcent_hum_ag
15	Porcentaje de absorción del agregado grueso	%	Porcent_absor_ag
16	Porcentaje óptimo de la arena	%	Porcent_opt_arena
17	Porcentaje óptimo de la grava	%	Porcent_opt_grava
18	Densidad óptima de la mezcla	kg/m ³	DOmezcla
19	Densidad máxima de la mezcla	kg/m ³	DMmezcla
20	Cantidad de agua	kg	Agua
21	Cantidad de cemento	kg	Cemento
22	Cantidad de grava	kg	Grava
23	Cantidad de arena	kg	Arena
24	Cantidad de agua corregida	kg	Agua_corr
25	Cantidad de cemento corregida	kg	Cemento_corr
26	Cantidad de grava corregida	kg	Grava_corr
27	Cantidad de arena corregida	kg	Arena_corr
28	Edad del hormigón	días	Edad_Ho
29	Resistencia a la compresión del hormigón	kg/cm ²	Resis_comp

3.2. Fase 1

En la **Tabla 4**, se presentan los resultados de R² obtenidos de cada variable en relación con la variable resistencia a la compresión del hormigón, arrojados por el software R y su interfaz RStudio.

Tabla 4

Coefficiente de determinación de cada variable preliminar

Variable predictora	Resis_comp
Resis_comp	1,0000
Asentamiento	-0,1324
Densidad_cemento	-0,1552
Modulo_finura_af	0,0686
TM_af	-0,2325
TNM_af	0,0521

Tabla 4

Coefficiente de determinación de cada variable preliminar (continuación)

Variable predictora	Resis_comp
DAS_af	0,0419
DAC_af	0,1298
Porcen_humedad_af	-0,0421
Porcen_absor_af	-0,0104
TM_ag	-0,1390
TNM_ag	-0,0400
DAS_ag	-0,0200
DAC_ag	0,0004
Porcen_humedad_ag	-0,0914
Porcen_absor_ag	0,4497
Porcen_opt_arena	-0,0845
Porcen_opt_grava	0,0934
DOmezcla	0,0487
DMmezcla	0,0544
Agua	0,0304
Cemento	0,0982
Arena	-0,0196
Grava	-0,0777
Agua_corr	0,0304
Cemento_corr	0,0982
Arena_corr	-0,0196
Grava_corr	-0,0777
Edad_hormigón	0,6480

Al analizar los coeficientes de determinación de cada variable preliminar (**Tabla 4**), se observó que únicamente la variable “Edad_hormigón” presentó un valor de R^2 considerable alcanzando un valor de 0,648. Sin embargo, las 27 variables preliminares restantes mostraron coeficientes de determinación inferiores a 0,5, lo que indica una relación baja o no necesariamente lineal con la resistencia a la compresión del hormigón, en contraste con la fuerte relación arrojada con la edad. A pesar de estos resultados iniciales, se optó por mantener todas las variables para la etapa de la construcción del modelo, ya que se empleará la técnica de “step-wise” o selección escalonada para determinar un subconjunto óptimo de variables predictoras para mejorar la precisión del modelo y evitar el sobreajuste.

3.3. Fase 2

La conformación del conjunto de datos para entrenar y testear el modelo, se lo realizó de forma aleatoria. Se asignó el 80% de los datos, es decir 144 registros, al conjunto de entrenamiento, el cual se utilizó para construir y ajustar el modelo. El 20% restante, equivalente a 35 registros, se reservó como conjunto de prueba, con el objetivo de evaluar la capacidad de generalización de los modelos entrenados.

En la construcción del modelo de regresión lineal se obtuvieron tres modelos para cada conjunto de datos, los nombres de las variables y las unidades de medida se indica en la **Tabla 5**.

- **Modelo 1 (M₁): Base de datos con unidades de medida originales.**

$$\text{Resis_comp} = -450,215 - 4,274 (\text{Asentamiento}) - 17,304 (\text{Modulo_fin_af}) - 79,763 (\text{TM_af}) - 0,049 (\text{DAC_af}) - 15,315 (\text{TM_ag}) - 0,070 (\text{DAS_ag}) + 0,110 (\text{DAC_ag}) + 21,9007 (\text{Porcen_absor_ag}) + 469,231 (\text{Porcen_opt_arena}) + 569,529 (\text{Porcen_opt_grava}) + 0,033 (\text{DO_mezcla}) + 0,482 (\text{Agua}) + 3,224 (\text{Edad hormigón}) + \varepsilon$$

- **Modelo 2 (M₂): Base de datos con unidades de medida estandarizadas.**

$$\text{Resis_comp} = -450,215 - 4,274 (\text{Asentamiento}) - 17,304 (\text{Modulo_finura_af}) - 31,403 (\text{TM_af}) - 0,049 (\text{DAC_af}) - 6,026 (\text{TM_ag}) - 0,069 (\text{DAS_ag}) + 0,110 (\text{DAC_ag}) + 21,9007 (\text{Porcen_absor_ag}) + 469,231 (\text{Porcen_opt_arena}) + 569,529 (\text{Porcen_opt_grava}) + 0,033 (\text{DO_mezcla}) + 0,48234 (\text{Agua}) + 3,224 (\text{Edad hormigón}) + \varepsilon$$

- **Modelo 3 (M₃): Base de datos con valores normalizados.**

$$\text{Resis_comp} = -0,354 - 0,128 (\text{Asentamiento}) - 0,107 (\text{Modulo_finura_af}) - 0,063 (\text{TM_af}) - 0,529 (\text{DAC_af}) - 0,080 (\text{TM_ag}) - 0,321 (\text{DAS_ag}) + 0,520 (\text{DAC_ag}) + 0,420 (\text{Porcen_absor_ag}) + 0,475 (\text{Porcen_opt_arena}) + 0,576 (\text{Porcen_opt_grava}) + 0,284 (\text{DO_mezcla}) + 0,207 (\text{Agua}) + 0,285 (\text{Edad hormigón}) + \varepsilon$$

El código de las variables predictoras que se emplearon para la construcción de los modelos M1, M2, M3, la descripción y la unidad de medida se indican en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Nombre de las variables preliminares

Codificación	Nombre de las variables predictoras	Unidad de medida
Resis_comp	Resistencia a la compresión del hormigón	kg/cm ²
Asentamiento	Asentamiento	cm
Mod_fin_af	Módulo de finura del agregado fino	-
TM_af	Tamaño máximo del agregado fino	in
DAC_af	Densidad aparente compacta del agregado fino	kg/m ³
TM_ag	Tamaño máximo del agregado grueso	in
DAS_ag	Densidad aparente suelta del agregado grueso	kg/m ³
DAC_ag	Densidad aparente compacta del agregado grueso	kg/m ³
Porcent_absor_ag	Porcentaje de absorción del agregado grueso	%
Porcent_opt_arena	Porcentaje óptimo de la arena	%
Porcent_opt_grava	Porcentaje óptimo de la grava	%
DOmezcla	Densidad óptima de la mezcla	kg/m ³
Agua	Cantidad de agua	kg
Edad_hormigón	Edad del hormigón	días

Al examinar los tres modelos de regresión lineal múltiple obtenidos, se observó que los tres modelos predictivos comparten las trece mismas variables predictoras, indicadas en la **Tabla 5**. Sin embargo, a pesar de esta similitud en las variables, los coeficientes estimados para cada modelo difieren significativamente, indicando que la influencia de cada variable independiente sobre la variable dependiente varía entre los distintos conjuntos de datos.

En la **Tabla 6** se presentan los valores obtenidos de las métricas de evaluación aplicada en los tres modelos de regresión lineal múltiple.

Tabla 6

Valores de métricas de evaluación

Datos de entrada	R ²	MSE	RMSE (kg/cm ²)	MAPE (%)
M ₁	0,7934	407,858	20,195	7
M ₂	0,7934	407,858	20,195	7
M ₃	0,7934	0,007	0,084	26

Al analizar el coeficiente de determinación R² de los tres modelos (**Tabla 6**), se observó una igualdad en este indicador, al poseer un coeficiente de determinación ajustado igual

a 0,7934, en los tres modelos. Esto indica que tanto el modelo “M₁” generado a partir de la base de datos con unidades de medidas originales como el modelo “M₂” generado a partir de la base de datos con unidades de medidas estandarizadas y el modelo “M₃” generado a partir de una base de datos con datos normalizados, explican una proporción similar de variabilidad en la variable dependiente, siendo cualquiera de estos tres modelos candidatos ideales para convertirse en el modelo definitivo.

Sin embargo, al analizar los valores obtenidos en las métricas de evaluación en los modelos “M₁” y “M₂”, se observó una igualdad en ambos modelos al obtener un MSE=407,858, RMSE= 20,195 kg/cm² y MAPE = 7%, siendo ambos modelos candidatos óptimos para la selección del modelo de regresión lineal múltiple.

Para esta investigación se optó por seleccionar el modelo “M₁” debido a su simplicidad, al no tener que realizar transformaciones a las unidades de medida.

3.4. Fase 3

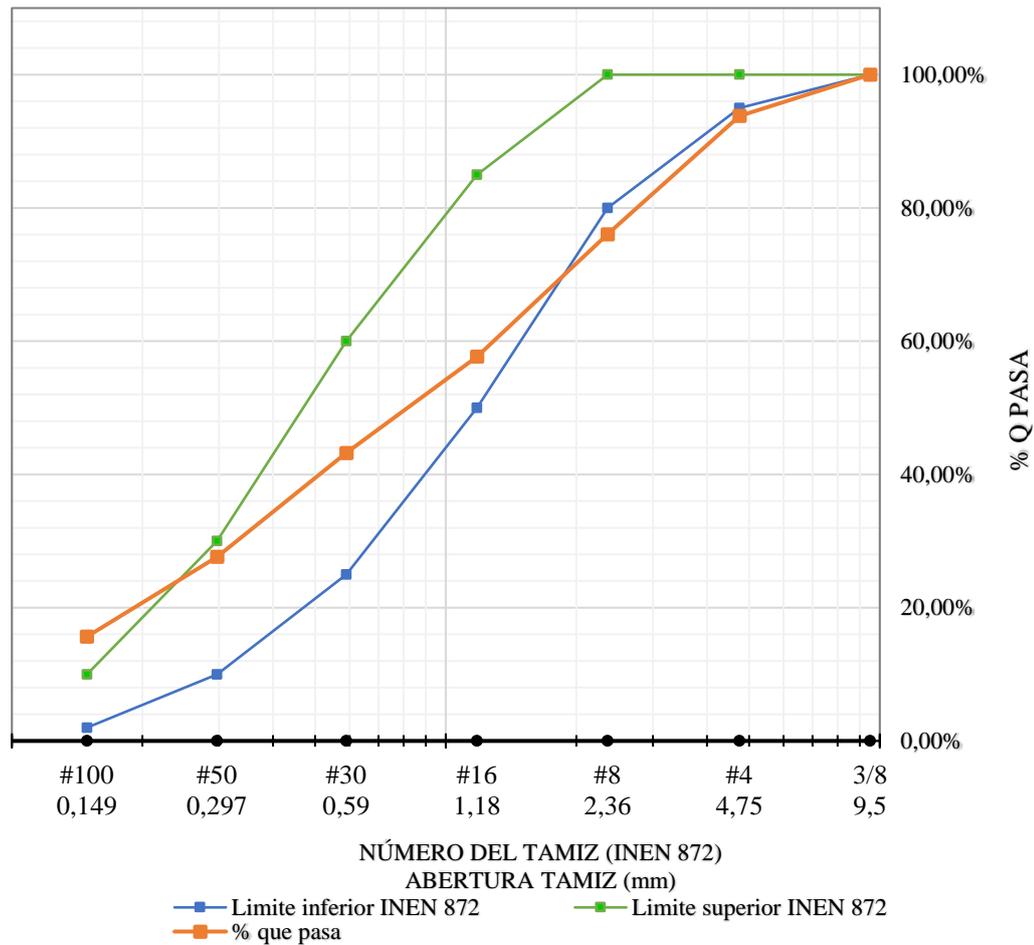
Para obtener los datos para la etapa de validación del modelo, fue necesario realizar la dosificación para un hormigón de 240 kg/cm² a los 28 días, para lo cual se realizaron ensayos para caracterizar a los materiales. La densidad del cemento hidráulico tipo IP fue de 2,719 g/cm³, valor obtenido usando el frasco de Le Chatelier.

En cuanto a los resultados de los ensayos de los agregados fino, grueso se obtuvieron los siguientes resultados:

- El agregado fino evaluado cumplió con los criterios de granulometría establecidos en la NTE INEM 872 (INEN, 2011b) ya que, su distribución granulométrica se encuentra dentro de los límites mínimos y máximos especificados. Asimismo, el módulo de finura de este agregado posee un valor de 2,86; cumpliendo de igual manera con el rango establecido para el módulo de finura del agregado fino, es decir, entre 2,30 y 3,10. Como se puede ver en la **Figura 1**.

Figura 1

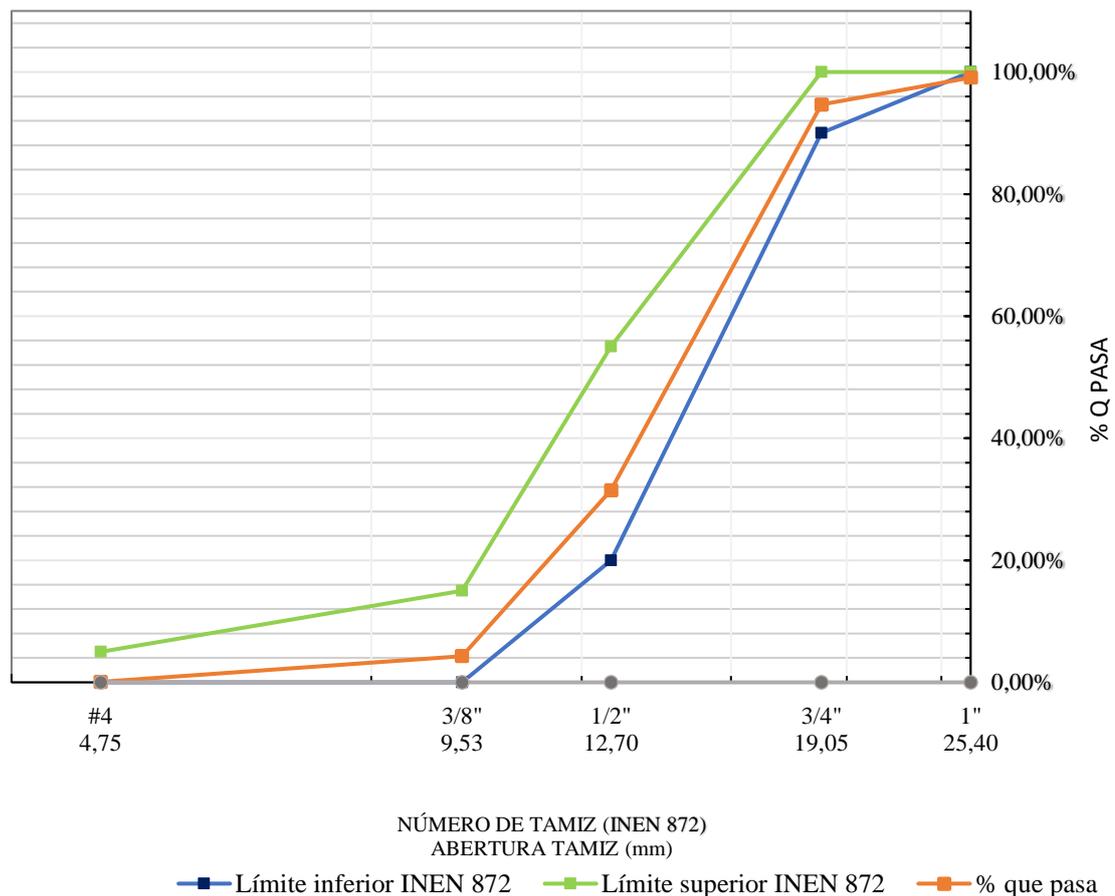
Curva granulométrica del agregado fino



- Por otro lado, el ripio triturado o agregado grueso analizado cumple con los requisitos establecidos en la NTE INEN 872. Su curva granulométrica se ajusta de forma adecuada a los límites normativos, garantizando una distribución adecuada de tamaños y su adecuada elaboración del hormigón según la normativa, además, el tamaño nominal máximo del agregado posee un valor de 1". Como se puede ver en la **Figura 2**.

Figura 2

Curva granulométrica del agregado grueso



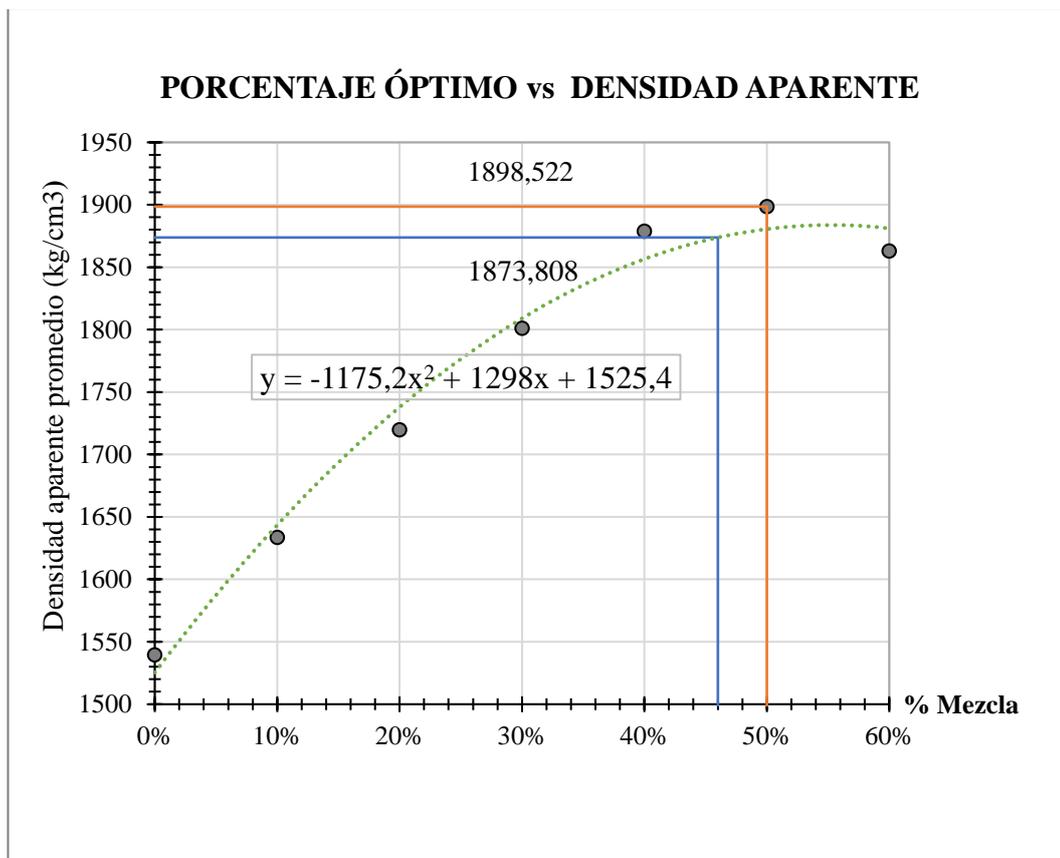
- En cuanto al análisis gravimétrico del agregado fino reveló una densidad saturada superficialmente seca de 2,596 g/cm³. Por otro lado, el porcentaje de absorción del agregado fino fue de 2,456%, situándose igualmente dentro del intervalo permisible de 0,2% a 2,50%.
- Mientras que, el análisis gravimétrico del agregado grueso arrojó una densidad saturada superficialmente seca de 2,617 g/cm³. El porcentaje de absorción del agregado grueso fue de 1,567%, ubicándose dentro del intervalo permisible de 0,2% a 2,50%, lo que indica la conformidad del material con los estándares establecidos.
- En cuanto al peso volumétrico de los agregados, se determinó que el agregado fino utilizado en esta investigación presentó un peso volumétrico suelto (o densidad aparente suelta) de 1654,91 kg/m³ y un peso volumétrico compactado (o densidad aparente compactada) de 1722,53 kg/m³. Estos valores se encuentran

dentro del rango establecido por la NTE-INEN 694 (INEN, 2010g), ya que se sitúan entre 1,120 g/cm³ y 1,920 g/cm³.

- Por otro lado, el agregado grueso utilizado en esta investigación presentó un peso volumétrico suelto (o densidad aparente suelta) de 1429,75 kg/m³ y un peso volumétrico compactado (o densidad aparente compactada) de 1547,58 kg/m³. Ambos valores se encuentran dentro del rango establecido por la NTE INEN 694, que establece un límite entre 1,120 g/cm³ y 1,920 g/cm³.
- En el ensayo de densidad aparente compactada de la mezcla, se obtuvieron datos clave para la dosificación, destacándose los porcentajes óptimos de 46% para el agregado fino y 64% para el agregado grueso. Además, el peso unitario máximo y óptimo de la mezcla fue de 1898,52 kg/m³ y 1890,64 kg/m³, respectivamente (**Figura 3**).

Figura 3

Densidad compactada de una mezcla



- En lo que se refiere a la dosificación se obtuvieron las cantidades descritas en la **Tabla 7**. Las cantidades de materiales para el volumen de ensayo, considera las

cantidades necesarias para llenar 9 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

Tabla 7

Dosificación al peso

Material	Cantidad para 1 m ³ de hormigón (kg)	Proporción en peso	Cantidad para ensayo (kg)
W	187,48	0,57	3,43
C	328,91	1	6,01
A	839,54	2,57	15,45
R	993,22	3,04	18,27
TOTAL	2349,15		

La **Tabla 7**, indica que la dosificación empleada fue: 1:2.57:3.04.

- Las cantidades para ensayo fueron corregidas el día que se elaboró el hormigón, debido a que la humedad de los agregados cambia. Estas cantidades se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Cantidades corregidas de materiales

Material	Dosificación al peso (kg)	Cantidad para cilindros de ensayo (kg)	Absorción	Humedad	Corrección		Cantidad para cilindros corregida
			%	%	%	kg	
W	3,43	3,43	-	-	-	0,241	3,669 lt
C	6,01	6,01	-	-	-	-	6,014 kg
A	15,43	15,43	2,456	1,520	0,936	0,141	15,288 kg
R	18,25	18,25	1,567	1,010	0,557	0,100	18,154 kg

Respecto a las propiedades del hormigón en estado fresco se obtuvo un asentamiento de 6.3 cm, medido con el cono de Abrams.

Finalmente, en el ensayo de compresión la resistencia promedio de tres especímenes ensayados a la compresión a los 7 días fue de 179,30 kg/cm², que representa un 75,70% de la resistencia máxima alcanzada, este valor se encuentra dentro del rango de 156 a 180 kg/cm², de acuerdo con valores teóricos que indican que deben estar entre. A los 14 días, la resistencia promedio fue de 208,03 kg/cm², ubicada dentro del rango de 192 a 216 kg/cm². Finalmente, a los 28 días, la resistencia promedio fue de 224,1 kg/cm², dentro del rango de 228 a 252 kg/cm². En todos los casos se obtuvo el promedio de tres especímenes.

Una vez obtenidos los resultados de resistencia a la compresión de los nueve cilindros de hormigón a los 7, 14 y 28 días, se validó el modelo de regresión lineal múltiple. La **Tabla 9** presentó los resultados de los ensayos realizados para determinar las propiedades de los agregados fino y grueso obtenidos en la región de la sierra centro del Ecuador, necesarios para realizar la dosificación del hormigón, que forman parte de las variables predictoras del modelo predictivo “M1” seleccionado.

Tabla 9
Valores de las variables predictoras

Codificación	Nombre de las variables preliminares	Valor	Unidad de medida
Asentamiento	Asentamiento	6,300	cm
Mod_fin_af	Módulo de finura del agregado fino	2,010	-
TM_af	Tamaño máximo del agregado fino	0,375	in
DAC_af	Densidad aparente compacta del agregado fino	1722,530	kg/m ³
TM_ag	Tamaño máximo del agregado grueso	1,500	in
DAS_ag	Densidad aparente suelta del agregado grueso	1429,750	kg/m ³
DAC_ag	Densidad aparente compacta del agregado grueso	1547,580	kg/m ³
Porcent_absor_ag	Porcentaje de absorción del agregado grueso	1,670	%
Porcent_opt_arena	Porcentaje óptimo de la arena	46,000	%
Porcent_opt_grava	Porcentaje óptimo de la grava	54,000	%
DOmezcla	Densidad óptima de la mezcla	1890,640	kg/m ³
Agua	Cantidad de agua	187,780	kg

La **Tabla 9** indica los valores de las variables que se obtuvieron luego de realizar los de los materiales y la dosificación empleada en la elaboración de los cilindros de hormigón simple. Estos valores se reemplazaron en el modelo predictivo “M1”, seleccionado para predecir la resistencia a compresión.

Es importante indicar que la caracterización, la dosificación y la mezcla de los materiales se lo realizó en una sola ocasión. Todos los especímenes fueron elaborados el mismo día, estuvieron en las mismas condiciones de curado hasta la fecha de ensayo, que fue a los 7, 14 y 28 días.

Los valores experimentales de las variables predictoras fueron reemplazados en el modelo predictivo “M1”, seleccionado en la fase 2, porque presentó el mejor desempeño. Los valores de la resistencia a la compresión del hormigón (kg/cm²) a las edades de 7, 14 y

28 días, que se presentan en la **Tabla 10** indican una tendencia creciente, lo cual es normal en el comportamiento de resistencia a compresión del hormigón.

Tabla 10

Resultados obtenidos para edad del hormigón de 7, 14 y 28 días

Edad (días)	Resistencia a la compresión del hormigón obtenida en el laboratorio (kg/cm ²)	Predicción de la resistencia a la compresión mediante el modelo rlm (kg/cm ²)	Tolerancia del modelo		Error de validación	
			Inferior (kg/cm ²)	Superior (kg/cm ²)	RMSE (kg/cm ²)	MAPE (%)
7	179,3	162,2	142,03	182,42		
14	206,43	180,0	159,8	200,19	22,148	10,0
28	247,54	225,1	204,94	245,33		

En la **Tabla 10** se presentan los valores reales de la resistencia a la compresión del hormigón (kg/cm²), a las diferentes edades.

Al comparar los valores de la resistencia a la compresión obtenidos experimentalmente con las predicciones del modelo “M1”, se observó que únicamente los resultados correspondientes a la edad de 7 días se encontraron dentro del rango de tolerancia establecido por la métrica RMSE, que corresponde a ± 20 kg/cm², a diferencia de los valores para las edades de 14 y 20 días, que están fuera del rango. Para la etapa de validación se obtuvieron valores de métricas de RMSE igual a 22,148 kg/cm² y de MAPE del 10 %.

En su estudio Sah & Hong (2024), reportaron un valor de MAPE de 13.204 % en su modelo de regresión lineal múltiple. Como se mencionó, el modelo de regresión lineal múltiple propuesto en esta investigación demostró una precisión en la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón simple, en la etapa de testeo del 7% y en la etapa de validación del 10%, considerándose mejor ya que tiene un porcentaje de error inferior.

En cuanto a la verificación de hipótesis que se planteó en esta investigación, tras ensayar las nueve probetas a los 7, 14 y 28 días y comparar los resultados experimentales con las predicciones del modelo de regresión lineal múltiple, se rechazó la hipótesis de nulidad de parámetros, y se afirma que existen variables que explican la resistencia a la compresión del hormigón simple. Se observó que algunas variables explican mejor la variabilidad de la resistencia que otras. El modelo demostró ser eficaz para predecir esta propiedad, con la raíz cuadrada del error cuadrático medio, RMSE = 20 kg/cm²; se indica

que, aunque el modelo captura las tendencias generales, aún existen variaciones no explicadas completamente.

4. Conclusiones

- Del análisis general del modelo, se determinó que existen 13 variables predictoras que resultaron estadísticamente significativas para el modelo, con un nivel de confianza del 90%.
- El análisis de correlación reveló que la variable independiente “Edad_hormigon”, fue la única variable que mostró un coeficiente de determinación R^2 igual a 0,648 considerado como alto, lo que evidencia que la relación lineal entre la resistencia a la compresión y la edad es fuerte y directamente proporcional.
- Por otro lado, la evaluación de la capacidad predictiva del modelo de regresión lineal múltiple mediante las métricas R^2 ajustado, RMSE y MAPE, presentaron valores de 0.7945, 20.195 kg/cm² y 7%, respectivamente, resultando valores inferiores a los presentados en otros estudios.
- Finalmente, en la etapa de validación, el modelo de regresión lineal múltiple para las edades de 7,14 y 28 días presentó un MAPE del 10% y un RMSE igual a $\pm 22,148$ kg/cm². Determinándose finalmente que el modelo genera predicciones aceptables.

5. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

6. Declaración de contribución de los autores

Todos autores contribuyeron significativamente en la elaboración del artículo.

7. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

8. Referencias Bibliográficas

Alabi, S. A., & Mahachi, J. (2022). Utilizing Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression to Model the Compressive Strength of Recycled Geopolymer Concrete. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4), 43-56. <https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie/article/view/6672>

Bakhom, E. S., Amir, A., Osama, F., & Adel, M. (2023). Prediction model for the compressive strength of green concrete using cement kiln dust and fly ash. *Scientific Reports*, 13, 1864. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28868-7>

- Carrasco Avendaño, J. E. (2020). *Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador* [Tesis de máster, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Ecuador]. <https://riunet.upv.es/entities/publication/03560d97-1c54-4481-ab42-c275f8ea161f>
- Contreras Vásquez, L., Mayorga-Amaguaya, D., Peñafiel-Valla, G., & Navarro-Peñaherrera, C. (2023). Análisis Comparativo de la Resistencia a compresión entre el hormigón tradicional y el preparado con escombros de hormigón. *Investigación Y Desarrollo*, 18(1). <https://doi.org/10.31243/id.v18.2023.2020>
- Fernández-Hernández, J.-L., Herranz-Hernández, P., & Segovia-Torres, L. (2022). Validación cruzada sobre una misma muestra: una práctica sin fundamento. *R.E.M.A. Revista electrónica De metodología Aplicada*, 24(1), 38–40. <https://doi.org/10.17811/rema.24.1.2022.38-40>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2009). *Cemento hidráulico. Determinación de la densidad*. (NTE INEN 156). <https://es.scribd.com/document/250993495/Norma-ENEN-156>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*. (NTE INEN 1573). <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010a). *Áridos. Muestreo* (NTE INEN 695). <https://es.slideshare.net/slideshow/ecnte06952010/33067227#3>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010b). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*. (NTE INEN 856). <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-del-azuay/resistencia-de-materiales-2/n-te-inen-856-densidad-relativa-del-agregado-fino/39868633>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010c). *Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. (NTE INEN 857). <https://es.scribd.com/document/364038726/857>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010d). *Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos*. (NTE INEN 858). <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/n-te-inen-858-1-determinacion-de-la-masa-unitaria/23206033>

- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010e). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento*. (NTE INEN 1578). <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-politecnica-salesiana/hormigon-armado-de-elementos-a-flexo/1578-hormigon-de-cemento-hidraulico-determinacion-del-asentamiento/44809508>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010f). *Cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón. Requisitos*. (NTE INEN 2528). <https://es.scribd.com/document/553715850/NTE-INEN-2528-Camaras-de-Curado-Gabinetes-Humedos-Tanques-Para-Almacenamiento-en-Agua-y-Cuartos-Para-Elaborar-Mezclas-Utilizados-en-Ensayos-de-Ceme>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2010g). *Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Terminología*. (NTE INEN 694). <https://www.studocu.com/ec/document/pontificia-universidad-catolica-del-ecuador/ingenieria-en-sistemas/nte-inen-694-1-hormigon-y-aridos/4778834>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2011a). *Áridos. Análisis granulométrico en áridos, fino y grueso*. (NTE INEN 696). <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2011b). *Áridos para hormigón. Requisitos*. (NTE INEN 872). <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2011c). *Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad*. (NTE INEN 862). <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/862-normas-nte-inen-862-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180419>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2011c). *Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo*. (NTE INEN 1576). <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnica-particular-de-loja/hormigon-armado/nte-inen-1576-hormigon-elaboracion-y-curado-en-obra-de-especimenes/47008206>
- Iqtidar, A., Bahadur Khan, N., Kashif-ur-Rehman, S., Faisal Javed, M., Aslam, F., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Mosavi, A. (2021). Prediction of compressive strength of rice husk ash concrete through different machine learning processes. *Crystals*, 11(4), 352. <https://doi.org/10.3390/cryst11040352>

- León Consuegra, L., & Rodríguez García, C. (2022). Factores que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón. estado del arte. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 16(3), 1-11.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193972950003>
- Nistal Cordero, A. F., Ruíz Abrio, M. T., & Retana Maqueda, M. J. (2012). El hormigón: historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia. *Tecnología y desarrollo*, 10.
https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/view/577/533
- Roque López J. (2021). *Técnicas de selección de variables en regresión lineal múltiple* [Tesis de máster, Universidad Internacional de Andalucía, Sevilla, España].
<http://hdl.handle.net/10334/6557>
- Sah, A. K., & Hong, Y.-M. (2024). Performance Comparison of Machine Learning Models for Concrete Compressive Strength Prediction. *Materials*, 17(9), 2075.
<https://doi.org/10.3390/ma17092075>
- Schloerke, B., Cook, D., Larmarange, J., Briatte, F., Marbach, M., Thoen, E., Elberg, A., & Crowley, J. (2024). *GGally: Extension to "ggplot2"*. R package version 2.2.1. <https://ggobi.github.io/ggally/authors.html#citation>
- Valarezo, M. (2015). *Reducción de muestras a tamaño de ensayo*. Slideshare.
<https://es.slideshare.net/mfvalarezo/reduccion-de-muestras-54317419>
- Wei, T., & Simko, V. (2024). R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix. (Version 0.95), <https://github.com/taiyun/corrplot>.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer Cham.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Wickham, H., & Bryan, J. (2025). readxl: Read Excel Files [Data set]. En *CRAN: Contributed Packages*. The R Foundation. <https://cran.r-project.org/web/packages/readxl/index.html>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of open-source software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Yancha Alvarado, A. G. (2022). *Modelos predictivos de la resistencia del hormigón mediante estadística y redes neuronales artificiales* [Tesis de máster,

Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Ecuador].
<http://hdl.handle.net/10251/190583>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Alfa Publicaciones**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Alfa Publicaciones**.

