



DYNA

ISSN: 0012-7353

ISSN: 2346-2183

Universidad Nacional de Colombia

Zapata-Montenegro, Estefanny; Orobio, Armando
Sensibilidad probabilística del costo de movimiento de
tierras a la variación de las condiciones de operación
DYNA, vol. 86, núm. 210, 2019, Julio-Septiembre, pp. 302-311
Universidad Nacional de Colombia

DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.77278>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49662789039>

- ▶ [Cómo citar el artículo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Más información del artículo](#)
- ▶ [Página de la revista en redalyc.org](#)



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Probabilistic sensitivity of the cost of earth moving to the variation of operating conditions

Estefanny Zapata-Montenegro & Armando Orobio

Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. estefanny.zapata@correounivalle.edu.co, armando.oro bio@correounivalle.edu.co

Received: January 16th, 2019. Received in revised form: June 4th, 2019. Accepted: June 11th, 2019.

Abstract

The construction comprises a wide spectrum of variables that need to be analyzed to carry out an adequate project planning to generate profit and to comply with the project technical specifications. The objective of this research is to study the variation of costs in earthworks according to the operating conditions of the construction equipment. The sensitivity of production and production costs to the variation of the operating conditions of the construction equipment were analyzed through a probabilistic model. The effect of variations on the parameters involved in the calculation of earthwork production were analyzed for the hauling equipment in different operating scenarios.

Keywords: earthworks construction; construction costs; equipment performance; operating conditions.

Sensibilidad probabilística del costo de movimiento de tierras a la variación de las condiciones de operación

Resumen

La construcción comprende un amplio espectro de variables que requieren ser analizadas para realizar una adecuada planeación, para generar utilidades y cumplir con las especificaciones del proyecto. Esta investigación tiene como objetivo estudiar la variación de los costos en los movimientos de tierras según las condiciones de operación de los equipos, se analiza mediante un modelo probabilístico la sensibilidad de la producción y los costos de producción a la variación de las condiciones de operación de los equipos para movimiento de tierras. Se investiga el efecto las variaciones en los parámetros involucrados en el cálculo de la producción en diferentes escenarios de operación de los equipos de acarreo del material excavado.

Palabras clave: movimiento de tierras; costos de construcción; rendimiento de equipos; condiciones de operación.

1. Introduction

La complejidad de la industria de la construcción comprende un amplio espectro de variables interrelacionadas en el desarrollo de cada proyecto, que requieren ser analizadas con objeto de realizar una adecuada planeación para generar utilidades, evitar sobrecostos, cumplir con el alcance y los requisitos del proyecto.

Los trabajos de movimiento de tierras son muy comunes en la industria de la construcción, requieren de equipos especializados de excavación y acarreo de materiales. La eficiencia en esta actividad se consigue con una tasa de producción alta con lo que se logran costos bajos. Una buena planeación permite la selección de los equipos más

adecuados a las condiciones del proyecto, optimizando el uso de los recursos disponibles. Una comprensión correcta de los costos que se derivan de la operación de los equipos proporciona a las empresas una ventaja en el mercado que conduce a mayores ganancias.

Los modelos de simulación computacional han demostrado ser una herramienta eficaz para los planificadores, permiten evaluar el costo de las operaciones de construcción con el fin de lograr la mejor relación costo beneficio en la ejecución de las actividades, cumpliendo con los requisitos de calidad de los trabajos. Aun así, estas técnicas automatizadas requieren del conocimiento previo de los puntos de partida para cada acción, de un modelo base para el análisis y de la sistematización de la información. Sin

How to cite: Zapata-Montenegro, E. and Orobio, A., Probabilistic sensitivity of the cost of earth moving to the variation of operating conditions. DYNA, 86(210), pp. 302-311, July - September, 2019.

un conocimiento adecuado de la actividad, no se puede construir un modelo para el posterior análisis de la actividad de la construcción [1], concepto del cual parte la presente investigación, presentando el análisis de interacción teórica entre las condiciones de operación de los equipos de acarreo de material y su productividad.

Esta investigación tiene como objetivo estudiar la variación de los costos de producción de movimiento de tierras considerando las condiciones del sitio, incluyendo las condiciones de operación de los equipos. Se realiza un análisis estadístico de los efectos en la producción y su costo asociado bajo diferentes condiciones del sitio de los trabajos y variaciones en los parámetros que afectan la producción de los equipos de excavación y de acarreo.

2. Marco Conceptual

Los costos de producción de los equipos de construcción, para la ejecución de una determinada actividad, son calculados sumando los costos de propiedad y los costos de operación de los mismos, la suma de estos costos se divide entre la cantidad de unidades producidas por el equipo (e.g. m^3) para determinar el costo de producción del equipo por cada unidad (e.g. $\$/m^3$). Los costos de propiedad son los costos que se generan por el solo hecho de poseer la máquina (impuestos, depreciación, financiación, seguros, mantenimientos menores y estacionamiento). Los costos de operación de un equipo son la suma de los gastos de la máquina por efecto de su operación (combustibles, grasas, aceites, operador, repuestos y mantenimientos correctivos), por lo tanto, la selección de un equipo en particular requiere conocimiento de los costos asociados a la máquina. Se debe seleccionar el equipo que pueda lograr la máxima producción con el mínimo costo.

2.1. Requerimientos técnicos de los equipos

Para analizar la producción de la máquina se requiere examinar los requerimientos funcionales de los equipos: la potencia requerida, la potencia disponible y la potencia útil, y conocer la capacidad de mecánica del equipo [2].

La potencia requerida para operar está condicionada por la fuerza de resistencia al trabajo, que se compone por la resistencia al rodamiento y la resistencia por pendiente.

La resistencia al rodamiento es la oposición de la superficie a mantener el movimiento de un elemento a través de ella, esta depende de la condición de la superficie, de las características de las ruedas y del peso del vehículo.

La resistencia por pendiente es el efecto de la fuerza de gravedad sobre el movimiento de la máquina (Fig. 1), su efecto es proporcional a la dirección del viaje. Si el equipo sube una pendiente, la resistencia por pendiente actúa oponiéndose al movimiento, mientras que si el equipo baja la resistencia por pendiente se convierte en asistencia por pendiente. Esta propiedad física no es afectada por la condición superficial del terreno ni del equipo, pero si por la relación angular de la pendiente. A mayor pendiente, mayor es el efecto de la resistencia por pendiente durante la operación del equipo.

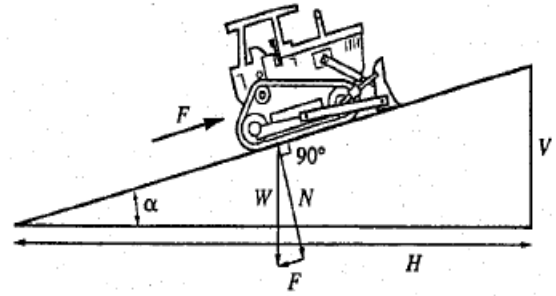


Figura 1. Relación pendiente - fuerza.
Fuente: [2]

La potencia disponible para operar una máquina es la potencia generada por el motor para poner en funcionamiento el equipo y se mide en caballos de fuerza. Cada fabricante determina la potencia disponible para las máquinas, estableciendo curvas de rendimiento, donde se describe la potencia disponible que está relacionada con la fuerza de tracción, que es la fuerza que interviene en el movimiento de la máquina derivada de fricción entre las ruedas de la máquina y la superficie sobre la que viaja, la resistencia total al rodamiento y el peso del vehículo (Fig. 2). La Fig. 2 presenta un gráfico de rendimiento para una volqueta Caterpillar de 22 toneladas [2], en este tipo de gráfica se puede determinar la velocidad de operación de la volqueta para diferentes condiciones de operación.

La potencia útil depende de las condiciones del proyecto, puesto que la potencia disponible de los equipos puede verse afectada por factores como la condición de la superficie, la altitud y la temperatura, debido a ello los fabricantes proporcionan tablas que detallan las reducciones de la potencia disponible según los factores mencionados.

Las gráficas de rendimiento son establecidas asumiendo que la máquina será operada bajo condiciones estándares, cuando la máquina opera en condiciones diferentes a las señaladas, la fuerza de tracción (Rimpull) y la velocidad deben ser ajustados para garantizar que la estimación de los valores sea adecuada para el análisis de rendimientos y producción.

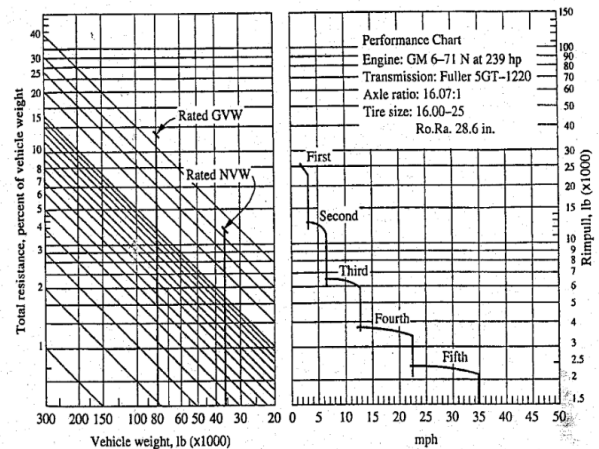


Figura 2. Relación pendiente - fuerza.
Fuente: [2]

La mayoría de modelos sobre la caracterización de los equipos de movimientos de tierras se basan en los modelos realizados por la "U.S. Army Waterways Experiment Station". En su libro, los autores Peurifoy R., Schexnayder C y Shapira A [2] consideran que los valores establecidos en su investigación pueden ser usados en las estimaciones de la producción de los equipos de acarreo de material en la construcción. El modelo de análisis elaborado para el presente estudio se basa en la información suministrada por esta referencia.

2.2. Producción teórica de los equipos de acarreo

Las volquetas son equipos de acarreo que proporcionan bajo costo de transporte, debido a que pueden operar a altas velocidades con gran capacidad de carga. Deben ser seleccionadas según sus características, de acuerdo con los requisitos del trabajo y las condiciones de operación.

Existen otros factores que influyen en la producción y eficiencia de los equipos para el movimientos de tierra como lo son: el alcance del equipo, la condiciones físicas de los equipos como altura de descargue, capacidad de la volqueta, tamaño de las volquetas e incluso aspectos externos a los equipos que implican realizar ajustes a las consideraciones de la producción, como son la experticia de los operadores, el estado de la superficie del recorrido, los tiempos muertos debido al tránsito, el estado de la máquina y de los neumáticos.

Aun así, una de las consideraciones importantes en el cálculo de la producción en movimiento de tierras es el adecuado emparejamiento con los equipos interrelacionados en la operación, para garantizar la selección de equipos con capacidades compatibles, para que las capacidades combinadas den la máxima eficiencia en toda la operación. Una forma para calcular la producción de las volquetas se basa en el análisis del balance de cargas, mediante la Eq. (1) se describe la relación entre la cantidad de movimientos del cargador que se necesitan para cargar la volqueta.

$$\text{Balance Carga} = \frac{\text{Capacidad Volqueta}}{\text{Capacidad Cargador}} \quad (1)$$

El balance de cargas permite conocer el tiempo de carga y el volumen de carga, el número de cubetas para llenar una volqueta debe ser un número entero, por lo cual se tienen dos opciones. Aproximar al número entero menor, con lo cual se reduce el tiempo de carga, pero se reduce el volumen que se carga en la volqueta, en este caso la producción estará controlada por el número de volquetas. Aproximar al número entero mayor, el cual aumenta el número de cubetas, por ende, aumenta el tiempo de cargue y el volumen de carga en la volqueta (el exceso de material cae al piso), en este caso la producción estará controlada por el equipo de carga.

Debido a la dependencia de la carga de la volqueta respecto a la operación del cargador, se debe verificar que el peso de la carga no supere la capacidad gravimétrica de la volqueta. Del análisis de cargas parte también la decisión sobre la cantidad de equipos de acarreo a utilizar.

2.3. Ciclo de tiempo de los acarreo de material

El ciclo de tiempo de la producción de los equipos de acarreo de material se compone del tiempo de carga, tiempo de recorrido, tiempo de descarga y tiempo de retorno; y la producción se mide por la cantidad de ciclos completos realizados en una hora de trabajo, no obstante, el cálculo de la producción debe ser ajustado por un factor de eficiencia que considere los elementos críticos que afectan el cumplimiento del trabajo.

Tanto el tiempo de recorrido como el de retorno del equipo dependen de la velocidad de viaje, es de considerar que la velocidad más óptima es la velocidad segura más alta.

2.4. Simulación Monte Carlo

La aplicación @Risk permite realizar Simulaciones Monte Carlo (SMC) en hojas de cálculo Excel y se debe ejecutar mediante el flujo de un modelo base para generar dicha simulación. La SMC tiene como objeto duplicar características y comportamientos propios de un sistema real, permitiendo mediante modelos matemáticos computarizados una aproximación a la solución de problemas, mediante la asignación de un rango de valores (distribución de probabilidad) a las variables de entrada en el sistema se evalúan aleatoriamente cada grupo de muestras como iteraciones en el sistema y el resultado correspondiente queda registrado. Los resultados probabilísticos muestran lo que puede suceder, la probabilidad del resultado, el análisis de sensibilidad permite identificar las variables que más afectan, la influencia de las variables sobre los resultados finales y el análisis de escenario permite modelar combinaciones de valores, de diferentes variables de entrada, lo que permite ver los efectos, y la correlación de variables interdependientes en los resultados [3].

3. Metodología

3.1. Elaboración del modelo

El flujo para ejecutar la SMC inicia en el modelo base de comportamiento e interacción entre las variables de entrada, por lo cual se debe definir el caso de estudio, el cual es un movimiento de tierras tipo arcilla arenosa, peso unitario suelto 1.276 Kg/m³ (2.150 lb/cy), ángulo de reposo 2:1, distancia a recorrer: 4,828 m (5.280 yardas), con retroexcavadora de balde de 2,29 m³ (3 cy) y volquetas de descarga trasera de 22 ton (tipo dumper). Después de definir las variables dependientes e independientes para construcción del modelo, se debe seleccionar o asignar las correlaciones a los factores de riesgo y ajustar los generadores de números aleatorios, número de iteraciones, valores semillas, entre otros criterios para la SMC, al finalizar la definición y crear el modelo estadístico se puede ejecutar las simulaciones [4]. Se definieron las variables de la siguiente manera:

Variables de entrada (exógenas controlables):

- Pendiente de la vía longitudinal
- Ciclo de excavadora
- Factor de llenado por balde

Variables de entrada (exógenas No controlables):

- Distancia a recorrer.
- Capacidad del equipo
- Tiempo muerto

Variables de estado:

- Tipo de superficie
- Característica de los equipos
- Tipo de material

Variables de salida (endógenas): son las dependientes o salidas del sistema y son generadas por la interacción de las variables exógenas. [5]

- Balance de cargas entre baldes.
- Ciclo de tiempo del equipo de acarreo.
- Volumen de carga de camión.
- Número de viajes requeridos.
- Producción volumétrica horaria.

3.2. Modelo de producción

Partiendo de la información teórica se realiza el modelo para cálculo automático de la producción en una hoja electrónica, con ecuaciones relacionadas entre sí, sobre la base de las limitaciones físicas o teóricas del sistema dado. El modelo determinista consiste en tres etapas:

- 1- Definición del caso y variables a evaluar: Inicia solicitando las variables de estado y parámetros de entrada requeridos para el cálculo de la producción.
- 2- Al ingresar adecuadamente la información el modelo se calcula el rendimiento del equipo de acarreo, describiendo los pasos que conforman el ciclo de la producción, la producción y el número de volquetas requeridas. En tres escenarios posibles: Carga enrasada, Carga máxima y Carga apilada.
- 3- La estimación de Costos se realizó a partir de los estudios de la Cámara Colombiana de Infraestructura presentados en su informe “Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción” [6], con esta información se realizó la estimación de los costos de propiedad y operación del equipo de acarreo determinado en el caso de estudio.

3.3. Simulaciones probabilísticas

El análisis estocástico mediante @Risk permitió evaluar la variación de la productividad en la operación de movimiento de tierras con relación a los cambios en las condiciones de operación, lo cual se logró mediante la iteración de diferentes valores asignados a los parámetros exógenos considerando los siguientes escenarios:

Tipos de superficie:

- Concreto en buen estado
- Asfalto en buen estado
- Afirmado
- Tierra pobre en mantenimiento
- Tierra con baches y sin mantenimiento
- Arena y grava sueltas
- Tierra muy fangosa y llena de baches

Pendiente longitudinal de la vía:

- Vía plana; pendientes entre 0 y 3% (Pendientes bajas)

- Vía ondulada; pendientes entre 3% y 6% (Pendientes medias)
- Vía escarpada; pendientes entre 6% y 10% (Pendientes altas)

Dirección de la pendiente

- Positivo (Resistencia por pendiente)
- Negativo (Asistencia por pendiente)

Para los parámetros cuantitativos se asignó una distribución de probabilidad tipo Beta General, para contar con suficientes puntos de evaluación en los rangos asignados según la referencia [2].

Ciclo de la retroexcavadora: Tiempo que toma la retroexcavadora en realizar toda su actividad, rango considerado oscila entre 17 s y 24 s, la actividad es planteada para una retroexcavadora con un solo operador.

Factor de llenado del balde de la retroexcavadora:

Factor para ajustar la capacidad máxima de llenado del balde de la retroexcavadora dependiendo del tipo de material. El rango considerado oscila entre 80% y 120%.

Tiempo muerto: son considerados como demoras u holguras en la actividad, causada por los operadores, movimientos no previstos, demoras en la toma de decisiones, demora en las salidas o entradas del equipo a las áreas de trabajo, congestión vehicular, entre otros. Para el análisis del proyecto se considera un tiempo muerto de 2 a 3 minutos para cada ciclo de producción y se le asignó una función de probabilidad uniforme.

Tras asociar la distribución de probabilidad a los parámetros exógenos controlables (parámetros de entrada considerados para la evaluación de la producción), se realiza la simulación en el programa @Risk, el cual permite definir la cantidad de iteraciones por simulación, en el caso de evaluación para cada escenario se definen 100 iteraciones en cada simulación para ser objetivos en los resultados.

4. Análisis de resultados

Para cada escenario del estado de la superficie se evaluó la producción, para cada rango de pendientes según la dirección de la operación, es decir, para los ocho escenarios posibles se evaluaron tres pendientes (elevadas, medias o leves) y para cada pendiente dos direcciones de operación lo que implica consideraciones de asistencia por pendiente o resistencia por pendiente, según el caso.

La Tabla 1 muestra la configuración de los parámetros de entrada que están sujetos a funciones estadísticas para la evaluación de la producción referente a la variación y combinaciones posibles de estos parámetros.

En la Fig. 3 se muestra el comportamiento de la producción de una flota cuya cantidad de volquetas no supera la capacidad de operación del cargador, en función de la probabilidad de ocurrencia en el cual se muestra una probabilidad del 5% de lograr una producción horaria de al menos 491 m³ (642 lcy), una probabilidad del 5% de que la producción sea menor o igual a 354 m³ (463 lcy) y una producción más probable del 405 m³ (530 lcy). Para los análisis de resultados en esta investigación se trabajó con el valor promedio interpretado como las estimaciones de valor más probables en ocurrencia o más frecuentes.

Tabla 1.

Variables del modelo de producción		
Nombre de la variable	Función de probabilidad	Valor Promedio @Risk
Factor de llenado por balde	RiskBetaGeneral (2;2;0,8;1,2; RiskStatic(1,1)	100%
Tiempo de descarga	RiskUniform (2;3; RiskStatic(2)	2.5
Pendiente de la vía	RiskBetaGeneral (2;2;0,8;1,2; RiskStatic(1,1)	-8%
Ciclo de la retroexcavadora	RiskBetaGeneral (2;2;0,8;1,2; RiskStatic(1,1)	19.5

Fuente: Los Autores.

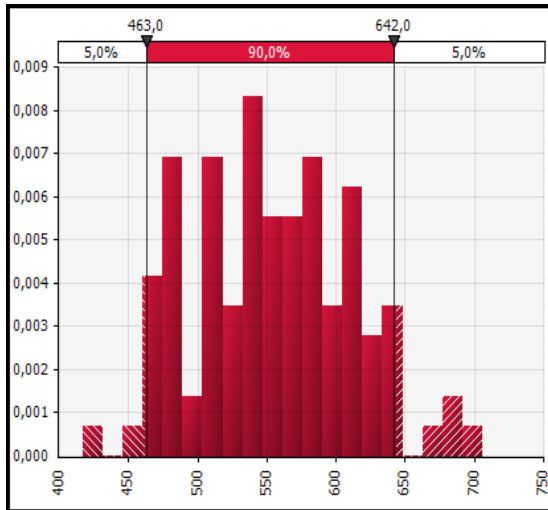


Figura 3. Frecuencia de la producción estimada para un escenario pobre en mantenimiento en pendiente leve asistida.

Fuente: Los Autores.

4.1. Resultados de la simulación de la producción

4.1.1. Producción horaria de una flota de equipos

Para realizar un movimiento de tierras efectivo se debe tener en cuenta que la actividad requiere de varios equipos cuyo emparejamiento debe garantizar la funcionalidad y rendimiento de la actividad. En esta investigación se calculó la producción máxima posible con una sola retroexcavadora, obteniendo que los escenarios positivos para obtener la mayor producción se dan en terrenos de superficie con mantenimiento, mostrando que las superficies de poco mantenimiento reducen entre el 1% y 2% la producción máxima horaria debido a la resistencia de rodadura, de igual forma se evidencia como escenario positivo cuando las pendientes de la vía son bajas y es más efectivo tener asistencia por pendiente (Figs. 4 y 5).

En las Figs. 6 y 7 se muestran los recursos necesarios, es decir, el número de volquetas requeridas para minimizar los tiempos muertos en la operación de movimiento de tierras con una retroexcavadora. Dependiendo del ciclo de las volquetas se determina la producción efectiva, la cual es considerablemente mayor cuando se presentan los escenarios

favorables como las superficies de la vía de acarreo con buen mantenimiento, las pendientes de vía leves y con bajos tiempos muertos.

Si el ciclo de la volqueta es grande, para obtener la producción estimada se deben tener al servicio un mayor número de volquetas que complementen el ciclo de la retroexcavadora, con objeto de minimizar el tiempo muerto de la retroexcavadora. Por ejemplo, cuando la operación se realiza sobre una superficie fangosa de pendiente alta, con resistencia por pendiente (acarreo en subida), se requieren más de 20 volquetas para obtener una producción de 356 m³ (466 lcy) en una hora, mientras que en un escenario más favorable como una superficie de asfalto bueno y pendiente leve con un juego de 10 volquetas pueden acarrear 362 m³ (474 lcy) en una hora, lo cual sería menos costoso en la

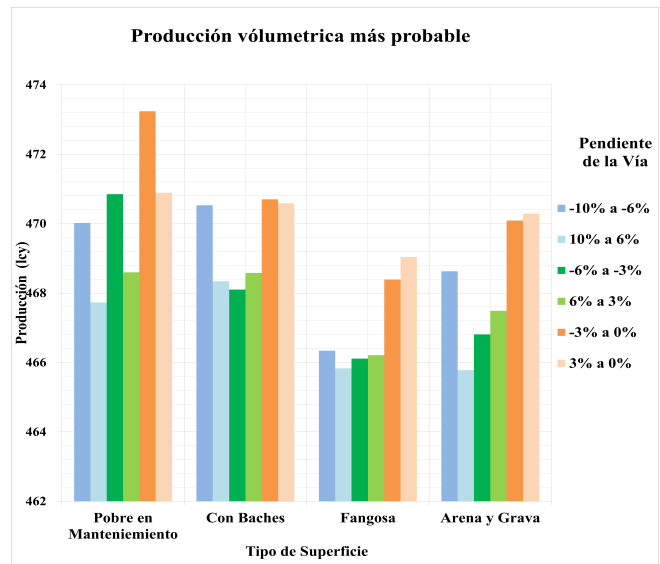


Figura 4. Producción volumétrica para terrenos de poco mantenimiento.

Fuente: Los Autores.

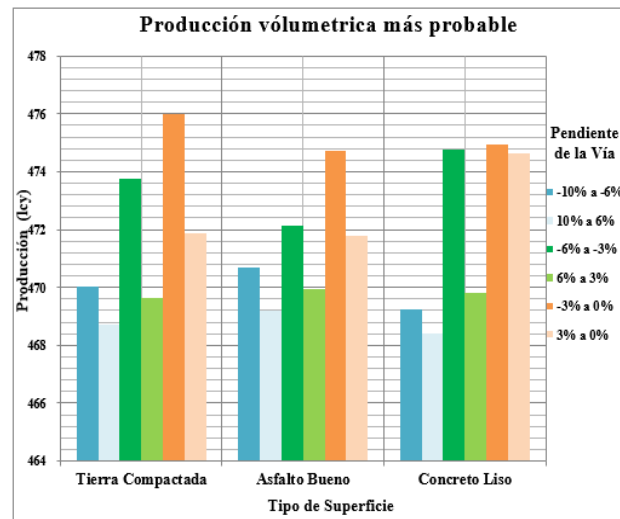


Figura 5. Producción estimada para terrenos con mantenimiento.

Fuente: Los Autores.

producción; este caso se debe a que en una superficie de buen mantenimiento el ciclo de producción de una volqueta es

mucho menor, ya que se reducen los efectos de resistencia de rodadura, fuerza de tracción, fricción neumáticos-superficie y resistencia por pendiente, los cuales son los factores de influyentes en la demora de la actividad.

Cada sistema de equipos está limitado al uso de una sola retroexcavadora, por lo general, la cantidad de volquetas requeridas para lograr la producción máxima se basa en que el ciclo de producción lo controla la retroexcavadora, si se excede en el número de volquetas disponibles, estas deberán esperar turno para ser cargadas, apareciendo tiempos muertos dentro de su ciclo de producción. Por otro lado, si se conoce el ciclo de una volqueta y se opta por reducir el número necesario de volquetas para obtener la mayor producción estimada, las pérdidas por tiempo de espera aparecen en el servicio de la retroexcavadora, porqué en este caso, este equipo deberá esperar la llegada de una volqueta para iniciar su ciclo de producción. Los tiempos muertos disminuyen la producción e incrementan los costos de la operación.

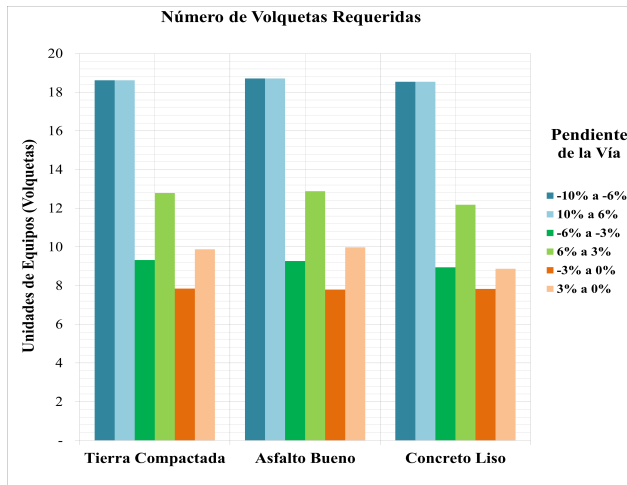


Figura 6. Número de volquetas requeridas en terrenos de poco mantenimiento. Fuente: Los Autores.

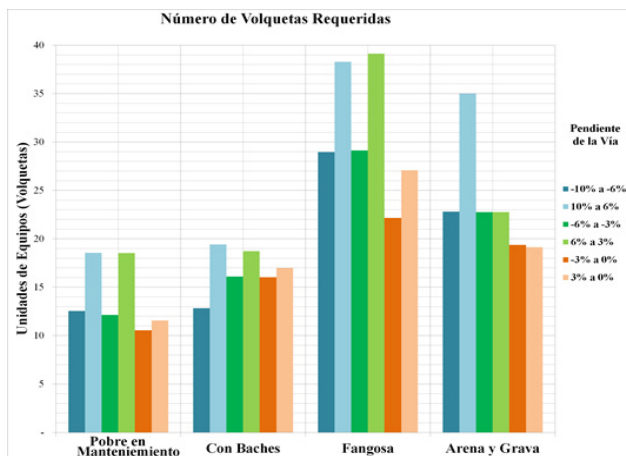


Figura 7. Número de volquetas requeridas en terrenos con mantenimiento. Fuente: Los Autores.

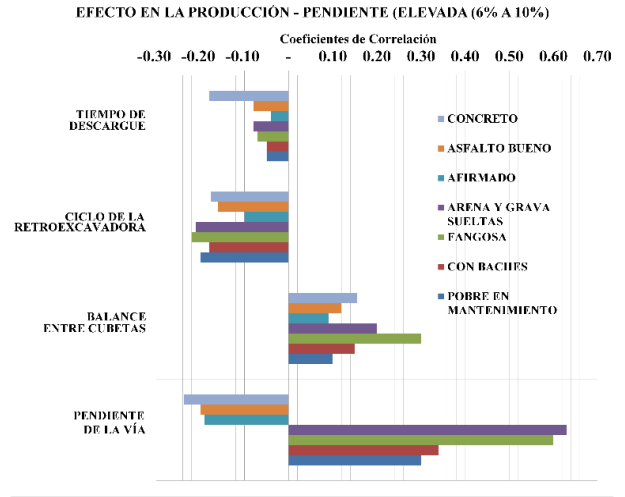


Figura 8. Coeficientes de correlación entre variables de entrada y producción (Para cada superficie – Pendiente elevada resistida). Fuente: Los Autores.

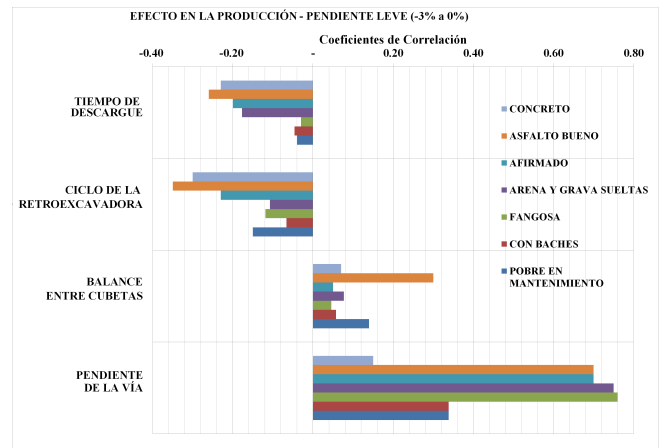


Figura 9. Coeficientes de correlación entre variables de entrada y producción (Para cada superficie – Pendiente leve asistida). Fuente: Los Autores.

4.1.2. Coeficientes de correlación

La relación entre las variables de entrada y su efecto sobre las variables de salida se pueden analizar en un diagrama de tornado con base en los coeficientes de correlación, los cuales indican el efecto de determinada variable de entrada en el resultado de la variable de salida, su valor esta entre -1 y 1, donde un valor positivo indica una relación directa entre las variables y negativo indica una relación inversa.

El análisis de los diagramas de tornado de las Figs. 8 y 9 muestra la influencia de las variables para cada escenario; la pendiente de la vía es la variable con mayor influencia, mientras que las variables de entrada como el ciclo de la retroexcavadora y el balance entre baldes tiene una menor incidencia. En general todos los parámetros de entrada tienen relación inversa con respecto al ciclo de producción, es decir, cualquier efecto desfavorable en la variable de entrada

aumenta la duración del ciclo y por ende reduce la producción.

Respecto a los ciclos de producción de una volqueta movilizándose en una superficie de buen acabado, se puede inferir que el tiempo de descargue tiene una relación directa, sin importar la pendiente, si el tiempo de descarga aumenta el ciclo de la volqueta aumenta, reduciendo la producción.

Sobre el ciclo de la retroexcavadora se evidencia que para las pendientes leves existe una relación directa, dado que las volquetas pueden viajar a mayor velocidad, si el ciclo de la retroexcavadora puede ajustarse al ciclo de las volquetas, la producción aumentará. Sobre el balance entre cubeta y capacidad de la volqueta existe una relación inversa, entre menor es la relación mayor será el ciclo, coincidiendo con la necesidad de aumentar el número de cubetas de la retroexcavadora para llenar la volqueta según lo requerido, lo que aumenta el ciclo disminuyendo la producción.

La resistencia por pendiente tiene una relación con la producción es inversa para los casos de pendientes mayores, debido a que el vehículo no puede descender a gran velocidad y debe hacer uso de sistemas de seguridad como retardadores para ayudar a mantener la velocidad segura en bajada. Con pendientes leves el vehículo puede operar a la máxima velocidad segura en bajada, por lo que en este caso la relación entre la pendiente y producción es directa.

4.1.3. Costos asociados al movimiento de tierras

Partiendo de la información sobre costos de propiedad y operación del equipo de acarreo [6], se complementó el modelo en MS Excel para realizar el cálculo del costo de la producción horaria.

Las Figs. 10 y 11 describen el comportamiento de los costos de producción horaria de la operación de una volqueta con carga apilada y una retroexcavadora, respecto al trabajo

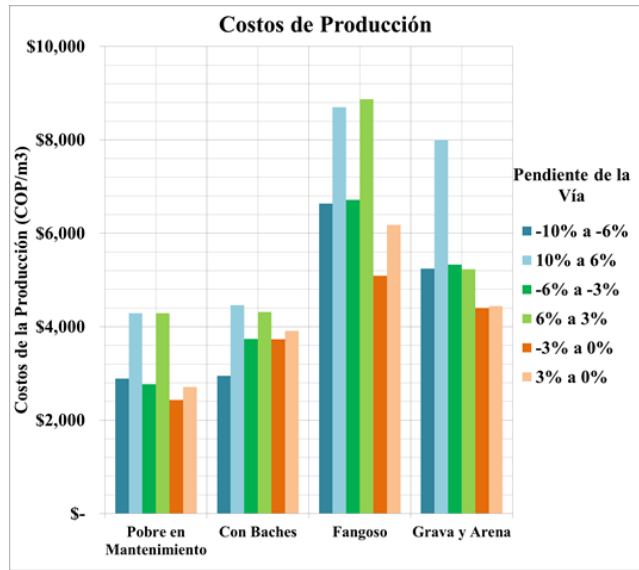


Figura 11. Costo de producción en terrenos de poco mantenimiento. Fuente: Los Autores.

Tabla 2. Afectación promedio de los costos por pendiente de servicio

Tipo de superficie	Costo Promedio de producción (COP \$/m³)	Influencia de la pendiente en el costo	Escenario Favorable
Concreto en buen estado	\$ 2.862	19%	Asistencia
Asfalto Bueno	\$ 2.947	22%	Asistencia
Afirmado	\$ 2.944	23%	Asistencia
Pobre en Mantenimiento	\$ 3.346	26%	Asistencia
Con Baches	\$ 3.991	18%	Asistencia
Fangoso	\$ 7.380	22%	Asistencia
Arena y Grava Seltas	\$ 5.665	12%	Asistencia

Fuente: Los Autores.

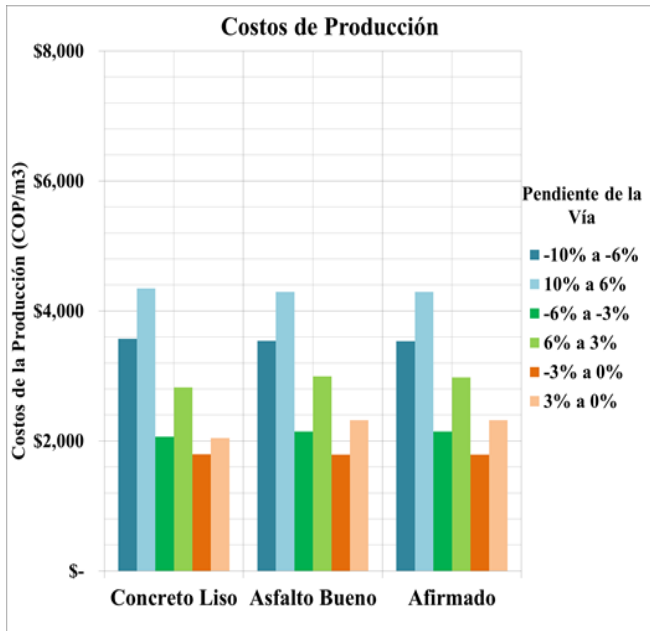


Figura 10. Costo de producción en terrenos de buen mantenimiento. Fuente: Los Autores.

realizado en diferentes tipos de superficie. Para una superficie fangosa se presenta los mayores costos de producción para todas las pendientes de la vía estudiadas, incrementándose en pendientes positivas donde el requerimiento de potencia y trabajo para realizar el viaje es mayor, le siguen superficies de difícil tránsito con costos considerablemente altos. Por el contrario, las superficies con buen mantenimiento presentan una reducción del ciclo de producción entre 46% y 71% respecto a los mayores costos de producción obtenidos.

Según los resultados obtenidos los costos de producción también se ven afectados según la dirección del efecto de la pendiente, para todos los escenarios se encontró que la resistencia por pendiente aumenta los costos, en la Tabla 2 se muestran los costos promedios y su afectación por la pendiente.

En general se observa que las volquetas con carga apilada, operando en condición de asistencia por pendiente, presentan mayor eficiencia en la producción y en consecuencia menores costos de producción. Los costos más altos se

presentan en las superficies de menor mantenimiento, esto se debe a que la producción se afecta con el incremento del tiempo del ciclo por factores como la resistencia al rodamiento y la resistencia por pendiente, destacando también que los máximos costos corresponden a terrenos con pendientes altas, debido a la mayor fuerza de tracción que requiere el equipo en estos terrenos.

Al comparar los costos asociados al volumen de carga, entre carga enrasada y carga apilada los costos varían entre un 5% y 8% de reducción cuando se trabaja a mayor volumen cargado, es decir carga apilada.

Para las superficies con buen mantenimiento la influencia de la pendiente tiene la misma tendencia, mientras en los casos de terrenos con poco mantenimiento se observa que para pendientes elevadas la diferencia entre realizar el trabajo con asistencia por pendiente o resistencia por pendiente representa un alto porcentaje en la variación de los costos.

Los diagramas de tornado de las Figs. 12 y 13, permiten analizar las principales variables que afectan la producción horaria de una volqueta, alimentada por una retroexcavadora con balde de 2,29 m³ (3 cy), que producen mayor impacto en los costos de producción, se puede interpretar: que en cada escenario (según el tipo de superficie) la pendiente de la vía es la variable con mayor influencia, mientras que las variables de tiempo de descargue, el ciclo de la retroexcavadora y el balance entre baldes tienen menor incidencia.

Si la pendiente es elevada, en las superficies con mayor dificultad de tránsito, la incidencia en la variación en los costos de producción es directa, es decir, cuando la pendiente es elevada y los terrenos son de difícil tránsito, si la pendiente aumenta los costos de producción aumentan, y si esta disminuye los costos se reducen, lo contrario ocurre si la pendiente es leve en superficies de buen mantenimiento debido a que se presenta menor resistencia al movimiento, la relación entre este parámetro y los costos de producción son inversos. Cuando las pendientes son leves se evidencia un cambio en el comportamiento de la relación entre la pendiente y los costos de producción, dado a que en pendientes bajas el equipo no requiere utilizar gran parte de su potencia para superar la resistencia por pendiente (que ahora es mucho menor), la mayoría de la potencia disponible se utiliza para superar resistencia al rodamiento que depende principalmente de la condición de la superficie, de aquí que los costos de producción se incrementan con la falta de mantenimientos de la superficie de la vía.

Cuando el tiempo de descargue y el ciclo de la retroexcavadora aumentan los costos de producción horaria aumentan debido a que el ciclo de la operación aumenta y la posibilidad de hacer un mayor número de viajes se reduce. En pendientes bajas, el tiempo de carga tiene mayor influencia ya que el ciclo de producción no está muy limitado por la resistencia por pendiente y los demás factores entran a ser determinantes en el rendimiento de los equipos.

Las Figs. 12 y 13 permiten inferir que la relación entre el balance de baldes y los costos de producción es inversa, si el balance entre el tamaño del balde y la capacidad de la

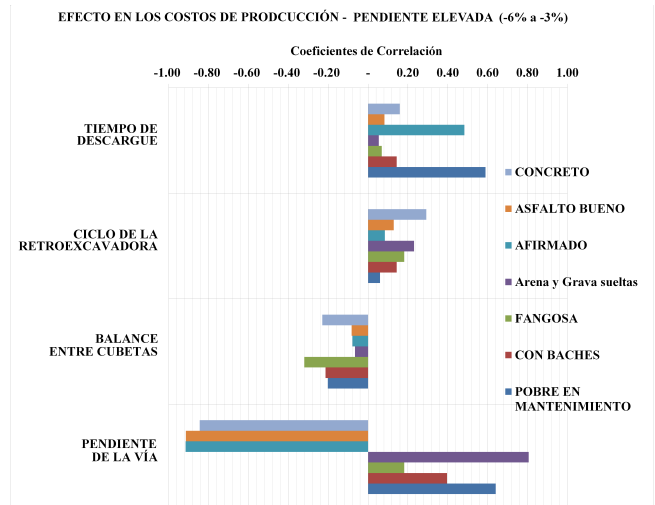


Figura 12. Coeficientes de correlación entre variables de entrada y costos (Para cada superficie – Pendiente elevada asistida).

Fuente: Los Autores.

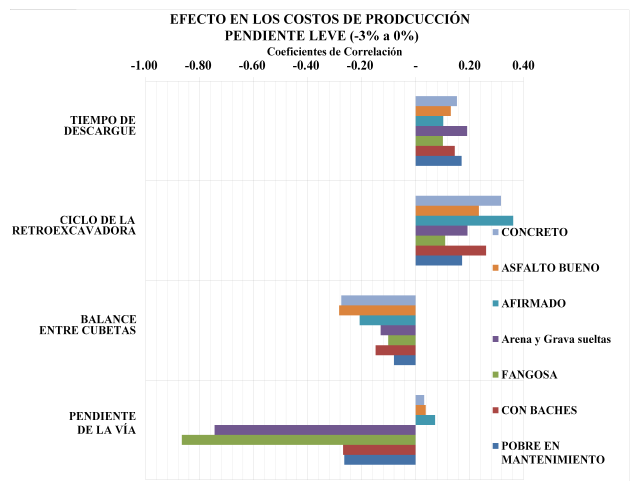


Figura 13. Coeficientes de correlación entre variables de entrada y costos (Para cada superficie – Pendiente leve asistida).

Fuente: Los Autores.

volqueta es pequeño, la producción se reduce y los costos aumentan, debido a que será necesario aumentar el número de cubetas de la retroexcavadora para llenar la volqueta, lo que incrementa el ciclo de la operación.

Si la operación se da con asistencia por pendiente, en una superficie de buen mantenimiento, la variación de la pendiente presenta relación inversa con los costos de producción, si el equipo realiza el acarreo en la dirección negativa de la pendiente (bajada) los costos disminuyen debido a que se reduce la resistencia por pendiente y la fuerza de tracción requerida para el trabajo, por otro lado, si la operación se realiza en condición de resistencia por pendiente (subiendo) se reduce la eficiencia en la producción indicando que la relación en este caso es directa, es decir, si la dirección del acarreo es en el sentido positivo de la pendiente, si la pendiente aumenta los costos de producción aumentan.

Cuando el tiempo de descargue y el ciclo de la retroexcavadora aumentan, los costos aumentan. Existe una relación directa entre estas variables, esto se debe a que el ciclo de la volqueta consume más tiempo en la zona de descarga y esto hace que disminuya la producción horaria.

La simulación de costos de producción permitió observar que los costos, según el escenario de trabajo respecto a las superficies de rodadura, presentan un aumento promedio del 55% cuando se trabaja sobre superficies en muy mal estado. Si se comparan vías de acarreo con pendientes altas, cuando la vía presenta pobre mantenimiento, los costos de producción se incrementan en un 23 % con relación a los costos cuando se realiza buen mantenimiento a la vía de acarreo. En vías de acarreo con pendientes bajas, los costos se reducen en un 25% cuando se realiza buen mantenimiento a la vía.

Cuando el equipo de acarreo desciende cargado por una vía con pendientes altas y con buen mantenimiento, los costos de producción se reducen en 18%, en pendientes medias y bajas se reducen un 23%, en comparación cuando la operación se realiza con el vehículo subiendo cargado. En superficies de poco mantenimiento, la reducción de costos es aún mayor cuando el equipo cargado se desplaza hacia abajo en pendientes medias o elevadas, en este caso los costos de producción se reducen en promedio 31%, cuando las pendientes son leves la reducción en costos de producción alcanza un 12%. Esto indica que durante la planificación de la operación de movimientos de tierra beneficiar el desplazamiento en bajada del vehículo cargado lo que permite ahorros significativos en los costos de producción.

Al comparar los costos según las pendientes del terreno, se evidencia que en los terrenos con pendientes altas se presentan los mayores costos de producción en movimiento de tierras, mientras que los rendimientos más altos se obtienen en pendientes bajas lo que implica costos de producción más bajos. Si se trabaja en una superficie de acarreo con buen mantenimiento, en pendientes medias los costos de producción se reducen en un promedio del 36%, y en 49 % en terrenos con pendientes bajas, ambas comparaciones con relación al trabajo en terrenos con pendientes altas. Los anteriores porcentajes resultan de la comparación de los escenarios contemplados en el análisis, si las condiciones cambian los porcentajes pueden cambiar, pero puede esperarse que las tendencias sean similares.

Dos casos particulares son el trabajo en un terreno fangoso, donde los mayores costos de producción se dan en terrenos de pendientes medias por las condiciones mismas de la superficie, enlazadas con la fuerza de tracción requerida para avanzar, de ser necesario trabajar en un terreno fangoso se evidencia que los costos son menores en aproximadamente un 27% cuando se trabajan en pendientes leves. En el segundo caso se compara el trabajo sobre superficie granular respecto a superficie en tierra, cuando el vehículo sube cargado experimentando una resistencia por pendiente sobre una superficie granular, se genera una reducción en el costo del orden de 35% para pendientes medias y de 45% para pendientes leves, la superficie granular genera una mejor fricción en las ruedas, permitiendo que se utilice mejor la potencia del vehículo.

Para el caso de pendientes elevadas, cuando se relaciona

la producción volumétrica con los costos de operación se infiere que, en superficies de buen mantenimiento la relación es óptima, mientras que para las superficies de difícil tránsito se presentan producciones volumétricas bajas, lo que implica costos de producción más altos.

Un caso especial es el escenario de terrenos con poco mantenimiento, pero con posibilidades de para operar sobre estos sin obstáculos importantes, en este beneficiar la operación con asistencia por pendiente (el vehículo baja cargado y sube vacío) es el mejor escenario para realizar la actividad.

6. Conclusiones

Esta investigación evidencia la importancia de utilizar técnicas avanzadas de planificación para las operaciones de construcción relacionadas con el movimiento de tierras, lo cual es una herramienta eficaz para la optimización de los recursos buscando maximizar la producción para reducir costos e incrementar utilidades.

Para que una actividad sea rentable se requiere hacer una planificación de trabajo adecuada, identificando los riesgos y restricciones del proyecto por factores externos, permitiendo reconocer los métodos constructivos y las consideraciones para ejecutar los trabajos, con la programación adecuada de los equipos de construcción.

Los análisis estocásticos permiten reconocer la influencia de los parámetros controlables en operaciones de movimiento de tierras sobre la producción y los costos asociados a la misma, proporcionando información valiosa para la planificación.

Cuando se hace la selección de equipos, en el emparejamiento de la flota se debe tener en cuenta la capacidad de los equipos y su influencia en producción, por esto es apropiado que se identifique previamente el equilibrio entre equipos, minimizando los tiempos muertos en el ciclo de producción.

La mejor eficiencia en el acarreo se logra mediante una cuidadosa planificación de la ruta. El análisis demostró que el costo del mantenimiento la vía de acarreo, se ve compensado con el aumento de la producción y su consecuente disminución en los costos.

La producción depende directamente del número de viajes que puede hacer el equipo en una unidad de tiempo, si el ciclo de producción se ve afectado negativamente la producción reducirá incrementando los costos. Si se aumenta la producción posible en la unidad de tiempo, el costo de operación del equipo por esta unidad de tiempo se reduce generando mayor rentabilidad.

En general se observa una mayor producción horaria cuando las volquetas son cargadas a su máxima capacidad, aunque el tiempo de carga sea mayor, es más conveniente que las unidades de acarreo transporten su capacidad máxima a que viajen parcialmente llenas. Para el caso estudiado se encontró que con los vehículos cargados a su máxima capacidad se logró un incremento en la producción de aproximadamente el 15%, esto es espacialmente conveniente cuando las distancias de acarreo son largas.

Los resultados obtenidos muestran que los mejores escenarios para maximizar la producción y minimizar costos

en movimiento de tierras, en general implican vías de acarreo con buen mantenimiento, con pendientes leves, realizar la planificación de los trabajos para aprovechar la asistencia de la pendiente (las volquetas bajan cargadas y suben vacías) y el llenado de las volquetas a su máxima capacidad, con lo que se logran beneficios del 80% frente al peor escenario (superficie fangosa con nulo mantenimiento). Aun así, se encuentra combinaciones de escenarios que mejoran la eficiencia en la producción sin tener todos los factores en la mejor condición, es decir, que el análisis de escenarios bajo la variación de diferentes factores o parámetros controlables permite decidir cuál de estos parámetros requieren atención para lograr menores costos y generar mayores beneficios sin modificar todos los parámetros controlables.

El análisis mostró que el estado de la superficie de acarreo y la pendiente longitudinal de la vía de acarreo son los parámetros externos con mayor influencia en la producción en movimiento de tierras, sin dejar de un lado consideraciones como el tiempo de descarga que puede interferir o no (congestión o malas condiciones en el sitio de descarga) en la duración del ciclo de producción.

Cuando se quiere ser conservador en la planificación se toma un valor de probabilidad situado en la menor parte de la gráfica de probabilidad acumulada, por ejemplo si se planifica con una probabilidad de 5% de producir una menor producción a la esperada, la posibilidad de generar sobre costos es también tan sólo del 5%, aun así una planificación tan conservadora implica que se estime la actividad con altos costos de ejecución puesto que los rendimientos considerados son muy bajos dejando los costos planificados muy elevados a lo que en la realidad se puede llegar, lo que obviaría una propuesta de mayor competitividad, más económica, al realizar la actividad con mayores rendimientos con estimaciones del 80% de la gráfica de distribución acumulada de probabilidad, incluso reservarse al 50% de probabilidad de ocurrencia escogiendo la producción promedio posible.

Es recomendable para las organizaciones y entidades del sector de construcción que profundicen e implementen los procesos de recolección de información histórica como datos de rendimiento de costos, rendimiento de producción, fallas de mantenimiento y rendimiento laboral, para mantener bases de datos que permitan implementar modelos de análisis de riesgos y estimaciones de producción lo más ajustadas a la realidad. Esto permitiría mejorar la metodología de planificación probabilística, que tiene una mayor precisión que un análisis determinístico, lo cual es espacialmente valiosos en proyectos con cantidades importantes de movimientos de tierras.

Referencias

- [1] Golparvar-Fard, M., Heydarian, A. and Niebles, J., Vision-based action recognition of earthmoving equipment using. *Advanced Engineering Informatics*, 27(4), pp. 652-663, 2013. DOI: 10.1016/j.aei.2013.09.001
- [2] Peurifoy, R.L., Schexnayder, C.J. and Shapira, A., *Construction planning, equipment, and methods*. McGraw-Hill Education, India, 2006.
- [3] Ramírez-Cardona, E., Efectos de la incertidumbre, asociada a la estimación de duraciones de actividades, en la programación de proyectos de construcción de infraestructura vial., Tesis de grado,

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia, 2014.

- [4] Okmen, O. and Ozkas, A., Scenario based evaluation of a cost risk model through sensitivity analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22(4), pp. 403-423, 2015. DOI: 10.1108/ECAM-09-2014-0121
- [5] Berger, E., Gambini, I. and Velásquez, C., Simulación de sistemas. Instituto de investigación en ciencias matemáticas, Perú, 2000.
- [6] Cámara Colombiana de la Infraestructura, Tarifas de arrendamiento para equipos de construcción, Colombia, 2010, 31 P.

E. Zapata-Montenegro, es Ing. Civil de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Es residente de ingeniería en la empresa Prodecon S.A. de Cali, Colombia.

ORCID: 0000-0001-8193-7169

A. Orobio, es PhD. en Ing. Civil de West Virginia University, USA. Ing. Civil, MSc. y Esp. en Ing. de Vías Terrestres de la Universidad del Cauca, Colombia, Esp. en Gerencia de Construcciones de la Universidad Javeriana, Colombia. Profesor titular de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Colombia. Ha sido consultor, especialista y asesor en diferentes empresas nacionales.

ORCID: 0000-0001-7166-3061



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería – Estructuras

Maestría en Ingeniería – Geotecnia

Maestría en Ingeniería - Infraestructura y

Sistemas de Transporte

Especialización en Estructuras

Especialización en Ingeniería Geotecnia

Especialización en Vías y Transportes

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5172