

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

**“ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO OPERATIVO DE
VOLQUETES MEDIANTE MACHINE LEARNING
PARA OPTIMIZAR LA PRODUCTIVIDAD EN UNA
MINA A CIELO ABIERTO, HUAMACHUCO”**

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Carlos Jesus Ninatanta Coba

Jorge Kevin Castro Escobar

Asesor:

Mg. Eduardo Manuel Noriega Vidal

<https://orcid.org/0000-0001-7674-7125>

Trujillo - Perú

2025

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	MAURO EDILBERTO CRUZADO RAMIREZ
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	JUAN MIGUEL DE LA TORRE OSTOS
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	EDUARDO MANUEL NORIEGA VIDAL
	Nombre y Apellidos

INFORME DE SIMILITUD



Página 2 of 90 - Integrity Overview

Identificador de la entrega trn:oid::1:3214824267

19% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Exclusions

▶ 14 Excluded Sources

Top Sources

18%  Internet sources

6%  Publications

11%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

DEDICATORIA

Dedicamos el presente trabajo de investigación a nuestras familias, pilares fundamentales en nuestra vida académica y personal. A nuestros padres, por ser ejemplo constante de esfuerzo, responsabilidad y compromiso; por brindarnos su apoyo incondicional, aun en los momentos más difíciles, y por creer en nosotros incluso cuando las circunstancias parecían adversas. A nuestros hermanos, quienes con su cariño y compañía nos motivaron a seguir adelante. A nuestros amigos cercanos, por su comprensión, aliento constante y palabras de ánimo durante este proceso.

A todos aquellos que, de una u otra forma, fueron parte de este camino, les dedicamos con gratitud y respeto el fruto de nuestro esfuerzo.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa al desarrollo y culminación de esta tesis. En primer lugar, agradecemos a nuestros asesores académicos por su orientación constante, sus observaciones oportunas y su disposición para acompañarnos en cada etapa del proceso investigativo. Su experiencia y compromiso fueron clave en la calidad de este trabajo.

Reconocemos también a los docentes de nuestra carrera, cuya enseñanza y vocación formaron parte esencial de nuestra preparación profesional. Agradecemos a la universidad por brindarnos el entorno académico, los recursos y las oportunidades necesarias para alcanzar nuestras metas.

Asimismo, queremos destacar el valor de los cursos y espacios de formación complementaria, que nos permitieron ampliar nuestros conocimientos y fortalecer nuestras capacidades investigativas. Finalmente, agradecemos a nuestros compañeros de estudio por el intercambio de ideas, la colaboración mutua y el compañerismo mostrado durante todos estos años de formación.

Este logro no habría sido posible sin el aporte de cada uno de ustedes.

TABLA DE CONTENIDOS

JURADO EVALUADOR.....	2
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO.....	5
TABLA DE CONTENIDOS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema	26
1.3. Objetivos	27
1.4. Hipótesis.....	27
CAPITULO II: METODOLOGÍA.....	28
CAPITULO III: RESULTADOS.....	34
CAPITULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Estadística descriptiva de las variables operativas de volquetes	34
Tabla 2 Hiperparámetros de la ANN-MLP para predicción de rendimiento operativo	40
Tabla 3 Hiperparámetros de RF para la predicción de rendimiento operativo	43
Tabla 4 Hiperparámetros de DT para la predicción de rendimiento operativo	45
Tabla 5 Hiperparámetros de SVR para la predicción de rendimiento operativo	46
Tabla 6 Evaluación de la predicción del rendimiento operativo de volquetes	48
Tabla 7 Escenarios de evaluación para optimizar la productividad	52
Tabla 8 Escenarios operativos por volquete en la optimización de la productividad.....	53
Tabla 9 Optimización de la productividad mensual promedio de los volquetes	55
Tabla 10 Registro diario de operación por volquete.....	72
Tabla 11 Registro de predicciones de rendimiento operativo realizadas con machine learning	73
Tabla 12 Simulaciones para optimización de productividad en volquetes mineros.....	73
Tabla 13 Prueba de normalidad de los datos	74
Tabla 14 Prueba estadística t de student	75
Tabla 15 Coeficiente de Holti.....	79
Tabla 16 Confiabilidad del coeficiente de Holti.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Histograma de distribución de las variables operativas de volquetes.....	35
Figura 2 Boxplot de las variables operativas de volquetes.....	36
Figura 3 Histograma combinado de frecuencia de variables operativas de volquetes por turnos	37
Figura 4 Matriz de correlación de Pearson de variables operativas en volquetes	38
Figura 5 Diagrama de pares de las variables operativas de volquetes	39
Figura 6 Curva de pérdida de entrenamiento y validación de la predicción con ANN-MLP	41
Figura 7 Comparación de rendimiento operativo real vs predicho con ANN-MLP	42
Figura 8 Comparación de rendimiento operativo real vs predicho con RF.....	44
Figura 9 Importancia relativa de las variables operativas utilizadas en la estimación con RF	44
Figura 10 Comparación de rendimiento operativo real vs predicho con DT	46
Figura 11 Comparación de rendimiento operativo real vs predicho con SVR.....	47
Figura 12 Rendimiento operativo real vs predicho con todos los modelos de machine learning en conjunto de entrenamiento.....	49
Figura 13 Rendimiento operativo real vs predicho con todos los modelos de machine learning en conjunto de validación.....	50

Figura 14 Matriz de correlación de los modelos de machine learning utilizados para la estimación del rendimiento operativo de volquetes 51

Figura 15 Distribución de la productividad mensual optimizada según escenarios operativos 54

Figura 16 Influencia del rendimiento operativo en la optimización de la productividad mensual de volquetes..... 56

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal estimar el rendimiento operativo de volquetes mediante modelos de Machine Learning para optimizar la productividad en una mina a cielo abierto en Huamachuco. Se aplicó una metodología de enfoque cuantitativo, diseño no experimental y nivel correlacional-predictivo. Para el análisis estadístico, se utilizó estadística descriptiva e inferencial, aplicando pruebas de correlación de Pearson y la prueba t de Student para muestras independientes, con un nivel de significancia menor a 0.05. La base de datos comprendió 1948 registros operacionales de cuatro volquetes durante el año 2024, considerando variables como número de viajes, tonelaje total, consumo de combustible y horas operativas. Se evaluaron cuatro modelos de Machine Learning: Support Vector Regression, Random Forest, Red Neuronal y Árbol de Decisión, siendo SVR el más preciso ($R^2 = 0.99$; RMSE = 3.25; MAE = 0.85). Además, se simularon cuatro escenarios operativos: base, mejora sostenible, optimista y pesimista. En el escenario de mejora sostenible se mantuvo constante la jornada laboral (9.6 h) y se aplicaron incrementos técnicos moderados: +5 % en número de viajes, +5 % en consumo de combustible y +10 % en tonelaje diario. Como resultado, la productividad mensual promedio aumentó de 25465.89 ton/mes (escenario base) a 28000.76 ton/mes, lo que representa una mejora del 10 %. Se concluye que el rendimiento operativo puede ser estimado con alta precisión mediante técnicas de Machine Learning, y que el uso de escenarios simulados permite implementar estrategias sostenibles de mejora operativa que impactan directamente en la productividad minera.

PALABRAS CLAVES: Machine learning, productividad, rendimiento operativo.

NOTA

El contenido de la investigación no se encuentra disponible en **acceso abierto** por determinación de los propios autores, en concordancia con en el Texto Integrado del Reglamento RENATI (artículo 12), la Directiva N°048-2020-CONCYTEC-P que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto (ALICIA) administrado por el pliego Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC y la Ley N° 29733, Ley de Protección de Datos Personales.

REFERENCIAS

- Andrade, E. (2005). *Metodología de la investigación científica*. (Editorial y librería Andrade, Ed.) (2°.). Perú.
- Arias, J., & Corvinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. (Enfoques Consulting EIRL, Ed.) (Primera.).
- Champahom, T., Wisutwattanasak, P., Se, C., Banyong, C., Jomnonkwao, S., & Ratanavaraha, V. (2023). Analysis of Factors Associated with Highway Personal Car and Truck Run-Off-Road Crashes: Decision Tree and Mixed Logit Model with Heterogeneity in Means and Variances Approaches. *Informatics, 10*(3).
<https://doi.org/10.3390/informatics10030066>
- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science, 7*.
<https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.623>
- Choi, Y., Nguyen, H., Bui, X.-N., & Nguyen-Thoi, T. (2022). Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods. *Resources Policy, 75*, 102522.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102522>
- Condori, R. (2019). *Optimización de la flota de volquetes aplicando programación en la Unidad Minera Tacaza* (Tesis de ingeniero de minas). Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Puno.
- Fajar Romadhon, Arifin, Moch. Z., Susanto, S., Subiyanto, B., Risni, T. W., & Ferijiyansyah, A. R. (2022). Estimated Cost And Productivity Of Heavy Equipment

Dump Truck On The Blitar / Malang Sp 5 Purwodadi Sta 8 + 450 – 8 + 500 Bts Road

Project. *Journal of Civil Engineering Science and Technology (CI-TECH)*, 3(2).

<https://doi.org/10.33005/ci-tech.v3i2.59>

Gawelski, D., Jachnik, B., Stefaniak, P., & Skoczylas, A. (2020). Haul Truck Cycle

Identification Using Support Vector Machine and DBSCAN Models. In

Communications in Computer and Information Science (Vol. 1287).

https://doi.org/10.1007/978-3-030-63119-2_28

Ghadimi, M. (2023). Simulation of HD 325-6 Dump truck Tires Performance of Angoran

Lead and Zinc Mine. *Journal of Geomine*, 1(3), 111–116.

González Mares, M. (2019). Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018).

Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. *Revista*

Universitaria Digital de Ciencias Sociales (RUDICS), 10(18), 92–95.

<https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6>

Gutierrez, W. (2019). *El rendimiento de equipos de transporte y su influencia en las tarifas*

horarias del acarreo de mineral y desmonte en la unidad minera Raura 2018 (Tesis

de ingeniero de minas). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco.

Hassan, M. A., Salem, H., Bailek, N., & Kisi, O. (2023). Random Forest Ensemble-Based

Predictions of On-Road Vehicular Emissions and Fuel Consumption in Developing

Urban Areas. *Sustainability (Switzerland)* , 15(2). <https://doi.org/10.3390/su15021503>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. (Mc

Graw Hill Education, Ed.) (6°). México.

- Hidayat, Y. R., & Sya'aroh, S. (2023). Application of the Decision Tree Method to Decision Makin in Using Trucking Services at A Freight Forwarding Company. *Jurnal Logistik Indonesia*, 7(2). <https://doi.org/10.31334/logistik.v7i2.3243>
- Hodson, T. O., Over, T. M., & Foks, S. S. (2021). Mean Squared Error, Deconstructed. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(12). <https://doi.org/10.1029/2021MS002681>
- ICMM. (2022). ICMM. *Taking urgent action to halt and reverse nature loss is vital to achieving the Sustainable Development Goals and reaching global decarbonisation targets.*
- Kuznetsov, D., & Kosolapov, A. (2022). Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. In *Transportation Research Procedia* (Vol. 63). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.104>
- Kuznetsov, I., Panachev, I., Shirokolobov, G., & Dobrinin, R. (2021). The economic assessment of heavy dump trucks energy distribution while in operation at Kuzbass open-pit mines. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 315). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131503005>
- Lagunova, Y., Bochkov, V., & Horoshavin, S. (2020). Efficiency of using dump trucks BELAZ-75180. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 971). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052079>
- Liu, X., & Jin, H. (2023). High-precision transient fuel consumption model based on support vector regression. *Fuel*, 338. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127368>
- MINEM. (2023). *Reporte estadístico anuario minero 2023*. Lima.

- Ñaupá, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2014). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis*. (Ediciones de la U, Ed.) (4°). Bogotá.
- Niño, R. (2011). *Metodología de la investigación*. (Ediciones de la U, Ed.). Bogotá.
- Oyeyemi Olayode, I., Du, B., Kwanda Tartibu, L., & Justice Alex, F. (2024). Traffic flow modelling of long and short trucks using a hybrid artificial neural network optimized by particle swarm optimization. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2023.04.004>
- Pituy, M. (2020). *Mejoramiento del transporte de mineral con volquete en interior mina para incrementar la productividad en U.M. Andaychagua de Volcan Compañía Minera S.A.A.* (Tesis de ingeniero de minas). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Ramos, M. (2021). *Optimización del ciclo de carguío, transporte y descarga de mineral para aumentar la producción de mineral en la Unidad Minera Andaychagua* (Tesis para ingeniero de minas). Universidad Continental, Huancayo.
- Samatamba, B., Zhang, L., & Besa, B. (2020). Evaluating and optimizing the effectiveness of mining equipment; the case of Chibuluma South underground mine. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119697>
- Sánchez, D. (2018). *Estimación de rendimiento y productividad de equipo y mano de obra de un proyecto vial con declaratoria de emergencia* (Tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Sanchez, J., & Cruz, C. (2023). *Simulación de la estimación de tiempos variables de acarreo y movimiento de tierras utilizando el software TALPAC en la etapa de cierre*

de mina de la Unidad Minera Florencia TUCARI (Tesis de ingeniero de minas).

Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa.

Segama, R. (2019). *Incremento de productividad mediante optimización del sistema de transporte con camiones en el Tajo Norte – Sociedad Minera El Brocal* (Tesis para ingeniero de minas). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.

Sulaiman, M. H., & Mustafa, Z. (2024). State of charge estimation for electric vehicles using random forest. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 3(5).

<https://doi.org/10.1016/j.geits.2024.100177>

Ugurly, O. F., Fan, C., Jiang, B., & Liu, W. V. (2024). Deep Neural Network Models for Improving Truck Productivity Prediction in Open-pit Mines. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 41(2). <https://doi.org/10.1007/s42461-024-00924-4>

Vilcapoma, H. (2019). *Evaluación de rendimiento de volquetes marca IVECO versus marca VOLVO para la renovación de equipos de acarreo de mineral* (Tesis de ingeniero de minas). Universidad Continental, Universidad Continental.

Yadav, P. K., Gupta, S., & Kumar, D. (2020). Measurement and analysis of performance of mining dump trucks. *International Journal of Vehicle Performance*, 6(2).

<https://doi.org/10.1504/IJVP.2020.106984>

Yurii, K., & Liudmila, G. (2017). Application of Artificial Neural Networks in Vehicles' Design Self-Diagnostic Systems for Safety Reasons. In *Transportation Research Procedia* (Vol. 20). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.024>