

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas



**Modelo Matemático para Predecir el Rendimiento del Acarreo con
Camiones de Gran Tonelaje**

Tesis presentada por el Bachiller:

Pastor Garcia, Ramiro Patricio

ORCID: 0009-0009-6608-1599

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor (a):

Mg. Delgado Ponce, María Azucena

ORCID: 0000-0003-4183-2180

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA DE MINAS
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 14 de Abril del 2023

Dictamen: 004993-C-EPIM-2023

Visto el borrador del expediente 004993, presentado por:

2013601321 - PASTOR GARCIA RAMIRO PATRICIO

Titulado:

**MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO DEL ACARREO CON CAMIONES DE
GRAN TONELAJE**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**40656104 - LOPEZ CASAPERALTA PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR**



**01231603 - REATEGUI ORDOÑEZ FULTON CARLOS PASTOR
DICTAMINADOR**



**40859499 - BERNEDO TITO EDWIN JOSE
DICTAMINADOR**



MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO DEL ACARREO CON CAMIONES DE GRAN TONELAJE

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	repositorio.usm.cl Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
4	es.slideshare.net Fuente de Internet	1%
5	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1%
7	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.unam.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
12	link.springer.com Fuente de Internet	<1%
13	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	<1%

Dedicatoria

A Dios, por brindarme la sabiduría y fortaleza para poder llevar adelante mi profesión.

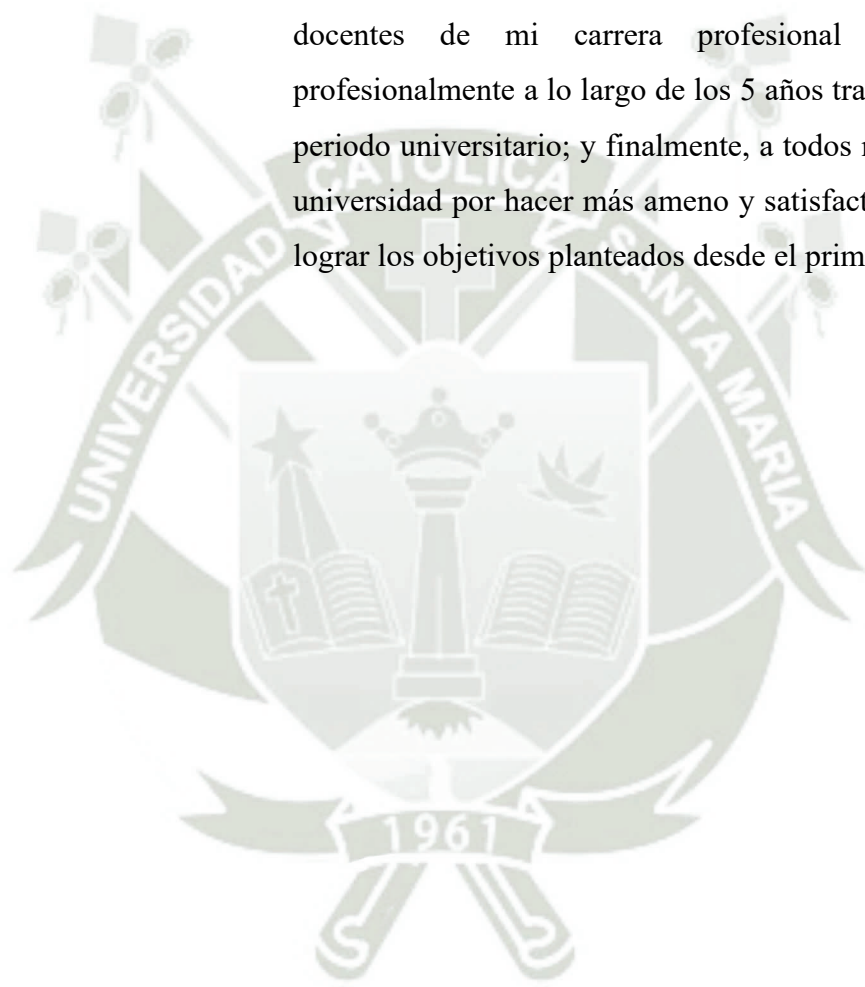
*A mis padres Lady y Álvaro, por su apoyo incondicional y por mostrarme el camino a seguir,
a lo largo de mi etapa como estudiante.*

A mi familia, por ser un ejemplo y fuente de motivación para mí.



Agradecimientos

A mi asesora, Mg. Azucena Delgado Ponce, por todos los esfuerzos realizados para encaminar el desarrollo de este trabajo de investigación; a los docentes de mi carrera profesional por formarme profesionalmente a lo largo de los 5 años transcurridos en mi periodo universitario; y finalmente, a todos mis amigos de la universidad por hacer más ameno y satisfactorio el camino a lograr los objetivos planteados desde el primer día de clases.



RESUMEN

En minería el acarreo es una actividad estratégica, esta se puede realizar con camiones gigantes, que, por el gran tonelaje de carga útil, contribuyen a disminuir los costos unitarios por efecto de las economías a escala.

Para el diseño de las rutas de acarreo se debe considerar la topografía y la fuerza de tracción del camión que está directamente relacionada a la potencia del motor. La variable más importante en el diseño de un tramo de la ruta de acarreo es la pendiente total que es la suma de la inclinación del terreno (gradiente) y la corrección por la resistencia a la rodadura que se produce debido al peso bruto del camión sobre la superficie de la vía. La velocidad en cada tramo de la ruta va a estar condicionada por la potencia del motor transmitida a los ejes impulsores. Esta potencia varía principalmente según la altura geográfica y la temperatura de operación.

En la presente investigación se relaciona la potencia disponible del camión con la potencia utilizable en operaciones con alturas promedio de 3970 msnm. y se determina un modelo de rendimiento de los camiones para alturas mayores de las especificadas por el fabricante (2750 msnm.). Se plantea un modelo matemático, correlacionando los datos tomados en operaciones con los datos calculados con fórmulas teóricas. Este modelo está constituido por los submodelos de velocidades (teóricas y reales), velocidades con camión vacío y pérdida de potencia.

El modelo se validó para determinar los presupuestos de acarreo, tales como la flota asignada a la pala y el costo unitario por kilómetro recorrido del camión ($\$/\text{km/Tm}$).

Palabras Clave:

modelo de acarreo, rendimiento de acarreo, acarreo en altura

ABSTRACT

In mining, hauling is a strategic activity, this can be done with giant trucks, which, due to the large tonnage of payload, contribute to reducing unit costs due to the effect of economies of scale.

For the design of the hauling routes, the topography and the traction force of the truck must be considered, which is directly related to the power of the engine. The most important variable in the design of a section of the haul road is the total slope, which is the sum of the inclination of the terrain (gradient) and the correction for the rolling resistance that occurs due to the gross weight of the truck on the road surface. The speed in each section of the route will be conditioned by the power of the engine transmitted to the drive shafts. This power varies mainly according to the geographical height and the operating temperature.

In the present investigation, the available power of the truck is related to the usable power in operations with average heights of 3970 meters above sea level and a truck performance model is determined for heights greater than those specified by the manufacturer (2750 MASL). A mathematical model is proposed, correlating the data taken in operations with the data calculated with theoretical formulas. This model is made up of the submodels of speeds (theoretical and real), speeds with an empty truck and power loss.

The model was validated to determine the hauling budgets, such as the fleet assigned to the shovel and the unit cost per kilometer traveled by the truck (\$·km/t).

Keywords:

haul model, haul performance, haul at height

ÍNDICE

<i>Dedicatoria</i>	iii
<i>Agradecimiento</i>	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xi
CAPÍTULO I	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Antecedentes.....	13
1.2. Enunciado del problema.....	13
1.3. Justificación.....	14
1.4. Hipótesis.....	16
1.5. Objetivos.....	16
1.5.1. Objetivo general.....	16
1.5.2. Objetivos específicos.....	16
1.6. Variables.....	16
1.6.1. Variable independiente.....	16
1.6.2. Variables dependientes.....	17
1.6.3. Unidades de medición.....	17
1.7. Alcance de la investigación.....	18
1.8. Limitaciones de la investigación.....	18
CAPÍTULO II	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. Estado del arte.....	20
2.2. Tiempo de ciclo de acarreo.....	21
2.2.1. Tiempos fijos.....	22
2.2.2. Tiempos variables.....	22
2.3. Factores influyentes en el acarreo.....	23
2.3.1. Características del camión.....	24
2.3.1.1. Tracción sobre los ejes.....	24
2.3.1.2. Retardo.....	24
2.3.1.3. Peso del camión.....	24
2.3.1.4. Resistencia a la rodadura.....	24
2.3.1.5. Velocidad de camiones.....	25
2.4. Tracción sobre las ruedas en camiones gigantes.....	26

2.4.1.	Potencia.....	26
2.4.2.	Tracción sobre las ruedas.....	26
2.5.	Factores de la ruta que afectan la velocidad del acarreo.....	28
2.5.1.	Rendimiento del camión en la ruta.....	28
2.5.2.	Aceleración.....	29
2.5.3.	Tiempo.....	30
2.5.4.	Velocidad en cada tramo.....	30
2.5.5.	Distancia recorrida en un intervalo de tiempo.....	31
2.6.	Determinación teórica de la velocidad y el tiempo esperado de viaje.....	32
2.6.1.	Determinación teórica de la velocidad en las rutas con pendientes positivas.....	32
2.6.2.	Distancia de la ruta.....	32
2.6.3.	Pendiente de diseño y pendiente real.....	33
2.6.4.	El ciclo productivo de un camión.....	34
2.6.5.	Rendimiento de acarreo.....	35
2.6.6.	Perfil de rutas de acarreo.....	35
CAPÍTULO III		37
3.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	38
3.1.	Datos generales de la operación	38
3.2.	Ruta 1	38
3.3.	Ruta 2	40
3.4.	Ruta 3	41
3.5.	Características de la flota de acarreo	47
3.6.	Diseño del modelo de acarreo.....	49
3.6.1.	Resistencia a la rodadura porcentual (%RR).....	50
3.6.2.	Aceleración (a).....	50
3.6.3.	Velocidad final (vf).....	52
3.6.4.	Determinación teórica de la velocidad en las rutas con pendientes negativas.....	52
3.6.5.	Determinación de la tracción sobre las ruedas.....	54
3.6.5.1.	Tracción utilizable.....	55
3.6.5.2.	Tracción disponible.....	55
3.7.	Determinación de la potencia	56
CAPÍTULO IV		58
4.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y VALIDACIÓN	59
4.1.	Determinación de las ecuaciones de velocidades	59
4.2.	Submodelos de velocidades en la etapa del camión cargado	59
4.3.	Submodelo de velocidad en la etapa del camión vacío	64
4.4.	Determinación de la potencia	69
4.4.1.	Potencia disponible y utilizada.....	69

4.5.	Submodelo de la pérdida de potencia	72
4.6.	Modelamiento del rendimiento en acarreo	73
4.6.1.	Modelo de rendimiento de acarreo.	73
4.7.	Validación del modelo.....	74
4.7.1.	Flota de camiones.	77
4.7.2.	Costo unitario de material transportado.....	78
CONCLUSIONES		79
RECOMENDACIONES		81
REFERENCIAS.....		82
ANEXOS		84



LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ábaco de eficiencia de camión gigante CAT modelo 793D.....	15
Figura 2: Ciclo productivo de un camión	34
Figura 3: Perfil de una ruta de acarreo de material	36
Figura 4: Perfil de ruta de transporte de Tajo Sur Fase 06 a Botadero Norte.....	39
Figura 5: Perfil de ruta de transporte de Tajo Sur Fase 06 a Botadero Oeste.....	40
Figura 6: Perfil de ruta de transporte de Tajo Sur Rampa 06 a Botadero Norte.....	41
Figura 7: Perfil de ruta de transporte de Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Norte.....	42
Figura 8: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Oeste ...	43
Figura 9: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3975 a Botadero Oeste ...	44
Figura 10: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Oeste .	45
Figura 11: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Norte .	46
Figura 12: Plano de ruta de transporte de Tajo Norte Bahía a Botadero Norte.....	47
Figura 13: Características técnicas del camión CAT modelo 793D	48
Figura 14: Pesos del camión CAT modelo 793D	48
Figura 15: Características de operación de camiones CAT modelo 793D	49
Figura 16: Tracción sobre las ruedas y velocidad teórica máxima.....	51
Figura 17: Velocidad teórica máxima para pendientes negativas.....	54
Figura 18: Distribución de pesos en los ejes del camión	55
Figura 19: Gráfico de velocidades versus pendientes totales	64
Figura 20: Velocidades en bajada versus pendientes totales en camiones vacíos	69
Figura 21: Pérdida de potencia versus la velocidad teórica.....	73
Figura 22: Perfil de la Ruta 3 - Tajo Norte Nivel 3975 a Botadero Oeste.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de variables.....	17
Tabla 2: De Tajo Sur Fase 06 a Botadero Norte.....	38
Tabla 3: De Tajo Sur Fase 06 a Botadero Oeste.....	39
Tabla 4: De Tajo Sur Rampa 06 a Botadero Norte.....	40
Tabla 5: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Norte.....	41
Tabla 6: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Oeste.....	42
Tabla 7: De Tajo Norte Fase 01 a Nivel 3975 a Botadero Oeste.....	43
Tabla 8: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Oeste.....	44
Tabla 9: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Norte.....	45
Tabla 10: De Tajo Norte Bahía a Botadero Norte.....	46
Tabla 11: Aceleración, velocidades y tracción disponible.....	56
Tabla 12: Rutas, tramos, distancias, pendiente total y velocidades.....	59
Tabla 13: Rutas, pendientes totales de bajada y velocidades promedio.....	65
Tabla 14: Potencia disponible y potencia utilizada.....	70
Tabla 15: Tramos, distancias y pendientes de diseño de la ruta 3.....	75
Tabla 16: Datos operacionales para la validación del modelo.....	76
Tabla 17: Resultado de las iteraciones.....	76



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El acarreo de materiales producto de la explotación de mina constituye una actividad de gran importancia porque representa un gran uso de recursos y no genera valor, entendiendo a la generación de valor en la cadena productiva minera, como la reducción de los tamaños de minerales que contribuyan a extraer el metal valioso contenido.

En nuestro país las alturas de operación en mina pueden estar por encima de los 2 750 m.s.n.m. que es, según los fabricantes de camiones gigantes, el límite del rendimiento óptimo de sus motores (CAT Performance Handbook 48). Esta disminución del rendimiento se debe a la menor presión atmosférica y menor masa de oxígeno en el aire (necesario para la combustión), sumado a que la temperatura es muy cambiante a lo largo del día. Todas estas condiciones afectan a la combustión de los motores diésel que impulsan los camiones. Si bien, el cálculo de esta disminución en la eficiencia de los camiones se puede evaluar teóricamente con fórmulas matemáticas, estos tienen supuestos específicos de acuerdo con el lugar donde se estudiaron y solo sirven para tener una idea inicial o general de la pérdida de eficiencia en el acarreo.

1.2. Enunciado del problema

La pérdida de potencia de los motores de los equipos de transporte de material causa que la velocidad de los camiones disminuya y que los tiempos de ciclo de acarreo sean mayores. Esta problemática se ve reflejada en la disminución de la eficiencia del acarreo de la mina, es decir, en la merma de las toneladas métricas por hora que puede producir un camión; que no puede ser estimada mediante los ábacos proporcionados por el fabricante ya que no permite corregir la velocidad debido a la pérdida de potencia del motor del equipo de acarreo.

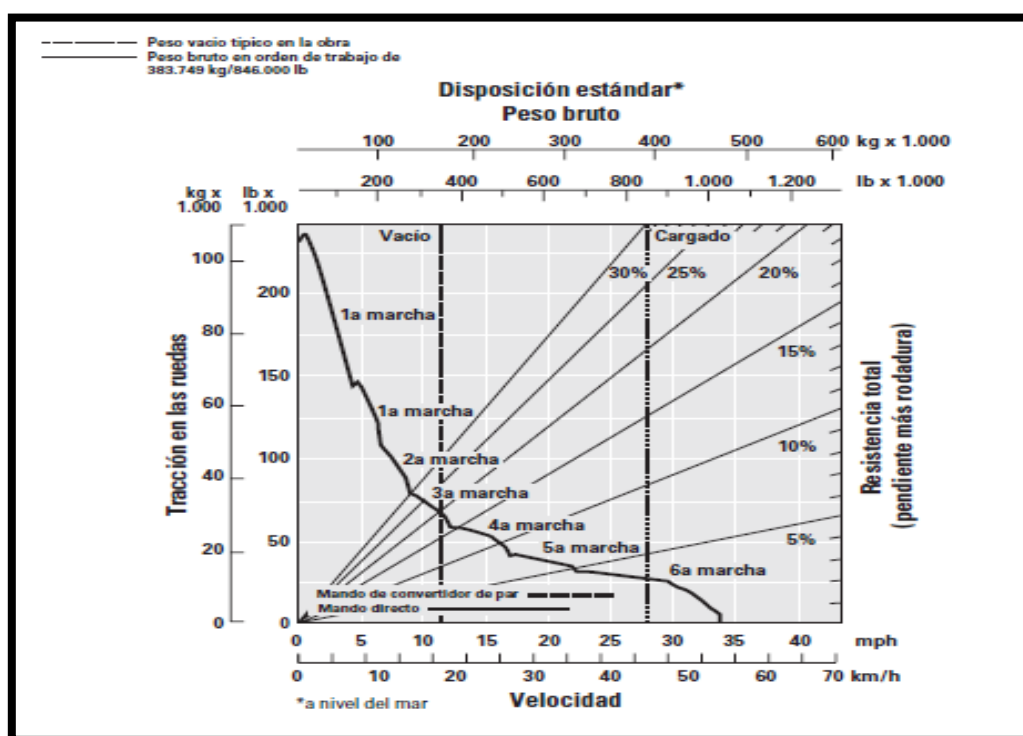
1.3. Justificación

El acarreo de material es una actividad costosa. Si el acarreo es de desmonte o estéril es más crítico porque representa un alto gasto en recursos que se verán reflejados en el costo. La forma de compensar este gasto es aplicando economías a escala, entendiéndose este concepto como, a que el tonelaje a transportar debe ser alto para disminuir el costo unitario de material transportado, expresado en \$·km/Tm (dólares sobre tonelada métrica cargada por kilómetro recorrido).

El cálculo del rendimiento en el acarreo depende del tonelaje de carga útil, de la distancia y del tiempo de ciclo. La velocidad es el parámetro variable para evaluar el tiempo de ciclo y se calcula usando ábacos que los fabricantes proporcionan, en este ábaco se relaciona el par motor (torque o tracción en las ruedas), el peso seco y bruto del camión (peso de máquina y peso de carga), la resistencia a la rodadura total (pendiente de diseño más resistencia a la rodadura expresada en porcentaje) y la velocidad que alcanza el camión (de acuerdo con la marcha o “cambio” en la caja); este cálculo es a nivel del mar tal como se muestra en la figura 1. En este ábaco se evalúa la fuerza de tracción necesaria para subir cierta pendiente con la carga total del camión, esta es la fuerza de tracción y depende de la fuerza del motor (par motor) ejercida sobre el eje.

La altura geográfica influye negativamente en la potencia del motor y por tanto en la fuerza de tracción, por lo que se debe establecer en cuánto disminuye esta potencia por efectos de la altura real de operación.

Figura 1: *Ábaco de eficiencia de camión gigante CAT modelo 793D.*



Nota: ábaco de camión CAT modelo 793D extraído de Caterpillar Performance Handbook edición 48.

Por medio de esta investigación se creará un modelo matemático que permitirá determinar la producción por hora del camión Caterpillar modelo 793D corregido por la pérdida de potencia del motor del equipo. Esta herramienta de cálculo podrá ser utilizada en nuevos proyectos mineros, que no cuenten con datos históricos, para predecir las variables críticas en el planeamiento en acarreo tales como: ciclos por hora de cada camión, consumo de combustible, consumo de llantas, velocidades aplicables para sistemas de despacho y costos unitarios, etc. Con estas variables será posible calcular los presupuestos operativos y presupuestos monetarios, que se expresan en indicadores clave de desempeño (KPIs) de fácil uso en todos los niveles de supervisión y control.

Además, desde el punto de vista académico, la presente investigación podrá ser utilizada para apreciar cómo influye la pérdida de potencia de los camiones en su velocidad y compararla con los valores teóricos calculados con la metodología propuesta por el fabricante Caterpillar.

1.4. Hipótesis

“La reducción de la potencia del motor de un camión gigante afecta la velocidad máxima alcanzada y la productividad del acarreo de material, en consecuencia, se puede determinar un modelo para predecir el rendimiento de acarreo en diferentes condiciones de operación”.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general.

Determinar la eficiencia en el acarreo y establecer un modelo matemático de predicción para camiones gigantes.

1.5.2. Objetivos específicos.

- Calcular las velocidades reales en las rutas estudiadas.
- Determinar la velocidad para cada ruta, de acuerdo con el ábaco de eficiencia, definiendo la pendiente de diseño de ruta, la resistencia a la rodadura y la fuerza de tracción (par-motor) requerida.
- Evaluar estadísticamente la diferencia entre la velocidad real y la velocidad estimada para definir el incremento de la fuerza de tracción necesaria (par-motor).
- Construir un modelo matemático de predicción del rendimiento del acarreo con camiones gigantes.

1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente.

- Velocidad real de acarreo

1.6.2. Variables dependientes.

- Resistencia a la rodadura
- Pendiente de la ruta corregida por peso más la carga del camión
- Tracción (par-motor) necesaria
- Peso del camión

1.6.3. Unidades de medición.

- Velocidad (v): km/h
- Resistencia a la rodadura (RR): kg/Tm
- Pendiente total (P): %
- Fuerza de tracción (T): kg·m x 1000
- Peso del camión: Tm

La operacionalización de las variables se realiza de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1: Operacionalización de variables.

Tipo de variable	Variable	Definición operacional	Indicador
Independiente	Velocidad camión	Se calcula en función a la distancia y pendiente de ruta	km/h
Dependiente	Pendiente real de la ruta	Peso del camión más carga de acarreo a través de la pendiente de la ruta	%
Dependiente	Fuerza de tracción	Se relaciona con la velocidad y la pendiente real de la ruta	Kg · m x 1000

Nota: elaboración propia.

La función matemática de las variables se puede expresar como:

$$Velocidad\ camión = f(pendiente) \wedge f(fuerza\ de\ tracción)$$

1.7. Alcance de la investigación

La investigación de tipo correlacional se realiza en las operaciones de acarreo de tres puntos de carga (tajo sur fase 06, tajo sur rampa 06 y tajo norte fase 01) a dos puntos de descarga (botadero norte y botadero oeste) dentro del plan de desbroce de la mina.

El modelo matemático se basa en la relación estadística de los datos tomados en campo para cada una de las variables definidas anteriormente. Estos datos han sido recogidos mediante cronómetros de precisión y evaluados en el paquete estadístico IBM – SPSS ® y el procesador de datos MS Excel ®.

1.8. Limitaciones de la investigación

La evaluación correlacional se evalúa en condiciones de operación propias como pendientes, estado de vías de las rutas de acarreo y condiciones de manejo propias del operador del camión. En un periodo dado, se puede representar la pérdida general de potencia para camiones del mismo tipo en otras labores mineras si es que se utiliza un factor de corrección.

Por motivos de confidencialidad, el nombre de la mina en donde se realizó la investigación será sustituido por “Mina Pórfido de Cobre del Sur” y los datos correspondientes al acarreo del material serán multiplicados por una constante “k” obteniendo datos diferentes pero proporcionalmente iguales a los datos reales.



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

Molina Arenas, S. I. (2021) en su trabajo “Modelo de optimización de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia)” concluye que la productividad de los camiones depende del ciclo, y a su vez este depende de las velocidades en la ruta, lo que permite tener un valor preciso del rendimiento real del camión.

Rodrigo Mena, Enrico Zio, Fredy Kristjanpoller, Adolfo Arata (2013), en su trabajo titulado “Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints” mencionan que cada ruta de transporte en la mina tiene características propias que determinan los tiempos de ciclo de los camiones, estas características principalmente son las pendientes de la ruta y las condiciones del camino. Dependiendo de las características de las rutas recorridas, los camiones tendrán diferentes rendimientos operativos. Dichos rendimientos también dependen de las condiciones mecánicas inherentes de los camiones, en nuestro caso del par-motor, entonces el rendimiento del camión está en función de la ruta y de las condiciones intrínsecas.

X. Zhang, Sufang Wang, Weicun Zhang (2019) en su trabajo denominado “Research of driving cycle construction for electric drive mining truck based on travelling analysis method”, explican que la mayor parte de la potencia del motor se utiliza en los sistemas de conducción, es decir, que pueden ser evaluados en función a su ciclo; también afirman que los principales indicadores de rendimiento son el consumo de combustible y la eficiencia en la producción, que podemos interpretar como la cantidad de toneladas de material movido en cierto tiempo, y si el tiempo está relacionado a la velocidad entonces este es un factor para evaluar el rendimiento de camiones en el acarreo.

Quiquia, M., & William, G. (2015) en su investigación denominada “Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapaccay y Pucamarca” establecen que el costo de acarreo representa el 45% del costo de minado, básicamente por pérdidas en el rendimiento real de los camiones gigantes; una variable importante relacionada con la mejora del rendimiento es la velocidad que se ve afectada por la altura geográfica de la operación.

Arredondo Pedraza, J. (2018) en su trabajo “Diseño integrado de vías para la eficiencia y vida útil de neumáticos en camiones Komatsu 930E-4SE, en la mina Las Bambas SA.”, concluye que un “diseño integrado de vías, es el proceso de construcción de una vía minera, la cual comprende cuatro componentes importantes: el diseño geométrico, el diseño estructural, el diseño funcional y el diseño de mantenimiento. Si un componente del diseño es deficiente los otros componentes no funcionarán en su máximo potencial”. Un componente importante en el diseño de vías es la pendiente, que define la potencia necesaria del camión para que este se desplace a una velocidad adecuada y no afecte la productividad del acarreo.

Dönicke, D. B. (2017) en su investigación “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación Discreta. Revista Ingeniería Industrial, 16(2), 151-168.” concluye que el comportamiento de los camiones gigantes ante las variables dinámicas, como la pendiente, la resistencia a la rodadura, la carga y la tracción en las ruedas, afectan directamente al rendimiento de los camiones y por tanto al mayor consumo de combustible que incide en el costo operacional del acarreo y la emisión de gases de tipo invernadero.

2.2. Tiempo de ciclo de acarreo

El tiempo de ciclo es un concepto importante para la productividad y los costos del acarreo con camiones. Este se define como el tiempo total necesario para efectuar el traslado del material desde el punto de carga hasta el punto de descarga. Los tiempos se distribuyen en dos: tiempos fijos y tiempos variables. (Preciado, 2012)

2.2.1. Tiempos fijos.

Están referidos a las operaciones de posicionamiento del camión (cuadrar) en el punto de carga y descarga. La carga, que es el tiempo necesario para poder llenar la tolva (caja) del camión, está efectuada por la máquina de carga que puede ser palas o cargadores frontales. El tiempo de carga se considera desde el momento que se descarga el primer contenido del “cucharon o balde” hasta el momento de cuadrado del siguiente camión en la zona de carga. El número de “cucharones” necesarios y el tiempo de esta operación se denomina “pase”, entonces el tiempo de carguío se puede definir como (Preciado, 2012)

$$T_{\text{carguío}} = \text{Número de pases} + T_{\text{cuadrar}} \quad \text{Ec.1}$$

La descarga consiste en dos acciones, primero en posicionar o “cuadrar” el camión en la zona de descarga y segundo en vaciar el contenido de la tolva; se debe considerar el tiempo desde el inicio del levantamiento de la tolva hasta su retorno a la posición normal. (Preciado, 2012)

$$T_{\text{descarga}} = T_{\text{cuadrar}} + T_{\text{descarga}} \quad \text{Ec.2}$$

En general podemos definir los tiempos fijos (TR) como la suma de las ecuaciones 1 y 2, entonces

$$TR = T_{\text{carguío}} + T_{\text{descarga}} \quad \text{Ec.3}$$

2.2.2. Tiempos variables.

Así también Preciado (2012) menciona que los tiempos variables están referidos al tiempo de viaje del camión cargado al punto de descarga y al viaje de retorno vacío al punto de carga. Esta acción se realiza en diferentes condiciones que dependen de las características de la ruta, específicamente de la distancia, la pendiente de diseño, la condición de mantenimiento de la ruta, las curvas y las velocidades límites establecidas por seguridad.

Si sabemos que la velocidad es una función de la distancia entre el tiempo, entonces podemos deducir que el ciclo dependerá de la velocidad aplicada en cada tramo de la ruta y de las características mencionadas, entonces el tiempo total de viaje será (Preciado, 2012)

$$T_{viaje} = T_{viaje\ ida} + T_{viaje\ vuelta} \quad Ec. 4$$

Si remplazamos en la Ec. 4, la relación *tiempo = distancia (D)/velocidad (v)* y, además incluimos los tiempos fijos de la Ec. 3 deducimos que (Preciado, 2012)

$$Tiempo\ de\ ciclo = TR + \frac{D\ ida}{v\ ida} + \frac{D\ vuelta}{v\ vuelta} \quad Ec.5$$

Donde:

- TR tiempos fijos en horas (h)
- D la distancia al punto de carga/descarga en kilómetros (km)
- v velocidad en kilómetros por hora (km/h)

2.3. Factores influyentes en el acarreo

El acarreo minero se puede realizar con diferentes tipos de equipos, sin embargo, en la mayoría de las operaciones a cielo abierto se utiliza camiones debido a la versatilidad de estos ante el constante cambio de la geometría del tajo y los botaderos durante la explotación. Este cambio de la geometría varia la longitud de la ruta, por lo que debemos considerar las características que se mencionan a continuación para el estudio del acarreo con camiones.

2.3.1. Características del camión.

2.3.1.1. Tracción sobre los ejes.

Es la fuerza de tracción que el motor puede entregar a las ruedas para que se desplacen sobre el terreno a una velocidad determinada. La tracción en los ejes del camión depende de la potencia del motor. La información sobre este parámetro se presenta en ábacos proporcionados por los fabricantes del camión. (Susanto, G. P. U. 2019)

2.3.1.2. Retardo.

Es un sistema de frenado en pendientes negativas (bajadas) que se basa en la capacidad del camión a desplazarse a una velocidad en función de la resistencia total del movimiento. (Soto Vilca, C. Y., & Tarazona Yábar, N. 2016)

2.3.1.3. Peso del camión.

El peso de la máquina sin carga; que incluye al chasis, motor, sistema de transmisión, llantas, aros, tolva (caja) y combustible se denomina “Peso Seco (Ps)”; mientras que, el “Peso bruto (Pb)” del camión es la suma del peso seco (Ps) más la carga útil (CU) colocada sobre la tolva. (Handbook, C.P. 2010)

El peso influye en la resistencia a la rodadura y por tanto en la velocidad del camión en la ruta.

2.3.1.4. Resistencia a la rodadura.

Es la oposición al movimiento debido al contacto entre superficies, este se debe a la fricción de las ruedas y la ruta, la deformación de las llantas o la penetración de las llantas en el terreno (se conoce como “huella”), que resulta en una fuerza de oposición al desplazamiento. (Soto Vilca, C. Y., & Tarazona Yábar, N. 2016)

La resistencia a la rodadura (RR) está influenciada por el peso del camión y las condiciones de mantenimiento de la ruta. Se puede determinar con la siguiente ecuación (Kennedy, B. A. 1990)

$$RR = \frac{Ps*(20+6(s))}{Pb} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- RR resistencia a la rodadura en kilogramo por toneladas métricas (kg/Tm)
- Ps peso seco en toneladas métricas (Tm)
- Pb peso bruto en toneladas métricas (Tm)
- s profundidad de la huella en centímetros (cm)

2.3.1.5. Velocidad de camiones.

La velocidad de los camiones es una relación entre la distancia (D) y el tiempo (t) de recorrido. Esta depende de la potencia del motor, la transmisión de la potencia a los ejes impulsores, la resistencia a la rodadura (RR), la relación peso-potencia del camión y la geometría de la ruta. Para poder identificar toda la geometría de la ruta se divide en segmentos que se denominan “tramos”. (Gómez, C. I. 2019)

Según Gómez, C. I. (2019) “Las variaciones en las velocidades pueden traducirse en variaciones en los tiempos de ciclo, por lo que se podría decir que efectivamente existe relación entre el diseño geométrico de los caminos mineros y la productividad de la flota de transporte, ya que, bajo ciertas condiciones, según la pendiente y/o la curva que enfrenta el camión, la productividad (medida según la cantidad de ciclos de carga completados) se puede ver severamente afectada”.

Cuando se trata de tramos en subida, la velocidad del camión comienza a descender; las principales variables que explican esta pérdida de velocidad son la inclinación y la longitud de la pendiente, la razón peso-potencia (RPP) del vehículo y la velocidad con que ingresa a la pendiente (Fitch, 1994).

2.4. Tracción sobre las ruedas en camiones gigantes

La tracción sobre las ruedas es necesaria para el movimiento del camión en la ruta, la potencia del motor se transmite hacia el eje de las ruedas impulsoras. Para lograr el control de la fuerza necesaria de tracción se usa un sistema de marchas o cambios de velocidad. (Oliveros Blanco, Y. 2015)

2.4.1. Potencia.

La potencia bruta (Pot_b) del motor es el producto del par motor multiplicado por las revoluciones y se expresa de la siguiente manera (Cargua Colcha, F. A. & Castelo Valdivieso, J. C. 2017)

$$Pot_b(Kw) = par\ motor\ (N.m) * rpm * \frac{2\pi.Radianes}{revolución} * 1000^{-1} \quad Ec. 7$$

La potencia varía en función a la altura geográfica, la temperatura de ambiente y la humedad relativa, por tanto, no es posible utilizar el 100% de la potencia bruta. (Cargua Colcha, F. A. & Castelo Valdivieso, J. C. 2017)

La potencia máxima utilizable (Pot_{mu}) es el producto de la potencia bruta multiplicada por un factor de eficiencia en la transmisión. (Cargua Colcha, F. A. & Castelo Valdivieso, J. C. 2017)

2.4.2. Tracción sobre las ruedas.

Existen dos tipos de tracción: la tracción utilizable y la tracción disponible (Yepes, V. 2014).

La tracción utilizable es aquella que se aplica en el eje impulsor, depende de la distribución del peso de la carga útil en los ejes y se calcula con la siguiente expresión

$$Tu = 9.81 * (Pb * W) * \left(\frac{(\%G + \%RR)}{100} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

- Tu tracción utilizable en kilogramos (kg)
- W carga útil distribuida en el eje impulsor
- %G pendiente de diseño en porcentaje (%)
- %RR pendiente de corrección por resistencia a la rodadura en porcentaje (%)

La tracción disponible depende de la potencia máxima utilizable motor (Pot_{mu}) o potencia disponible (Pd), y define la velocidad máxima (v) para cada marcha del sistema de transmisión; se expresa como (Yepes, V. 2014)

$$Td = \frac{\eta * Pot_{mu}}{v} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

- Td tracción disponible en millares de kilogramos (kg x 1000)
- Pot_{mu} potencia máxima utilizable en kilovatios (kW)
- v velocidad del camión en metros por segundo (m/s)
- η factor de eficiencia del sistema de transmisión.

La potencia disponible se calcula despejando la ecuación 9 y sustituyendo la velocidad máxima (v) por la velocidad teórica, que posteriormente será calculada con el submodelo de velocidad teórica (vt).

$$Pd = \frac{v_t * Td}{\eta} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- Pd potencia disponible (kW)
- v_t velocidad teórica (m/s)
- Td tracción disponible (kg x 1000)
- η factor de eficiencia del sistema de transmisión

La potencia utilizada se calcula despejando la ecuación 9, cambiando la velocidad máxima (v) por la velocidad real (v_r), que será hallada con el submodelo correspondiente, y sustituyendo el valor del factor de eficiencia según los datos proporcionados por el fabricante del camión.

$$Pu = \frac{v_r * Td}{1.54} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- Pu potencia utilizada (kW)
- v_r velocidad real (m/s)
- Td tracción disponible (kg x 1000)

2.5. Factores de la ruta que afectan la velocidad del acarreo

2.5.1. Rendimiento del camión en la ruta.

El rendimiento del camión se basa en la velocidad, la distancia, el tiempo y la aceleración en cada tramo de la ruta. Se puede evaluar cada una de estas variables con los datos tomados en una serie de viajes realizados por los camiones en diferentes condiciones de ruta y

operación. La evaluación de estos datos nos permite determinar la ecuación de velocidad real de cada ruta, el que se puede expresar de la siguiente manera (Santos, E. 2018)

$$Velocidad\ final = \frac{D}{\sum_{t=1}^n \frac{dt}{vt}} \quad Ec. 12$$

Donde:

- D distancia de la ruta (km)
- dt distancia de cada tramo (km)
- vt velocidad en el tramo (km/h)

Sin embargo, la velocidad está influenciada por la aceleración, el tiempo y la distancia. Teniendo en cuenta esto, definiremos estas variables para construir el submodelo. (Santos, E. 2018)

2.5.2. Aceleración.

La aceleración de un camión se puede evaluar con la segunda ley de Newton para el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Variado (MRUV), esta ley indica que $\sum F = m \cdot a$. Se sabe que la fuerza (F) de un camión está dada por la tracción en las ruedas, el peso total del camión, la pendiente o gradiente del tramo y la resistencia a la rodadura, entonces podemos expresar la ecuación de la aceleración como (Santos, E. 2018).

$$a = \left(\frac{9.81}{Pb} \right) * (Tu - Pb(G + RR)) \quad Ec. 13$$

Donde:

- a aceleración (m/s)
- Tu tracción utilizable en las ruedas (kg x 1000)
- Pb peso del camión (kg)

- G gradiente (%)
- RR resistencia a la rodadura (%)

2.5.3. Tiempo.

El tiempo se estima en función a la variación de la aceleración, distancia y velocidad; por tanto, debe ser calculado como la sumatoria de los intervalos de tiempo, evaluados en cada tramo de la ruta, multiplicado por la duración de cada intervalo según la ecuación 14. (Santos, E. 2018).

$$Tiempo = \sum iT + \Delta t \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

- iT número de intervalos evaluados
- Δt duración del intervalo (s)

2.5.4. Velocidad en cada tramo.

La velocidad en cada tramo será variable, depende de la aceleración y de los intervalos de tiempo en cada tramo. Si usamos las leyes del movimiento rectilíneo uniformemente variado (MRUV) podemos estimar la velocidad final con una aproximación aceptable para la distancia total de la ruta. (Santos, E. 2018).

La ecuación de la velocidad del tramo es

$$v_f = v_o + (a * \Delta t) \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

- v_f velocidad final (m/s)
- v_o velocidad inicial (m/s)

- a aceleración (m/s^2)
- Δt duración del intervalo de tiempo (s)

Debemos notar que la velocidad inicial (v_0) que se usa cuando el camión empieza a moverse, debe ser también considerada al cambiar de pendiente en el tramo de la ruta correspondiente o cuando existe una disminución de la velocidad por factores de tránsito o ruta (ejemplos: paradas obligatorias, curvas, angostamientos del tramo, etc.).

2.5.5. Distancia recorrida en un intervalo de tiempo.

La distancia recorrida en un intervalo de tiempo (Dr) está en función de la velocidad inicial multiplicada por la variación del tiempo y sumado a la mitad de la aceleración por la variación del tiempo al cuadrado (Santos, E. 2018), tal como se puede apreciar en la ecuación 16.

$$Dr = v_0 * \Delta t + 0.5 * a * \Delta t^2 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

- Dr distancia recorrida (m)
- v_0 velocidad inicial (m/s)
- a aceleración (m/s^2)
- Δt duración del intervalo del tiempo (s)

La ecuación 16 es muy útil para interpretar los ábacos de rendimiento/tracción/velocidad de camiones del fabricante porque estos se encuentran contruidos interrelacionando el peso del camión (cargado y vacío), la fuerza de tracción sobre el eje, la pendiente total (gradiente de diseño más el porcentaje por la resistencia a la rodadura) y la velocidad máxima alcanzada. (Handbook, C.P. 2010)

Para transmitir la fuerza adecuada sobre el eje de tracción se usa una “caja de velocidades” que es necesaria para aumentar o reducir las revoluciones del motor según el momento de fuerza (par-motor) necesario sobre el eje impulsor de las ruedas. (Castellanos, J.U. 2015)

Este momento de fuerza (par-motor) depende de la “marcha” que se aplica en función a la distancia recorrida (Castellanos, J.U. 2015). Entonces si se aplica la Ec. 12, se determina la distancia necesaria para aplicar cada “marcha” del camión y por tanto el momento par-motor correcto en cada tramo de la ruta.

2.6. Determinación teórica de la velocidad y el tiempo esperado de viaje

En el presente estudio se determina, en cada ruta y por cada tramo, las velocidades teóricas y el tiempo esperado de viaje para luego compararlas con las velocidades y tiempos de viaje en campo. Con esos resultados se procede a calcular la fuerza de tracción sobre las ruedas necesarias para la operación de camiones en las pendientes positivas y el retardo aplicado en las pendientes negativas.

2.6.1. Determinación teórica de la velocidad en las rutas con pendientes positivas.

La velocidad máxima se alcanza cuando el valor de la aceleración en cada intervalo de tiempo es positivo y se mantiene hasta final del tramo.

Una vez alcanzada la velocidad máxima se determina el tiempo esperado de viaje usando las ecuaciones de la distancia recorrida (D_r) y relacionándola luego con la distancia del tramo.

Se hará el cálculo de las variables fijas del estudio y se evaluará una variable específica, como ejemplo, de lo que se determina en todo el estudio.

2.6.2. Distancia de la ruta.

La distancia es la medida que recorre el camión entre dos puntos, esta se mide desde el punto de carga hasta el punto de descarga. La ruta se divide en tramos, los cuales pueden ser lineales o curvos; sin embargo, para los cálculos se consideran siempre lineales debido a que en el diseño de las curvas se asume que el movimiento del camión siempre recorre tramos lineales (radio de giro). En la práctica, en las curvas el camión deberá reducir su velocidad.

2.6.3. Pendiente de diseño y pendiente real.

La Gradiente o Pendiente (G) es la inclinación, expresada en porcentaje, de la ruta. Cuando se habla de pendiente de diseño se refiere a la inclinación con la que cada tramo ha sido diseñado y construido. En cambio, cuando se habla de pendiente real se incluye, para el cálculo de factores de desempeño del camión, un porcentaje de inclinación que se calcula en función a la resistencia a la rodadura (RR) ejercida por el camión que circula por la ruta. (Darling, P. 2011)

En la práctica, para el cálculo de la velocidad en los “ábacos de eficiencia de camión gigante” (fig. 1), la pendiente de diseño de la ruta, en los tramos ascendentes y en tramos planos, debe ser corregida aumentando 1% por cada 10 kg/Tm de resistencia a la rodadura (RR); y para los tramos descendentes o bajadas debe reducirse en 1% por cada 10 kg/Tm. (Darling, P. 2011)

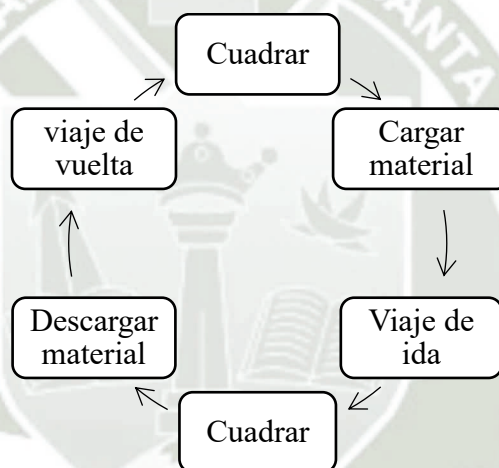
Lo anterior se explica por el hecho que en los tramos ascendentes se utiliza mayor esfuerzo de tracción sobre los ejes para lograr la velocidad requerida, mientras que en los tramos descendentes se aplica el retardo para mantener las revoluciones del motor que aseguren la velocidad de seguridad. En una ruta de operaciones existen tramos horizontales (con pendiente de diseño de cero por ciento) y tramos con pendiente positiva (subidas con pendientes de diseño de máximo de doce por ciento), el cambio de velocidad se da cuando

el camión pasa del tramo horizontal al tramo con pendiente diferente de cero por ciento y viceversa. Para el análisis de la velocidad, las curvas se consideran tramos lineales, sin embargo, la velocidad es menor por seguridad. (Darling, P. 2011)

2.6.4. El ciclo productivo de un camión.

Se define como el tiempo necesario para realizar todas las actividades unitarias para transportar el material y podemos esquematizarlo tal como se muestra en la figura 2. (Darling, P. 2011)

Figura 2: Ciclo productivo de un camión



Nota: elaboración propia.

Las operaciones de cuadrar, cargar y descargar se consideran tiempos fijos (TR) y las operaciones viaje de ida (T1) y viaje de vuelta (T3) son tiempos variables (Tv). (Preciado, 2012)

El ciclo del camión puede ser calculado con la ecuación 5. La distancia (D) es una variable de diseño, que se mide entre el punto de carga y el punto de descarga. Esta distancia se debe dividir en tramos debido a que, por la topografía del terreno y el diseño de ruta, la pendiente en cada tramo es diferente (ver figuras 4 a 12).

La velocidad es una variable multifactorial, tal como se ha analizado anteriormente. Los factores más importantes que determinan la velocidad son la aceleración, el peso bruto del camión (P_b), la tracción utilizable (T_u), la gradiente o pendiente del terreno (G), la resistencia a la rodadura (RR) y el tiempo (t). (ver ecuaciones 13 y 15)

La velocidad será determinada para cada ruta y tramos del estudio para así determinar el tiempo de ciclo por ruta.

2.6.5. Rendimiento de acarreo.

El acarreo con camiones depende de la pendiente total en todos los tramos de la ruta, la carga útil del camión y la velocidad real en cada tramo. (Darling, P. 2011)

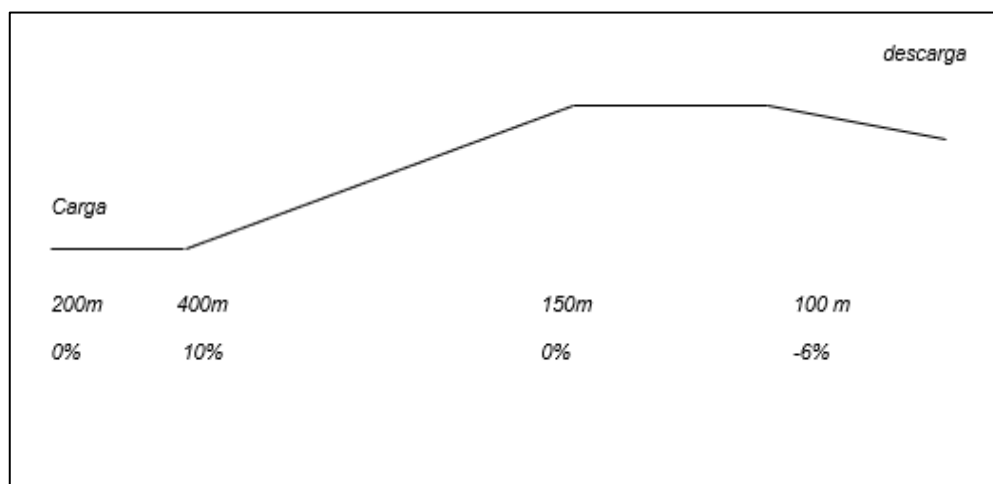
Como se ha visto, la pendiente total de la ruta define la velocidad real del camión para cada tramo, esta velocidad es lograda debido a la transferencia de potencia en el sistema de transmisión.

La potencia varía principalmente por razones de altura geográfica y temperatura, motivo por el cual hay una diferencia entre la potencia disponible (P_d) y la potencia utilizable (P_u) que afectan la velocidad del equipo de acarreo. (Cargua Colcha, F. A. & Castelo Valdivieso, J. C. 2017)

2.6.6. Perfil de rutas de acarreo.

Las rutas de acarreo son dinámicas, es decir, que van cambiando con la explotación de la mina. La ruta de acarreo se divide en tramos de acuerdo con la pendiente de diseño ($\%G$), cada tramo tiene una distancia (D) de recorrido establecida. Para determinar la eficiencia del acarreo se debe construir un perfil donde se muestre la distancia del tramo y la pendiente de diseño ($\%G$), desde el punto de carga hasta el punto de descarga. En la figura 3 se muestra un ejemplo de perfil de acarreo. (Darling, P. 2011)

Figura 3: *Perfil de una ruta de acarreo de material*



Nota: elaboración propia.





CAPÍTULO III

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Datos generales de la operación

Los datos de operación corresponden al transporte de material estéril en la Mina Pórfido de Cobre del Sur, situada en el sur del Perú a una altura promedio de operación de 3970 m.s.n.m.

El estudio se realizó para tres rutas de transporte y se evaluaron las potencias reales para camiones Caterpillar modelo 793D en las rutas definidas, cuyas longitudes y pendientes de diseño se detallan en las siguientes tablas acompañadas de los perfiles correspondientes de cada ruta.

3.2. Ruta 1

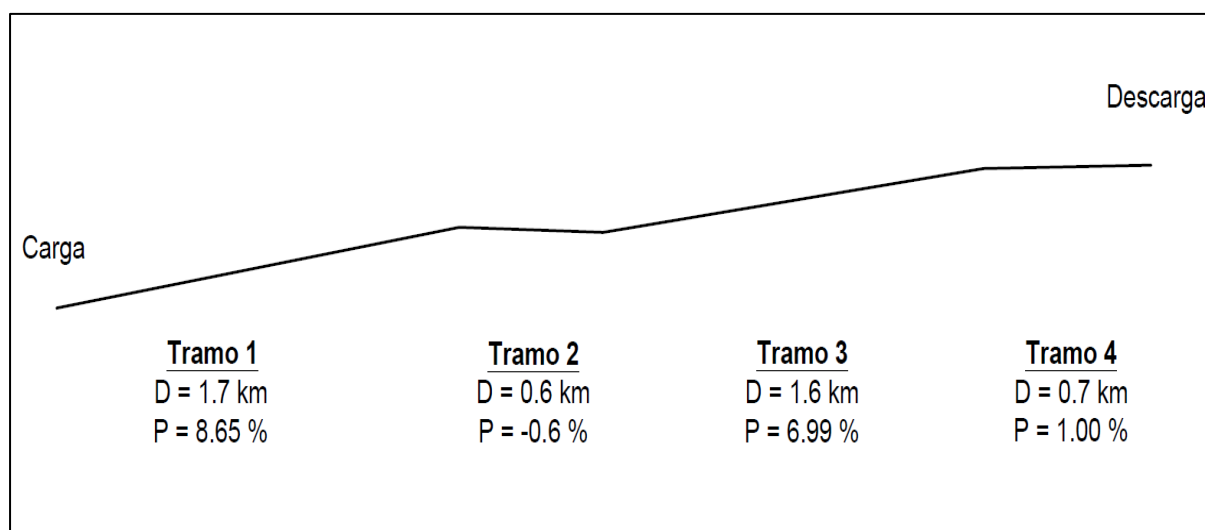
La primera ruta se considera desde el punto de carga de tajo sur fase 06 hacia el botadero norte y botadero oeste. Los tramos, distancias y pendientes correspondientes a la ruta estudiada se aprecian en las tablas y perfiles siguientes.

Tabla 2: *De Tajo Sur Fase 06 a Botadero Norte*

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	1.7	8.65
Tramo2	0.6	-0.60
Tramo3	1.6	6.99
Tramo4	0.7	1.00
Total	4.6	

Nota: elaboración propia.

Figura 4: Perfil de ruta de transporte de Tajo Sur Fase 06 a Botadero Norte



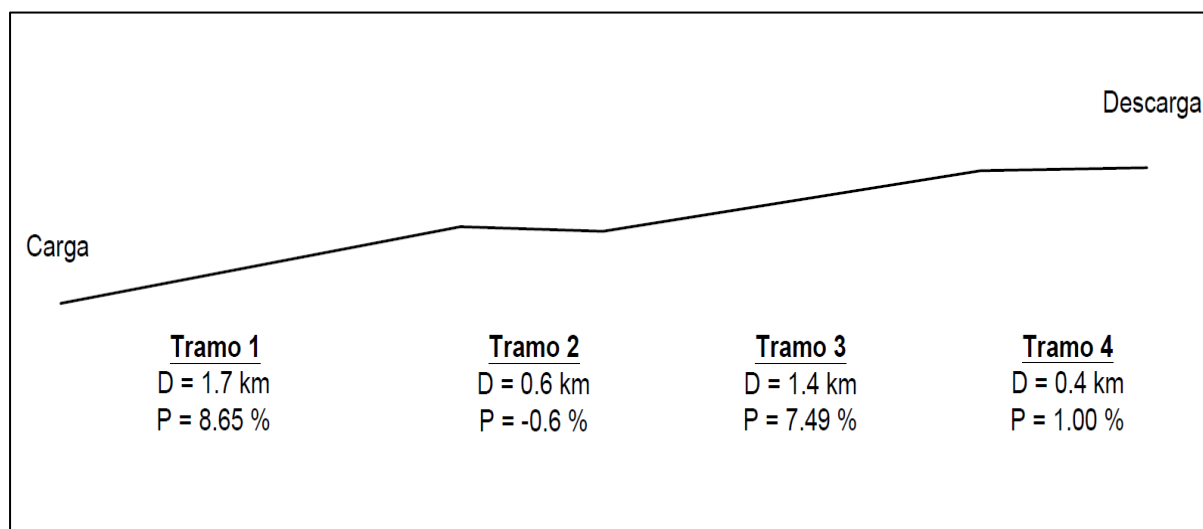
Nota: elaboración propia.

Tabla 3: De Tajo Sur Fase 06 a Botadero Oeste

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	1.7	8.65
Tramo2	0.6	-0.60
Tramo3	1.4	7.49
Tramo4	0.4	1.00
Total	4.1	

Nota: elaboración propia.

Figura 5: Perfil de ruta de transporte de Tajo Sur Fase 06 a Botadero Oeste



Nota: elaboración propia.

3.3. Ruta 2

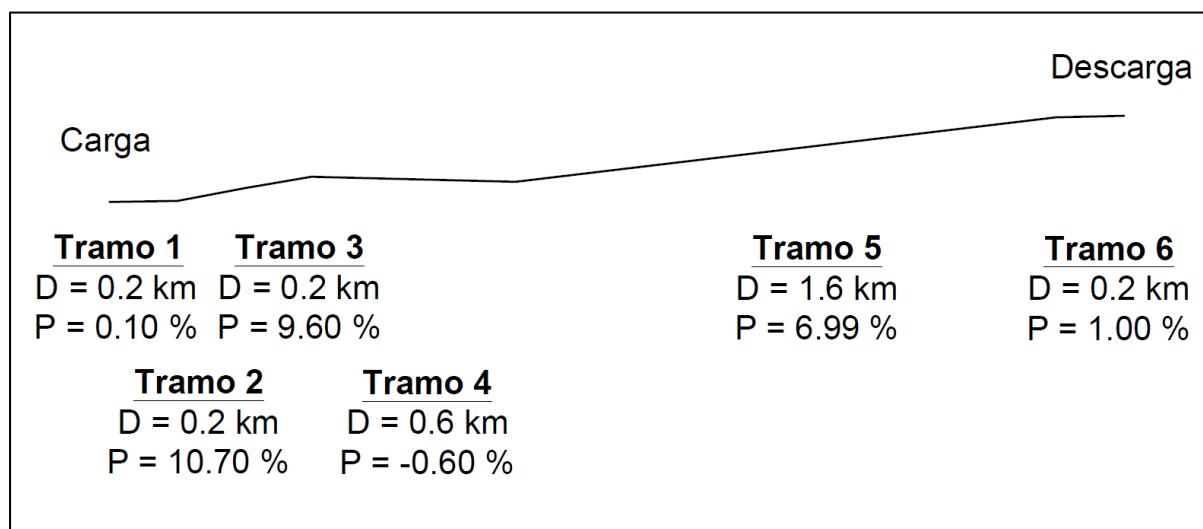
La segunda ruta se considera desde el punto de carga de tajo sur rampa 06 hacia el botadero norte. Los tramos, distancias y pendientes correspondientes a la ruta estudiada se aprecian en las tablas y perfiles siguientes.

Tabla 4: De Tajo Sur Rampa 06 a Botadero Norte

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.2	0.10
Tramo2	0.2	10.70
Tramo3	0.2	9.60
Tramo4	0.6	-0.60
Tramo5	1.6	6.99
Tramo6	0.2	1.00
Total	3.0	

Nota: elaboración propia.

Figura 6: Perfil de ruta de transporte de Tajo Sur Rampa 06 a Botadero Norte



Nota: elaboración propia.

3.4. Ruta 3

La tercera ruta se considera desde todos los puntos de carga del tajo norte hacia los botaderos norte y oeste. Los tramos, distancias y pendientes correspondientes a la ruta estudiada se aprecian en las tablas y perfiles siguientes.

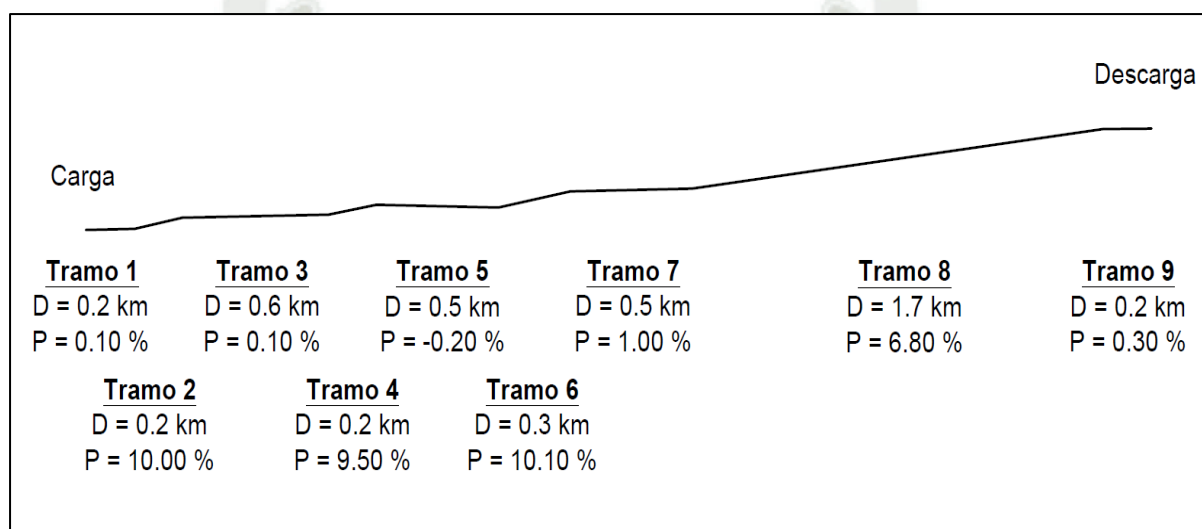
Tabla 5: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Norte

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.2	0.10
Tramo2	0.2	10.00
Tramo3	0.6	0.10
Tramo4	0.2	9.50
Tramo5	0.5	-0.20
Tramo6	0.3	10.10
Tramo7	0.5	1.00
Tramo8	1.7	6.80

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo9	0.2	0.30
Total	4.4	

Nota: elaboración propia.

Figura 7: Perfil de ruta de transporte de Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Norte



Nota: elaboración propia.

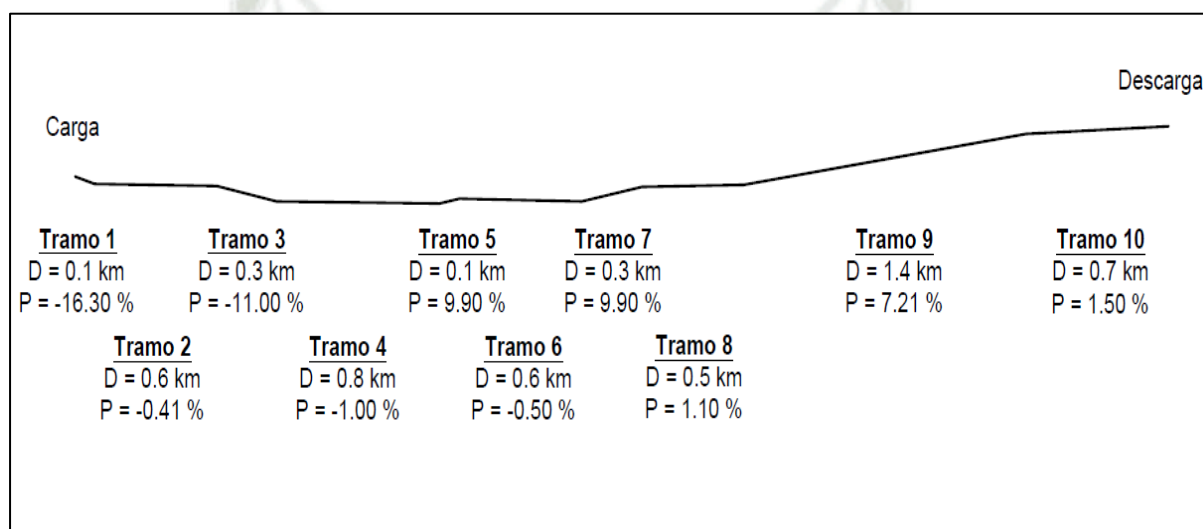
Tabla 6: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Oeste

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.1	-16.30
Tramo2	0.6	-0.41
Tramo3	0.3	-11.00
Tramo4	0.8	-1.00
Tramo5	0.1	9.90
Tramo6	0.6	-0.50
Tramo7	0.3	9.90
Tramo8	0.5	1.10

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo9	1.4	7.21
Tramo10	0.7	1.50
Total	5.4	

Nota: elaboración propia.

Figura 8: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3990 a Botadero Oeste



Nota: elaboración propia.

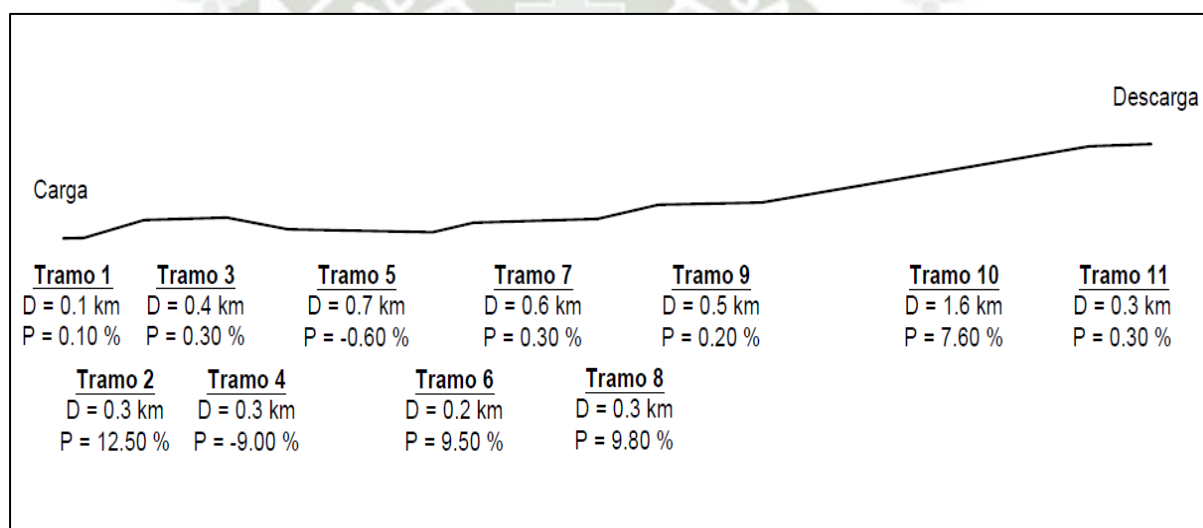
Tabla 7: De Tajo Norte Fase 01 a Nivel 3975 a Botadero Oeste

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.1	0.10
Tramo2	0.3	12.50
Tramo3	0.4	0.30
Tramo4	0.3	-9.00
Tramo5	0.7	-0.60
Tramo6	0.2	9.50
Tramo7	0.6	0.30

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo8	0.3	9.80
Tramo9	0.5	0.20
Tramo10	1.6	7.60
Tramo11	0.3	0.30
Total	5.3	

Nota: elaboración propia.

Figura 9: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3975 a Botadero Oeste



Nota: elaboración propia.

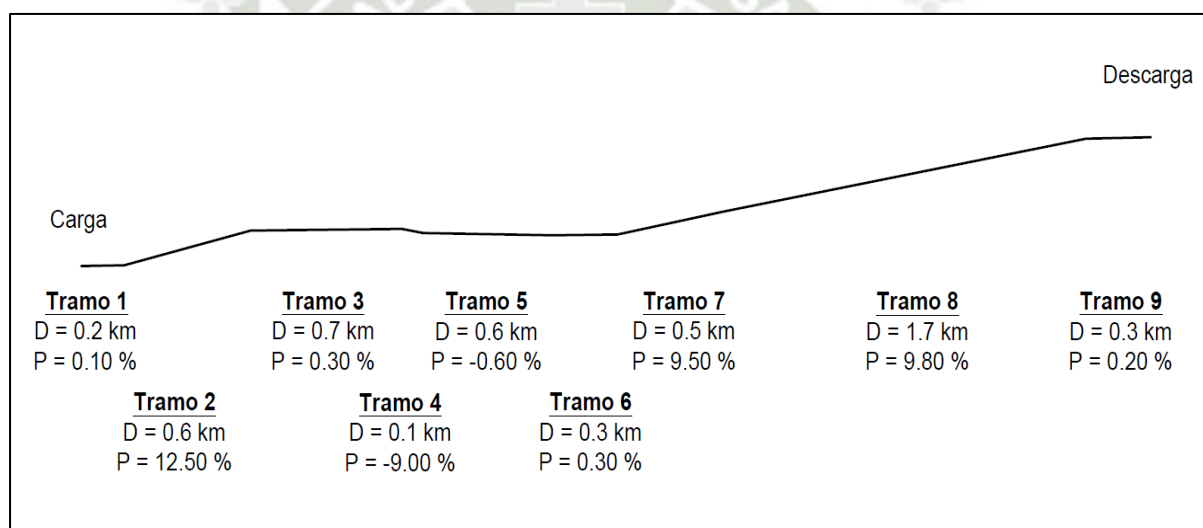
Tabla 8: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Oeste

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.2	0.10
Tramo2	0.6	12.50
Tramo3	0.7	0.30
Tramo4	0.1	-9.00
Tramo5	0.6	-0.60

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo6	0.3	0.30
Tramo7	0.5	9.50
Tramo8	1.7	9.80
Tramo9	0.3	0.20
Total	5.0	

Nota: elaboración propia.

Figura 10: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Oeste



Nota: elaboración propia.

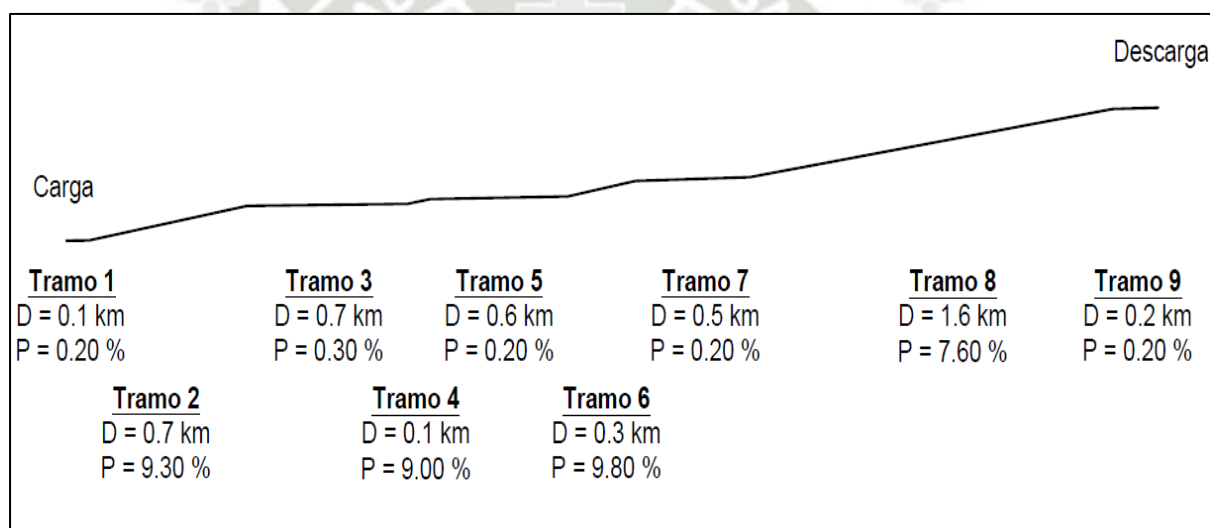
Tabla 9: De Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Norte

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.1	0.20
Tramo2	0.7	9.30
Tramo3	0.7	0.30
Tramo4	0.1	9.00
Tramo5	0.6	0.20

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo6	0.3	9.80
Tramo7	0.5	0.20
Tramo8	1.6	7.60
Tramo9	0.2	0.20
Total	4.8	

Nota: elaboración propia.

Figura 11: Perfil de ruta de transporte de Tajo Norte Fase 01 Nivel 3960 a Botadero Norte



Nota: elaboración propia.

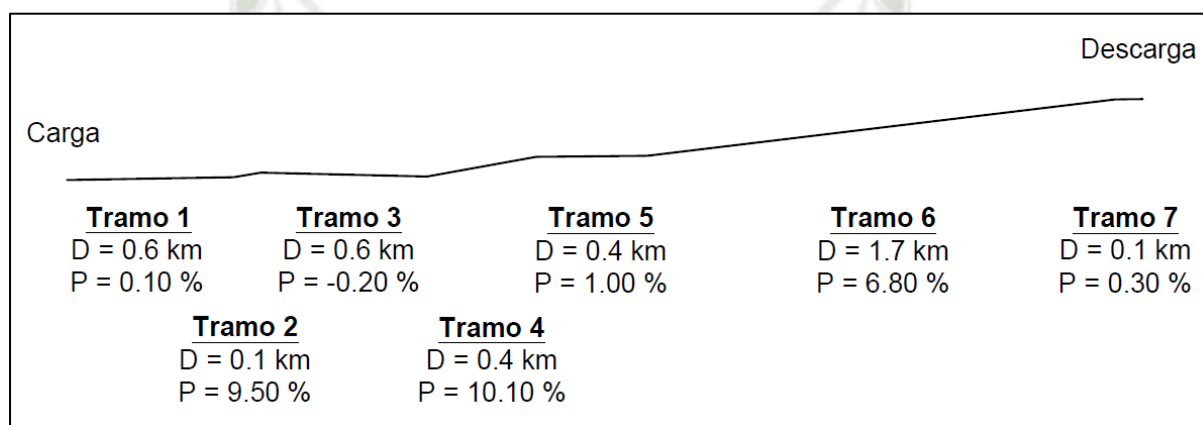
Tabla 10: De Tajo Norte Bahía a Botadero Norte

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.6	0.10
Tramo2	0.1	9.50
Tramo3	0.6	-0.20
Tramo4	0.4	10.10
Tramo5	0.4	1.00

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo6	1.7	6.80
Tramo7	0.1	0.30
Total	4.9	

Nota: elaboración propia.

Figura 12: Plano de ruta de transporte de Tajo Norte Bahía a Botadero Norte



Nota: elaboración propia.

3.5. Características de la flota de acarreo

La flota de acarreo que se estudiará está compuesta por un total de 13 camiones, de los cuales 3 camiones son CAT modelo 793D y los 10 camiones restantes son CAT modelo 785C.

En el estudio se evaluará los camiones CAT modelo 793D que tienen un motor cuya potencia bruta es de 1801 kW y una potencia utilizable máxima de 1743 kW. Según el manual de operación del camión CAT modelo 793 D (página 20) “Los valores se basan en condiciones normales del aire, conforme a la normativa internacional SAE J1995 a 25 °C (77°F) y 99 kPa (29,61 mm Hg) en seco. La potencia es estimada con un combustible de 35 grados a 16 °C (60 °F) medido en gravedad o grados API (*American Petroleum Institute*) y un poder calorífico bajo de 42.780 kJ/kg (18.390 BTU/lb) cuando el motor se usa a 30 °C (86 °F). No se requiere

reducir la capacidad del motor hasta altitudes inferiores a 2750 m.s.n.m. (9.000 pies)”. Las características técnicas del motor de los camiones se muestran en la figura 13.

Figura 13: Características técnicas del camión CAT modelo 793D

Modelo de motor	Cat 3516B HD EUI	
Potencia nominal	1.750 RPM	
Potencia bruta – SAE J1995	1.801 kW	2.415 hp
Potencia neta – SAE J1349	1.743 kW	2.337 hp
Potencia neta – ISO 9249	1.743 kW	2.337 hp
Potencia neta – 80/1269/EEC	1.743 kW	2.337 hp
Reserva de par	23%	
Calibre	170 mm	6,7 pulg
Carrera	215 mm	8,5 pulg
Cilindrada	78 L	4.760 pulg ³

Nota: extraída del catálogo del camión CAT modelo 793D, página 20

Los pesos de operación aproximados que incluyen el tanque de combustible lleno, la tolva (caja), los aros, neumáticos y la carga de material sobre la tolva (caja) se muestran en la figura 14.

Figura 14: Pesos del camión CAT modelo 793D

Peso bruto de la máquina en operación	383.749 kg	846.000 lb
Peso del chasis	116.707 kg	257.294 lb
Gama de pesos de la caja	21.795 – 54.431 kg/ 48.050 – 120.000 lb	

Nota: extraída del catálogo del camión CAT modelo 793D, página 20

Las demás especificaciones de operación de los camiones detalladas por el fabricante se pueden observar en la figura 15.

Figura 15: Características de operación de camiones CAT modelo 793D

Capacidad nominal de carga útil	218 toneladas métricas	240 toneladas cortas
Capacidad de la caja – SAE (2:1)	129 m ³	169 yd ³
Capacidad máxima	Especial	
Velocidad máxima-con carga	54,3 kph	33,7 mph
Ángulo de la dirección	36 Grados	
Radio de giro – delantero	28,42 m	93,2 pie
Diámetro del círculo de giro	32,66 m	107,15 pie

Nota: extraída del catálogo del camión CAT modelo 793D, página 20

3.6. Diseño del modelo de acarreo

El modelo se construirá con los datos tomados en la operación por la flota de camiones CAT modelo 793D (en las rutas mostradas en las tablas 2-10 y figuras 4-12).

Los camiones operan en alturas entre 3960 a 3975 msnm, que exceden en 44% a la altura de las especificaciones de rendimiento dadas por el fabricante por lo que se generará una pérdida inevitable de potencia de motor y por ende una disminución apreciable de rendimiento. Los datos de velocidad, tiempo y distancia han sido tomados en operaciones de campo para cada tramo. Se determina la interdependencia de estas velocidades con las características de pendiente (G) de la ruta y resistencia a la rodadura (RR) del camión en cada tramo de la ruta.

Los resultados se comparan con las velocidades determinadas por el fabricante (Caterpillar Inc.) que se muestran en el ábaco de eficiencia del camión gigante CAT modelo 793D (figura 1) y con las fórmulas teóricas para determinar el incremento de tracción en las ruedas, y por tanto la pérdida de potencia del motor en condiciones operación a alturas geográficas mayores a las especificadas.

Se evalúa las velocidades máximas para que el retardo garantice las revoluciones por minuto necesarias y el enfriamiento adecuado del sistema de frenos en las bajadas o tramos con pendiente negativa de la ruta.

Con los datos teóricos y los datos de operación en campo se construye un modelo que sirve para determinar la pérdida de potencia real, por tanto, el rendimiento real del acarreo en alturas mayores a las del diseño del camión.

3.6.1. Resistencia a la rodadura porcentual (%RR).

Para determinar el %RR, que es una variable fija, se hace uso de la Ec. 6. El reemplazo se realiza con los datos de los pesos del camión (figuras 12 y 13) y con la “huella” medida en campo de 10 cm., entonces

$$RR = \frac{165.7 * (20 + 6(10))}{383.8} = 34.55 \text{ kg/Tm}$$

Por cada 10 kg/Tm la gradiente real se incrementa 1 por ciento, por ende el porcentaje de incremento en la pendiente es de 3.46 por ciento.

3.6.2. Aceleración (a).

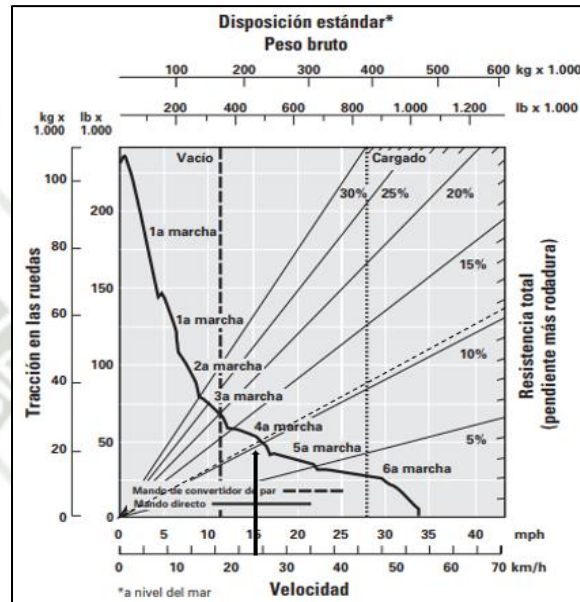
Esta es una variable específica que se calculará en cada ruta y tramo analizado.

Como ejemplo del cálculo, se evaluará la aceleración cuando se tiene una pendiente de diseño de 6.99 por ciento y una distancia de tramo de 1.6 kilómetros (tabla 2).

La tracción sobre las ruedas se debe evaluar en función de las marchas alcanzadas desde el inicio del movimiento hasta alcanzar la velocidad teórica máxima, tal como se muestra en la figura 16, en donde la línea punteada indica la pendiente total calculada (10.45 %); esta línea se intercepta con la línea de 4a marcha.

Para determinar gráficamente la velocidad, se debe trazar una línea perpendicular hacia abajo hasta encontrar la velocidad teórica del camión en las condiciones de operación definidas. En el ábaco esta velocidad es de aproximadamente 24 kilómetros por hora (km/h).

Figura 16: Tracción sobre las ruedas y velocidad teórica máxima



Nota: extraída del catálogo del camión CAT modelo 793D

Para verificar la velocidad determinada en el ábaco, se compara con las aceleraciones necesarias para alcanzar la velocidad máxima determinadas con la Ec.13. Se realizan las 5 iteraciones de acuerdo con las marchas alcanzadas (se toma en cuenta que hay dos marchas 1a, baja y alta).

$$a1 = \left(\frac{9.81}{383749} \right) * (136106 - 383749 \left(\frac{(6.99+3.46)}{100} \right)) = 2.45 \text{ m/s}^2$$

$$a1a = \left(\frac{9.81}{383749} \right) * (113422 - 383749 \left(\frac{(6.99+3.46)}{100} \right)) = 1.87 \text{ m/s}^2$$

$$a2 = \left(\frac{9.81}{383749} \right) * (90738 - 383749 \left(\frac{(6.99+3.46)}{100} \right)) = 1.28 \text{ m/s}^2$$

$$a3 = \left(\frac{9.81}{383749} \right) * (68053 - 383749 \left(\frac{(6.99+3.46)}{100} \right)) = 0.71 \text{ m/s}^2$$

$$a4 = \left(\frac{9.81}{383749} \right) * (45369 - 383749 \left(\frac{(6.99+3.46)}{100} \right)) = 0.13 \text{ m/s}^2$$

3.6.3. Velocidad final (vf).

La velocidad final se determina con la Ec.15 en intervalos de tiempo (Δt) de 1 segundo. Se hace uso de las aceleraciones evaluadas en el título 3.6.2., la velocidad inicial es 0 (v_0) en la primera iteración, en la segunda iteración la velocidad inicial será la v_{f1} y así sucesivamente.

$$v_{f1} = 0 + (2.45 * 1) = 2.45 \frac{m}{s} = 8.84 \text{ km/h}$$

$$v_{f1a} = 2.45 + (1.87 * 1) = 4.33 \frac{m}{s} = 15.58 \text{ km/h}$$

$$v_{f2} = 4.33 + (1.29 * 1) = 5.62 \frac{m}{s} = 20.24 \text{ km/h}$$

$$v_{f3} = 5.62 + (0.71 * 1) = 6.34 \frac{m}{s} = 22.82 \text{ km/h}$$

$$v_{f4} = 6.34 + (0.13 * 1) = 6.47 \frac{m}{s} = 23.30 \text{ km/h}$$

Este resultado es muy aproximado al evaluado gráficamente en el ábaco y es la velocidad teórica del camión cargado.

3.6.4. Determinación teórica de la velocidad en las rutas con pendientes negativas.

En el caso de pendientes negativas el cálculo se limita a mantener la velocidad adecuada por dos razones:

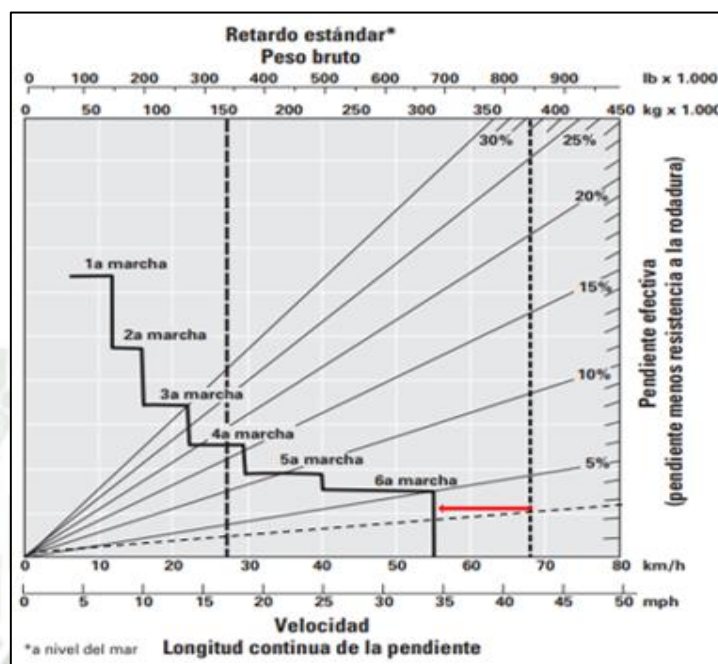
- Mantener las revoluciones por minuto (rpm) del motor al máximo sin exceder la velocidad.
- Controlar los frenos debidamente sin exceder la capacidad de enfriamiento.

El cálculo de la velocidad teórica en pendientes negativas se hace con el ábaco de retardo estándar.

Para determinar la pendiente de operación en bajada (Ptb), se resta el % de pendiente real (%G) y el porcentaje de resistencia a la rodadura (%RR). Se define si el camión está cargado o sin carga y luego se desciende sobre la línea punteada del ábaco hasta interceptar con la línea de pendiente determinada. A partir de este punto se traza una línea horizontal hasta encontrar la marcha más alta y se desciende para estimar la velocidad teórica adecuada.

Para entender mejor este procedimiento se determinará, como ejemplo general, la velocidad teórica de un camión cargado en la ruta 01, tramo 2 (tabla 2) que tiene una gradiente de diseño (%G) igual a menos 0.6 por ciento, una distancia de 600 metros (0.6 km) y una pendiente de resistencia a la rodadura de 3.46 por ciento. En la figura 17, la línea punteada negra representa la pendiente de 2.86 por ciento (diferencia entre 3.46 % y 0.6 %) que al interceptar con la línea perpendicular del peso bruto (383.8 Tm) da un punto, a partir del cual se recorre hacia la izquierda (flecha roja) y se intercepta con la 6a marcha. La velocidad teórica máxima es de 54.5 kilómetros por hora (km/h). En el caso de camiones vacíos el procedimiento es igual, solo que se debe usar la línea perpendicular del peso en seco y trazar la flecha hacia la izquierda para interceptar la línea de la marcha más alta.

Figura 17: *Velocidad teórica máxima para pendientes negativas*



Nota: extraída del catálogo del camión CAT modelo 793D

3.6.5. Determinación de la tracción sobre las ruedas.

La tracción sobre las ruedas, necesaria para mover el camión, depende de factores como: la potencia máxima utilizable del motor, pendiente total de la ruta, velocidad del camión, tracción utilizable y tracción disponible.

La potencia máxima utilizable del camión CAT modelo 793D es de 1743 kilovatios (kW). Se ha determinado la resistencia a la rodadura (RR) para el camión del estudio que es 34.6 kilogramos por tonelada métrica (kg/Tm) y la pendiente de corrección que se aplica a la pendiente de diseño es de 3.46 por ciento (%) en todos los tramos.

Se ha explicado la forma por la cual se determina la aceleración teórica, la velocidad teórica final en cada marcha y el tiempo teórico esperado de viaje. En todos los cálculos siguientes se usarán las ecuaciones teóricas y los datos proporcionados por el fabricante; y por último se comprobarán los resultados validando en el ábaco de rendimiento del camión.

3.6.5.1. Tracción utilizable.

La tracción utilizable se determina con la Ec. 8, depende de la pendiente total de la ruta (%G+%RR) y solo se aplica al eje impulsor (eje trasero); entonces el peso bruto del camión debe ser multiplicado por el porcentaje de carga sobre este eje que se muestra en la figura 18.

Figura 18: *Distribución de pesos en los ejes del camión*

Distribuciones de peso – Aproximadas

Eje delantero – Vacío	46%
Eje trasero – Vacío	54%
Eje delantero – Cargado	33%
Eje trasero – Cargado	67%

Nota: extraída del catálogo del camión CAT modelo 793D

En el ejemplo de cálculo, esta tracción utilizable (Tu) es:

$$Tu = 9.81 * (383749 * 0.67) * \left(\frac{6.99 + 3.46}{100} \right) = 263\,577\,kg$$

3.6.5.2. Tracción disponible.

La tracción disponible (Td), que se calcula con la Ec. 9, debe ser determinada para cada marcha del sistema de transmisión y comparada con la tracción utilizable para determinar la mayor velocidad posible. Siempre la tracción utilizable es menor a la tracción disponible para que el camión se desplace en la gradiente de la ruta. Para este ejemplo se han determinado las tracciones disponibles para todas las marchas (tabla 11).

Tabla 11: *Aceleración, velocidades y tracción disponible*

Marcha	Aceleración (m/s ²)	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)	Tracción disponible (Kg x1000)
1°	2.45	2.45	8.84	710.21
1°a	1.87	4.33	15.58	402.68
2°	1.29	5.62	20.24	309.98
3°	0.71	6.34	22.82	275.03
4°	0.13	6.47	23.30	269.31

Nota: elaboración propia.

La tracción utilizable es de 263577 kilogramos (kg), esta debe ser menor a la tracción disponible. En la tabla la tracción disponible en 4a marcha es 269310 Kg y la velocidad es de 23.30 km/h (6.47 m/s).

3.7. Determinación de la potencia

La determinación de la diferencia entre la potencia disponible y la potencia utilizada nos sirve para calcular la pérdida de la capacidad para alcanzar la velocidad máxima de diseño del camión por las condiciones de operación reales. La potencia máxima utilizable del camión en estudio es de 1743 kilovatios (kW).

Las variables más importantes para la determinación de la potencia disponible (Pd) y la potencia utilizada (Pu) son la tracción utilizable y la velocidad del camión en cada tramo (Ec. 10 y Ec. 11).

Si la potencia disponible es mayor que la potencia utilizada en operaciones, entonces existen condiciones de campo que producen una pérdida de potencia.

La pérdida de potencia se refleja en la disminución de la velocidad alcanzada en los tramos para condiciones de tracción iguales. Para determinar dicha disminución de potencia, en todas las situaciones operacionales se ha tomado las velocidades en cada ruta y tramo considerando la pendiente, la resistencia a la rodadura y las distancias. Estos datos se han correlacionado para construir el submodelo de velocidades.

El submodelo de velocidades teóricas para todos los tramos y rutas estudiadas se construye siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 3.6. y el submodelo de velocidades reales de la misma manera pero considerando los datos tomados en campo.

Con ambos submodelos se determina la tracción disponible, la tracción utilizable, la potencia disponible y la potencia utilizada, y se construye el submodelo de pérdida de potencia.

Con los tres submodelos se construirá el modelo general de pérdida de rendimiento en el acarreo. Finalmente se valida este modelo con los datos operativos correspondientes.



CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO Y VALIDACIÓN

4.1. Determinación de las ecuaciones de velocidades

Para la investigación se tomó datos en campo, en el recorrido de camiones cargados en diferentes rutas, distancias y pendientes de diseño. Los datos se ordenaron crecientemente en función a la pendiente de diseño de la ruta (%G) y se tomaron velocidades de campo.

Se determinaron las velocidades teóricas con el procedimiento descrito en el capítulo anterior y se correlacionó ambos resultados en un gráfico de dispersión, para determinar las ecuaciones correspondientes.

4.2. Submodelos de velocidades en la etapa del camión cargado

La mínima pendiente de diseño en las rutas estudiadas es de -0.6 por ciento (%) y la máxima 10.1 por ciento (%), a estas pendientes se le sumó 3.46 por ciento (%) de la pendiente de corrección por la resistencia a la rodadura (%RR) para determinar la pendiente total en cada tramo. Las velocidades reales tomadas en campo y las calculadas teóricamente se muestran en la tabla 12.

Tabla 12: Rutas, tramos, distancias, pendiente total y velocidades

Ruta	Tramo	Distancia (km)	Pend. total (%)	Velocidad real (km/h)	Velocidad teórica (km/h)
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Norte	02	0.6	2.86	15.88	38.7
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	02	0.6	2.86	15.65	38.7
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	04	0.6	2.86	45.00	38.7
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	04	0.6	2.86	50.23	38.7
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	04	0.6	2.86	54.00	38.7

Ruta	Tramo	Distancia (km)	Pend. total (%)	Velocidad real (km/h)	Velocidad teórica (km/h)
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	06	0.6	2.96	18.46	38.6
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	07	0.6	3.16	24.55	38.28
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	05	0.5	3.26	24.66	38.28
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	05	0.6	3.26	26.34	38.28
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	05	0.6	3.26	29.59	38.28
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	03	0.6	3.26	33.23	38.28
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	09	0.5	3.66	39.13	37.85
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	07	0.5	3.66	39.13	37.85
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	07	0.5	3.66	40.91	37.85
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	08	0.3	3.66	20.00	37.85
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	11	0.3	3.76	15.88	37.75
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	07	0.5	4.46	38.30	37.01

Ruta	Tramo	Distancia (km)	Pend. total (%)	Velocidad real (km/h)	Velocidad teórica (km/h)
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	05	0.4	4.46	31.30	37.01
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	04	0.4	4.46	8.14	37.01
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	08	0.5	4.56	18.95	36.9
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	10	0.5	4.96	12.59	38.48
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	08	1.7	10.26	15.90	30.86
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	06	1.7	10.26	14.68	30.86
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Norte	03	1.6	10.45	14.85	30.66
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	05	1.6	10.45	16.74	30.66
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	05	1.6	10.45	15.24	30.66
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	05	1.6	10.45	15.28	30.66
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	09	1.4	10.67	17.32	30.43
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	09	1.4	10.67	17.32	30.43
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	03	1.4	10.95	12.82	30.13
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	03	1.4	10.95	12.82	30.13
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	08	1.6	11.06	14.40	30
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	10	1.6	11.06	14.01	30

Ruta	Tramo	Distancia (km)	Pend. total (%)	Velocidad real (km/h)	Velocidad teórica (km/h)
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	10	1.6	11.06	14.01	30
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	07	1.7	11.36	16.36	30
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	07	1.7	11.36	16.36	29.7
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	04	0.2	12.46	25.71	29.7
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	04	0.2	12.46	28.80	29.7
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	04	0.2	12.96	27.69	28.8
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	06	0.2	12.96	28.80	28.8
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	02	0.2	12.96	24.83	28.8
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	03	0.2	13.06	10.14	28.77
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	03	0.2	13.06	10.00	28.77
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	03	0.2	13.06	9.73	28.77
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	08	0.3	13.26	12.86	28.7
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	06	0.3	13.26	15.21	28.7

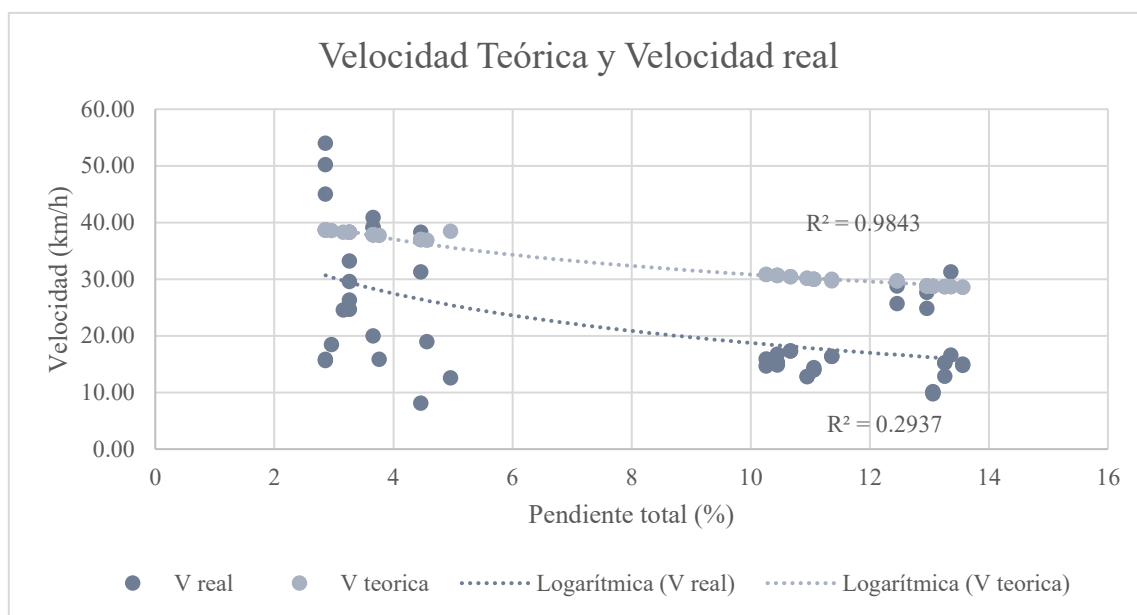
Ruta	Tramo	Distancia (km)	Pend. total (%)	Velocidad real (km/h)	Velocidad teórica (km/h)
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	06	0.3	13.26	15.21	28.7
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	07	0.3	13.36	16.62	28.66
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	05	0.2	13.36	31.30	28.66
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	06	0.3	13.56	15.00	28.59
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	04	0.3	13.56	14.79	28.59

Nota: elaboración propia.

Los valores de las velocidades fueron graficados para determinar la ecuación de correlación, en cada caso se ha utilizado una curva de tendencia logarítmica debido a que los valores en pendientes bajas son más dispersos que los valores en pendientes altas.

Con la ecuación de la curva podemos evaluar la velocidad para cualquier pendiente y es parte del modelo final de rendimiento en acarreo.

Figura 19: Gráfico de velocidades versus pendientes totales



Nota: elaboración propia.

La ecuación que determina las velocidades reales (v_r) de campo para cualquier pendiente total (Pt) es

$$v_r = -9.526 \ln(Pt) + 40.681 \quad \text{Ec.17}$$

y la ecuación de las velocidades teóricas (v_t) para cualquier pendiente total (Pt) es

$$v_t = -6.807 \ln(Pt) + 46.500 \quad \text{Ec. 18}$$

4.3. Submodelo de velocidad en la etapa del camión vacío

Determinamos las velocidades promedio cuando el camión está vacío, debido a que los camiones pueden alcanzar la máxima velocidad en cualquier bajada, sin embargo, por razones de seguridad se utiliza el retardo de motor para mantener la velocidad adecuada para mantener las revoluciones por minuto del motor y enfriar el sistema de frenos. La velocidad teórica es estimada con el ábaco de retardo.

Tabla 13: *Rutas, pendientes totales de bajada y velocidades promedio*

Ruta	Pendiente total bajada (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Velocidad Promedio (km/h)
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	0.93	38.57	54	46.29
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	1.43	40.00	50	45.00
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	1.43	25.71	50	37.86
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	1.43	48.00	50	49.00
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	1.43	28.42	50	39.21
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	1.43	36.00	50	43.00
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	1.83	37.24	48	42.62
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	1.83	21.82	48	34.91
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	1.83	12.20	48	30.10
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	1.83	22.50	48	35.25
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	1.83	40.00	48	44.00
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	2.13	45.00	45	45.00
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	2.13	45.00	45	45.00

Ruta	Pendiente total bajada (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Velocidad Promedio (km/h)
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	2.13	42.35	45	43.68
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	2.23	42.35	45	43.68
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	2.23	34.91	45	39.95
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Norte	2.63	26.06	42	34.03
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	2.63	33.68	42	37.84
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	2.63	33.49	42	37.74
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	2.63	35.56	42	38.78
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	2.63	32.55	42	37.28
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	2.63	33.44	42	37.72
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	2.63	19.57	42	30.78
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Norte	2.73	10.80	40	25.40
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	2.93	13.85	38	25.92
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	3.43	12.86	35	23.93
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	3.43	11.43	35	23.21
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	3.53	13.58	35	24.29
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Norte	4.37	28.05	33	30.53
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	4.37	26.34	33	29.67
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	4.56	38.57	33	35.79

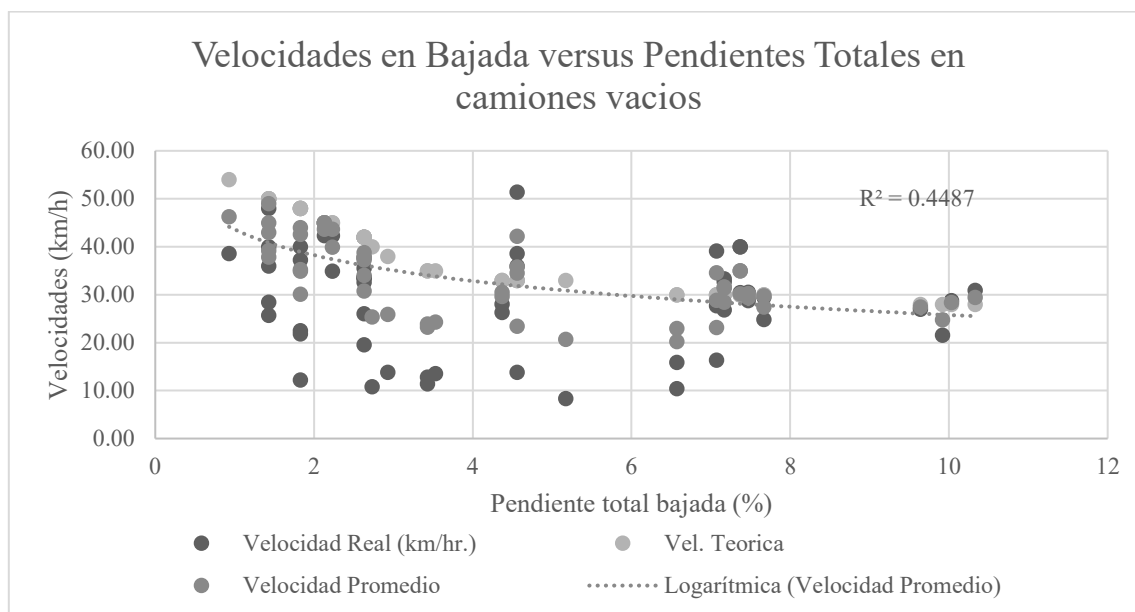
Ruta	Pendiente total bajada (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Velocidad Promedio (km/h)
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	4.56	36.00	33	34.50
Tajo Sur Rampa 06 - Bot. Norte	4.56	51.43	33	42.21
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	4.56	13.85	33	23.42
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	5.17	8.37	33	20.69
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	6.57	15.88	30	22.94
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	6.57	10.43	30	20.22
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	7.07	16.36	30	23.18
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	7.07	27.69	30	28.85
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	7.07	39.13	30	34.57
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	7.17	33.33	30	31.67
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	7.17	26.87	30	28.43
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	7.17	32.73	30	31.36
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Norte	7.37	40.00	30	35.00

Ruta	Pendiente total bajada (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Velocidad Promedio (km/h)
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	7.37	40.00	30	35.00
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	7.37	30.42	30	30.21
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	7.47	28.80	30	29.40
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Norte	7.47	30.51	30	30.25
Tajo Norte Bahía Norte - Bt. Norte	7.67	24.83	30	27.41
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	7.67	29.51	30	29.75
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3990 - Bt. Oeste	9.64	26.95	28	27.48
Tajo Sur Fase 06 - Bot. Oeste	9.92	21.54	28	24.77
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3975 - Bt. Oeste	10.03	28.80	28	28.40
Tajo Norte Fase 01 Nv. 3960 - Bt. Oeste	10.33	30.91	28	29.45

Nota: elaboración propia.

Para correlacionar y determinar la gráfica se usa la velocidad promedio y nos muestra la línea de esta correlación.

Figura 20: *Velocidades en bajada versus pendientes totales en camiones vacíos*



Nota: elaboración propia.

La ecuación de la velocidad con camión vacío (v_c) en cada tramo y pendiente total de bajada (P_{tb}) es

$$v_c = -7.747 \ln(P_{tb}) + 43.596 \quad \text{Ec.19}$$

4.4. Determinación de la potencia

La potencia máxima utilizable (Pot_{mu}) del motor es de 1743 kilovatios (kW) y no disminuye hasta la altura geográfica de 2750 msnm (catálogo camión CAT 793D); sin embargo, a mayor altura la potencia disponible (P_d) debería disminuir. Para determinar la disminución de esta potencia, se procede a calcular la potencia disponible y la potencia utilizada en las operaciones y se compara la diferencia o pérdida de potencia disponible.

4.4.1. Potencia disponible y utilizada.

En la tabla 14 se muestra la potencia disponible (Ec. 10) y la potencia utilizada (Ec. 11) para cada pendiente total del estudio.

Tabla 14: *Potencia disponible y potencia utilizada*

Pend. Total (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Potencia Disponible (kW)	Potencia Utilizada (kW)
2.86	30.66	38.29	492	394
2.86	30.66	38.29	492	394
2.86	30.66	38.29	492	394
2.86	30.66	38.29	492	394
2.86	30.66	38.29	492	394
2.96	30.34	38.00	506	403
3.16	29.71	37.51	532	422
3.26	29.42	37.27	546	431
3.26	29.42	37.27	546	431
3.26	29.42	37.27	546	431
3.26	29.42	37.27	546	431
3.66	28.32	36.37	598	466
3.66	28.32	36.37	598	466
3.66	28.32	36.37	598	466
3.66	28.32	36.37	598	466
3.76	28.06	36.16	611	474
4.46	26.44	34.82	698	530
4.46	26.44	34.82	698	530
4.46	26.44	34.82	698	530
4.56	26.22	34.65	710	537
4.96	25.43	33.99	757	566
10.26	18.50	28.33	1305	853

Pend. Total (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Potencia Disponible (kW)	Potencia Utilizada (kW)
10.26	18.50	28.33	1305	853
10.45	18.32	28.18	1323	860
10.45	18.32	28.18	1323	860
10.45	18.32	28.18	1323	860
10.45	18.32	28.18	1323	860
10.67	18.12	28.00	1343	869
10.67	18.12	28.00	1343	869
10.95	17.88	27.82	1368	879
10.95	17.88	27.82	1368	879
11.06	17.79	27.74	1378	883
11.06	17.79	27.74	1378	883
11.06	17.79	27.74	1378	883
11.36	17.79	27.74	1378	883
11.36	17.79	27.74	1378	883
12.46	16.65	26.80	1500	932
12.46	16.65	26.80	1500	932
12.96	16.47	26.50	1542	947
12.96	16.47	26.50	1542	947
12.96	16.47	26.50	1542	947
13.06	16.20	26.44	1551	950
13.06	16.20	26.44	1551	950
13.06	16.20	26.44	1551	950
13.26	16.00	26.32	1567	956

Pend. Total (%)	Velocidad Real (km/h)	Velocidad Teórica (km/h)	Potencia Disponible (kW)	Potencia Utilizada (kW)
13.26	16.00	26.32	1567	956
13.26	16.00	26.32	1567	956
13.36	15.98	26.26	1576	959
13.36	15.98	26.26	1576	959
13.56	15.84	26.14	1592	965
13.56	15.84	26.14	1592	965

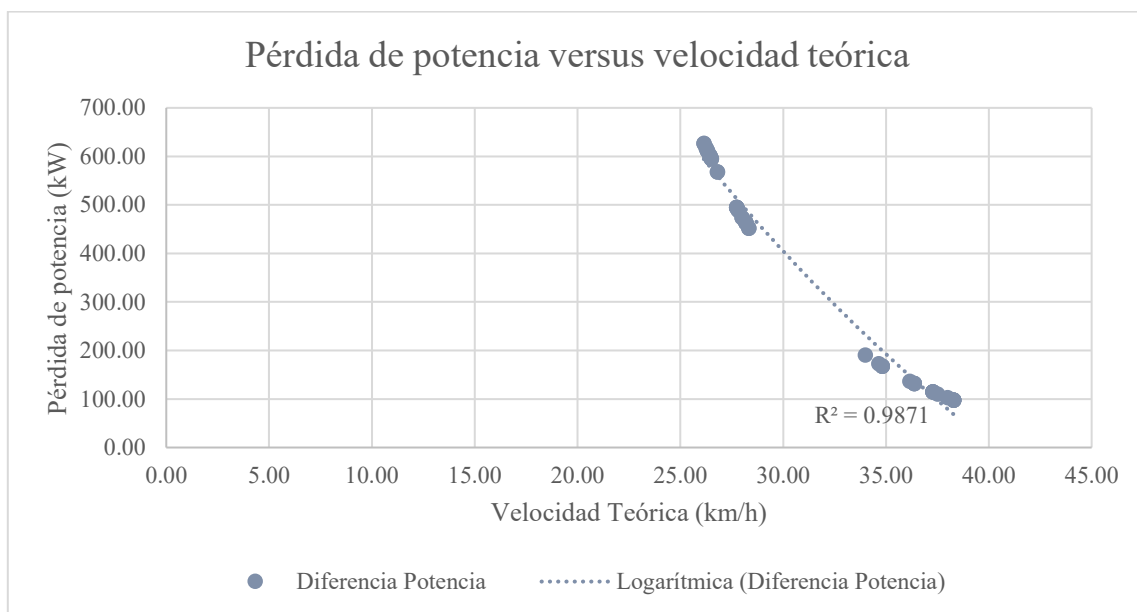
Nota: elaboración propia.

4.5. Submodelo de la pérdida de potencia

La diferencia entre potencias indica el aumento de tracción requerida para operar el camión, por tanto, la velocidad de desplazamiento es menor. Esto sucede, según el fabricante, por encima de los 2750 msnm.

Esta pérdida de potencia se puede explicar básicamente por el aumento de la altura geográfica, temperatura y otras condiciones medidas indirectamente con la toma de velocidades reales en campo. Se observa que a velocidades menores la pérdida de potencia es mayor y esto se explica debido a que a mayor pendiente total se requiere mayor tracción. La transferencia de tracción a los ejes, que se logra usando la caja de cambios o marchas, implica un mayor uso de potencia del motor. En la figura 21 se ha correlacionado la velocidad teórica (v_t) y la pérdida de potencia, determinando la ecuación de la curva de tendencia que explica esta pérdida a diferentes velocidades.

Figura 21: Pérdida de potencia versus la velocidad teórica



Nota: elaboración propia.

La ecuación para la pérdida de potencia para cualquier velocidad es

$$\Delta Pot = -1377 \ln(v_t) + 5088.8 \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

- ΔPot pérdida de potencia (kW)
- v_t velocidad teórica (km/h)

4.6. Modelamiento del rendimiento en acarreo

4.6.1. Modelo de rendimiento de acarreo.

El rendimiento o productividad de los camiones en toneladas de material transportado por hora (TMH) depende del tiempo de ciclo en la ruta. En cada tramo se alcanza diferentes velocidades reales (v_r), que son menores a las velocidades teóricas (v_t) por la pérdida de potencia transferida al sistema de tracción. La pendiente total es la variable más importante

para definir la velocidad máxima en cada tramo. El modelo de rendimiento de acarreo se construye en función a los submodelos de velocidades y potencia.

Existen variables fijas que deben ser tomadas de las operaciones, estas son la carga útil del camión (CU), las distancias del tramo (D) y los tiempos de carga, descarga y cuadrado (TR).

El modelo general de rendimiento en acarreo se puede expresar como

$$TMH = CU * \left[\sum_{D=1}^n \left(\frac{D}{v_t - \left(\frac{\Delta Pot}{Pot_{md}} * v_t \right)} + \frac{D}{v_c} \right) + TR \right]^{-1} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

- TMH rendimiento en toneladas métricas por hora (Tm/h)
- Cu carga útil del camión en toneladas métricas (Tm)
- D distancia del tramo en kilómetros (km)
- v_t velocidad teórica en kilómetros por hora (km/h)
- ΔPot diferencia de potencia en kilovatios (kW)
- Pot_{md} potencia máxima disponible del motor en kilovatios (kW)
- v_c velocidad del camión vacío en kilómetros por hora (km/h)
- TR tiempos fijos en horas (h)

Como se mencionó, este modelo sirve para el cálculo de los presupuestos en el acarreo con camiones.

4.7. Validación del modelo

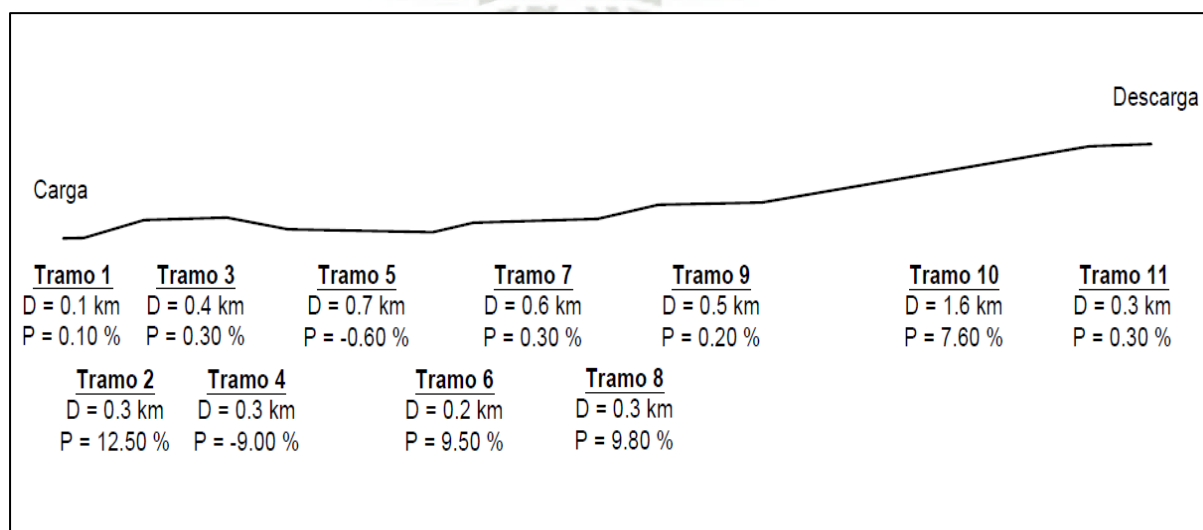
Para validar el modelo se determinará la producción por hora de un camión CAT modelo 793D en la ruta 03: Tajo Norte Fase 01- Nivel 3975 Botadero oeste. La ruta tiene una distancia total de 5.30 km y está dividida por los tramos y pendientes de diseño que se especifican en la tabla 15.

Tabla 15: *Tramos, distancias y pendientes de diseño de la ruta 3*

N.º de Tramo	Distancia (km)	Pendiente (%)
Tramo1	0.1	0.10
Tramo2	0.3	12.50
Tramo3	0.4	0.30
Tramo4	0.3	9.00
Tramo5	0.7	0.60
Tramo6	0.2	9.50
Tramo7	0.6	0.30
Tramo8	0.3	9.80
Tramo9	0.5	0.20
Tramo10	1.6	7.60
Tramo11	0.3	0.30

Nota: elaboración propia.

El perfil de la ruta 3 se puede observar en la figura 22.

Figura 22: *Perfil de la Ruta 3 - Tajo Norte Nivel 3975 a Botadero Oeste*


Nota: elaboración propia.

Para poder validar el modelo, se deben tomar los datos de la operación indicados en la tabla 16.

Tabla 16: *Datos operacionales para la validación del modelo*

Carga útil del camión	218 Tm
Tiempo de carga pala P&H 2800	0.06 h
Tiempo de descarga	0.03 h
Pendiente por resistencia a la rodadura	3.46 %
Potencia máxima utilizable del motor	1743 KW.

Nota: elaboración propia.

Se calcula, con los submodelos respectivos, la velocidad teórica (v_t), la velocidad de camión vacío (v_c) y la diferencia de potencia (ΔPot). Se aplica en el modelo de acarreo y se obtiene el tiempo de viaje en cada tramo, a la sumatoria de estos tiempos de viajes se le adiciona los tiempos fijos (T_R). Finalmente se multiplica el resultado por la carga útil del camión para obtener el rendimiento en toneladas por hora. Las iteraciones se ven reflejadas en la tabla 17.

Tabla 17: *Resultado de las iteraciones*

Tramo	v_t (km/h)	v_c (km/h)	ΔPot (kW)	T (h)
1	36.59	34.21	132.02	0.006
2	24.87	26.54	663.37	0.041
3	36.16	34.68	148.18	0.018
4	26.81	30.33	560.33	0.026
5	35.56	35.45	171.00	0.042
6	26.50	29.66	576.00	0.018
7	36.16	34.68	148.18	0.035

Tramo	V _t (km/h)	V _c (km/h)	ΔPot (kW)	T (h)
8	26.32	29.29	585.51	0.027
9	36.37	34.44	140.19	0.029
10	27.74	32.59	513.34	0.131
11	36.16	34.68	148.80	0.018
Sumatoria T+TR				0.481
Toneladas por hora (TMH)				452.76

Nota: elaboración propia.

El rendimiento del acarreo es de 452.76 toneladas por camión es decir que en esta ruta el camión puede realizar 2.08 viajes por hora.

El uso de este modelo nos permite múltiples estimaciones del planeamiento operacional del acarreo, tal como se explica en los siguientes apartados.

4.7.1. Flota de camiones.

Se puede definir la flota de camiones asignados a una pala. Para el cálculo se debe dividir la producción requerida por planeamiento (PR), entre el rendimiento horario (TMH) multiplicado por las horas efectivas de trabajo (24*E). La ecuación se puede escribir como

$$\#camiones = \frac{PR}{(TMH * (24 * E))}$$

Si suponemos que se requiere producir 100,000 TM por día y que la eficiencia horaria es del 83% entonces la flota a asignar debería ser de:

$$\#camiones = \frac{100,000}{(452.76 * (24 * 0.83))} = 11 \text{ camiones}$$

4.7.2. Costo unitario de material transportado.

Otra aplicación operacional que nos permite realizar el modelo diseñado es la de estimar el costo unitario en dólares por kilómetro sobre tonelada transportada (\$-Km/TM). Para el cálculo se debe aplicar la fórmula

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\frac{\text{Costo horario del camión}}{\text{Distancia de la ruta}}}{\text{Toneladas por hora (TMH)}}$$

Si suponemos que el costo horario del camión es de 130 \$/h y sabemos que la distancia de la ruta es de 5.30 km, entonces

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\frac{130 (\$/h)}{5.3 (km)}}{452.76 (Tm/h)} = 0.0542 \frac{\$ \cdot km}{Tm}$$

CONCLUSIONES

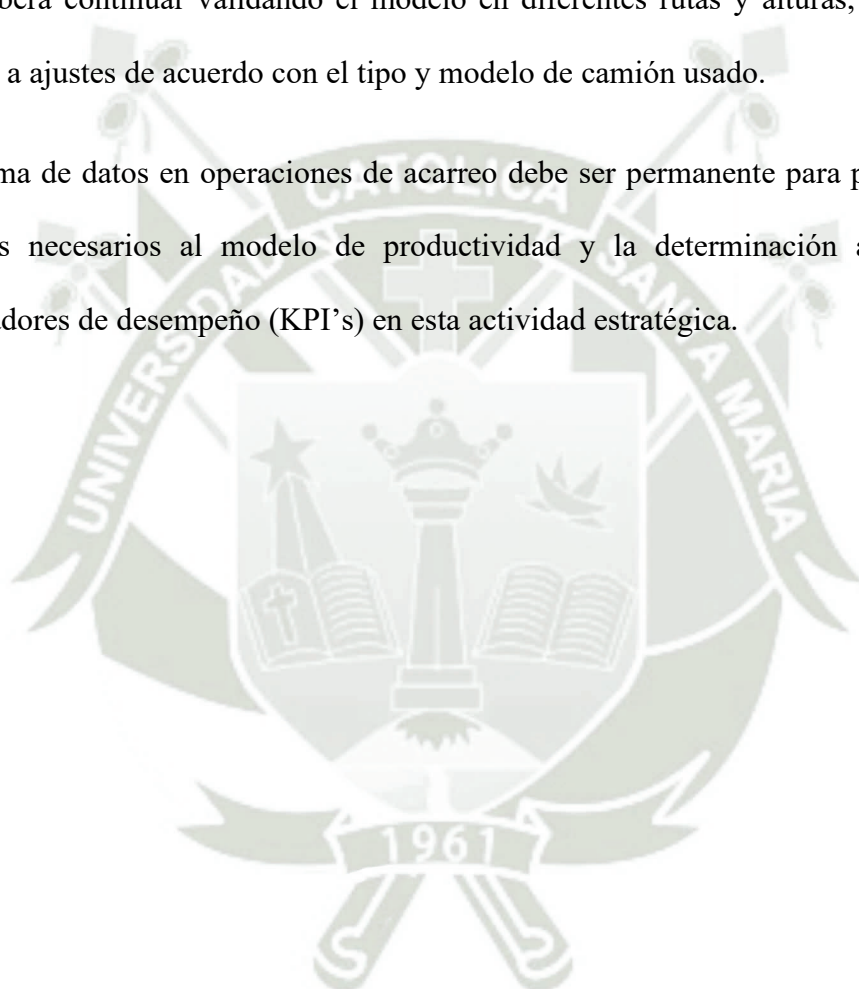
1. La eficiencia del acarreo disminuye debido a que la potencia del motor utilizada es menor que la disponible, esto se refleja en la disminución de la velocidad alcanzada en cada tramo de la ruta. Esta disminución no es lineal y se determinó que es inversamente proporcional a la velocidad, así, a mayor velocidad menor es la pérdida de potencia (figura 19). Se determinó un Modelo de Acarreo considerando esta disminución real de la transmisión de potencia en el sistema de tracción de los camiones.
2. Las velocidades reales en cada tramo de la ruta estudiada dependen de la tracción utilizable y la tracción disponible necesarias para vencer la pendiente total del tramo. La transmisión de la tracción se controla mediante una caja de cambios que definen las “marchas” y por tanto la velocidad máxima que se puede alcanzar.
3. La velocidad teórica alcanzada por los camiones se determina con los ábacos del fabricante (figuras 14 y 15). En la investigación se hizo una comprobación usando las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniformemente variado (MRUV) para validar los resultados del ábaco. Finalmente, luego del cálculo de la aceleración, velocidad final y tracción disponible (Capítulo III) se comprobó la validez de las velocidades calculadas con los ábacos.
4. Para la evaluación de la diferencia entre la velocidad, se correlacionó la velocidad teórica y la velocidad real con la pendiente total, para cada tramo y ruta (figuras 17 y 18); de esta correlación se obtuvo los submodelos de velocidades teóricas, velocidades reales y velocidades con camión vacío.
5. Se construyó el modelo general de acarreo que se muestra en el acápite 4.6. Este determina la productividad del camión (en toneladas métricas por hora, TMH) para cada tramo de la ruta; considerando diferentes cargas útiles (C_u), distancias del tramo de la ruta (D), modelos

de camiones (potencia en KW y peso bruto) y gradiente de diseño de la ruta (%G). Con la validación de este modelo se estimaron los presupuestos de acarreo como, la flota necesaria de camiones y el costo unitario de material transportado.



RECOMENDACIONES

1. El uso de modelos en el acarreo es importante porque las variables de análisis, específicamente pendientes y distancias de la ruta son dinámicas, es decir, que cambian continuamente, entonces la determinación de la productividad debe ser con un modelo.
2. Se deberá continuar validando el modelo en diferentes rutas y alturas, este puede estar sujeto a ajustes de acuerdo con el tipo y modelo de camión usado.
3. La toma de datos en operaciones de acarreo debe ser permanente para poder realizar los ajustes necesarios al modelo de productividad y la determinación adecuada de los indicadores de desempeño (KPI's) en esta actividad estratégica.



REFERENCIAS

- CAT Handbook 48, descargado de <https://wheelercat.com/company/resources/cat-performance-handbook/>
- Catálogo de camión 793D descargado de www.cat.com
- Molina Arenas, S. I. Modelo de optimización de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Rodrigo Mena, Enrico Zio, Fredy Kristjanpoller, Adolfo Arata, Availability-based simulation, and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints, International Journal of Mining Science and Technology, Volume 23, Issue 1, 2013, Páginas 113-119, ISSN 2095-2686.
- Zhang, X., Wang, Sufang, Zhang, Weicun "Research of Driving Cycle Construction for Electric Drive Mining Truck Based on Travelling Analysis Method", book title "Proceedings of 2018 Chinese Intelligent Systems Conference", 2019, Springer Singapore.
- Preciado, J. (2012). Diseño y Aplicación de un Modelo Económico para la Toma de Decisiones en Reemplazo de Equipo de Acarreo en una Mina a Cielo Abierto. Tesis de Maestría. Manzanillo, México: Universidad de Colima. Obtenido de http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/Jose%20
- Santos, E. (2018). Aplicaciones del cálculo al movimiento rectilíneo uniforme variado (MRUV).
- Susanto, G. P. U. (2019). Analisis Nilai Rimpull Dan Load Factor Terhadap Produksi Dump Truck Cat 793c Pada Pit Tembaga Phase 6 Batu Hijau Pt. NEWMONT NUSA

TENGGARA (Doctoral Dissertation, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta).

- Soto Vilca, C. Y., & Tarazona Yábar, N. (2016). Diseño, validación e implementación de una aplicación de acarreo en minería superficial.
- Kennedy, B. A., & Kennedy, B. A. (Eds.). (1990). Surface mining. SME.
- Handbook, C. P. (2010). Peoria. Illinois: Caterpillar Inc.
- Gómez, C. I. (2019). Análisis Del Impacto Del Diseño Geométrico De Caminos Mineros En La Productividad De La Flota De Transporte.
- Oliveros Blanco, Y. (2015). Evaluación de los parámetros tecnológicos y explotación del transporte automotor minero empleado en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (Doctoral dissertation, Tesis en opción al título de Máster en Electromecánica).
- Cargua Colcha, F. A., & Castelo Valdivieso, J. C. (2017). Determinación de la variación de par motor, potencia, y pérdidas mecánicas en un motor de encendido provocado (MEP) en función de la presión atmosférica y temperatura ambiente a través del método de aceleración libre (Master's thesis, Quito, 2017.).
- Yepes, V. (2014). Maquinaria de movimiento de tierras. Apuntes de la Universidad Politécnica de valencia, Ref., 204.
- Castellanos Alonso, J. U. (2015). Cálculo y diseño de la transmisión de un automóvil.
- Darling, P. (Ed.). (2011). SME mining engineering handbook (Vol. 1). SME.



ANEXOS

ANEXO A

FORMATO DE MEDICIÓN DE LOS TIEMPOS DE ACARREO

Características del minado							
Actividad							
Frente de Carguío							
Nivel							
Frente de Descarga							
Material							

Equipo	Código	Fabricante	Modelo
Equipo de carguío 1			
Equipo de carguío 2			
Camión			

Herramientas y equipos de medición		

Día	Mes	Año

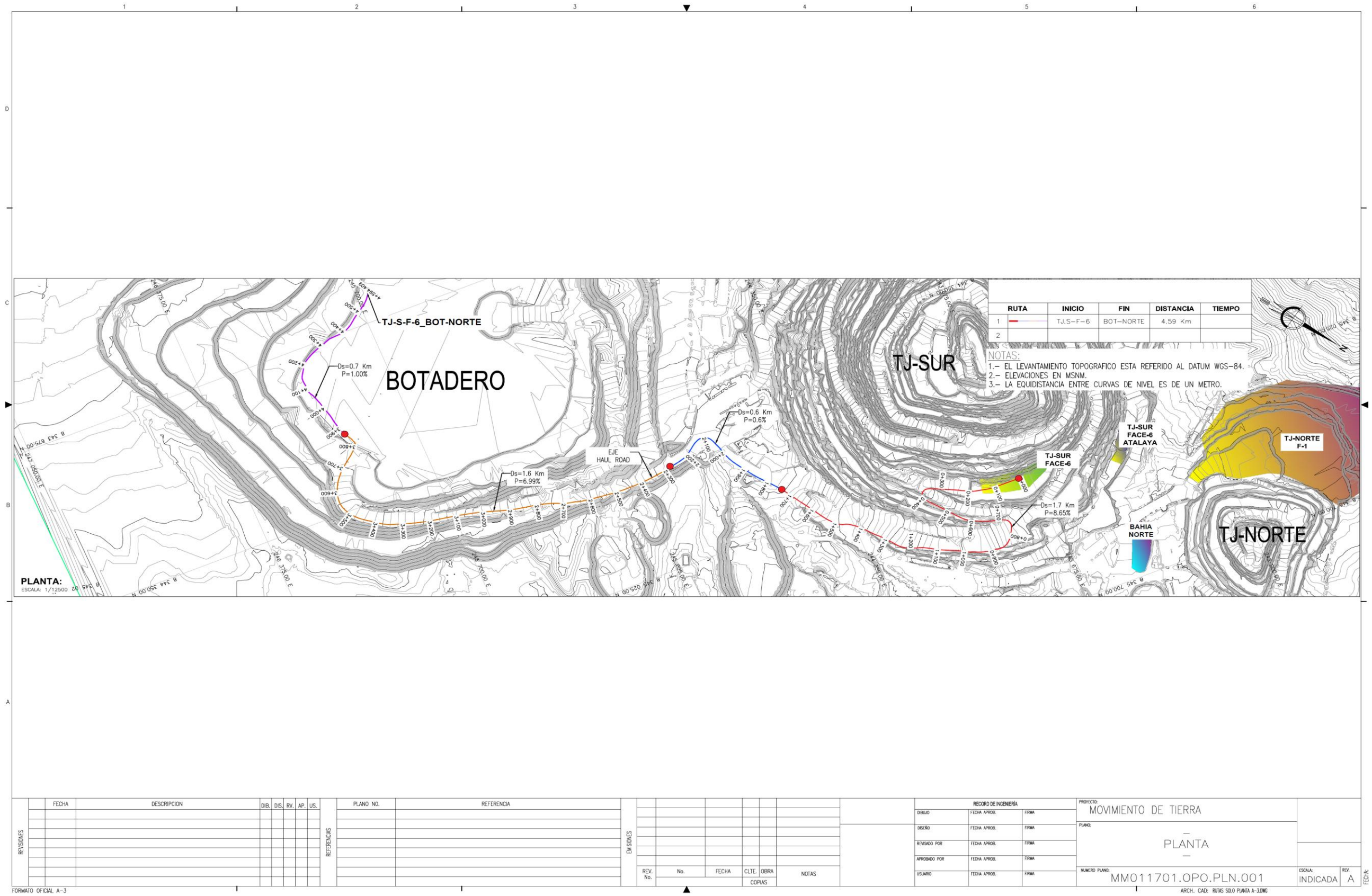
Hora de inicio							
Hora de finalización							

Movimientos en el Frente de Carguío								Tramo Camión Cargado						Movimientos en el Frente de Descarga						Tramo Camión Vació						Tiempo Total del Ciclo		
Llegada		Cuadrar		Cargar		Hora de Salida	Total de tiempo de carguío	Tramo 01		Tramo 02		Tramo 03		Llegada		Cuadrar		Descarga		Hora de Salida	Total de tiempo de descarga	Tramo 01		Tramo 02			Tramo 03	
Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de inicio	Tiempo de cuadrado	Hora de inicio	Tiempo de carga			Hora de inicio	Tiempo tramo 01	Hora de inicio	Tiempo tramo 02	Hora de inicio	Tiempo tramo 03	Hora de llegada	Tiempo de espera	Hora de inicio	Tiempo de cuadrado	Hora de inicio	Tiempo de descarga			Hora de inicio	Tiempo tramo 01	Hora de inicio	Tiempo tramo 02		Hora de inicio	Tiempo tramo 03
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												
6																												
7																												
8																												
9																												
10																												

Observaciones

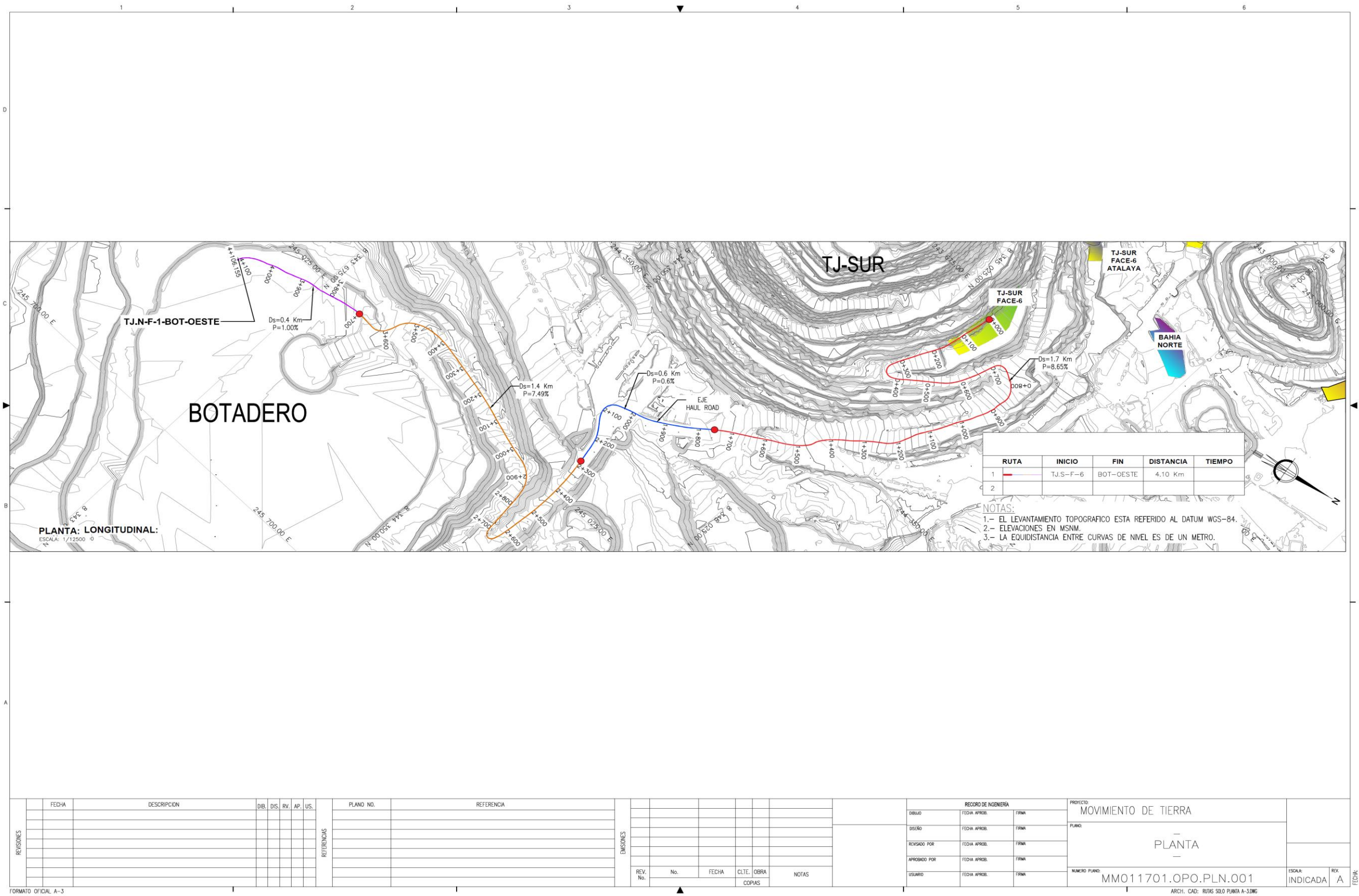
ANEXO B

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO SUR FASE 06 A BOTADERO NORTE



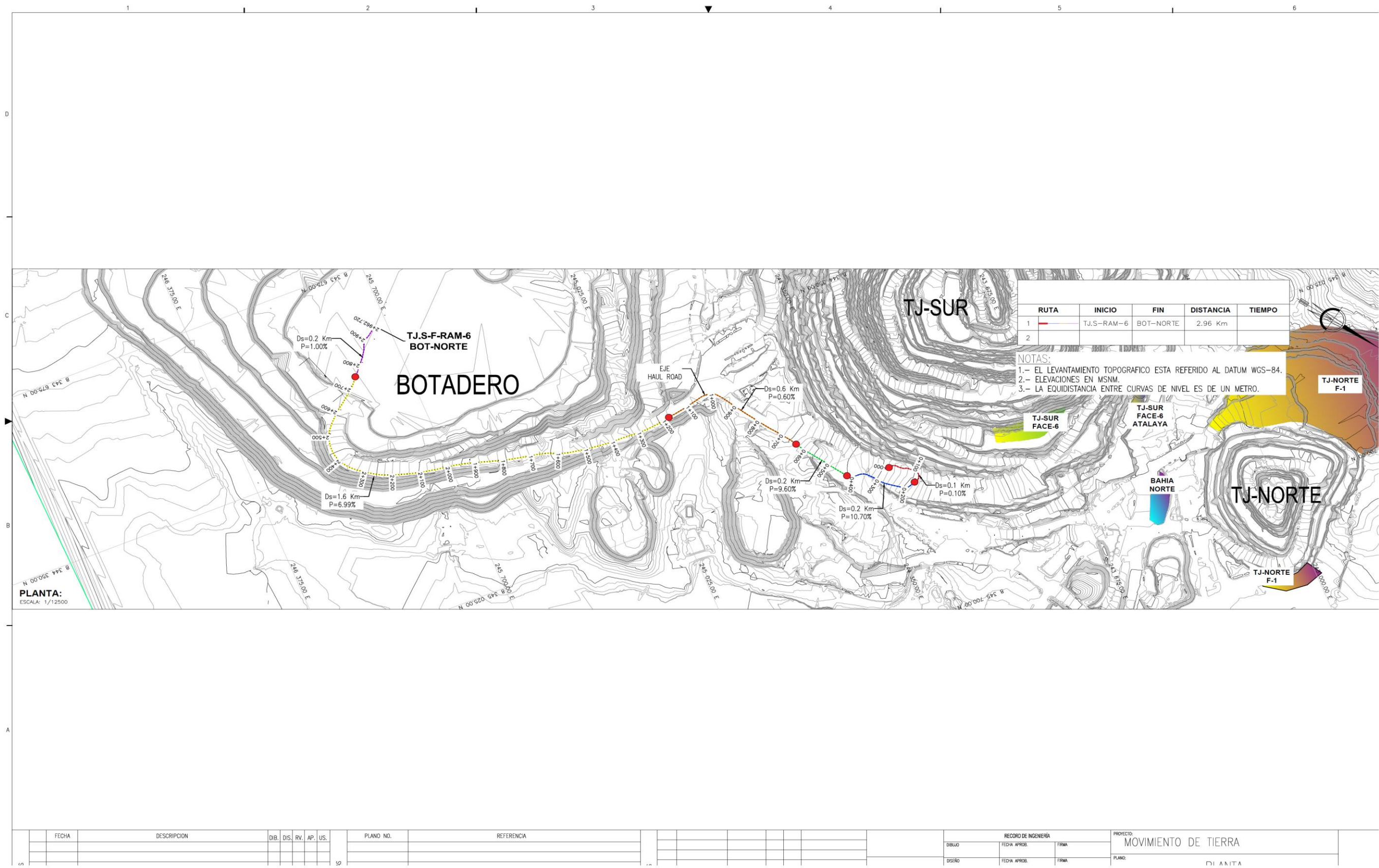
ANEXO C

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO SUR FASE 06 A BOTADERO OESTE



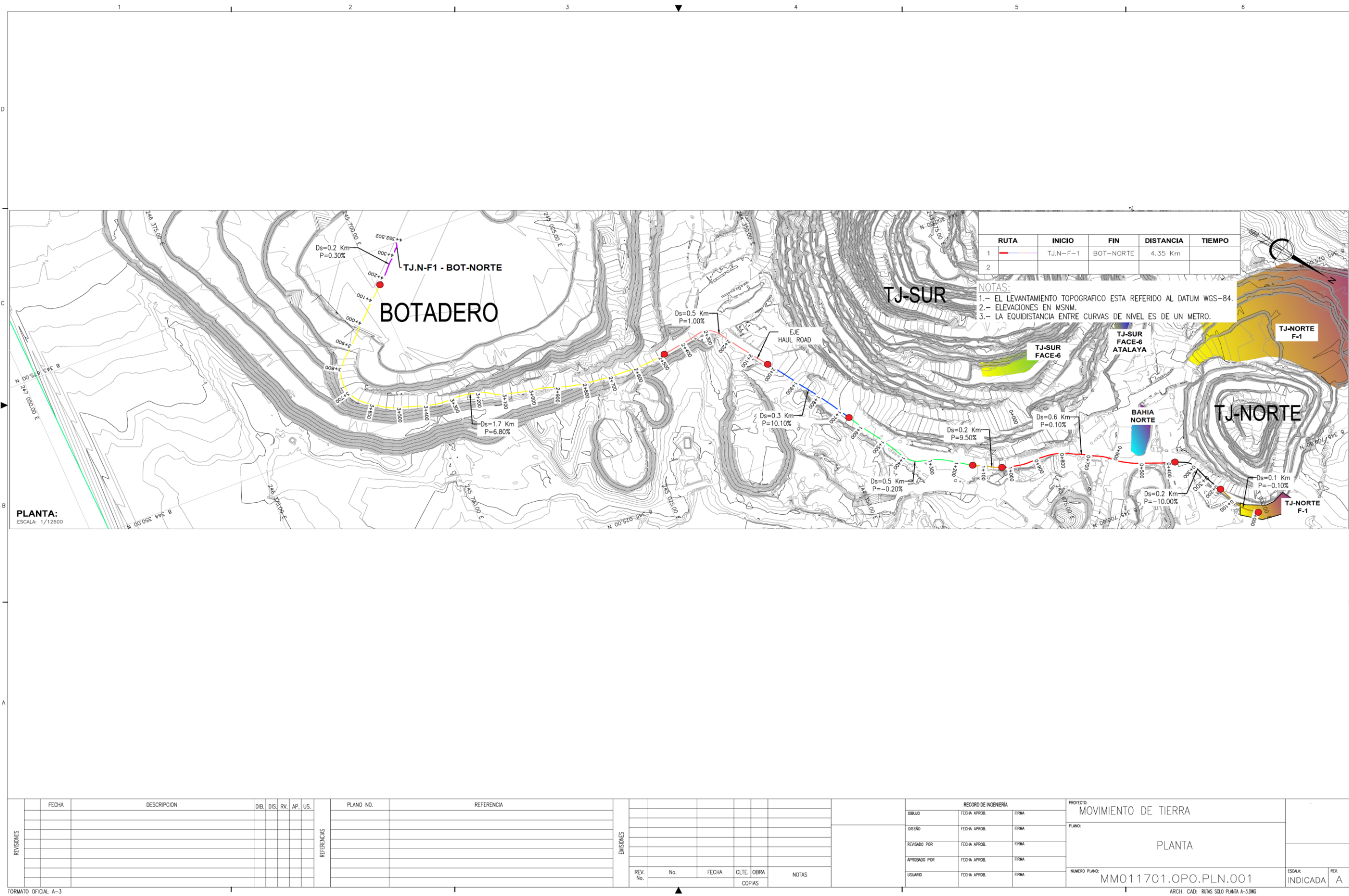
ANEXO D

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO SUR RAMPA 06 A BOTADERO NORTE



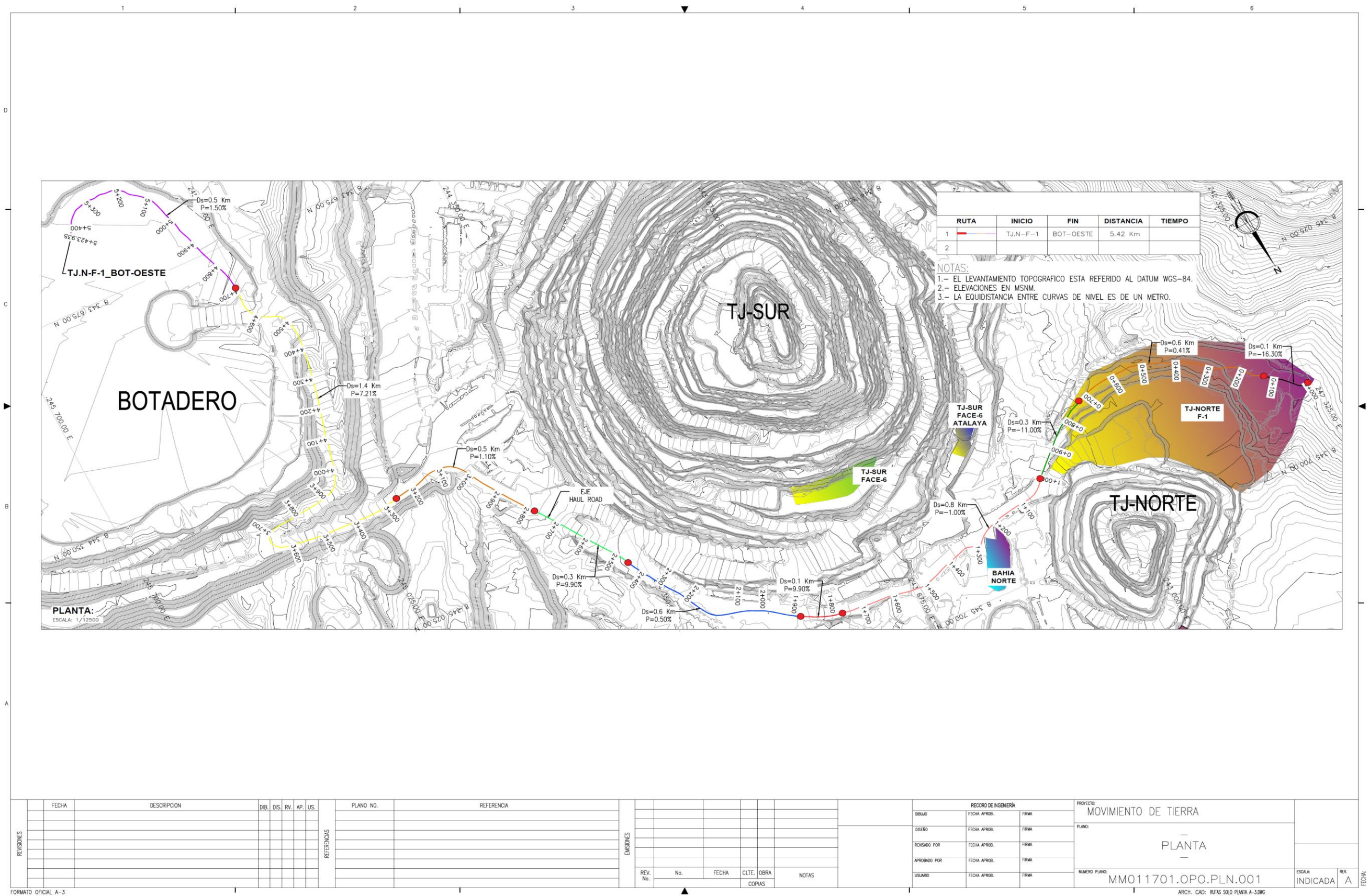
ANEXO E

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO NORTE NIVEL 3990 A BOTADERO NORTE



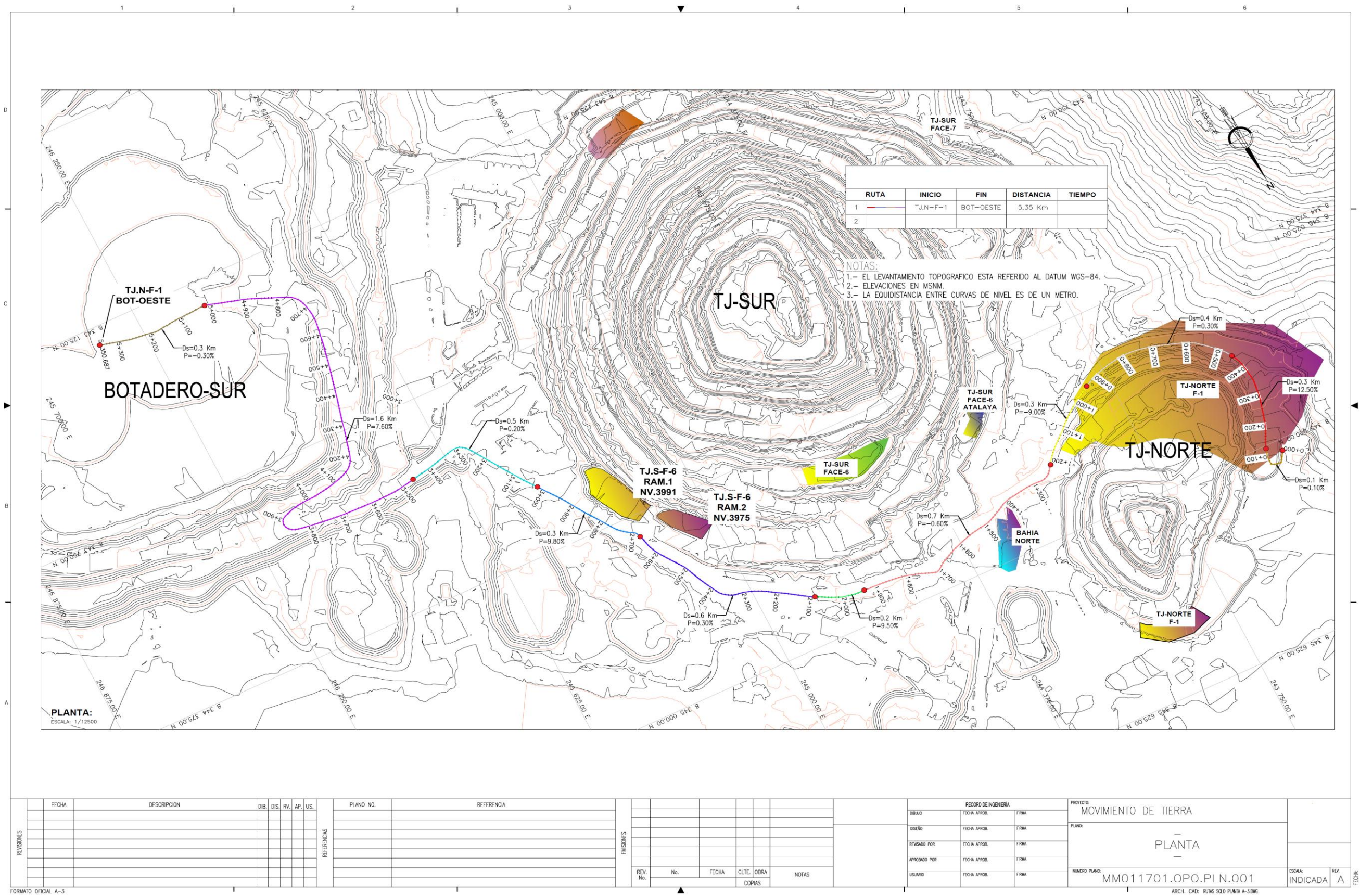
ANEXO F

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO NORTE NIVEL 3990 A BOTADERO OESTE



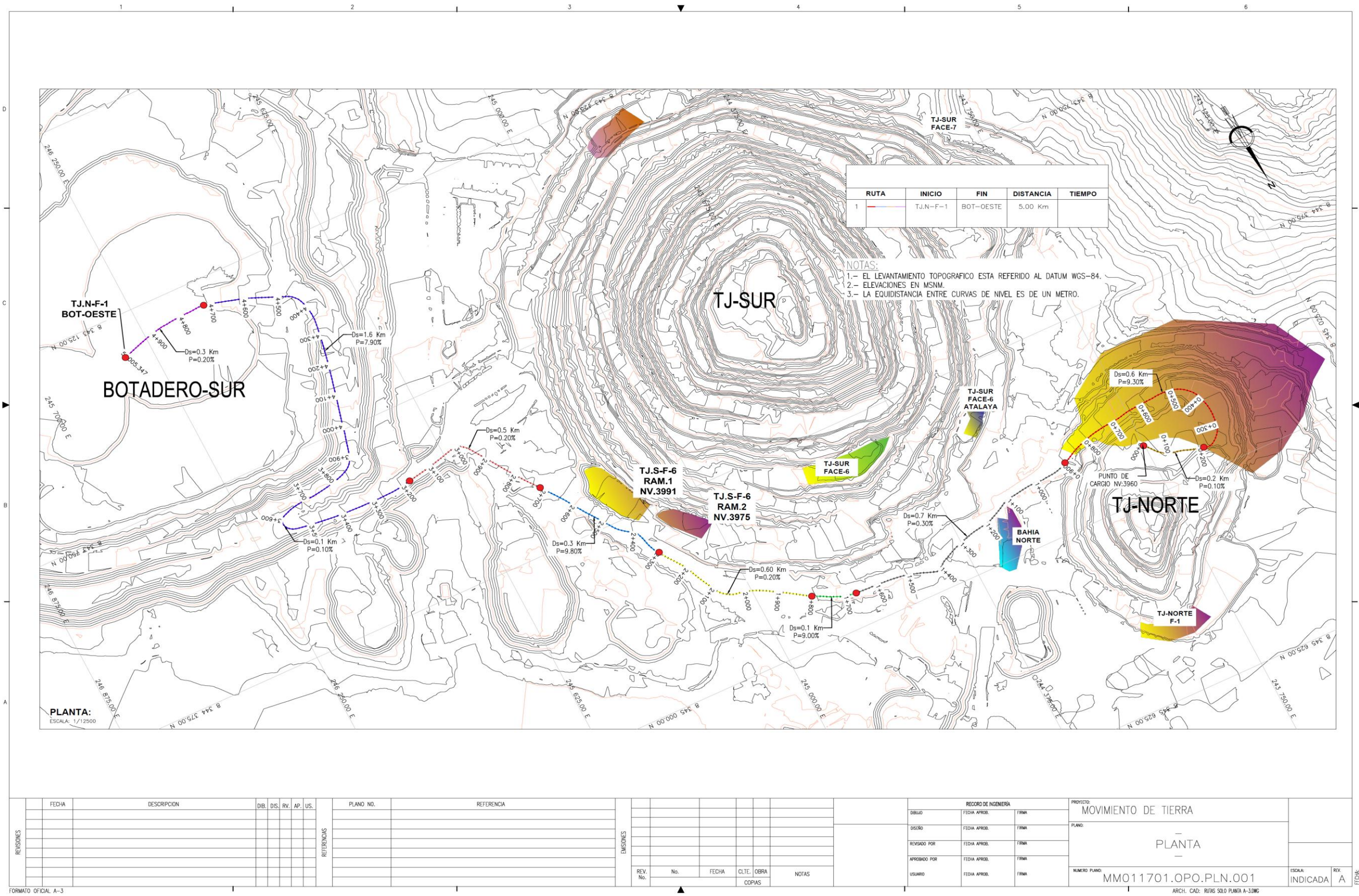
ANEXO G

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO NORTE NIVEL 3975 A BOTADERO OESTE



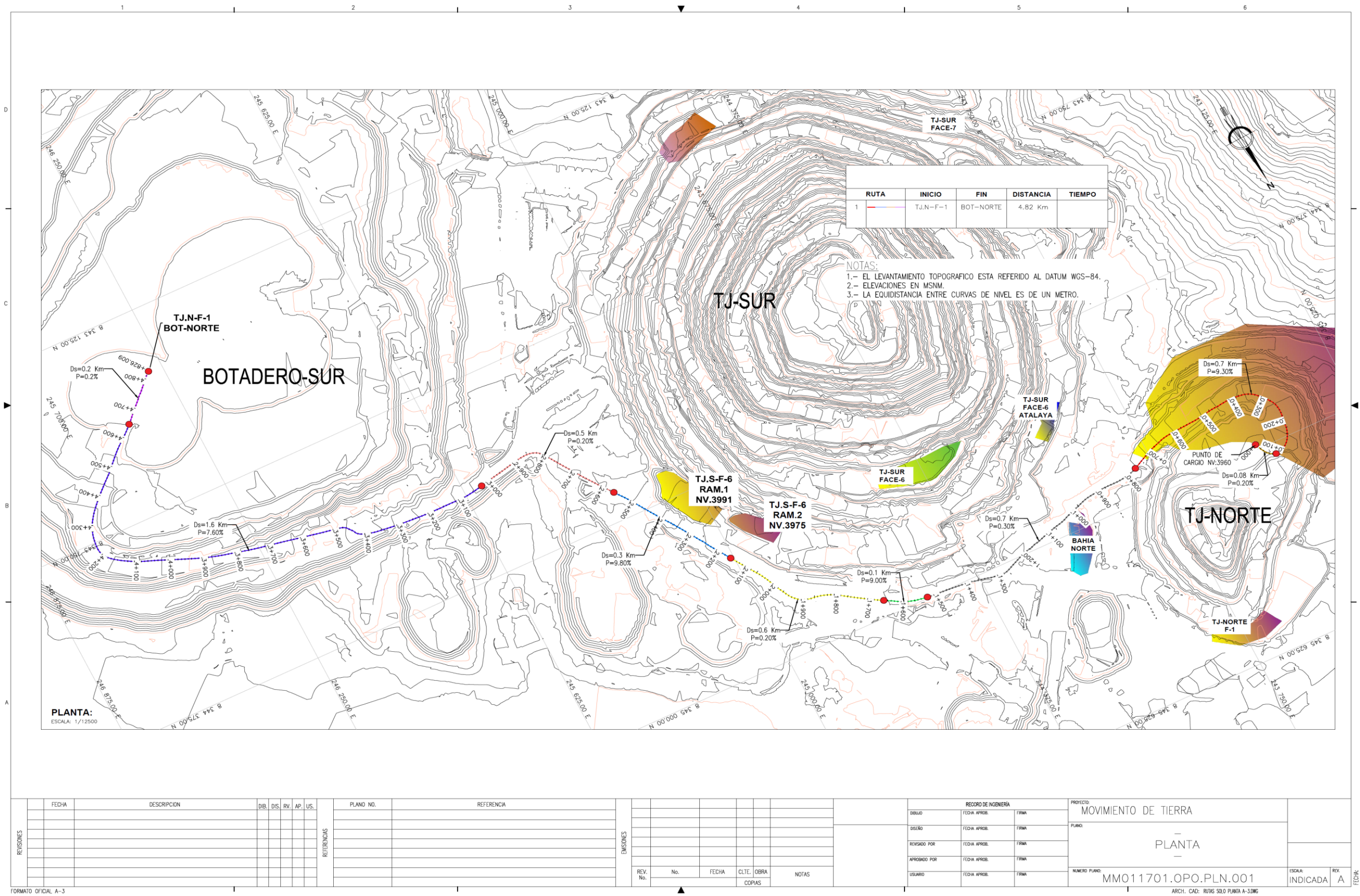
ANEXO H

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO NORTE NIVEL 3960 A BOTADERO OESTE



ANEXO I

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO NORTE NIVEL 3960 A BOTADERO NORTE



ANEXO J

PLANO DE RUTA DE TRANSPORTE DE TAJO NORTE BAHÍA A BOTADERO NORTE

