

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TESIS

**“APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN A
LAS OPERACIONES MINERAS UNITARIAS DE CARGUÍO Y
ACARREO EN TAJOS ABIERTOS”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

**ELABORADO POR
EDER GUSTAVO TOMAIRO PROLEON**

**ASESOR
DR. ISAURO CARLOS AGREDA TURRIATE**

LIMA-PERU

2018

DEDICATORIA:

A mis padres (Victoria Proleón y Ricardo Tomairo) que se esforzaron para lograr que sus hijos alcancen un mejor nivel de vida en forma integral.

AGRADECIMIENTO.

A Dios por sobre todas las cosas.

A la Universidad Nacional de Ingeniería.

Mi profundo agradecimiento a todos los profesores que contribuyeron a mi formación profesional.

RESUMEN.

Como bien se sabe, en cualquier operación minera el sistema de acarreo está ubicado entre los sistemas de carguío y descarga. Los sistemas de acarreos efectivos y eficientes pueden ser desarrollados a través de un detallado proceso; tomando en cuenta todas las variables que intervienen en estas dos operaciones mineras unitarias binomiales.

Para dar solución a uno de los casos-estudio, se ha usado la simulación de Montecarlo y se ha podido observar la potencialidad que tiene el uso de números aleatorios, hace que los resultados obtenidos serán los más representativos posibles.

Por lo tanto, se sugiere que los estudiantes de todas las especialidades estudien y apliquen la ciencia de las ciencias que es la investigación de operaciones.

ABSTRACT.

It is very known that in any mining operation the hauling system is located between the loading and dumping systems. On the other hand, effective and efficient hauling systems can be developed taken into account all the variables involved in the two mining operations.

To solve one of the cases-study Montecarlo simulation and random numbers have been used. The result obtained have been very representatives and importants.

Therefore, it is suggested that the students of all the specialities should study and apply the science of the sciences that is the investigation of operations.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: GENERALIDADES.	3
1.1 Introducción.	3
1.2 Origen de la investigación de operaciones.	5
1.3 Definición.	7
1.4 Tipos de decisiones y sus elementos constituyentes.	8
1.4.1 Decisiones bajo certeza.	8
1.4.2 Decisiones estáticas.	9
1.4.3 Decisiones donde el oponente es la naturaleza.	10
1.5 Metodología de la investigación de operaciones.	10
1.5.1 Clasificación de la investigación de operaciones.	12
1.5.1.1 Investigación científica.	12
1.5.1.2 Investigación aplicada.	13
1.6 Modelos matemáticos que usa la investigación de operaciones.	13
1.7 Principales características de la investigación de operaciones.	14
1.8 Clasificación de los modelos matemáticos.	16

1.8.1 Modelo determinísticos.	16
1.8.2 Modelo estocásticos.	17
1.8.3 Modelo competitivos.	18
1.9 Procedimientos para resolver un modelo matemático.	19
1.10 Importancia de la investigación de operaciones y de los minerales en el mundo.	21
1.11 Antecedentes referenciales	23
1.12 Planeamiento del problema	24
1.13 Objetivos.	25
1.13.1 Generales.	25
1.13.2 Específicos.	25
1.14 Hipótesis	26
1.14.1 General	26
1.14.2 Especifica	26
CAPITULO II: MARCO TEORICO.	27
2.1 Minería a tajo abierto.	27
2.2 Principales productos de la producción minera.	29
2.2.1 Cobre y Molibdeno.	30
2.2.2 Oro y Plata.	33
2.2.3 Zinc y Plomo.	34
2.2.4 Hierro y Estaño.	35
2.3 Estadísticas de Producción de metales.	35

2.4	Análisis de estadísticas de producción de metales y no metales.	41
2.5	Macizos rocosos en tajos abiertos.	45
2.5.1	Características físico-mecánicas del macizo rocoso.	45
2.5.2	Fragmentación del macizo rocoso.	47
2.5.3	Factor de esponjamiento (swell factor).	48
CAPITULO III: EQUIPOS MINEROS USADOS PARA MINERIA		
A TAJOS ABIERTOS.		
3.1	Introducción.	50
3.2	Equipos primarios.	52
3.2.1	Perforadoras.	53
3.2.2	Palas.	61
3.2.3	Camiones.	66
3.3	Equipos secundarios.	71
3.3.1	Cargadores frontales.	71
3.3.2	Rodillos.	72
3.3.3	Tractores.	73
3.3.4	Motoniveladoras.	75
3.3.5	Cisterna de agua.	76
3.4	Eficiencia operacional de los equipos mineros.	77
3.4.1	Eficiencia o utilización.	78
3.4.2	Variables de operación.	80

3.4.3	Disponibilidad mecánica.	81
3.4.4	Disponibilidad física.	82
3.4.5	Porcentaje de utilización.	82
3.4.6	Horas netas de operación/guardia.	82
3.5	Aplicación de un caso práctico.	83
CAPITULO IV: MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN.		85
4.1	Introducción.	85
4.2	Origen.	87
4.3	Definición.	90
4.4	Principales características.	93
4.5	Clasificación general de los modelos de simulación.	97
4.5.1	Modelos continuos.	97
4.5.2	Modelos Determinísticos.	98
4.5.3	Modelos Estocásticos.	99
4.5.4	Modelos discretos.	100
4.5.5	Modelos Estáticos.	101
4.5.6	Modelos Dinámicos.	101
4.5.7	Modelos a Escala.	102
4.6	Campos de aplicación de la simulación.	103
4.6.1	La NASA.	103
4.6.2	La agricultura.	104
4.6.3	El comercio.	105

4.6.4	Las comunicaciones.	105
4.6.5	La electrónica.	105
4.6.6	La estadística.	106
4.6.7	Capacitación de personal.	106
4.6.8	La energía.	106
4.6.9	La medicina.	107
4.6.10	La minería.	108
4.6.11	Sistemas de transporte.	109
4.6.12	Procesos de manufacturas	110
4.7	Estructura básica de un modelo de simulación.	111
4.7.1	Formulación del problema.	111
4.7.2	Recolección de datos.	111
4.7.3	Construir y verificar el programa del modelo por la computadora.	112
4.7.4	Ejecución de pruebas.	112
4.7.5	Validación del modelo.	112
4.7.6	Diseño de los experimentos de simulación.	113
4.7.7	Ejecución de los experimentos de simulación.	113
4.7.8	Análisis de resultados e implementación en campo.	114
4.8	Condiciones que debe reunir un modelo de simulación.	114
4.9	Formas para implementar un modelo de simulación.	115
4.10	Generación de números aleatorios.	116

CAPITULO V: CASOS-ESTUDIO APLICANDO EL MODELO	
MATEMATICO DE SIMULACION.	
	118
5.1	Introducción.
	118
5.2	Caso-estudio N° 01: Aplicando simulación al sistema minero
	pala-camión.
	120
5.2.1	Formulación del problema.
	122
5.2.2	Criterios para la selección de la mejor alternativa.
	125
5.2.3	Resultados.
	128
5.2.4	Evaluación de resultados.
	129
5.3	Caso-estudio N° 02: Simulación de Montecarlo aplicada al
	sistema de acarreo: Pala-camión.
	130
5.3.1	Introducción.
	130
5.3.2	Datos de campo.
	130
5.3.3	Criterios a considerar.
	132
5.3.4	Proceso de simulación.
	133
5.3.5	Simulación de un turno de 8 horas de trabajo.
	137
5.3.6	Simulación de un turno de 12 horas de trabajo.
	140
5.3.7	Evaluación de resultados.
	148
CAPITULO VI: INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	
DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS	
CASOS-ESTUDIO.	
	150
6.1	Introducción.
	150

6.2	Contrastación de la hipótesis.	150
	CONCLUSIONES.	155
	RECOMENDACIONES.	156
	BIBLIOGRAFÍA.	158
	ANEXO	159

INDICE DE FIGURAS.

	Página
Figura 1,1: Parámetros a tener en cuenta para solucionar cualquier problema.	4
Figura 1,2: Impacto de la investigación de operaciones.	6
Figura 1,3: Conceptualización de la investigación de operaciones.	8
Figura 1,4: Decisiones bajo certeza.	9
Figura 1,5: Decisiones estáticas.	9
Figura 1,6: Decisiones donde el oponente es la naturaleza.	10
Figura 1,7: Diagrama conceptual de la metodología de la I. O.	11
Figura 1,8: Diagrama conceptual para dar solución a un problema cualquiera.	11
Figura 1,9: Fases para construir un modelo.	12
Figura 1,10: Modelos matemáticos que usa la I. O.	14
Figura 1,11: Disciplinas para trabajar en equipo.	16
Figura 1,13: Tiempo de carguío y acarreo.	17
Figura 1,14 Macizo rocoso, sus características físico-mecánicas son aleatorias.	18
Figura 1,15: Modelo competitivo.	18
Figura 1,16: Industria minera como “madre de todas Las industrias”	22
Figura 1,17: Influencia de investigación de operaciones en el mundo.	23

Figura 2,1: Tajo abierto en operaciones.	29
Figura 2,2: Estructura de exportaciones peruanas enero-agosto 2016	40
Figura 2,3: Fragmentación del macizo rocoso.	48
Figura 2,4: Factor de esponjamiento del macizo rocoso.	49
Figura 3,1: Operación binomial de carguío y acarreo.	51
Figura 3,2: Variables que se debe tener en cuenta para la selección de equipos.	52
Figura 3,3: Perforación rotativa (cortesía Southern Perú).	58
Figura 3,4: Barrenos para las perforadoras rotativas.	59
Figura 3,5: Tipos de brocas tricónicas para perforadoras rotativas	59
Figura 3,6: Evacuación de los detritus formados en el momento de la perforación de los taladros.	61
Figura 3,7: Pala eléctrica en pleno trabajo.	62
Figura 3,8: Retroexcavadora en plena operación de acarreo	63
Figura 3,9: Pala hidráulica cargando material.	65
Figura 3,10: Pala neumática en pleno trabajo.	66
Figura 3,11: Distribución de camiones para ser cargados por palas	68
Figura 3,12: Gradiente de una rampa para camiones mineros	70
Figura 3,13: Cargador frontal en pleno trabajo.	72
Figura 3,14: Rodillo trabajando.	72
Figura 3,15: Tractor montado sobre neumáticos apilando material	73
Figura 3,16: Tractor montado sobre orugas apilando material	74
Figura 3,17: Motoniveladora en operación	75

Figura 3,18: Camión cisterna regando la operación minera.	76
Figura 4,1: Departamento de investigación de operaciones.	88
Figura 4,2: Simulación de la operación de un sistema pala-camión	91
Figura 4,3: Proceso iterativo de modelación, diseño y simulación	96
Figura 4,4: Macizo rocoso con sus características aleatorias	98
Figura 4,5: Simulador para manejar un equipo en la mina	99
Figura 4,6: Simulación de un yacimiento mineralizado	100
Figura 4,7: R red de telefónica.	101
Figura 4,8: Modelos dinámicos	102
Figura 4,9: Modelo a escala.	103
Figura 4,10: Trabajo típico de la NASA.	104
Figura 4,11: Simulación de carguío y acarreo.	109
Figura 4.12: Realidad y la solución al caos del transporte público de Lima.	110
Figura 4,13: Estructura de un modelo de simulación.	111
Figura 4,14: Estructura del modelo de simulación.	114
Figura 4,14: Sistema carguío y acarreo en un tajo abierto	117
Figura 5,1: Aplicación del modelo simulación a la minera	119
Figura 5,2: Camiones haciendo cola.	125
Figura 5,3: Número excesivo de camiones asignados a una pala	126
Figura 5,4: Número adecuado de camiones para una pala	127
Figura 5,5: Diagrama conceptual para solucionar el caso-estudio 2	133

INDICE DE TABLAS.

	Página
Tabla 2,1: Producción de principales metales de minas peruanas	30
Tabla 2,2: Producción de los metales del 2006 al 2015	36
Tabla 2,3: Principales productos de la producción minero metálica	38
Tabla 2,4: Estructura de las exportaciones peruanas US\$ millones	40
Tabla 2,5: Evolución histórica de precios de los principales metales	42
Tabla 2,6: Volumen de producción no metálica en Tm 2007 al 2012	43
Tabla 2,7: Precio promedio anual de los principales metales	44
Tabla 3,1: Diámetros de brocas disponibles en el mercado	60
Tabla 3,2: Escala para factor de utilización.	79
Tabla 3,3: Datos de perforadora bucyrus erie.	81
Tabla 5,1: Tiempos usados en el caso estudio 01.	123
Tabla 5,2: Resultados generales.	128
Tabla 5,3: Componentes de uno de los block mineralizados	131
Tabla 5,4: Tiempo de viaje a cada uno de los destinos.	131
Tabla 5,5: Distribución de probabilidades para demanda aleatoria	134
Tabla 5,6: Tiempos de ida y retorno.	135
Tabla 5,7: Generación de números aleatorios.	136
Tabla 5,8: Viajes del primer bloque en el turno de 8 horas	137
Tabla 5,9: Viajes del segundo bloque en el turno de 8 horas	138
Tabla 5,10: Viajes en el turno de 12 horas.	141

INTRODUCCION

En el sector de la minería subterránea o superficial se invierten grandes capitales; para lo cual los accionistas o inversionistas de esos capitales deben tener la plena seguridad que sus capitales están bien invertidos y no correrán grandes riesgos; debiéndose asegurar y tener cierto grado de confiabilidad a través de los modelos matemáticos que usa la investigación de operaciones y la estabilidad de las políticas del estado.

Se debe enfatizar que ciertos modelos matemáticos que usa la investigación de operaciones son de optimización y otros no, solo ayudan a tomar decisiones adecuadas y oportunas, tal es así el modelo de simulación que se está aplicando en la presente tesis. Se reitera que, es fundamental que en la industria minero-metalúrgica se debe aplicar los modelos matemáticos en cada una de las operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total de minado, para lograr incrementar la producción y productividad y minimizar los costos operacionales. Como en la presente tesis se trata las operaciones mineras unitarias de carguío y acarreo en minas de tajos abiertos, es por ello que se ha seleccionado el modelo matemático de simulación o "systems

simulation”, cuya aplicación se observara en los dos casos-estudios que aquí se presentan (capítulo V). Así como su definición, clasificación, campos donde se aplica dicho modelo, etc.

Por otro lado, cabe mencionar la ciencia y desarrollo de la tecnología ha avanzado vertiginosamente, es por eso que también en la investigación de operaciones aplicada en este caso en la industria minera se hace uso de la ingeniería de sistemas; porque mediante el desarrollo de los softwares, se hace más fácil solucionar cualquier problema en un menor tiempo que hacerlo manualmente. En el Caso-estudio N° 01: Aplicando simulación al sistema minero pala-camión y el Caso-estudio N° 02: Simulación de Montecarlo aplicada al sistema de acarreo: Pala-camión. Para el primero se ha considerado 2 palas y seis camiones, observándose en la tabla N° 5.2 que la mejor alternativa es de operar con 8 por el menor costos CEP de US\$ 169.2 que esta representa. En cuanto al caso-estudio N° 02, se puede observar que el turno de 480 minutos (8 horas), solo el equipo de trabajo efectivamente 298.40 y existe un tiempo no productivo de 181.60 y una eficiencia de la pala de 0.622 en porcentajes seria de 62.2%. Respecto al turno simulado de 720 minutos (12 horas) el equipo trabajo efectivamente 555.8 y existe un tiempo no productivo de 164.20 y una eficiencia de la pala de 0.772 o su equivalencia 77.20%.

CAPITULO I: GENERALIDADES.

1.1 Introducción.

Se puede decir que, los cambios revolucionarios originaron gran aumento en la división de trabajo y la separación de las responsabilidades administrativas en las diferentes organizaciones. Sin embargo, esta revolución creó nuevos problemas que ocurren hasta la fecha en muchas empresas de cualquier rubro y/o actividad económica. Uno de estos problemas es la tendencia de muchos de los componentes a convertirse en imperios relativamente autónomos, con sus propias metas y sistemas de valores. Este tipo de problemas, y la necesidad de encontrar la mejor forma de resolverlos, proporcionaron el surgimiento de la investigación de operaciones.

Entonces, usando la investigación de operaciones se puede determinar la mejor solución para un problema determinado con las restricciones de recursos que casi siempre son limitados. En la investigación de operaciones se usa modelos matemáticos, de los cuales se puede elegir cualquiera de ellos que permita tomar

una decisión a la hora de resolver un problema cualquiera sea la necesidad.

En cualquier ámbito de la vida y/o rama del ser humano se deben tomar decisiones de distinta índole, y la forma en cómo éstas decisiones se toman se pueden basar en una perspectiva cualitativa o cuantitativa. En la actualidad donde la complejidad de los problemas es ascendente, por las megas-tendencias de la globalización, la competitividad, la economía de libre mercado, la Investigación de Operaciones ha permitido abordar estos temas de forma eficiente aplicando los modelos matemáticos, los cuales responden de manera adecuada y oportuna a los diversos problemas que se presentan en la vida diaria y en las industrias, superando ampliamente los procedimientos cualitativos.

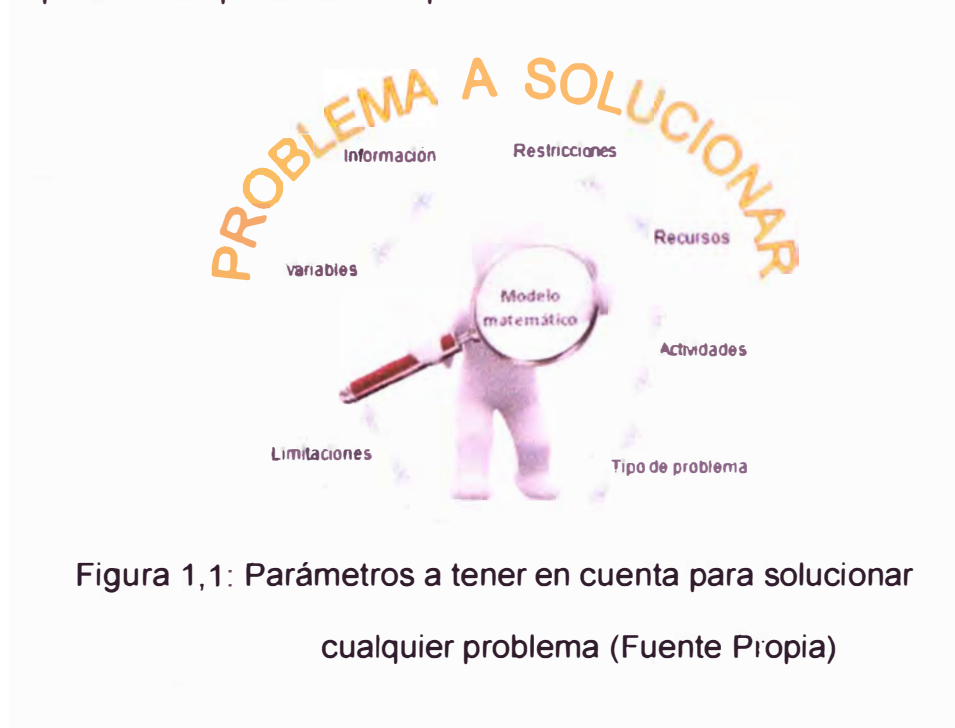


Figura 1,1: Parámetros a tener en cuenta para solucionar cualquier problema (Fuente Propia)

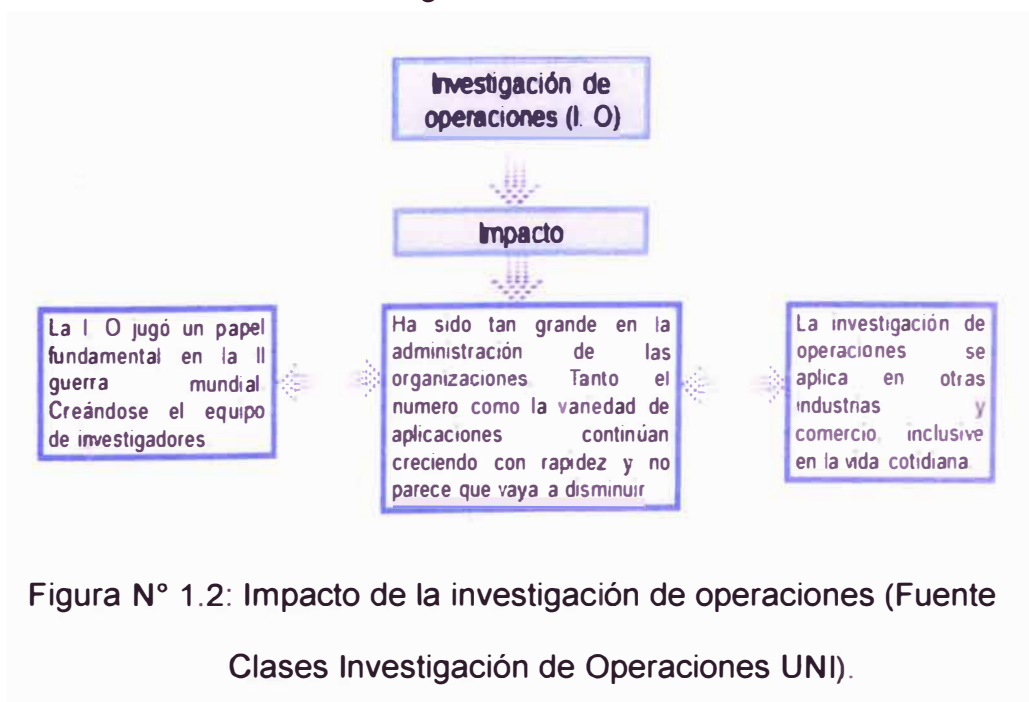
1.2 Origen de la investigación de operaciones

Como se sabe, los orígenes de la Investigación de Operaciones datan de varias décadas atrás, cuando comenzaron a hacer los primeros intentos de aplicar enfoques científicos en las gerencias de las diferentes organizaciones. Sin embargo, el comienzo de la ciencia de la Investigación de Operaciones ha sido generalmente atribuido a las actividades militares al iniciarse la II Guerra Mundial. Porque en esta guerra; había una necesidad urgente de asignar algunos recursos escasos a varias operaciones militares y a todas las respectivas actividades dentro de cada operación de la manera más efectiva. Fue por esta razón que los altos mandos de los ejércitos ingleses y americanos llamaron a un gran número de científicos, para aplicar un enfoque científico para hacer frente a esta y a otras operaciones estratégicas.

Los altos mandos de los ejércitos ingleses y americanos llamaron a un gran número de científicos, quienes fueron los primeros equipos de trabajo que comenzaron a aplicar la Investigación de operación para solucionar problemas de estrategia militar en este caso. Los éxitos obtenidos en operaciones militares mediante la aplicación de la naciente ciencia de la investigación de operaciones, atrajo la atención de todo el mundo y así mismo el

interés por conocer acerca de este nuevo campo del saber humano.

Como se sabe, después de la segunda guerra mundial la revolución industrial comenzaba a abrirse paso y junto con ella, la complejidad, la especialización en las organizaciones comenzaban a aparecer para una gran cantidad de personas incluyendo empresarios, consultores, etc., etc. En 1951, ya se usaba con grandes resultados, tanto en Inglaterra como en USA desde entonces la Investigación de Operaciones se ha desarrollado y aplicado en todas las ramas del saber humano. Así como también, el uso de los metales es usado en la vida cotidiana de cada ser humano; y muchas veces por ignorancia se oponen a la industria extractiva minero-metalúrgica.



1.3 Definición.

En cuanto a la definición de investigación de operaciones, existen varias, pero a continuación se mencionarán las más importantes:

- “Es la aplicación de métodos, técnicas y procedimientos científicos a los problemas que conforman las operaciones de un sistema; de tal manera de proveer a los encargados del control del sistema y/o a la alta gerencia con soluciones óptimas para dichos problemas”.
- “La investigación de operaciones o investigación operativa o investigación operacional (conocida también como teoría de la toma de decisiones o programación matemática) (I.O.) es una disciplina moderna que consiste en el uso de modelos matemáticos, estadísticos y algoritmos con objeto de realizar un proceso de toma de decisiones. Frecuentemente trata del estudio de complejos sistemas reales, con la finalidad de mejorar (u optimizar) su funcionamiento. La investigación de operaciones permite el análisis de la toma de decisiones teniendo en cuenta la escasez de recursos, para determinar cómo se puede optimizar un objetivo definido, como la maximización de los beneficios o la minimización de costos”.
- “Es la toma de decisiones sobre una base científica acerca de los problemas que puedan presentarse en las operaciones que conforman sistemas industriales u organizacionales”.

- “Es ganar guerras sin realmente pelearlas”, etc.

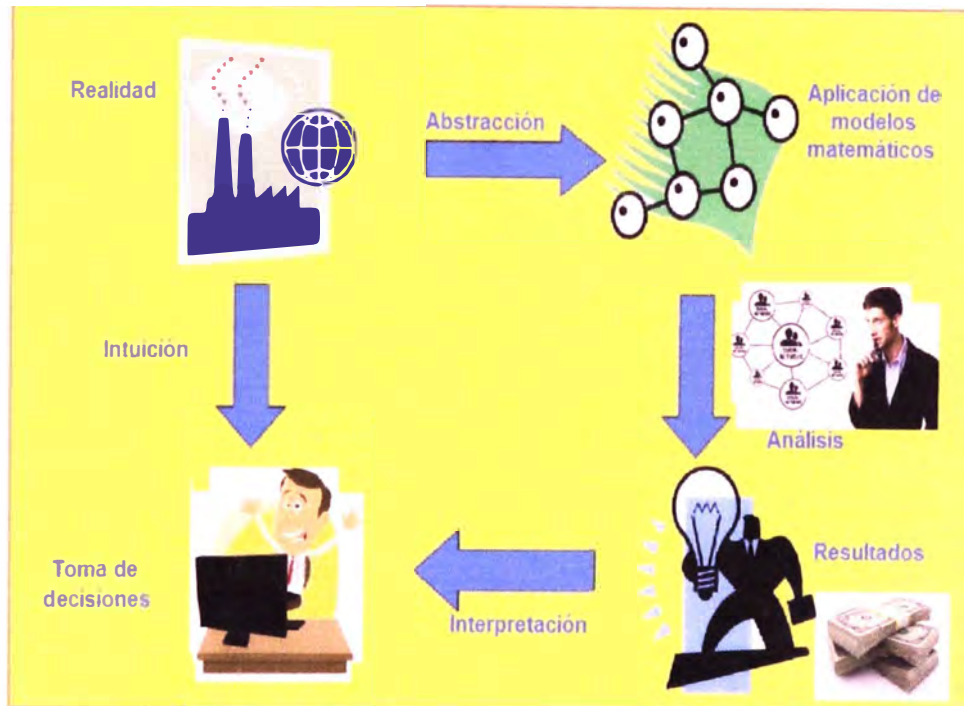


Figura 1,3: Conceptualización de la investigación de operaciones

(Fuente <https://profememo.milaulas.com/>)

1.4 Tipos de decisiones y sus elementos constituyentes.

1.4.1 Decisiones bajo certeza: Todos los hechos son conocidos con seguridad Vs. la incertidumbre el evento que ocurrirá no es conocido pero se le puede asignar una probabilidad o posibilidad a su ocurrencia.



Figura N° 1.4: Decisiones bajo certeza (Fuente propia).

1.4.2 Decisiones estáticas: Decisiones que se toman una y solo una vez Vs. decisiones dinámicas en donde se toman una secuencia de decisiones interrelacionadas, simultáneamente o sobre varios periodos de tiempo.



Figura 1,5: Decisiones estáticas (Fuente propia)

1.4.3 Decisiones donde el oponente es la naturaleza: El estado del tiempo, el estado de la economía o un oponente que piensa (racional) desarrollo de una política nacional energética donde se tiene que considerar muchos factores.



Figura 1,6: Decisiones donde el oponente es la naturaleza (Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

1.5 Metodología de la investigación de operaciones.

Se tiene por definición de Investigación de Operaciones que puede mencionar que la metodología que esta ciencia emplea para solucionar todas y cada uno de los problemas del mundo industrial moderno, es la científica; la cual se muestra mediante los diagramas conceptuales siguientes, y esta puede resumirse en las siguientes etapas o fases.

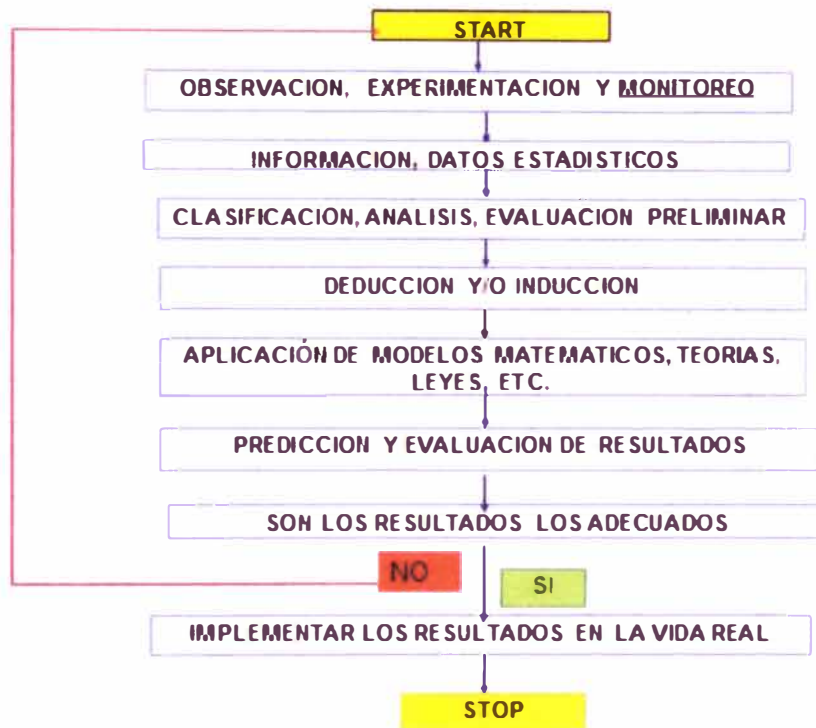


Figura 1,7: Diagrama conceptual de la metodología de la investigación de operaciones (Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

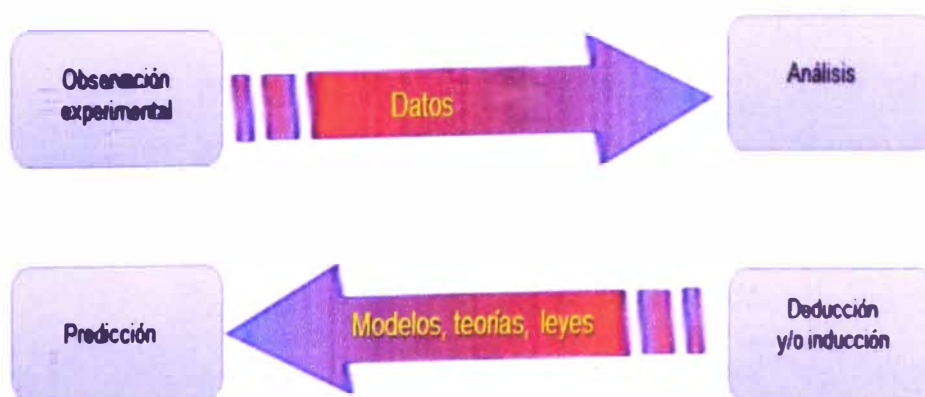


Figura 1,8: Diagrama conceptual para dar solución a un problema cualquiera (Fuente propia).

Dependiendo de la complejidad del problema, generalmente la construcción de un modelo matemático es la siguiente:

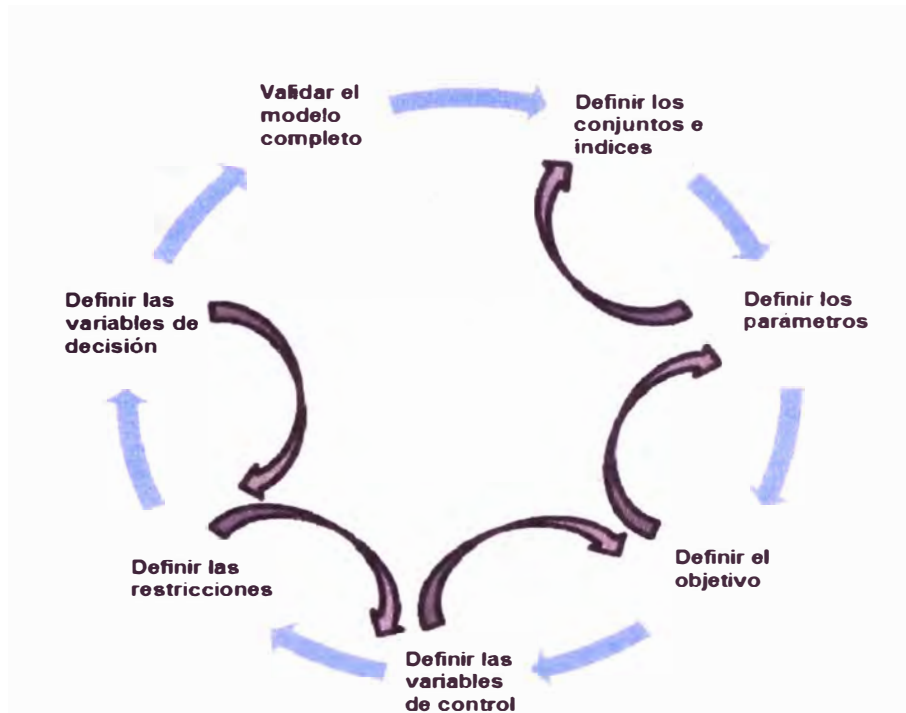


Figura 1,9: Fases para construir un modelo (Fuente propia)

1.5.1 Clasificación de la investigación de operaciones

1.5.1.1 Investigación científica: La Investigación científica es el nombre general que obtiene el largo y complejo proceso en el cual los avances científicos son el resultado de la aplicación del método científico para resolver problemas o tratar de explicar determinadas observaciones.

1.5.1.2 Investigación aplicada: Es la utilización de los conocimientos en la práctica, para aplicarlos, en la mayoría de los casos, en provecho de cualquier rama del saber humano.

1.6 Modelos matemáticos que usa la investigación de operaciones.

Entre ellos se mencionan los siguientes:

- Análisis matemático
- Algebra lineal
- Programación matemática (lineal o no lineal)
- Probabilidades
- Procesos estocásticos
- Estadística (inferencial)
- Teoría de grafos
- Teoría de juegos
- Simulación
- Procesos Markovianos
- Programación Dinámica
- Teoría de Colas o Líneas de Espera (Q.T)
- Teoría de Decisiones (D.T)
- Análisis de Redes: PERT, CPM, (Network Análisis)
- Teoría de la Confiabilidad (R.T)

- Dinámica Industrial (I.D), etc.



Figura 1,10: Modelos matemáticos que usa la I. O (Fuente propia)

1.7 Principales características de la investigación de operaciones.

Entre las principales, se mencionan las siguientes:

- Usa métodos, modelos y procedimientos científicos para solucionar problemas que puedan presentarse en cualquier organización industrial.
- Debe proveer soluciones y/o información adecuada y confiable a los encargados de tomar decisiones y/o a la alta gerencia.

- Provee soluciones integrales para los problemas que puedan presentarse en las organizaciones industriales. Evitando de esta forma los conflictos de interés individualizados.
- Provee soluciones óptimas para todos y cada uno de los problemas que se presentan en todas las organizaciones industriales modernas que se encuentran operando en la actualidad a nivel mundial.
- La búsqueda del óptimo para todos y cada uno de los problemas, representa una característica muy importante de la ciencia de la Investigación de Operaciones.
- Obliga a trabajar en equipo para solucionar los diversos problemas a que se enfrentan las organizaciones industriales modernas. En otras palabras, el equipo de trabajo de Investigación de Operaciones debe estar conformado por personas de diferentes especialidades y habilidades. El número de participantes en el equipo de trabajo estará en función directa de la complejidad y tamaño del problema a resolverse.
- Usa modelos matemáticos, en otras palabras; la idea de representar una operación o sistema real cualquiera mediante un modelo matemático significa una característica muy importante de la Investigación de Operaciones. Como bien se sabe, los modelos matemáticos o conceptuales

relacionan las variables de un sistema real cualquiera en términos de ecuaciones y fórmulas matemáticas, etc.



Figura 1,11: Disciplinas para trabajar en equipo (Fuente propia)

1.8 Clasificación de los modelos matemáticos.

Con respecto a la función del origen de la información utilizada para construir los modelos pueden clasificarse de otras formas.

Pero en la investigación de operaciones, estos modelos matemáticos se clasifican en:

1.8.1 Modelo determinísticos: Son utilizados para representar sistemas cuyo estado varía con el factor tiempo. Todas las

variables limitantes están bajo el control directo de la gerencia.



Figura 1,13: El tiempo de carguío y acarreo (Fuente propia)

1.8.2 Modelo estocásticos: Son utilizados para representar sistemas cuyo estado es invariable a través del tiempo. Las variables limitantes no están bajo el control directo de la gerencia. Sujetas a condiciones aleatorias.



Figura 1,14: Macizo rocoso con características físico-mecánicas aleatorias (Fuente propia).

1.8.3 Modelo competitivo: En los modelos matemáticos de “JUEGOS” la acción de los resultados depende del comportamiento de dos o más oponentes. Minimizar la ventaja del oponente.



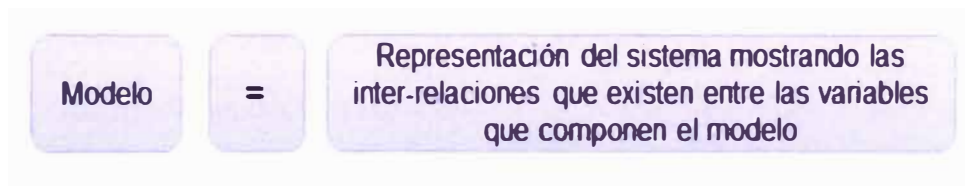
Figura 1,15: Modelo competitivo (Fuente Google laprensa)

1.9 Procedimientos para resolver un modelo matemático.

Analítico: Involucran soluciones explícitas

Numérico: Estos procedimientos usan algoritmos

Simulado: Consiste en procesar modelos matemáticos, sirve para estudiar el comportamiento del sistema en estudio. La elección del procedimiento de solución es función directa de la clase del modelo matemático formulado.



Respecto al número de variables que intervienen en la operación de un sistema a veces suele ser sumamente grande y por lo tanto, será siempre necesario, por razones de costo, al establecer el modelo, incluir en este solamente aquellos factores y/o variables que sean relevantes para el análisis respectivo.

Por otro lado, es importante hacer esta pregunta: ¿Cómo afectan la disponibilidad de los datos en la representación por medio de modelos?

- Modelos son poco prácticos, si no están respaldados por datos confiables.
- Si se distorsionan las estimaciones, la solución que se obtenga, pese a ser óptima en un sentido matemático, será de calidad inferior desde la perspectiva del sistema real.
- Cuando no se conozcan con certeza los datos, se debe determinar a través de las distribuciones de probabilidad, modificándose la estructura del modelo; dando origen a los modelos probabilísticos o estocásticos en contraste con los modelos determinísticos.

No todos los modelos matemáticos de la investigación de operaciones poseen algoritmos de solución que conlleven al nivel óptimo, para lo cual existen dos razones:

- a. Se puede demostrar que el algoritmo de solución conlleve al nivel óptimo, pero en el sentido teórico. La convergencia indica que hay un límite superior finito para el número de iteraciones, pero no indica cuán alto puede estar el límite. En los modelos matemáticos, el número de iteraciones es función de la eficiencia del algoritmo de solución y la estructura específica del modelo.

- b. La complejidad del modelo matemático puede hacer imposible idear un algoritmo de solución, en este caso el modelo se puede mantener in-factible en términos de cálculo, pero no garantiza optimizar la solución final.

1.10 Importancia de la investigación de operaciones y de los minerales en el mundo.

Como se sabe, la investigación de operaciones y los minerales actúan como un binomio, ambos dependen entre sí; y juegan un papel determinante en la evolución de la ciencia y la tecnología, y sobre todo en el confort de los seres humanos. Sin embargo, se debe enfatizar que la industria minera “es la madre de todas las industrias”, que sin los metales y sus aleaciones no existiría las demás industrias, así como también sin la investigación de operaciones “que es la ciencia de las ciencias” el hombre no hubiere llegado a la luna.



Figura 1,16: Industria minera “madre de todas las industrias”

(Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

Actualmente las empresas de cualquier rubro económico, ya sea de bienes y/o servicios se enfrentan a problemas de todo tipo, los cuales en algunos casos pueden poner en riesgo a la empresa, no sólo su estabilidad, sino también su permanencia en el mercado, por lo que deben de resolver dichos problemas en forma rápida y oportuna. En la mayoría de los casos estos problemas son complejos, debido al número de variables y por el alto grado de incertidumbre de la información que se obtenga.

Entonces, el hombre se ha visto en la necesidad de aplicar modelos matemáticos para dar solución a estos problemas, y uno

de esos modelos matemáticos es la simulación que da excelentes resultados.



Figura 1,17: Influencia de la investigación de operaciones en el mundo (Fuente propia)

1.11 Antecedentes referenciales

Como es sabido, el avance de la ciencia y la tecnología del mundo; y confort del hombre se debe a la explotación de minerales por métodos adecuados y el uso del ataque físico-químico al macizo rocoso y a la investigación de operaciones.

La investigación de operaciones, conocida también como “la ciencia de las ciencias” usa modelos matemáticos para optimizar recursos y resultados y otros modelos matemáticos para tomar decisiones oportunas y adecuadas.

Entonces, el modelo matemático que se ha usado en la presente tesis de investigación se denomina simulación, el cual no optimiza.

La presente tesis de investigación engloba los conceptos básicos de la investigación de operaciones y fundamentalmente el modelo matemático “systems simulation”. El cual, su uso es de imperiosa necesidad en estas operaciones mineras binomiales de carguío y acarreo en tajos abiertos.

1.12 Planteamiento del problema.

En la presente tesis de investigación, se plantea el problema principal, que se pretende resolver y demostrar las mejoras efectuadas, aplicando el modelo matemático llamado simulación en los casos-estudio en las operaciones mineras binomiales de carguío y acarreo en tajos abiertos; donde está en juego millones de dólares en la inversión de la flota de palas y camiones.

Si en todas las operaciones mineras unitarias se simulara, se obtendría información valiosa para tomar decisiones adecuadas y oportunas, y en otros casos para mejorar los procesos productivos correspondientes.

1.13 Objetivos

1.13.1 Generales.

- Consideraciones técnico-económicas en la reducción de los tiempos no productivos en las operaciones mineras unitarias de carguío y acarreo en el sistema pala-camión en los tajos abiertos usando el modelo matemático llamado simulación.

1.13.2 Específicos

- El resultado de estas dos operaciones mineras unitarias de carguío y acarreo permite reducir los costos operacionales.
- La FIGMM-UNI se involucren todos los profesores, alumnos conjuntamente con la empresa privada formando un equipo humano multidisciplinario para hacer investigación científica y aplicada.

1.14 Hipótesis

1.14.1 General.

Es posible la reducción de los tiempos de trabajo no productivos en el sistema pala-camión en los tajos abiertos de minera Southern Cooper usando el modelo matemático llamado simulación.

1.14.2 Especifica

- Aplicando el modelo matemático de simulación en las operaciones mineras unitarias de carguío y acarreo de minera Southern Copper; el resultado de estas permite reducir los costos operacionales, obteniéndose mayor rentabilidad para la empresa minera en (US\$/Tm) transportada.
- Podrá la FIGMM-UNI se involucrar a todos los profesores, alumnos y la empresa privada formando un equipo humano multidisciplinario para hacer investigación científica y aplicada. Cuyo resultado de estas investigaciones podrán ser implementadas en el campo y finalmente patentadas en INDECOPI.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 Minería a tajo abierto.

Se sabe que, el Perú ha sido y es tradicionalmente minero, el cual cuenta con un enorme potencial de minerales a lo ancho y largo del territorio. A nivel mundial y latinoamericano el Perú se ubica entre los primeros productores de diversos metales, (oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, telurio, entre otros), lo cual es reflejo no sólo de la abundancia de recursos y la capacidad de producción de la actividad minera peruana, sino de la estabilidad de las políticas económicas establecidas; aunque últimamente se puede enfatizar que no habido inversiones mineras por falta de liderazgo de los gobernantes de turno.

El Perú también tiene un gran potencial en minerales no-metálicos, conocidos como minerales industriales, tales como el mármol travertino, diatomita (primer productor de América del Sur), bentonita y boratos. En efecto, el Perú está entre los pocos países

en el mundo en los que se pueden encontrar depósitos de estos minerales.

Como se sabe, para llevar a cabo la explotación de un cuerpo mineralizado, se tiene dos métodos, tales como: Subterráneo y a tajo abierto. Para el caso, que es el tema de la tesis es el método de explotación a tajo abierto o también conocido como superficial, se selecciona este método cuando los yacimientos mineralizados son de gran tamaño, presentando diferentes formas. Cuya explotación se lleva a cabo por este método si se cumple con dos condiciones; la primera es cuando el cuerpo mineralizado es económicamente rentable, es decir que la sumatoria de los costos operacionales sea mucho menor que el precio de comercialización del concentrado y/o metal y la otra condición es que exista suficientes reservas (T_m).

La minería a tajo abierto es una actividad extractiva, que consiste en la remoción de grandes cantidades de material, que buena parte de este material es desmonte o conocido como estéril y la otra parte en menor cantidad es mineral; muchas veces los entendidos lo conocen como rango de remoción ("stripping ratio"), como por ejemplo $S/R = 1/3$. Este mineral puede estar presente en concentraciones muy bajas, en relación con la cantidad del material removido.



Figura 2,1: Tajo abierto en operaciones (Fuente propia).

2.2 Principales productos de la producción minera.

La información de la referencia se ha obtenido de la Dirección de Promoción Minera de la Dirección General de Minería del Ministerio de Energía y Minas, informa sobre la evolución de la producción metálica al mes de setiembre del presente año. En el resultado acumulado al noveno mes del año, el cobre incrementó 44.13%, molibdeno 31.15%, plata 10.53%, oro 4.77% y plomo 2.29%. En tanto, el zinc, hierro y estaño cayeron en 9.05%, 2.28% y 2.93%, respectivamente.

En la variación del mes respecto a lo reportado hace un año, el incremento de la producción de cobre es de 34.63%, la del molibdeno de 25.05% y el oro de 3.05%

Tabla 2.1: Producción de principales metales de minas peruanas

Metales	Unidad de medida	Setiembre			Enero - Setiembre		
		2015	2016	Var. % 2016/2015	2015	2016	Var. % 2016/2015
Cobre	(TMF)	148,216	199,537	34.63	1,196,867	1,725,023	44.13
Oro	Grs.f.)	11,990,682	12,355,920	3.05	109,307,499	114,523,256	4.77
Zinc	(TMF)	130,273	115,870	-11.06	1,064,816	968,481	-9.05
Plata	(TMF)	377,034	368,762	-2.19	2,965,101	3,277,393	10.53
Plomo	(TMF)	26,930	26,622	-1.14	230,670	235,948	2.29
Hierro	(TMF)	405,473	263,289	-35.07	5,927,185	5,792,239	-2.28
Estaño	(Kg.f)	1,567	1,577	0.63	14,382	13,961	-2.93
Molibdeno	(TMF)	1,600	2,000	25.05	14,548	19,079	31.15

(Fuente MEM).

2.2.1 Cobre y Molibdeno: En setiembre 2016, la producción nacional de concentrados de cobre creció 34.63% al obtenerse 199,537 Toneladas Métricas Finas (TMF); consolidando en el acumulado anual, la tendencia es a incrementarse que al mes de setiembre viene siendo de 44.13% y un volumen de 1.72 millones de TMF. Cabe anotar que de esta manera, en los primeros 9 meses del presente año se ha logrado superar el record histórico nacional de producción de cobre que fue de 1.70 millones de TMF en el año 2015; y se estima que las expectativas de crecimiento continúen en lo que queda del año, pues se espera que sobrepase los 2.3 millones de TMF al cerrar el periodo. Este

considerable incremento repercutirá favorablemente en las previsiones de crecimiento estimada en la economía nacional, ya que el cobre constituye uno de los principales productos de exportación de nuestro país (constituye el 46% del valor de las exportaciones mineras, un sector clave por los encadenamientos que genera y que actualmente viene impulsando el crecimiento nacional). Sociedad Minera Cerro Verde S.A., se consolida actualmente como el primer productor nacional de este metal básico en nuestro país, con una participación total del 22.27% (384,161 TMF) en su unidad minera del mismo nombre que opera a tajo abierto en el complejo minero ubicado en la región Arequipa a 2,600 msnm; la cual ha mejorado su rendimiento en 145.35% en el acumulado de los primeros nueve meses del año, debido en parte a su ampliación de capacidad productiva que ya se encuentra operando. Compañía Minera Antamina, que tiene un importante complejo minero polimetálico del mismo nombre a 4,300 msnm, en el distrito de San Marcos, región Ancash; se ubica en la segunda posición, al obtener volúmenes de 341,597 TMF en el acumulado enero-septiembre, que representa un incremento de 16.58% respecto a lo obtenido en el año anterior (19.80% de participación). La tercera ubicación la ocupa la empresa

Southern Perú Copper Corporation (Suc. Perú), que en el conjunto de sus operaciones en Cuajone (Moquegua) y Toquepala (Tacna) logró alcanzar las 231,698 TMF de concentrados de cobre en los primeros nueve meses del año. La Minera Las Bambas S.A. (224,845 TMF), ocupa la cuarta ubicación seguida por Compañía Minera Antapaccay S.A. (165,714 TMF); Minera Chinalco Perú S.A. (112,786 TMF) y Hudbay Peru S.A.C. (99,450 TMF). Estas siete empresas representan en su conjunto el 90.45% de la producción nacional de cobre del país. A nivel regional, las tres primeras ubicaciones las ocupan: Arequipa, que actualmente lidera la producción nacional de cobre al obtener 22.35% del total (385,530 TMF), seguido por Ancash (349,966 TMF) con una participación del 20.29% del total y Cusco (265,164 TMF). En cuarta ubicación, la región Apurímac se fortalece en la cuarta ubicación al acumular 224,845 TMF debido a la puesta en operación de la mina "Las Bambas", en espera de alcanzar plena capacidad de producción en los próximos meses. Respecto a la producción de molibdeno, debemos indicar que la extracción de concentrados de este metal, sumó al noveno mes del año unas 19,079 TMF incrementándose en 31.15% en lo que va del año en curso.

2.2.2 Oro y Plata: En los resultados acumulados al noveno mes del año, la producción de metales preciosos del país mantienen resultados positivos. En el caso del oro, el crecimiento productivo viene siendo de 4.77% y la plata en 10.53%. Sin embargo; en setiembre, la plata registró un ligero descenso en -2.19%; en tanto, el oro se expandió en 3.05%. En el caso del oro, la producción nacional acumulada a mes de septiembre del 2016, alcanzó las 114 toneladas finas. Su producción estuvo concentrada en las regiones La Libertad (32.9 toneladas finas) aportante de la producción total en 28.75%; Cajamarca cooperante con 23.33% (26.7 toneladas finas) y Madre de Dios (13.6 toneladas finas) aportante del 11.9%. Estas regiones acumulan el 64% de la producción aurífera nacional. La producción nacional de plata, que alcanzó al séptimo mes del año las 3,277 Toneladas destaca en las primeras posiciones las regiones Junín (663,323 kg finos), Ancash (591,160 Kg finos) y Lima (582,487kg finos), asociada a las explotación polimetálica del centro del país. El Perú es el segundo productor de plata a nivel mundial y ostenta las mayores reservas probadas y probables de este precioso metal en el mundo.

2.2.3 Zinc y Plomo: El plomo, en el periodo enero-septiembre 2016, sostiene un crecimiento de 2.29%, mientras que el zinc continuó en descenso, esta vez atenuado del orden de -9.06. En el caso del plomo, las empresas que obtuvieron la mayor producción acumulada fueron Volcan Compañía Minera S.A.A. (20,683 TMF y 6.88% de incremento); Compañía Minera Raura S.A. (18,037 y 23.02% de crecimiento) y Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. (16,132 TMF y 29.68% de expansión). Las minas polimetálicas del centro del país concentran la mayor producción, así Pasco se ubica en la primera posición al obtener 64,487 TMF de plomo y participa del 27.33% del total nacional. Lima y Junín ocupan la segunda y tercera posición, obteniendo 46,029 TMF y 39,417 TMF; respectivamente. El comportamiento de la producción nacional de zinc al mes de setiembre de este año se vio reflejado en una caída de 9.05% (968,481 TMF) respecto a lo reportado en idéntico periodo del año anterior. En nuestro país, la producción de zinc viene siendo afectado por un menor rendimiento de Antamina en -26.61% (165,447 TMF); ya que el año pasado esta empresa concentró sus operaciones en zonas de mayor ley mineral; pese a ello, esta empresa mantiene la primera posición en la producción de este metal participando del 17.08% del total nacional. A nivel

regional; Junín, Pasco y Ancash ocupan las primeras posiciones, con 236,428 TMF; 198,080 TMF y 197,141 TMF; respectivamente.

2.2.4 Hierro y Estaño: Finalmente, el reporte de setiembre registra resultados negativos en la producción acumulada nacional de hierro y estaño. El hierro disminuye en 2.28% y el estaño en 2.93%. En el Perú; el hierro y el estaño se obtienen en las únicas minas de dichos metales en el país: Marcona (hierro) ubicada en la región Ica (operada por Shougang Hierro Perú S.A.A.); y “San Rafael” (estaño) operada por Minsur S.A. En el caso del hierro, la producción de setiembre de 2016 fue solamente 263,289 TMF; menor en 61.98% en relación al mes anterior (692,500 TMF), debido a la paralización de la producción durante unos 19 días de huelga de los obreros.

2.3 Estadísticas de Producción de metales.

El crecimiento que registró la minería en diciembre 2015 no se presentaba desde junio 2002, y se explica por la mayor extracción de cobre (68%), hierro (40.8%), molibdeno (22.8%), plata (19.1%) y plomo (14.6%); esto es debido a la participación de empresas responsables y sostenibles tales como: Cerro Verde, Antamina, Chinalco (Toromocho), Buenaventura, Las Bambas, entre otras.

Cartera de Proyectos Mineros 2016		
Proyectos	Inversión (US\$ millones)	Fecha de inicio
Ampliaciones		
Minera Milpo	45	Mar-2016
Minera Cerro Verde	4,600	Jun-2016
Southern Perú Copper	1,200	Jul-2016
Minera Miski Mayo	520	Jul-2016
Con EIA Aprobado/en construcción		
Minera Las Bambas	10,000	Mar-2016
Minas Buenaventura	340	Jun-2016
Shahuindo	132	Dic-2016
Minera Shouxin Perú	239	2016
En exploración		
Anabi	90	2016

Tabla 2.2: Producción de los metales del 2006 al 2015

Año	Cobre	Oro	Zinc	Plata	Plomo	Hierro	Estaño
	TMF	OzF	TMF	OzF	TMF	TMF	TMF
2006	1,048,472	6,521,008	1,203,364	111,584,354	313,332	4,861,155	38,470
2007	1,190,274	5,473,211	1,444,361	112,574,629	329,165	5,185,254	39,019
2008	1,267,867	5,782,971	1,602,597	118,505,446	345,109	5,243,278	39,037
2009	1,276,249	5,915,567	1,512,931	126,118,017	302,459	4,418,768	37,503
2010	1,247,184	5,275,436	1,470,450	117,043,695	261,990	6,042,644	33,848
2011	1,235,345	5,343,028	1,256,383	109,918,981	230,199	7,010,938	28,882
2012	1,298,761	5,193,782	1,281,282	111,912,160	249,236	6,684,539	26,105
2013	1,375,641	5,023,793	1,351,273	118,130,938	266,472	6,680,659	23,668
2014	1,377,642	4,504,224	1,315,475	121,148,743	277,294	7,192,592	23,105
2015	1,700,814	4,662,863	1,421,513	131,885,896	315,784	7,320,807	19,511

Año	Cobre	Oro	Zinc	Plata	Plomo	Hierro	Estaño
	TMF	G finos	TMF	Kg finos	TMF	TMF	TMF
2016	1,725,023	114,523,256	968,481	3,277,393	235,948	5,792,239	13,961

(Fuente MEM).

Según OSINERGMIN, con respecto a la evolución de la producción metálica nacional, se observa en la tabla N° 2.3, que para el 2011 y 2015, en el mercado específico del cobre, se registró un total de 1,235,345 y 1,700,814 toneladas métricas finas (TMF) de concentrados de cobre, lo cual representó un crecimiento de 38% durante dicho periodo. Este crecimiento fue impulsado principalmente por el incremento de la demanda mundial del mineral.

Según el reporte estadístico del Ministerio de Energía y Minas (MEM), hasta abril del 2016 la producción de cobre creció en un 51.7% con respecto al mismo periodo del año anterior, principalmente por la producción de Las Bambas.

Además, las regiones con mayor participación en la producción cuprífera fueron Arequipa (171,551 TMF), Ancash (152,174 TMF) y Cusco (109,345 TMF), con una participación de 24.42%, 21.66% y 15.57%, respectivamente. Además, cabe resaltar que para el caso peruano, entre los años 2011 al 2015, se iniciaron nuevas operaciones mineras, modernizaciones y ampliaciones.

Tabla 2,3: Principales productos de la producción minero metálica

Metal	2011	2015	Var. %	Ene-Abr 2016
Cobre	1,235,345	1,700,814	38	702,477
Oro	166,186.7	145,031.3	-13	50,548.8
Zinc	1,256,383	1,421,513	13	416,899
Plata	3,418,863	4,102,110	20	1,419,872
Plomo	230,199	315,784	37	104,333
Hierro	7,010,938	7,320,807	4	2,757,115
Estaño	28,882	19,511	-32	5,714
Molibdeno	19,141	20,153	5	8,191

(Fuente MEM)

La producción esta medida en Tm finas a excepción del oro y la plata (kilogramos finos).

La producción de oro mostró una disminución entre el 2011 y 2015 (-13%), debido principalmente a las menores leyes de algunas minas y a las intervenciones a la minería ilegal. Sin embargo, entre enero y abril del 2016, la producción del metal registró un crecimiento de 6.8% con respecto al mismo periodo del año anterior. Asimismo, las regiones de La Libertad (13,675,705 Grsf.) y Cajamarca (12,270,467 Grsf.) concentran el 51.26% del total de

la producción hasta abril del 2016. Adicionalmente, la producción de zinc, plata, plomo, hierro y molibdeno creció en 13%, 20%, 37%, 4% y 5% entre el 2011 y 2015, respectivamente. Desde enero a abril del 2016 se observa un crecimiento en la producción de plata (14.82%) y de plomo (2.25%) respecto al mismo periodo del año anterior. En el caso de la plata, el crecimiento estaría asociado al incremento de las operaciones metálicas en el centro del país, específicamente en las regiones de Junín (269,063 Kg.f.), Lima (266,420 Kg.f.) y Ancash (265, 493 Kg.f.). Sin embargo, la producción de zinc y hierro disminuyó para el 2016 en 9.1% y 6.6%, respectivamente.

Finalmente, en los últimos años, la producción de estaño ha disminuido; así se puede observar que en el 2011 se produjo 28,882 TMF y en el 2015 19,511 TMF, lo que representó una disminución de 32%, ocasionado como consecuencia del menor volumen de producción por parte de la mina San Rafael, Minsur (mina más grande de estaño en el mundo). Por último, entre enero y abril del 2016 se registra un descenso en el volumen de producción de estaño en 8.3%.

Tabla 2.4: Estructura de las exportaciones peruanas US\$ millones

RUBRO	ENE-AGO											Part%
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Mineros	14,735	17,439	18,101	16,482	21,903	27,526	27,467	23,789	20,545	18,836	13,316	59.27%
Minerales no metálicos	135	165	176	148	252	482	722	722	864	698	412	1.83%
Siderometalúrgicos y joyería	829	906	909	571	949	1,130	1,301	1,320	1,149	1,080	693	3.09%
Metal-mecánicos	164	220	328	369	393	476	545	544	581	525	288	1.28%
Petróleo y gas natural	1,818	2,306	2,681	1,821	3,088	4,568	4,996	5,271	4,562	2,302	1,177	5.24%
Pesqueros (Export. Trad.)	1,335	1,460	1,787	1,683	1,884	2,114	2,312	1,707	1,731	1,449	928	4.13%
Agrícolas	574	460	686	634	975	1,689	1,085	786	847	704	366	1.63%
Agropereuanos	1,220	1,512	1,913	1,828	2,203	2,836	3,083	3,444	4,231	4,387	2,708	12.05%
Pesqueros (Export. No Trad.)	433	500	622	518	644	1,049	1,017	1,030	1,155	934	552	2.46%
Tenidos	1,473	1,736	2,026	1,495	1,561	1,990	2,177	1,928	1,800	1,329	791	3.52%
Maderas y papales	333	362	428	336	359	402	438	427	416	352	198	0.88%
Químicos	602	805	1,041	838	1,228	1,655	1,636	1,510	1,515	1,402	889	3.95%
Otros	180	222	311	248	364	451	622	381	336	237	150	0.67%
TOTAL EXPORTACIONES	23,830	28,094	31,018	27,071	35,803	46,376	47,411	42,861	39,533	34,236	22,468	100%

Fuente MEM.

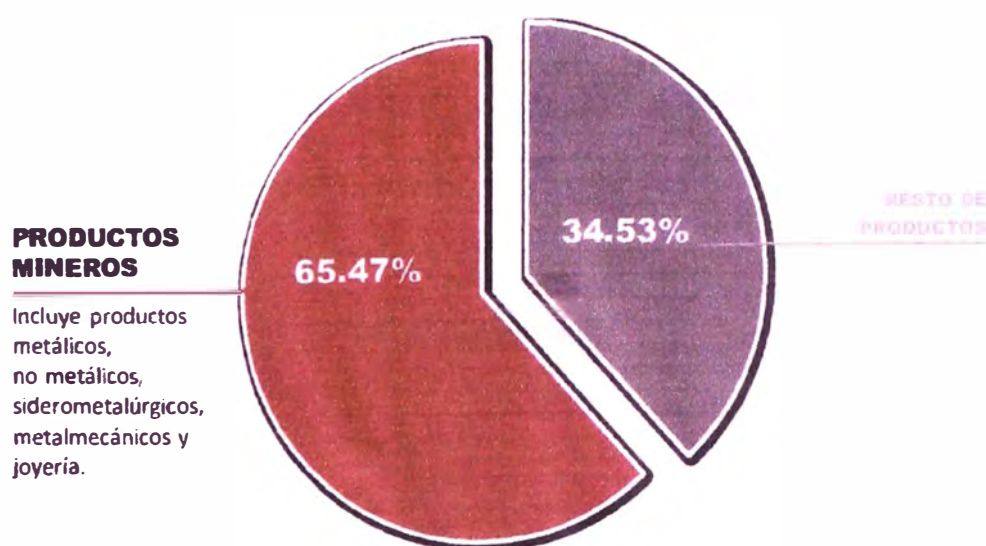


Figura 2.2: Estructura de las exportaciones peruanas de enero a agosto 2016 (Fuente MEM).

2.4 Análisis de estadísticas de producción de metales y no metales.

La minería en las últimas décadas ha jugado un papel fundamental principalmente por el impacto económico que ésta genera sobre los diferentes países en lo referido la producción, exportaciones, inversión minera, tributos, entre otras variables. Además, la influencia que tiene la producción de los principales minerales sobre los mercados financieros internacionales, ratifica la relevancia de este sector en la economía global.

En el Perú, la minería tiene una importante presencia en la inversión, las exportaciones, los tributos, el empleo directo e indirecto que esta genera y otras variables económicas importantes; aunque también existe una relación importante con respecto a los conflictos sociales originados en el sector minero por las “famosas ONG anti mineras” que más es por intereses propios e ignorancia, que no tienen ningún fundamento científico-tecnológico.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales productos de los metales de la minería peruana desde 1995 al 2014.

Tabla 2,5: Evolución histórica de precios de los principales metales

AÑO	Cobre Ctvs.US\$/lb	Oro US\$/OzTr	Zinc Ctvs.US\$/lb	Plata US\$/OzTr	Plomo Ctvs.US\$/lb	Estaño Ctvs.US\$/lb
1995	133.18	384.52	46.78	5.19	28.62	281.82
1996	104.14	388.25	46.52	5.19	35.12	279.62
1997	103.28	331.56	59.75	4.89	28.32	256.09
1998	75.02	294.48	46.46	5.54	23.98	251.30
1999	71.32	279.17	48.82	5.25	22.80	245.07
2000	82.24	279.37	51.16	5.00	20.59	246.57
2001	71.60	271.23	40.17	4.39	21.60	203.40
2002	70.74	310.13	35.32	4.63	20.53	184.18
2003	80.70	363.62	37.54	4.91	23.36	222.03
2004	129.99	409.85	47.53	6.69	40.21	383.13
2005	166.87	445.47	62.68	7.34	44.29	334.84
2006	304.91	604.58	148.56	11.57	58.50	398.29
2007	322.93	697.41	147.07	13.42	117.03	679.50
2008	315.51	872.72	85.04	15.01	94.83	864.53
2009	233.52	973.62	75.05	14.68	77.91	641.51
2010	342.28	1225.29	98.18	20.19	97.61	954.13
2011	400.20	1569.53	99.50	35.17	108.97	1215.90
2012	360.55	1669.87	88.35	31.17	93.54	989.60
2013	332.31	1411.00	86.65	23.86	97.17	1041.43
2014	311.16	1266.09	98.07	19.08	95.07	1023.05
2015	249.23	1158.96	87.47	15.70	80.90	756.43

Fuente BCRP

La producción no metálica acumulada al 2015 es 56, 499,800 Tm.

Tabla 2,6: Volumen de producción no metálica Tm del 2007 al 2012

Productos	2007	2008	2009	2010	2011	2012 P/
Arcillas	2 183 804	1 720 894	2 048 130	1 120 043	1 021 502	1 098 537
Arena	2 248 222	2 892 025	2 908 260	1 908 705	1 069 534	1 292 780
Baritina	27 368	45 213	27 881	52 275	87 848	79 451
Bentonita	21 451	31 566	119 452	44 266	27 534	22 977
Boratos / Ulexita	233 991	349 892	187 221	292 855	-	104 072
Calcita	351 169	312 813	506 541	331 156	421 598	752 088
Caliza / Dolomita	9 609 966	10 364 558	10 303 947	11 527 997	11 593 903	16 305 211
Caolín	4 772	13 230	9 655	16 678	18 169	34 585
Carbón	100 621	131 951	144 661	120 954	182 792	214 350
Feldespatos	15 450	13 353	5 154	3 589	11 645	26 359
Fosfatos	-	-	-	1 134 086	8 889 295	10 345 925
Mármol	24 513	596	338	-	-	16 335
Piedra / Hormigón	2 659 359	5 827 834	5 541 328	4 612 927	4 374 124	5 340 723
Pirofilita	-	22 114	21 567	19 185	30 389	30 399
Pizarra	10 844	42 436	16 447	315	18 165	33 948
Puzolana	329 266	425 095	477 591	700 514	986 673	735 704
Sílice	203 872	266 328	216 658	283 098	316 877	374 611
Talco	23 096	18 003	13 359	19 767	28 296	31 559
Travertino	284 755	231 924	97 937	105 392	126 200	149 214
Yeso	330 687	463 079	321 012	313 025	481 770	390 738

Fuente MEM

Por otro lado, según OSINERGMIN en el primer trimestre del año 2016 se observó una recuperación de los precios de los metales, originada principalmente por el mejor desempeño de la economía de China, junto con la debilidad del dólar y la aplicación de intereses negativos por los bancos centrales de Japón y la Eurozona; además por la demanda especulativa de metales en la segunda economía mundial (China).

La producción minera de los ocho principales metales se incrementó entre los años 2011 y 2015, de esta forma se observa un mayor crecimiento del estaño (a una tasa acumulada de

+20.5%), la plata (+17.2%), el cobre (+16.1%), el hierro (+12.9%) y el oro (+12.8%); y por debajo de ellos, con un crecimiento más modesto, la producción del zinc (+4.7%), molibdeno (+1.1%) y plomo (+0.2%).

Tabla 2,7: Precio promedio anual de los principales metales

Metal	2011	2012	2013	2014	2015
Cobre ¹	8,873	7,995	7,281	6,821	5,469
Plomo ¹	2,417	2,088	2,145	2,080	1,783
Estaño ¹	26,231	21,356	22,086	21,799	15,843
Zinc ¹	2,210	1,966	1,915	2,172	1,917
Oro ²	1,573	1,676	1,397	1,252	1,153
Plata ²	35.6	31.4	23.4	18.6	15.5
Hierro ³	167.8	128.5	135.4	96.8	55.2
Molibdeno ²	15.4	12.7	10.3	11.4	6.7

Fuente Bloomberg Cochilco mayo 2016*

(*)El precio está expresado en US\$/TM, a excepción del oro y plata (US\$/ozt), y el molibdeno (US\$/lb).

¹Corresponde a los precios spot en la LME.

²Corresponde a los precios spot en EE.UU.

³Corresponde al precio del mineral de hierro importado (62% Fe) en el puerto chino de Tianjin.

2.5 Macizo rocoso en tajos abiertos.

Como se sabe a nivel mundial, el macizo rocoso es totalmente aleatorio y es determinante para diseñar las mallas de perforación y voladura (B x S), la selección de la mezcla explosiva comercial, equipos, etc.

2.5.1 Características físico-mecánicas del macizo rocoso.

En cuanto a las características físicas del macizo rocoso, es principalmente para determinar la relación que existe entre contenido de aire, agua y sólidos de una roca. Entre las propiedades físicas, se tienen: Densidad, gravedad específica, peso específico, porosidad, Contenido de humedad (W) y grado de saturación (S), permeabilidad.

Así por ejemplo la propiedad física que se usa en la mina es la densidad: En los macizos rocosos peruanos la densidad generalmente oscila en el rango de 2 a 3 Tm/m³.

$$Densidad = \frac{\text{Peso natural}}{\text{Volumen}} \quad (Gr / m^3)$$

Respecto a las propiedades mecánicas del macizo rocoso, se debe considerarse el comportamiento de la roca in-situ con las discontinuidades geológicas inherentes, etc. Entre

ellas se incluyen: Las clasificaciones geomecánicas (RQD, RMR, Q de Barton), la resistencia a la tracción y a la compresión simple, las características tenso-deformacionales de las rocas sometidas a esfuerzos y deformaciones.

Las propiedades mecánicas de una roca caracterizan la reacción de esta, frente a la aplicación de un campo de fuerzas y dependen de:

- La naturaleza del macizo rocoso
- Los defectos de la roca
- La metodología del ensayo.

Las propiedades más importantes del macizo rocoso que deben ser estudiadas cuando se diseñan estructuras y principalmente excavaciones subterráneas, son:

- Dureza,
- Elasticidad,
- Propiedades de resistencia de la roca

La resistencia de la roca puede determinarse tanto en especímenes de roca intacta en el laboratorio como en ensayos in situ.

Los principales ensayos de Laboratorio de Mecánica de Rocas, son:

- Ensayo de Compresión Uniaxial.
- Ensayo de Compresión Triaxial.
- Ensayo de Carga Puntual.
- Ensayo de Corte Directo.
- Ensayo de Tracción Indirecta – Brasilerero.
- Ensayo para la determinación de Constantes Elásticas.

2.5.2 Fragmentación del macizo rocoso.

Como se sabe, la variable aleatoria fragmentación del macizo rocoso es el resultado de la voladura de rocas. Entonces, para obtener la fragmentación adecuada y requerida intervienen muchas variables, tales como: Principalmente las características físico-mecánicas y geomecánicas del macizo rocoso (densidad, humedad, porosidad, permeabilidad, modelo de Young, relación de Poisson, módulo de rigidez, módulo de bulk, la constante de Lamé, ángulo de fricción interna, cohesión, etc., RQD,

RMR, Q de Barton, SGI, etc.), la elección del modelo matemático para diseñar las mallas de perforación y voladura ($B \times S$), la perforación, la elección de la mezcla explosiva comercial y sus accesorios de voladura, tipos de retardo y lógicamente el factor humano para el carguío de los taladros con MEC.



Figura 2,3: Muestra la fragmentación del macizo rocoso (Fuente Clases Voladura de Rocas UNI)

2.5.3 Factor de esponjamiento (Swell factor)

En cuanto al factor de esponjamiento, es importante tenerlo en cuenta especialmente para las operaciones mineras binomiales de carguío y acarreo. Porque el

macizo rocoso en forma natural o compacta tiene un volumen 1 y un peso 1, pero cuando en este macizo rocoso se realiza la voladura de rocas, el volumen del macizo rocoso cambia, pero su peso es el mismo.

El factor de esponjamiento se calcula usando la siguiente expresión matemática:

$$SF = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100$$

Donde:

SF: Swell factor (%)

V_1 : Volumen en el banco

V_2 : Volumen de roca fragmentada

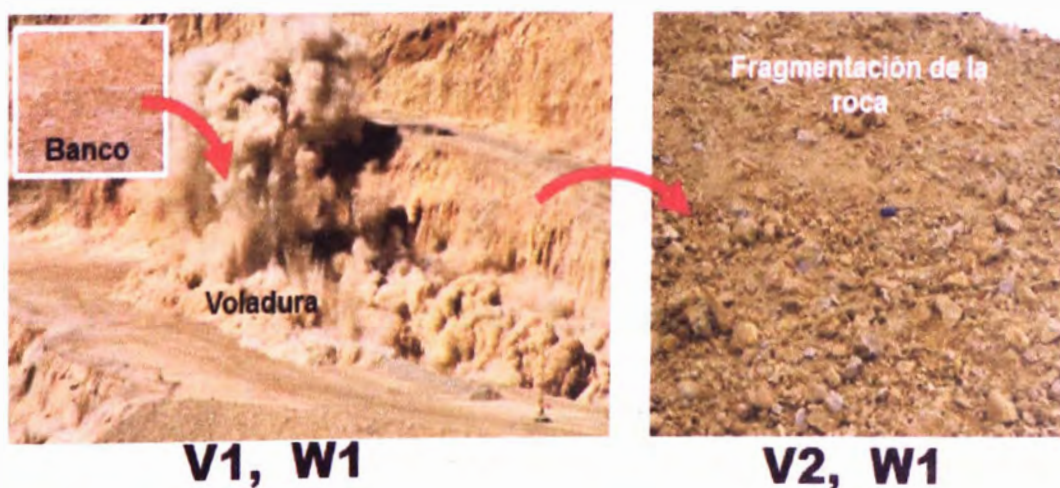


Figura 2,4: Factor de esponjamiento del macizo rocoso (Fuente propia)

CAPITULO III: EQUIPOS MINEROS USADOS PARA MINERIA A TAJOS ABIERTOS.

3.1 Introducción.

En cuanto a los procesos productivos de mayor costo en una operación minera se encuentran las operaciones binomiales de carguío y acarreo de material fragmentado, debido a que es el proceso con mayor cantidad de equipos involucrados (flota de camiones y palas), también se debe tomar en cuenta el alto grado de mecanización, menor rendimiento productivo por los equipo; todo esto constituye un proceso de operación prácticamente continuo y lento si es que no se minimizan los tiempos de trabajo no productivos y las distancias y tiempos entre el tajo y la chancadora primaria o cancha de desmonte.

Como se mencionó anteriormente, este proceso productivo es el que más impacta en los costos de operación, por lo que es de gran importancia garantizar un ambiente de operación adecuado y

apto para lograr los mejores rendimientos de los equipos, tanto en la parte física (material, equipos, mantenimiento, disponibilidad, eficiencia, insumos, etc.), como en la parte humana (operadores, ayudantes, jefes de guardia, ingenieros, etc.).



Figura 3,1: Operación de carguío y acarreo (Fuente propia)

Por otro lado, la elección adecuada de los equipos principales y secundarios en minería superficial es una actividad compleja donde intervienen muchas variables técnicas, geométricas, de producción de la mina y económicas; ya que en un libre mercado existen muchas marcas, modelos y capacidades que compiten entre sí. El departamento técnico que efectúa la selección no tiene una herramienta apropiada que le permita evaluarlos y decidir por

el mejor. Entonces, el modelo llamado simulación contribuye a efectuar esta selección.



Figura 3,2: Variables que se debe tener en cuenta para la selección de equipos mineros (Fuente propia).

3.2 Equipos primarios

El éxito de una gestión en la operación de una mina trabajada por el método de open pit , no solo reside en la capacidad y destreza del equipo técnico de ingenieros y/o especialistas o en la riqueza de un yacimiento mineralizado; sino también se debe poner énfasis en la selección de los equipos mineros principales y secundarios o auxiliares que se van a usar para llevar a cabo la explotación; la marca, calidad y cantidad de estos equipos deben guardar relación directamente con la producción anual, mensual y diaria que previamente fue determinada en el departamento de

planeamiento de minado; así como las características físico-mecánicas del macizo rocoso, etc.

A continuación se mencionaran los equipos principales que se usan en la minería a tajo abierto.

3.2.1 Perforadoras

Como se sabe, en la cadena de valor de la industria minero-metalúrgica comienza con las operaciones unitarias binomiales de perforación y voladura, y termina con la obtención de los metales y/o concentrados y como etapa final la venta de estos.

Por otro lado, muchos investigadores a nivel mundial han demostrado que la fragmentación obtenida como resultado de las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura tiene un impacto hasta del 70% del costo total (US\$/Tm) en las operaciones minero-metalúrgicas.

En las operaciones mineras a tajo abierto para llevar a cabo la operación minera unitaria de perforación se seleccionan las perforadoras rotativas. Estos equipos son de gran tamaño y generalmente en las minas de Perú, los diámetros

de las brocas oscilan entre los diámetros 6 $\frac{3}{4}$ " , 9 $\frac{7}{8}$ " , 10" , 11" hasta 15". Son máquinas diseñadas para operar con gran fuerza de avance o pull down y un par de rotaciones.

Estos equipos llamadas perforadoras rotativas son exclusivamente para minas a tajo abierto, son usadas para realizar la perforación de los taladros, previamente diseñados el burden y espaciamiento (B x S). Estos equipos han sido diseñados para adaptarse a los ambientes de operaciones más agrestes.

También, se debe tener en cuenta que en toda empresa minera se trata de obtener una adecuada fragmentación a un costo mínimo en dólares por tonelada métrica fragmentada. Entonces, una buena alternativa es incrementar el diámetro de los taladros, se debe tener en cuenta que al realizar esto, el costo de la perforación y voladura disminuirá. El riesgo es que si se incrementan en demasía comienzan a presentarse los llamados "pedrones". Por lo que para obtener la optimización operativa de los equipos, primero se deben minimizar los costos, para esto se debe producir una buena interrelación entre las variables del macizo rocoso y las de la perforadora para que se

genere un buen rango de penetración (PR). Básicamente en la perforación lo que se persigue es fragmentar al macizo rocoso con una granulometría adecuada y a un costo mínimo. Para esto es necesario conocer la geología estructural del mismo y la ingeniería de rocas, que permitan identificar las características físico-químicas del macizo rocoso. Si se consigue optimizar esta primera fase, se puede decir que se está en el camino correcto de conseguir el resto de las operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total del minado y con eso se asegurará el éxito de la producción, lo que implícitamente se estaría reduciendo los costos operacionales.

Lo óptimo en toda actividad minera es perfeccionar la perforación, y para esto se debe mejorar el rango de penetración y debido a esto se obtendrá el máximo metraje perforado por hora, para lo cual se debe seleccionar y obtener el más alto rendimiento de los equipos. A nivel mundial en minería superficial se emplean las perforadoras rotativas. Por lo tanto, una de las preocupaciones más importantes es la búsqueda de los parámetros de perforación que brinden la velocidad más alta de penetración por rotación de la broca. Además, el estudio de

la profundidad de corte se convierte en una herramienta indispensable para alcanzar una mejora continua y sostenible en perforación.

Uno de los criterios a tener en cuenta para la selección de equipos es el tiempo del ciclo, el cual es determinado por el rango de penetración neto obtenible y el tiempo empleado para manipular y movilizar la perforadora. Por lo tanto, el rango de penetración neto es solamente una parte del rendimiento total de la perforadora, teniendo en cuenta que si la productividad de la máquina se incrementa, el tiempo total del ciclo de perforación disminuye.

Uno de los principales métodos para optimizar la productividad de la perforación rotativa y el incremento de la vida útil de las brocas tricónicas que son empleadas por las perforadoras rotativas es el denominado mecanismo de rotura de la roca, que está compuesto por las siguientes fases: Abrasión, fatiga, fracturamiento, exceso de presión y de las RPM, lo mismo que del "pull down".

El desarrollo tecnológico, la evolución en el diseño de las brocas tricónicas y los accesorios de perforación permiten

alcanzar velocidades de penetración muy altas, las cuales combinadas con una razonable vida útil en metros y un correcto uso de la capacidad de los equipos de perforación, logran cubrir las expectativas de las operaciones mineras.

Se puede indicar que para maximizar el rendimiento durante la perforación rotativa es necesario observar todo el sistema de perforación como un conjunto; es decir, llevar un control de los parámetros, los cuales involucran la capacidad del compresor, los sistemas hidráulicos de "pull down" y presión de rotación, así como los accesorios y herramientas de perforación. De esta manera se pueden optimizar los recursos incrementando la productividad, logrando así la reducción del costo total de la perforación.

Para finalizar, se puede indicar fehacientemente que existen una serie de beneficios al incrementar la velocidad de penetración efectiva mediante el estudio de la profundidad de corte, además de la correcta aplicación de los parámetros de perforación. Esto conlleva a aumentar la capacidad de los equipos de perforación, incrementando su productividad.



Figura 3,3: Perforación rotativa (Fuente Southern Perú)

Los componentes principales de la perforadora rotativa son:

- **El barreno:** La longitud de los barrenos depende de la longitud del taladro a perforarse. Sirve para transmitir el empuje necesario hacia la parte superior y para canalizar el aire comprimido para la limpieza y enfriamiento de los cojinetes y billas. Son barrenos de acero que se instalan uno a uno y el último se conecta directamente a la broca para hacer el trabajo de perforación.

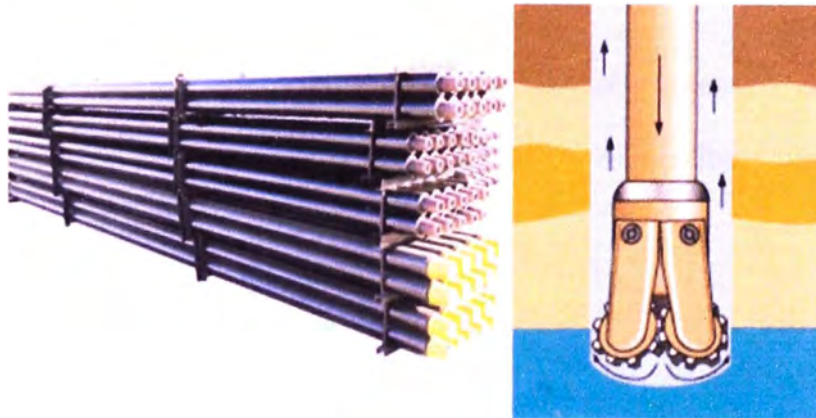


Figura 3,4: Barrenos para las perforadoras rotativas (Fuente Clases Voladura de Rocas UNI)

- **La broca:** El tipo de broca usada a nivel mundial, en perforación rotativa en minas superficiales, es la broca tricónica con conos dispuestos excéntricamente para tener una mayor acción trituradora. Las brocas se clasifican en brocas tricónicas de dientes y de botones.

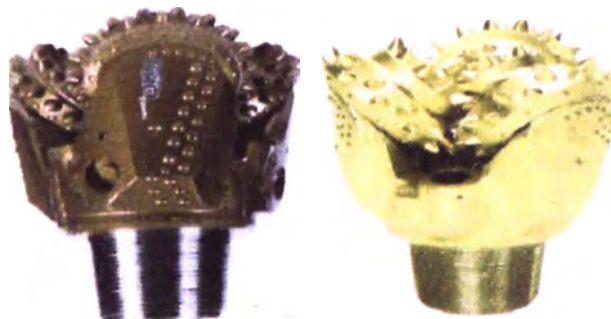


Figura 3,5: Tipos de brocas tricónicas para perforadoras rotativas (Fuente Google brocas)

Dependiendo de la marca y el modelo se presentan en la tabla 3.1 algunos diámetros de broca disponibles en el mercado.

Tabla N° 3.1

Ferreyros CAT		Atlas Copco	
Marca	Diámetro (pulg)	Diámetro del barreno (pulg)	Diámetro de la broca (pulg)
MD6240	6 – 10 5/8	4 ½	5 7/8 – 6 ¾
MD6290	6 – 10 5/8	5	6 ¾ - 7 3/8
MD6420	9 – 12 ¼	5 ½	6 ¾ - 7 7/8
MD6540	9 – 15	6 ¼	7 7/8 - 9
MD6640	9 5/8 - 16	7	9 – 9 7/8
MD6750	10 ¾ - 17 ½	7 5/8	9 7/8 – 10 5/8

Fuente Atlas Copco

- La circulación de flujo de aire para la limpieza de los taladros:** Para una eficiente perforación, los detritus de roca formados por la perforación en los taladros, deben ser evacuados para evitar que sean triturados por los elementos cortadores de la broca, para ello debe suministrarse una circulación de aire para evacuar dichos detritus. También, debe suministrarse agua para controlar el polvo.

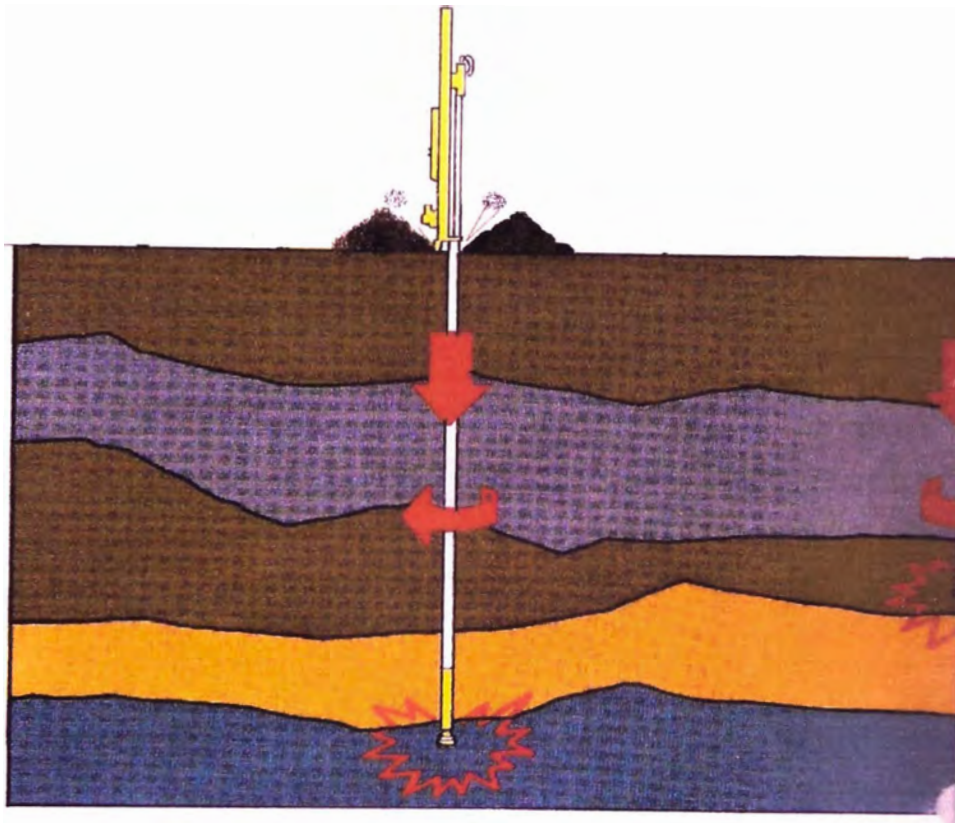


Figura 3,6: Evacuación de los detritos formados en el momento de la perforación de los taladros (Fuente ISEE)

3.2.2 Palas

Se sabe que para el carguío en minería superficial se tiene:

- **Las palas eléctricas o de cables:** Se usan para mediana y gran minería, son de bajo costo de operación, mueven grandes volúmenes de producción, equipos críticos en la producción y son de baja movilidad.



Figura 3.7: Pala eléctrica en pleno trabajo (Fuente propia)

Las palas de cable están montadas sobre orugas, lo que permite a estos equipos posicionarse adecuadamente en el lugar de trabajo, pero su traslado es a una baja velocidad. Tienen poca movilidad para trabajar en varios bancos al mismo tiempo. Para una misma producción, la energía eléctrica que consumen estos equipos resulta más económica que el consumo de combustible de una pala hidráulica. Sin embargo, el costo de inversión requerido es considerablemente mayor en el caso de una pala eléctrica.

- **Las retroexcavadoras:** Se usan en canteras o en pequeña y mediana minería no metálica, mueven pequeños volúmenes de material, estos equipos son montados sobre neumáticos y también sobre orugas.



Figura 3,8: Retroexcavadora en plena operación de acarreo (Fuente propia)

- **Las palas hidráulicas:** Estos equipos tienen mayor movilidad, menor inversión que la pala eléctrica, el costo de operación es levemente mayor, la capacidad de cuchara hasta 30 yd³, la cuchara es frontal o inversa.

Los desafíos que enfrentan, la importancia de la confiabilidad y la relación entre el tiempo de disponibilidad y la productividad. Es por eso que las palas hidráulicas son más seguras, fiables y productivas posibles.

En cuanto a las palas hidráulicas (modelo Bucyrus) presentan una mejor movilidad que las palas de cable, aunque no están diseñadas para cambiar de posición de manera frecuente. Con una menor inversión y un costo operacional levemente más alto que en el caso de las palas eléctricas, las palas hidráulicas poseen un rango de capacidad de cuchara menores (hasta 30 yd³). La cuchara de la pala puede estar instalada de manera frontal o inversa (como una retroexcavadora).



Figura 3.9: Pala hidráulica cargando material (Fuente Google Cartepillar)

- **Las palas neumáticas:** Son pequeños equipos montados sobre llantas metálicas o neumáticos que permiten el carguío de material en vagones de tren que se ubican inmediatamente tras la pala. La pala acarrea el material fragmentado del frente de trabajo y lo lleva hacia atrás del mismo, tras pasarlo por sobre el equipo. Estos equipos suelen ser alimentados por energía neumática y han ido cayendo en la obsolescencia. El sistema de transporte que naturalmente está asociado a este equipo de carguío es el tren.



Figura 3,10: Pala neumática en pleno trabajo (Fuente Google Cartepillar).

3.2.3 Camiones

La optimización de los costos en cada sub proceso, responde a la estrategia de reducción de costos en toda la cadena de valor de ciclo total de minado. Como ejemplo, el tráfico dentro de la unidad minera corre en ambas direcciones y está compuesto tanto de camiones de carga como de varios tipos de vehículos de servicio. Los camiones de carga por su gran tamaño y capacidad de carga de la tolva no están autorizados a pasarse uno al otro durante su trayecto, convirtiéndose en las unidades más lentas, que disminuyen el rendimiento de la flota. Durante su descenso por la rampa de acceso, los camiones encuentran desvíos conducentes a los distintos bancos de

trabajo. Estas rutas se desvían a su vez hacia los distintos bancos donde la pala está realizando la operación de carguío de material.

La decisión respecto a qué ruta tomar, se puede controlar de varias maneras. La más simple de ellas, es la de fijar el recorrido de un cierto camión, indicándole al operador, al comienzo de cada turno de trabajo, a que banco y pala deberá dirigirse. Otra forma que más se usa actualmente es el sistema "distpach", el cual a través de una radio, asigna recorridos a los camiones cuando éstos llegan a un desvío, como así también por medio de sistemas de despacho computarizados.

Una vez en la zona de trabajo de la pala y de haber otros camiones esperando a ser cargados, el camión entra en la famosa línea de espera. Existen métodos, como el de "double back up" (doble reverso) tendientes a minimizar el tiempo entre cargas (spotting times). Una vez completada la carga del camión, éste mismo procede por la ruta hacia el destino indicado, usualmente a la chancadora o a la cancha de desmonte. El camión avanzará más lentamente cuando

suba la rampa cargado de material, por eso es importante tener en cuenta la gradiente.

El tiempo de cada ciclo de un camión dependerá, entre otras cosas, de las esperas requeridas en los puntos de carga y descarga, de interferencias con vehículos más lentos durante su trayecto.

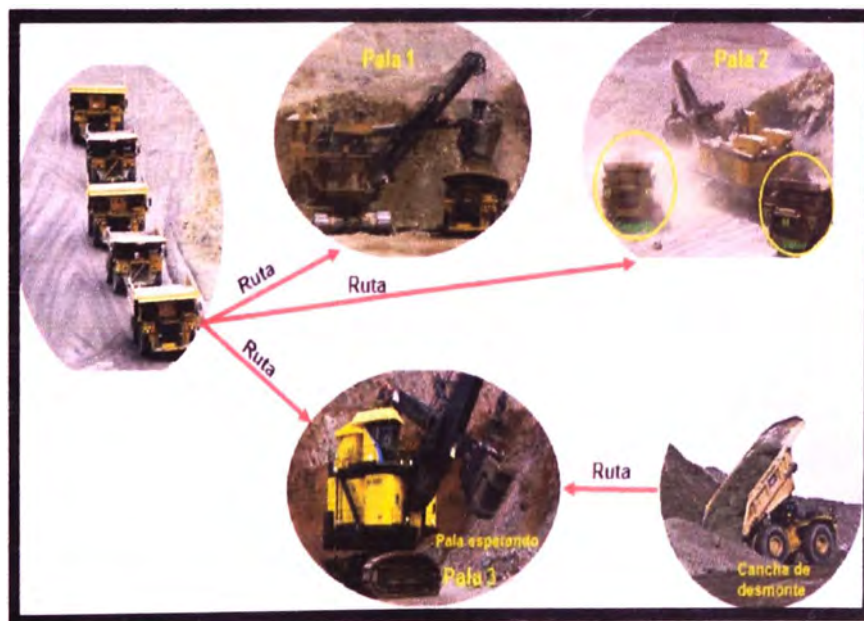


Figura 3,11: Distribución de los camiones para ser cargados por las palas (Fuente propia)

Por otro lado, Cada modelo puede combinarse con varios modelos de camiones, pero siempre teniendo en cuenta que guarden una relación entre la capacidad de cuchara

de la pala Vs. La tolva del camión, lo que les otorga cierta flexibilidad. Son equipos caros y críticos en la producción que requieren de mantenimiento preventivo para evitar interrupciones en la producción.

Los camiones mineros (truck), son para el acarreo de material fragmentado de gran capacidad de tonelaje. Las operaciones mineras unitarias binomiales de carguío y acarreo; se les denomina así porque ambas dependen entre sí para lograr su objetivo principal de transportar el material fragmentado. Cabe enfatizar que si este material es mineral se llevara a la chancadora primaria y si es estéril a la cancha de desmonte o botadero.

Entre las principales características de los camiones mineros dependen de la marca del fabricante, algunos destacan por su tamaño en la capacidad de tolva, otros soportan los cambios climáticos. Cabe resaltar que para su buen funcionamiento de operatividad deben contar con vías de acceso con una gradiente de 10° para transportar adecuadamente el material fragmentado a la chancadora o al botadero si este fuera desmonte.



Figura 3,12: Gradiente de una rampa para camiones mineros (Fuente Google)

Hay que tener en cuenta dos aspectos importantes en los equipos de acarreo:

- El tiempo productivo: Que corresponde al tiempo que realmente está trabajando el equipo, tomándose un tiempo de ciclo programado o efectivo que trabaja sin inconvenientes.
- El tiempo no productivo: corresponde al tiempo que el equipo está operativo, pero no está trabajando, ejemplo típico es cuando está en la cola para ser cargado por la pala.

3.3 Equipos secundarios.

3.3.1 Cargadores frontales

El cargador frontal es un equipo minero tradicional, quizás uno de los más antiguos de los equipos secundarios. Este equipo minero se compone de un tractor sobre neumáticos o sobre orugas; siendo el más utilizado el de neumáticos para sectores regularmente planos o con pendiente baja, tiene un cucharón cuyo movimiento de elevación se logra mediante dos brazos laterales articulados.

El cucharón por si mismo puede realizar un movimiento de rotación de cierta amplitud alrededor de un eje horizontal, con incluso, inclinación negativa del cucharón. Además, se debe tener presente que estos equipos poseen una estructura competente, una vida útil prolongada, continuas mejoras para facilitar la operación, comodidad y seguridad del operador, así como tecnologías para evaluar la operatividad de la máquina y, sistemas que permiten elevar la eficiencia en el consumo de combustible.



Figura 3,13: Cargador frontal en operación (Fuente propia)

3.3.2 Rodillos.

Estos equipos auxiliares tienen una función principal de compactar las vías de acarreo o donde se le requiera. El trabajo de los rodillos ayuda a mantener la vida útil de los neumáticos de los equipos que transitan por estas vías.



Figura 3,14: Rodillo trabajando (Fuente Google)

3.3.3 Tractores

Los tractores se clasifican en: tractores montados sobre ruedas y sobre orugas.

El tractor con ruedas, es un equipo auxiliar es usado para trabajar en el piso, es decir para acumular y/o juntar el material esparcido por las palas al momento del acarreo. También, se puede decir que el tractor es muy útil en el mantenimiento de las vías en condiciones operativas.



Figura 3,15: Tractor montado sobre neumáticos apilando el material (Fuente Google metacrust)

El tractor montado sobre orugas, tiene prácticamente las mismas funciones que los tractores montado sobre neumáticos.

Este equipo auxiliar posee menos movilidad, pero posee mayor fuerza de trabajo, es utilizado en zonas de difícil acceso, por la alta pendiente y relieves muy accidentados.



Figura 3,16: Tractor montado sobre orugas apilando el material (Fuente CAT)

3.3.4 Motoniveladoras.

Las motoniveladoras son equipos auxiliares, cuya función principal es para mantener en buen estado las vías. Estos equipos en la parte de adelante poseen una cuchara rectangular y en la parte posterior uñas. La cuchara sirve para remover barro, lodo o rocas que obstaculizan las vías o carretera. Las uñas sirven para escarificar las vías que se encuentren en mal estado ya sea por efectos naturales o por el uso del tránsito, ya que este es muy pesado.



Figura 3,17: Motoniveladora en operación (Fuente Google tecnología minera)

3.3.5 Cisterna de agua.

La cisterna diseñada para cargar agua, son camiones que fueron transformados para este fin, es decir en la parte de la tolva se coloca un tanque para ser cargado con agua. Su función principal en la mina es el regado de vías para aplacar el polvo que muchas veces se produce por el tránsito de los camiones o maquinaria pesada, o cuando se genera la operación minera unitaria de carguío y acarreo de material, en casos extremos también se pueden usar en estados de emergencia, un ejemplo típico sería un incendio.



Figura 3,18: Camión cisterna regando la operación minera
(Fuente Cerro Verde)

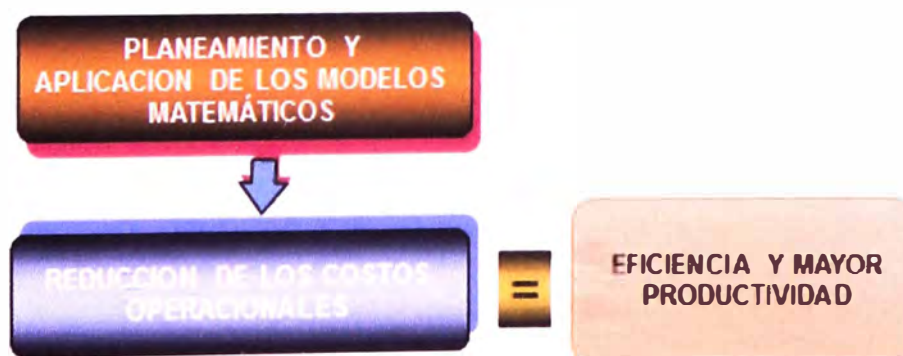
3.4 Eficiencia operacional de los equipos mineros

La selección de los equipos mineros, tales como palas y camiones para la mayoría de las operaciones mineras requiere la determinación del número de unidades, lo mismo que el tamaño de estas, contrariamente a la selección del equipo de desencapado ninguna restricción es impuesta en las dimensiones de las maquinas con respecto a la altura del banco, el área de apilamiento, la forma de apilamiento, etc. La altura de banco no tiene una dimensión fija. Esta puede ser variada de acuerdo a las operaciones mineras. La altura y el alcance (brazo) de la pala es una función de las dimensiones del camión y el método de operación, los cuales pueden ser seleccionados. El proceso inicial para la selección de pala, esencialmente depende del requerimiento de producción. El resultado es que el número y tamaño de las palas son primeramente determinado Vs. El número y el tamaño de los camiones a los cuales van a ser cargados.

Para obtener buenos resultados en la producción, es importante la eficiencia de los equipos mineros, desde la selección como marca y modelo, mantención y reparación de los equipos mineros hasta la comodidad y efectividad del trabajador u operador de estos equipos; donde este operador ya no necesita ser veloz, sino más eficiente.

Por otro lado, los modelos matemáticos y la planificación se puede decir que son herramientas gerenciales modernas, más allá de la sola reducción de los gastos operacionales; eso quiere decir que no sirve tener el mejor equipo minero, si no se programa como hacerlo más eficiente.

Entonces, más que las nuevas tecnologías de los equipos mineros en su modernidad, es la aplicación de las herramientas gerenciales por especialistas en las operaciones mineras unitarias que conforman el ciclo total de minado, quienes deben ayudar a producir en el menor tiempo posible.



3.4.1 Eficiencia o utilización

El tiempo de utilización total cuando los equipos mineros que están mecánicamente disponible aun 100%. Demora tales como: Cambio de guardia, almuerzo, ubicación y

ajuste menores reduce la eficiencia para dichas operaciones.

La tabla N° 3.2 muestra la escala puede que ser tomada como una guía.

Tabla N° 3.2

Descripción	%
Excelente	92 (55 minutos/hr)
Buena	83 (50 minutos/hr)
Regular	75 (45 minutos/hr)
Pobre	67 (40 minutos/hr)

El 83% de utilización es el más usado cuando se está calculando la eficiencia y está basado en la estadística varias unidades de acarreo y una buena ubicación de la pala, tales como cuando el carguío se lleva a cabo por ambos lados.

Para obtener el rango excelente del 92%, se requiere de operarios capacitados, actualizados y motivados; muy apartes que el equipo minero debe estar en óptimas condiciones, y la fragmentación obtenida como resultado de

la voladura de rocas, debe ser la adecuada y requerida; y las condiciones de trabajo y climatológicas deben ser las adecuadas. Cuando las condiciones climatológicas son muy adversas es probable que se tengan que suspender dichas operaciones por cuestiones de seguridad. Así por ejemplo algunas tajos abiertos referenciales se ubican en alturas predominantes, tales como: Antamina se ubica en Ancash a 4300 msnm, la mina San Rafael en Puno a 4500 msnm, Cerro Verde en Arequipa a 2600 msnm, Volcan en Cerro de Pasco a 4380 msnm, Cuajone en Moquegua a 3500 msnm, etc.

3.4.2 Variables de operación

En cuanto a la operatividad de los equipos mineros en cualquier operación minera, las variables a tener en cuenta son las siguientes:

- Eficiencia de trabajo
- Disponibilidad mecánica
- Disponibilidad eléctrica
- % de utilización

A continuación se muestra en la tabla N° 3.3 datos prácticos del equipo minero, en este caso una perforadora Bucyrus Erie 40-R.

Tabla N° 3.3

Rendimiento de la Bucyrus Erie 40-R	Horas	Días
Total horas/año	8,760	365
(-) Domingos y feriados	1,560	65
Horas Programadas (3 gd) HP	7,200	300
(-) Mantenimiento Preventivo (MP)	450	19
(-) Reparaciones Mecánicas y eléctricas (R)	665	28
Horas Disponibles (HD)	6,085	253
Otras demoras (falta de electricidad, repuestos, etc.) OD	2,235	93
Horas de Operación	3,850	160

Fuente ISEE

3.4.3 Disponibilidad mecánica: Se refiere al índice que calcula la eficiencia de mantenimiento. Muestra el porcentaje del tiempo programado que el equipo está disponible para ser usado, descontando el tiempo por reparaciones mecánicas-eléctricas y mantenimiento preventivo.

$$DM = \frac{HP - (MP + R)}{HP} \rightarrow (3.1)$$

3.4.4 Disponibilidad física: Es el factor que relaciona las horas de operación con respecto a las horas programadas.

$$DF = \frac{HP - (MP + R) - OD}{HP} \rightarrow (3.2)$$

3.4.5 Porcentaje de utilización: Es el factor que indica que porcentaje se utiliza de las horas disponibles.

$$\%U = \frac{HP - (MP + R) - OD}{HP - (MP + R)} \rightarrow (3.3)$$

3.4.6 Horas Netas de Operación/guardia: Se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{Horas Netas de Operación} = \frac{N^{\circ} \text{ hr}}{gd} (\%U)(Ef) \rightarrow (3.4)$$

Donde:

Ef = Es la eficiencia del trabajo o tiempo (Ef = 40/60)

3.5 Aplicación de un caso práctico

Para este caso se tomarán los datos de la tabla N° 3.2 y se reemplazarán en las ecuaciones matemáticas:

Para la disponibilidad mecánica, se reemplazará los datos en la fórmula 3.1.

$$DM = \frac{7200 - (450 + 665)}{7200} = 0.845$$

$$\therefore DM = 84.5\%$$

En cuanto a la disponibilidad física, se reemplaza los datos en la fórmula 3.2, y se tiene lo siguiente:

$$DF = \frac{7200 - (450 + 665) - 2235}{7200} = 0.535$$

$$\therefore DF = 53.5\%$$

Para obtener el porcentaje de utilización, se reemplaza los datos en la fórmula 3.3.

$$\%U = \frac{7200 - (450 + 665) - 2235}{7200 - (450 + 665)} = 0.633$$

$$\therefore \%U = 63.3\%$$

Finalmente para obtener las horas de operación/guardia, se reemplaza los datos en la fórmula 3.4.

$$\text{Horas Netas de Operación} = \frac{8hr}{gd} (0.633) \left(\frac{40}{60} \right) = 3.4$$

$$\therefore \text{Horas Netas de Operación} = 3.4 \text{ hr / gd}$$

CAPITULO IV: MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN.

4.1 Introducción.

A nivel mundial el planeamiento e implementación de proyectos grandes y complejos en los negocios de los diferentes rubros económicos, industriales y gobierno requieren de grandes inversiones representadas en miles de dólares, razón por la que es indispensable realizar estudios preliminares para asegurar su conveniencia de acuerdo a su eficiencia y ejecución económica para cualquier proyecto. Un modelo matemático para ejecutar estudios piloto, con resultados rápidos y a un costo relativamente bajo, está basado en la modelación y se conoce como simulación.

El proceso de elaboración de este modelo involucra un grado de abstracción y no necesariamente es una réplica de la realidad; consiste en una descripción que puede ser física, verbal o abstracta en forma, junto con las reglas de operación. Más aún debido a que el modelo es dinámico, su respuesta a diferentes

entradas puede ser usada para estudiar el comportamiento del sistema del cual fue desarrollado.

La simulación de sistemas ofrece un método para analizar el comportamiento de un sistema. Aunque los sistemas varían en sus características y complejidades, la síntesis de la formación de modelos, la ciencia de la computación, y las técnicas estadísticas que representa este tipo de simulación constituye un conjunto útil de métodos para aprender sobre estas características y complejidades e imponerles una estructura. Para comprender las características técnicas de este enfoque y aplicarlas a un problema real, es necesario familiarizarse con los conceptos que describen un sistema y un modelo.

Por otro lado, el modelo matemático de simulación también es conocido con el nombre de Método Monte Carlo o Simulación Monte Carlo, que agrupa una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando la simulación de números aleatorios.

La simulación de Monte Carlo, da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. El modelo es aplicable a

cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico. Generalmente en estadística los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. A veces la aplicación de la simulación de Monte Carlo, se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos un parámetro determinístico del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

4.2 Origen.

Este modelo matemático fue llamado así por el principado de Mónaco por ser “la capital del juego de azar”, al tomar una ruleta como un generador simple de números aleatorios.

El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 con el invento de la computadora.



Figura 4,1: Departamento de investigación de operaciones
(Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI).

El uso real de la simulación de Monte Carlo como una herramienta de investigación, proviene del trabajo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Este trabajo involucraba la simulación directa de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones aleatorios en material de fusión.

Aún en la primera etapa de estas investigaciones, John Von Neumann y Stanislaw Ulam refinaron esta curiosa "ruleta rusa" y los métodos "de división". Sin embargo, el desarrollo sistemático de estas ideas tuvo que esperar el trabajo de Harris y Herman Kahn en 1948.

Aproximadamente en el mismo año, Fermi, Metropolis y Ulam obtuvieron estimadores para los valores característicos de la ecuación de Schrödinger para la captura de neutrones a nivel nuclear. Alrededor de 1970, los desarrollos teóricos en complejidad computacional comienzan a proveer mayor precisión y relación para el empleo del modelo de Monte Carlo. La teoría identifica una clase de problemas para los cuales el tiempo necesario para evaluar la solución exacta al problema crece con la clase, al menos exponencialmente con M . La cuestión a ser resuelta era si MC pudiese o no estimar la solución al problema de tipo intratable con una adecuación estadística acotada a una complejidad temporal polinomial en M . Karp (1985).

A partir de la década de los 60 empiezan a aparecer en el mercado, programas de simulación de sistemas de acontecimientos discretos que poco a poco se empezaron a utilizar para resolver problemas de ámbito civil. Los más destacables fueron el GPSS de IBM (General Purpose System Simulator) y el SIMSCRIPT. Los modelos de acontecimientos discretos son muy utilizados en la actualidad para estudiar problemas de fabricación de procesos, logística, transporte, comunicaciones y servicios.

Estos problemas se caracterizan por centrar su interés en los cambios que hay en el sistema como consecuencia de los acontecimientos y en su capacidad para modelar los aspectos aleatorios del sistema.

La revolución que se produjo en la informática a partir de los años 80, tiene un impacto importante en la simulación por ordenador. El uso de simuladores se generaliza en prácticamente todos los ámbitos de la ciencia y la ingeniería.

4.3 Definición.

Existen varias definiciones, pero se ha tomado de los autores más renombrados algunas definiciones:

- La simulación: Es el proceso de diseñar un modelo que representa a un sistema real; y llevar a cabo varios experimentos usando el modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o el de evaluar varias estrategias, dentro de los límites impuestos por un criterio, de tal manera que el sistema opere.

- **La simulación:** Es el diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentalmente con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema del mundo real o evaluar varias estrategias con los cuales puedan operar el sistema.



Figura 4,2: Simulación de la operación de un sistema pala-camión (Fuente Google Throughtec)

- **Robert Shannon:** Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el

comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema. Se describe comúnmente como un arte, o una ciencia sofisticada, debido a que la utilidad de los resultados dependerá de la destreza del grupo que realiza y analiza el modelo; actualmente no existe una teoría científica para garantizar la validez de un proceso de simulación antes de que el experimento sea realizado, en su lugar, la confiabilidad de un modelo es evaluada por la correspondencia de los resultados del modelo con los obtenidos por otros sistemas comparables con el que se está examinando.

- **Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann:** "Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos".
- **SHUBIK:** Es un modelo, la simulación de un sistema o de un organismo es la operación de un modelo lo cual se va a

llamar simulador el cual es una representación del sistema.

- Este modelo o simulador estará sujeto a diversas manipulaciones, las cuales serían imposibles de realizar, demasiado costosas o imprácticas. La operación de un modelo puede estudiarse y con ello conocer las propiedades concernientes al comportamiento del sistema o subsistema real.

4.4 Principales características.

Entre las principales características, se tienen:

- El éxito de este modelo depende de que exista una alta fidelidad física en la cual se logren desarrollar habilidades manuales, una alta fidelidad conceptual en la cual se desarrolla el razonamiento y la habilidad para solucionar problemas y por último, la alta fidelidad emocional o vivencial en la cual se favorece la retención de información mediante el manejo de procesos complejos que involucran conocimientos o emociones.
- Una simulación exitosa no está basada en el realismo de la simulación, sino en el compromiso de los participantes en sus roles que intervienen en dicho proceso.

- Una de las características de la simulación es que en ésta se utiliza el aprendizaje previamente adquirido para estimular la participación, potenciar el conocimiento cercano a la vida real y su aplicación a situaciones cotidianas. Estos conceptos conducen hacia las cuatro características básicas de la simulación: la observación del mundo real, su representación física o simbólica, la acción sobre esta representación y los efectos de esta acción sobre el aprendizaje humano.
- Desde el punto de vista social, la simulación es útil para ensayar estrategias de enfrentamiento con la realidad, aprender a tomar decisiones, a resolver problemas, planificar en contextos con cierto desorden o incertidumbre, o para realizar técnicas creativas que descubran alternativas a un problema dado, entre muchas otras.
- El modelo matemático de simulación se aproxima lo más cercanamente posible a la realidad que se requiere simular.
- Se utilizan para estudiar sistemas y procesos cuyo estado va cambiando con el tiempo de forma discreta, por lo que permiten conceptualizar el curso de un proceso y su manejo en términos de los eventos que pueden suceder durante el modelado, y cuyo impacto afecta directamente como a otros componentes del sistema.

- Estos modelos representan procesos y situaciones complejas, en función de los eventos que puedan ocurrir.
- Todos estos elementos, en conjunto, simulan la evolución natural de lo que se esté simulando, en el caso puede ser cualquier operación minera unitaria, cuya simulación se realiza en el modelo.
- Por todo ello, y dado que en el mundo real es frecuente encontrarse con procesos y sistemas cuyo análisis, mediante métodos matemáticos, resulta extraordinariamente complejo o incluso imposible de llevar a cabo, el uso de simulación permite resolver problemas de esta índole. En tales circunstancias, la alternativa más eficaz para afrontar este tipo de estudios consiste en construir unos modelos lógico-matemáticos de forma que permitan imitar o simular el comportamiento del mundo real. Como resultado de repetir dicha simulación un número suficiente de veces, se obtendrá un histórico artificial de observaciones sobre el comportamiento del sistema o proceso. A partir de dichas observaciones, y utilizando técnicas de análisis estadístico, será posible extraer conclusiones sobre el funcionamiento de dicho sistema.
- El diseño, el desarrollo y el análisis de resultados de una simulación es un proceso sofisticado, que requiere del

analista unos mínimos conocimientos sobre programación, matemáticas, estadística, gestión de proyectos y también sobre el propio sistema estudiado.

- Otra principal característica de un sistema de eventos discretos es que el sistema está determinado por una secuencia de eventos que ocurren en momentos aleatorios de tiempo t_1, t_2, \dots y el cambio de estado del sistema tiene lugar en esos instantes.

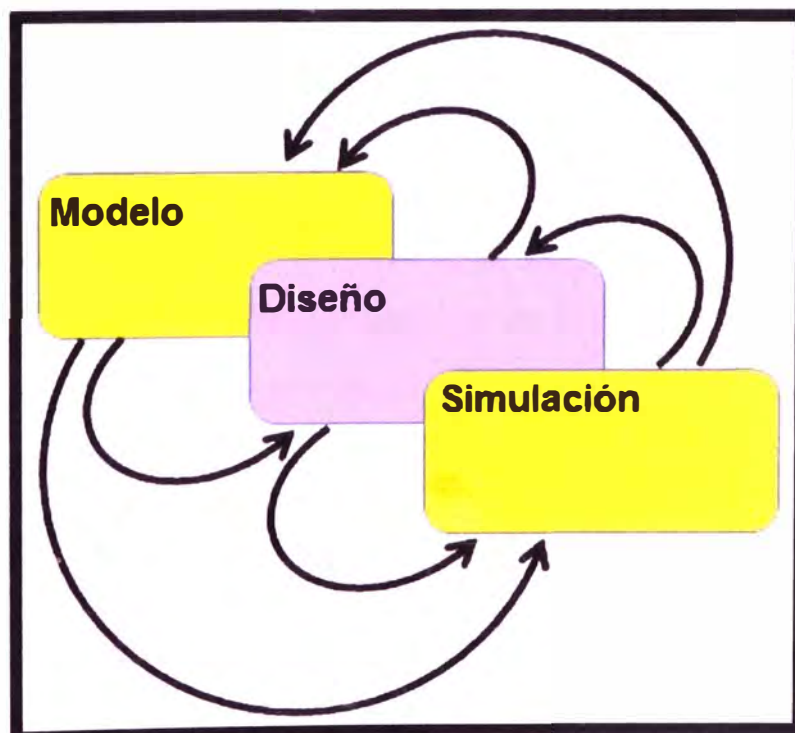


Figura 4,3: Proceso iterativo de modelación, diseño y simulación (Fuente propia)

4.5 Clasificación general de los modelos de simulación.

4.5.1 Modelos continuos.

Se denomina modelos continuos a aquellos modelos matemáticos que resuelven un tipo de problemas en los que el comportamiento del macizo rocoso puede ser modelizado por medio de las ecuaciones diferenciales de la mecánica de los medios continuos. Dentro de esta categoría se engloban la mayor parte de los modelos numéricos geomecánicos: Mediante ellos es posible también analizar macizos rocosos que presentan discontinuidades, como fallas, planos de estratificación contactos.

Existen otras definiciones, tales como: Es aquella en que el estado del modelo cambia permanentemente en el tiempo, generalmente se utilizan conjuntos de ecuaciones diferenciales para describirlos.



Figura 4,4: Macizo rocoso con sus características aleatorias
(Fuente propia)

4.5.2 Modelos Determinísticos.

Es aquella donde una actividad tiene un valor determinado a través del tiempo. Este modelo elimina el estudio de tiempo, que para obtener el rendimiento de un equipo cualquiera utiliza ecuaciones que relacionan fuerza, masa, aceleración y el marco ambiental donde este trabaja.

Ni las variables endógenas y exógenas se pueden tomar como datos al azar. Permittedose que las relaciones entre estas variables sean exactas, o sea que no entren en ellas funciones de probabilidad. Este tipo determinístico emplea

menor tiempo del uso de la computadora que otros modelos. Ejemplo: Modelos Estocásticos.



Figura 4,5: Simulador para manejar un equipo en la mina
(Fuente CEIM).

4.5.3 Modelos Estocásticos.

Cuando por lo menos una variable es tomada como un dato al azar las relaciones entre variables se toman por medio de funciones probabilísticas, sirven por lo general para realizar grandes series de muestreos, involucra mucho tiempo en la computadora son muy utilizados en la Investigaciones científicas.

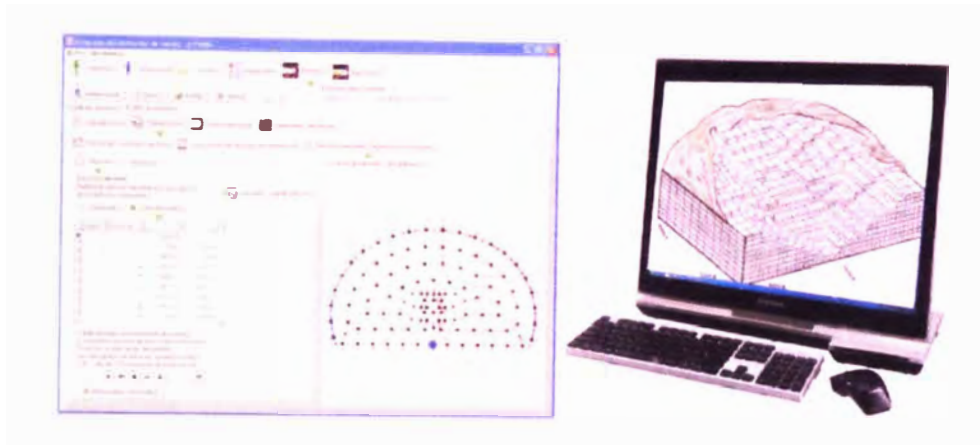


Figura 4,6: Simulación de un yacimiento mineralizado
(Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

4.5.4 Modelos discretos.

Aquellos en que los cambios de estado se producen cada cierto intervalo de tiempo a incremento fijo o próximo evento (GPSS).

Un modelo discreto de simulación no siempre se usa para modelar un sistema discreto. La decisión de usar este modelo discreto para simular un sistema en particular depende de los objetivos específicos del estudio que está realizando.

4.5.5 Modelos Estáticos.

Debido a su naturaleza fortuita, es conocida como simulación Montecarlo. Emplea funciones de distribución probabilísticas dentro de los límites de las funciones estándar, y donde los valores de las variables ocurren aleatoriamente pero en la misma proporción que ocurren en el sistema real. No se toma en cuenta el tiempo dentro del proceso, por ejemplo: los modelos de juegos, modelos donde se observa las ganancias de una empresa. Ejemplo: Arquitectónicos: líneas de teléfono, tubos de agua, etc.

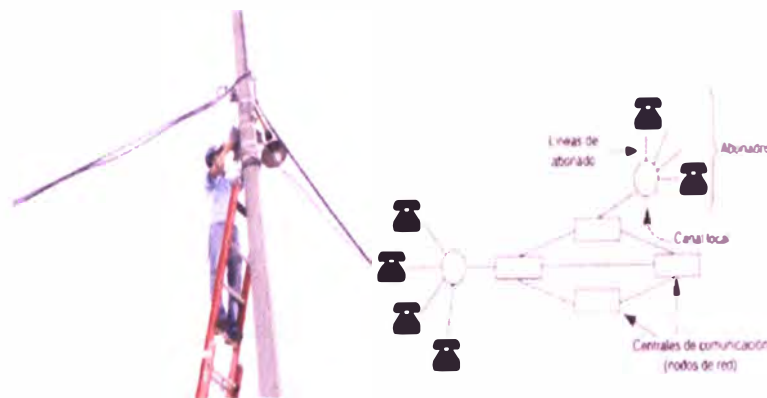


Figura 4,7: Red telefónica (Fuente Biblioteca digital)

4.5.6 Modelos Dinámicos.

Si se toma en cuenta la variación del tiempo, ejemplo: la variación de la temperatura, del aire durante un día,

movimiento anual de las finanzas de una empresa. Ejemplo:
Laboratorio de química: reacción entre elementos.

En estos modelos físicos podemos realizar modelos a escala o en forma natural, a escala menor y/o mayor, sirven para hacer demostraciones de procesos como para hacer experimentos nuevos.

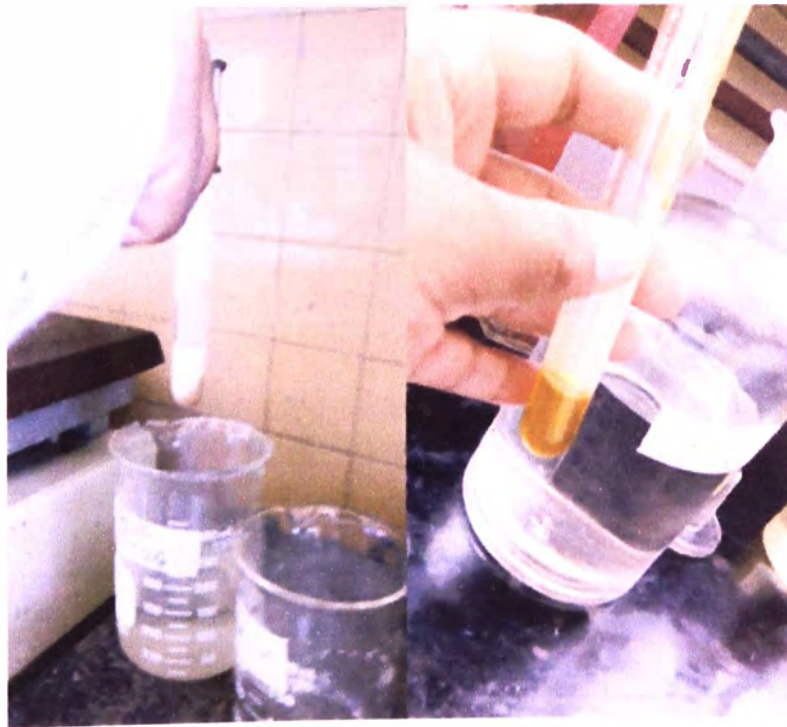


Figura 4,8: Modelo dinámico (Fuente propia)

4.5.7 Modelos a Escala.

Son los modelos sencillos de maquetas, como por ejemplo casas, cuartos, etc. También se pueden tener a tamaño

natural a menor o mayor escala, bidimensional y tridimensional.

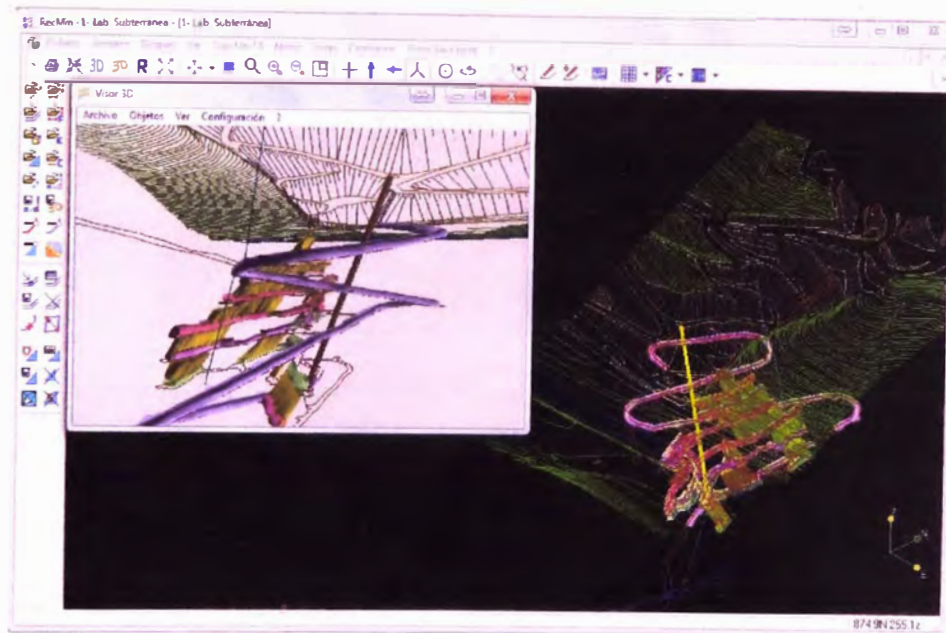


Figura 4,9: Modelo a escala (Fuente Google informática minera)

4.6 Campos de aplicación de la simulación.

Este modelo matemático llamado simulación, es utilizado ampliamente en diferentes campos de investigación en el mundo, los casos en los que más se usan son:

4.6.1 La NASA: Este organismo que se dedica exclusivamente a la investigación. Por ejemplo para llegar a la luna aplico el modelo matemático de simulación.



Figura 4,10: Trabajo típico de la NASA (Fuente Google NASA)

4.6.2 La agricultura: El uso de los diferentes tipos de modelos matemáticos que usa la investigación de operaciones; respecto a la agricultura ha surgido como una alternativa de planificación e investigación, dado que pueden utilizarse para predecir el comportamiento de una planta, las características del suelo, la interacción entre diferentes cultivos, y el comportamiento e sistemas de producción con interacción de ganado y cultivos. Actualmente se ha incorporado el efecto de políticas agrícolas, racionalidad de los productores, características del mercado y aspectos ambientales. Desde el enfoque de los agro-ecosistemas estos modelos se han usado para simular la sustentabilidad, bajo una visión holística y sistémica.

4.6.3 El comercio: En cuanto al comercio electrónico es considerado como una oportunidad de que los países en desarrollo fortalezcan su posición en el sistema multilateral de comercio. El comercio electrónico puede contribuir decisivamente a que las economías en desarrollo obtengan mayores beneficios del comercio. El comercio electrónico, es el proceso de simulación mediante las tecnologías de la información y las comunicaciones.

4.6.4 Las comunicaciones: Diseñar sistemas de comunicación o protocolos para mensajería, etc.

4.6.5 La electrónica: El uso de simuladores de circuitos electrónicos es de gran ayuda. Los simuladores de circuitos favorecen de una u otra forma el proceso de enseñanza-aprendizaje en el campo de la electrónica. Un simulador de circuitos electrónicos es una herramienta de software utilizada por profesionales en el campo de la electrónica los estudiantes de las carreras de tecnologías de información. Ayuda a crear algún circuito que se desee ensamblar, ayudando a entender mejor el mecanismo, y ubicar las fallas dentro del mismo de manera sencilla y eficiente.

4.6.6 La estadística: La difusión de los ordenadores y de los paquetes de software estadístico, además de aumentar la posibilidad de tratar grandes volúmenes de datos y de facilitar la aplicación de métodos estadísticos que exigen cálculos muy laboriosos, abre también un gran abanico de posibilidades al uso de las técnicas de simulación como ayuda a la docencia y a la resolución de problemas. En este sentido, Novales (1989) describe la importancia y las posibilidades de la simulación en la Estadística aplicada a la Economía y la Econometría. Santisteban (1989) comenta el uso de la simulación en la Estadística aplicada a la Psicología.

4.6.7 Capacitación de personal: Este modelo se puede aplicar a cualquier área y/o actividad de personal. Dado que el riesgo y los costos son casi nulos, una persona puede utilizar el simulador para aprender por sí misma utilizando el método más natural para aprender: el de prueba y error. Un ejemplo típico es el simulador de equipos mineros.

4.6.8 La energía: Simulación energética edilicia, también llamado modelización energética edilicia (o modelización

energética), hace referencia al uso de software para predecir el uso de energía en un edificio. El modelo energético típico tendrá entradas para el clima; envolvente del edificio; ganancias internas de iluminación, equipos y los ocupantes; calefacción, refrigeración, ventilación y sistemas; horarios de los ocupantes, el equipo y la iluminación. El modelo energético debe permitir resultados y salidas relacionadas con el uso de energía en las predicciones típicas y categorías de uso final, como: calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y diversos procesos electromecánicos. Además de las unidades de energía, la mayoría de los programas y software incluyen las tarifas de servicios como datos de entrada y así se puede predecir los costes de energía.

4.6.9 La medicina: como se sabe, el modelo matemático llamado simulación se viene aplicando en las diferentes ramas del saber humano y en el caso de la educación médica no es diferente. En este sentido se debe referir al informe del Institute of Medicine de Estados Unidos de 1999 que con el título "Err is human", (Kohn L.T. et al, 2000), estimaba en cerca de 100.000 anuales las muertes ocurridas en hospitales de aquel país como consecuencia de errores

médicos, a parte del gasto económico generado por los daños a los pacientes. Se planteaba ya entonces la necesidad de intentar evitar estos errores médicos mediante una mejora de la formación de los profesionales. Pero además es indispensable garantizar la seguridad y la intimidad de los pacientes durante el proceso de aprendizaje de dichos profesionales, lo cual se ha convertido en una exigencia ética. Esta exigencia ética puede entrar en conflicto con el aprendizaje realizado en pacientes en cualquier momento del proceso educativo de los profesionales. Como dice A. Ziv, “el uso de las simulaciones puede por un lado hacer más adecuada la formación de los profesionales y a la vez contribuir a minimizar el referido conflicto ético”. (Ziv, A. et al, 2003). Partiendo de esta exigencia de garantizar la seguridad del paciente que tiene sus raíces más antiguas en el aforismo o regla de oro de la medicina “Primum non nocere”, en los últimos tiempos se han dado una serie de factores que han impulsado todavía más el uso de las simulaciones en educación médica.

4.6.10 La minería: Este modelo matemático se aplica en las operaciones mineras unitarias de: Voladura de rocas para

conocer la fragmentación, así como también en el carguío y acarreo.



Figura 4.11: Simulación de carguío y acarreo (Fuente Google Throughtec).

4.6.11 Sistemas de transporte: Se detecta zonas de los posible congestionamiento de tránsito, las zonas con mayor riesgo de incidentes y/o accidentes, este modelo también puede predecir la demanda de usuarios para cada hora del día.



Figura 4.12: Realidad y la solución al caos del transporte público en Lima (Fuente Google revistaideele)

4.6.12 Procesos de manufacturas: Ayuda a detectar los cuellos de botellas, a distribuir de la mejor manera al personal, determinar la política de producción, etc.

Estos son algunos de los campos de aplicación de la simulación aunque existen otros campos donde son utilizadas las simulaciones para predecir, mejorar y establecer el comportamiento de algún sistema; es decir si se usa este modelo matemático en todas las ramas del saber humano, se ahorraría gastos innecesarios en los procesos de cualquier bien y/o servicio.

4.7 Estructura básica de un modelo de simulación.

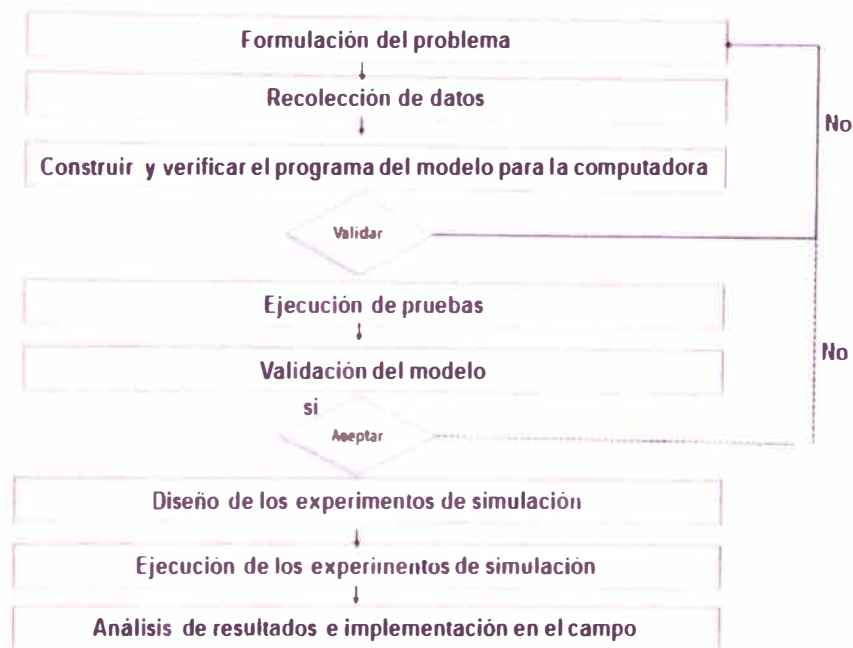


Figura 4,13: Estructura de un modelo de simulación (Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

4.7.1 Formulación del problema: Es el primer paso del modelo, debe quedar establecido el objeto principal de la simulación.

4.7.2 Recolección de datos: Una vez establecido el objeto del estudio, se procede a recolectar todos los datos e información posible al respecto. Una vez obtenida esta información de proceder a clasificar y tomar la de mayor importancia y relevante. Es decir la naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo. Los datos pueden ser provistos por

registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real. Los mismos deberán ser procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo.

4.7.3 Construir y verificar el programa del modelo por la

computadora: Se construye el algoritmo y se determina que lenguaje de programación se usara. Como por ejemplo se tiene el GPSS (General Purpose Simulation System), C++, Yava, CSMP (Continuos System Modeling Programs), Speedup, FORTRAN y Run On Mainframes [por Harrington, H.C y Tumay, K.; 1999], Modsim y Simple ++, ITHINK [High Performance Systems; <http://www.hpsinc.com>] o su versión más sencilla el STELLA [High Performance Systems] o el SIMPROCESS [Harrington, H.C y Tumay, K.; 1999], etc. Es decir se comienza con el desarrollo de un modelo simple que captura los aspectos relevantes del sistema real.

4.7.4 Ejecución de pruebas: En esta etapa se procede a correr las primeras pruebas del modelo.

4.7.5 Validación del modelo: Aunque sea imposible de demostrar rigurosamente, se trata de verificar al modelo con

una serie de situaciones conocidas para obtener un alto grado de confiabilidad. En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales.

4.7.6 Diseño de los experimentos de simulación: En esta etapa se decide las características de los experimentos a realizar: El tiempo de arranque, el tiempo de simulación y el número de simulaciones. No se debe incluir aquí la elaboración del conjunto de alternativas a probar para seleccionar la mejor, la elaboración de esta lista y su manejo es tarea de la optimización y no de la simulación.

4.7.7 Ejecución de los experimentos de simulación: En esta etapa se comprueba que no se hayan cometido errores durante la implementación del modelo. Para ello, se utilizan las herramientas provistas por el entorno de programación.

4.7.8 Análisis de resultados e implementación en el campo:

En esta última etapa se procede analizar los resultados obtenidos del modelo y principalmente implementarlo en el campo in-situ.

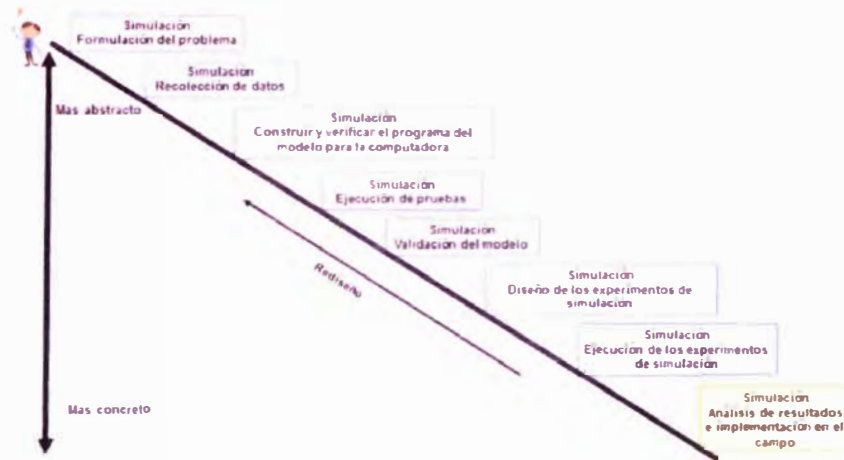


Figura 4,14: Estructura del modelo de simulación (Fuente propia).

4.8 Condiciones que debe reunir un modelos de simulación

- Que sea fácil de entender por el usuario
- Que tenga el modelo metas y objetivos
- Que el modelo no de respuestas absurdas
- Que sea fácil de manipular, la comunicación entre el usuario y la computadora debe ser sencilla
- Que sea completo, tenga por lo menos las partes o funciones más importantes del sistema.
- Sea adaptable, que se pueda modificar, adaptar, actualizarlo

- Que sea evolutivo que al principio sea simple y poco a poco empiece a volverse complejo dependiendo de las necesidades de los usuarios

4.9 Formas para implementar un modelo de simulación

Actualmente las empresas en especial las que invierten millones de dólares utilizan cada vez más el modelo matemático de simulación como parte de su enfoque al proceso de innovación del giro de la empresa y mejora continua de las actividades.

Dependiendo de la necesidad y actividad económica de la empresa existen formas de implementar el modelo matemático de simulación. Como ejemplo:

- Para equipos mineros: Actualmente para manejar cualquier equipo minero se hace a través de simuladores.
- En cuanto a la fragmentación del macizo rocoso: Primero se simula que grado de fragmentación es la requerida, para luego proceder a ser la voladura de rocas.
- Transporte de mineral por sistemas de fajas: Primero se simula el recorrido de todo el tramo, teniendo en cuenta la gradiente, sistema eléctrico, condiciones del terreno, etc. Y

luego se procede a ejecutar en si el proyecto de construcción, etc.

4.10 Generación de números aleatorios.

Los números aleatorios se generan de tablas, o usando métodos para hallar números pseudo-aleatorios. Por el método aditivo de congruencias o el multiplicativo de las congruencias.

Sub-rutina RANDU para generar números pseudo-aleatorios.

```
SUBROUTINE RANDU (IX, IV, YFR)
```

```
IY = IX + 65539
```

```
IF = IY 5, 6, 6
```

```
5 IY = IY + 2147483647 + 1
```

```
6 YFL = IY
```

```
YFL = YFL * .4656613E-9
```

```
RETURN
```

```
END.
```

El tiempo empleado para el carguío de los camiones se puede calcular usando la siguiente expresión matemática:

$$TCT_{TRUCK} = LTT + TL + DT + TE + ST$$

Dónde:

TCT_{TRUCK} = Tiempo de ciclo total para un camión cargado desde que se inicia el carguío hasta el siguiente.

LTT = Tiempo total de carguío de un camión por una pala

TL = Tiempo de viaje cargado hasta la chancadora (dump)

DT = Tiempo de descarga (dumping)

TE = Tiempo de viaje vacío

ST = Tiempo de espera del camión para ser cargado.

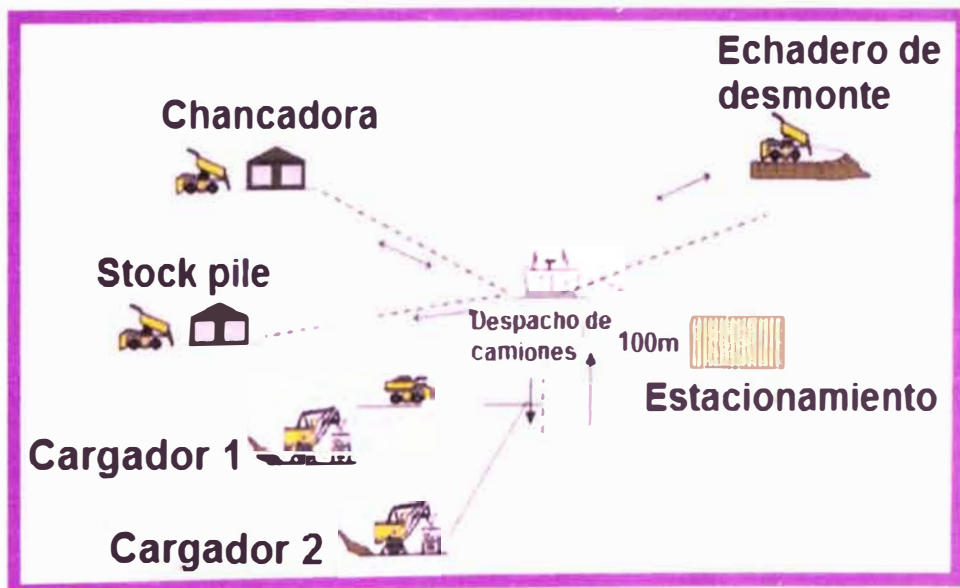


Figura 4.15: Sistema carguío y acarreo en un tajo abierto

(Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

CAPITULO V: CASOS-ESTUDIO APLICANDO EL MODELO MATEMATICO DE SIMULACION.

5.1 Introducción.

Últimamente con el desarrollo de los softwares y el uso de las computadoras en el campo minero, se han desarrollado una serie de programas de gran aplicación y utilidad para la minería, en el aspecto técnico, económico, ecológico y gerencial.

Uno de los grandes aportes de la informática en el campo minero es la simulación, que permite reproducir en una computadora cualquier actividad, como por ejemplo la voladura de un banco, sistemas de transporte de mineral mediante camiones, fajas, trenes, etc.

Este modelo matemático permite tomar en cuenta, todas las variables más importantes que puedan afectar a un sistema, para reproducir los estados y los tiempos en forma aleatoria y controlar

los tiempos mediante distribuciones estadísticas sofisticadas con la finalidad de simular en forma muy aproximadas a las actividades reales que ocurren diariamente.

Una de las grandes ventajas de los programas de simulación es que permiten realizar una gran cantidad de pruebas en la computadora, reduciendo considerablemente las pruebas de campo, cuyos costos y peligros son inherentes en toda actividad minera, y a veces prohibitivos.



Figura 5,1: Aplicación del modelo matemático simulación a la minería
(Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

A continuación se presentan dos casos-estudio la forma de resolver un problema de carguío y transporte de mineral aplicando

simulación al sistema minero pala-camión y distribución de camiones a una pala.

5.2 Caso-estudio N° 01: Aplicando simulación al sistema minero pala-camión.

El objetivo de este caso estudio es encontrar una adecuada flota de camiones aplicando ciertas distribuciones de tiempo mostradas, y empleando sistemas de simulación.

El tiempo empleado para el carguío de los camiones se puede calcular usando la siguiente expresión matemática:

$$TCT_{TRUCK} = LTT + TL + DT + TE + ST \rightarrow (1)$$

Dónde:

TCT_{TRUCK} = Tiempo de ciclo total para un camión cargado desde que se inicia el carguío hasta el siguiente.

LTT = Tiempo total de carguío de un camión por una pala

TL = Tiempo de viaje cargado hasta la chancadora (dump)

DT = Tiempo de descarga (dumping)

TE = Tiempo de viaje vacío.

Fuente: Calder, P – Canada, 2005

Por otro lado, el tiempo de viaje de un camión para ser cargado esta dado por:

$$(TL + DT + TE + ST) = TA \rightarrow (2)$$

El modelo tiene dos distribuciones:

- 1) Para el tiempo de carguío
- 2) Para el tiempo de viaje de un camión.

Asumiendo que ambas son distribuciones normales. Para aplicar simulación, se debe considerar que hay 2 palas y 6 camiones.

El tiempo promedio para cargar camiones es de 4.0 minutos con una desviación estándar de 1 minuto. El tiempo de viaje promedio del camión es de 16 minutos, con una desviación estándar promedio de 2.0 minutos.

Para determinar el tiempo que se empleará para el carguío y viaje del camión, se usa la siguiente relación matemática:

$$TS = Mean Time + (NDRD * Std Dev) \rightarrow (3)$$

Donde:

TS = Tiempo muestra para este evento.

Maen Time = Tiempo medio para el evento.

NDRD = Numero Random Normalmente Distribuido ($\mu = 0, \sigma = 1$)

Std Dev = Desviación estándar del tiempo.

M = Numero de palas en el sistema

N = Numero de camiones en el sistema

ES TS(i) = Tiempo del turno empleado por la pala i

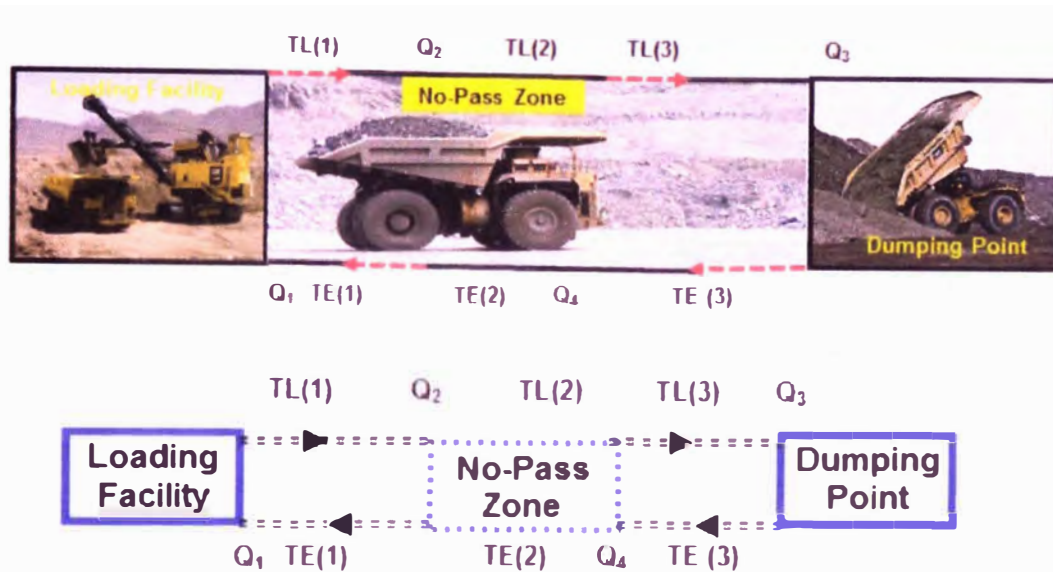
ES TT(i) = Tiempo del turno empleado por el camión i

ST = Tiempo de finalización de la simulación.

Fuente: Wilson, E - Canada, 2003.

5.2.1 Formulación del problema: En el diagrama conceptual, se muestra la solución de este problema. Donde se observa un sistema de acarreo que consiste en una facilidad de carguío (pala) y también un número de camiones.

La ruta de viaje incluye una sección angosta, donde 2 unidades de transporte no pueden pasar simultáneamente. Esta variación en la ruta es frecuentemente encontrada en los circuitos de acarreo, por ejemplo en los sistemas de trenes. Se pueden formar líneas de espera en el punto de carguío, en el punto de descarga y en las entradas a la zona de tráfico restringida.



Q: Queuing

Cualquier referencia de distancias se ha omitido, para facilitar los tiempos que se muestran en la siguiente tabla N° 5.1.

Tabla N° 5.1

	Mean (min)	ST. Desviation (min)	Type of distribution
Load	1/3.06(*)	1/3.06(*)	Neg. Exponential
TL (1)	1.92	0.18	Aprox. Normal
TL (2)	2.28	0.21	Aprox. Normal
TL (3)	2.95	0.25	Neg. Exponential
Dump	1/1.34	1/1.34	Aprox. Normal
TE (1)	2.79	0.14	Aprox. Normal
TE (2)	2.28	0.21	Aprox. Normal
TE (3)	1.87	0.17	Aprox. Normal

Fuente: Wilson, E - Canada, 2003.

Tiempos relativamente cortos, frecuentemente ocurren durante las operaciones de carguío y descarga. Por lo

tanto, esto es no inusual que la frecuencia de estos tiempos tome la forma de una distribución exponencial negativa o de La Place.

(*) La media de una distribución exponencial es:

$\mu = 1/m$ y la desviación estándar es μ , entonces la media del tiempo "m" para el carguío es 3.06 min., y la media de la relación de carguío por unidad de tiempo es 1/3.06.

De acuerdo a los servicios de tiempo combinados y las respectivas demoras, estas son consideradas distribuciones exponenciales negativas que se usan para la solución del problema respectivo.

El tiempo de viaje de las unidades cargadas TL (travel loaded) y el sistema de viaje de las unidades vacías (travel empty) son aproximadamente distribuciones normales.

Se pide:

- i. Encontrar la mejor alternativa para obtener la producción y la productividad para este sistema pala-camión de la operación minera respectiva.

5.2.2 Criterios para la selección de la mejor alternativa: En un sistema de acarreo de mineral como del problema propuesto, se requiere seleccionar el número de camiones más adecuado con la finalidad de minimizar el tiempo ocioso de la pala. Esto es debido a que el costo de propiedad y operación de las palas y los camiones; es muy alto. Por lo que, se deben minimizar los tiempos ociosos de estos equipos. Este mismo criterio es compatible con la producción o número de camiones cargados en una hora o una guardia.

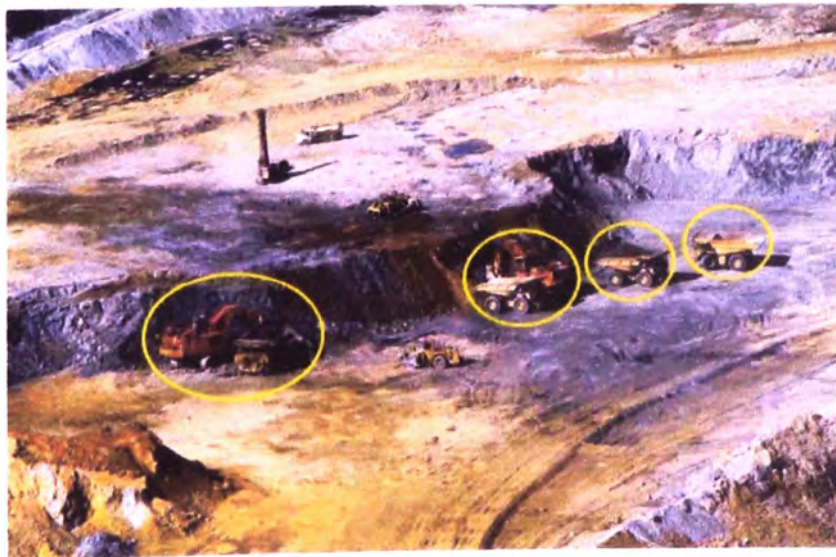


Figura 5.2: Camiones haciendo cola (Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

Sin embargo, tampoco resulta económico asignar un número excesivo de camiones a una pala, con la finalidad de minimizar el tiempo ocioso de la pala, debido a que los tiempos ociosos de los camiones esperando para ser cargados por las palas incrementarían notablemente los costos de acarreo.



Figura 5.3: Número excesivo de camiones asignados a una pala
(Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

El número de camiones adecuados para una pala, teniendo en cuenta las distribuciones dadas, será aquel que produzca el costo mínimo combinado por no tener tiempos de trabajo no productivos del sistema pala-camión.



Figura 5,4: Número adecuado de camiones para una pala (Fuente Clases Investigación de Operaciones UNI)

Para calcular el costo combinado, se emplea la siguiente relación matemática:

$$CEP = CP \& O(Pala) * TOP + CP \& O(Camión) * TOC \rightarrow (4)$$

Donde:

CEP: Costo de equipos ociosos (\$)

CP&O (Pala): costo de propiedad y operación de pala (\$)

CP&O (Camión): costo de propiedad y operación de camión (\$)

TOP: tiempo ocioso de la pala (hr)

TOC: tiempo ocioso del camión (hr)

Fuente: Calder, p – Canada, 2003

Los valores de TOP y TOC serán obtenidos usando los cálculos respectivos para cada número de camiones seleccionados y los valores de los costos de propiedad de palas y camiones se obtendrán de los manuales de los equipos correspondientes.

5.2.3 Resultados: Los resultados generales, se muestran en la siguiente tabla 5.2. Para la aplicación de la formula (1), se ha considerado los siguientes datos de campo.

- Costo de propiedad & costo de operación pala : 100 \$/hr.
- Costo de propiedad & costo de operación camión: 100 \$/hr.

Tabla N° 5.2

N° Camiones	TOP (hr)	TOC (hr)	CEP (US\$)	N° Camiones cargados
3	2.24	1.71	241.1	42
4	1.87	2.98	216.8	56
5	1.51	5.85	281.2	62
6	1.50	6.50	215.0	81
7	0.87	8.89	175.9	90
8	0.83	8.62	169.2	95
9	0.80	11.18	191.8	95
10	0.23	18.39	206.9	101
11	0.25	22.62	251.2	101
12	0.05	23.00	235.0	97

5.2.4 Evaluación de resultados: Observando la tabla 5.2, se puede apreciar, que el número de camiones que ofrece la mejor alternativa es 8.

Para este número de camiones recomendados, se obtiene el menor costo del equipo ocioso.

Estos resultados varían si se cambian los costos de propiedad y operación considerados, por lo que estos costos deben ser considerados como datos del problema.

Para una mejor evaluación de los costos de carguío y acarreo del sistema (\$/Tm.), se requiere conocer la capacidad de la pala y de los camiones que son muy fáciles de obtener a través de los fabricantes. La evaluación de un sistema de acarreo utilizando sistemas de simulación como el mostrado, es la forma más real y objetiva de trabajar, ya que los tiempos considerados fueron tomados de datos reales y ajustados a ciertos tipos de distribuciones estadísticas conocidas, y para los cálculos de simulación se asignan tiempos en forma aleatoria (random), que es lo que justamente ocurre en la operación de carguío y acarreo de la industria minera.

5.3 Caso-estudio N° 02: Simulación de Montecarlo aplicada al sistema de acarreo: Pala-camión.

5.3.1 Introducción

Una manera adecuada para ejecutar los estudios, con resultados rápidos y a un costo relativamente bajo, está basada en el modelamiento, y a esto se le conoce como simulación. El proceso de elaboración del modelo involucra un grado de abstracción y no necesariamente es una réplica de la realidad; consiste en una descripción que puede ser física, verbal o abstracta en forma, junto con las reglas de operación. Más aún debido a que el modelo es dinámico, su respuesta a diferentes entradas puede ser usada para estudiar el comportamiento del sistema al cual está tratando de representar.

5.3.2 Datos de campo

En una operación minera trabajada por el método open pit se está empleando 5 camiones para acarrear mineral de cobre. Los choferes de los camiones no saben el destino del material a acarrear hasta que el "ore grader" se lo indique. Cada block mineralizado en el pit, tiene 4 tipos de material; y por ejemplo para un block particular dentro del

pit, los componentes pueden ser como se muestra en la tabla N° 5.3.

Tabla N° 5.3

Tipo de material	Porcentaje
mineral	22%
mineral de baja ley	14%
mineral marginal	14%
desmante	50%

El camión cargado debe pasar a través de un control ubicado en la ruta de acarreo, el cual se encargará de clasificar el material que está cargado en los camiones dentro de las 4 categorías mencionadas anteriormente, el destino de cada uno de los camiones es función del tipo de material que está cargando. El tiempo de viaje a cada uno de los destinos, ha sido determinado y es como se indica en la tabla N° 5.4

Tabla N° 5.4

Tiempos	Minutos
Acarreo de mineral	4,5 min.
Acarreo de mineral baja ley	8,6 min.
Acarreo de mineral marginal	6,4 min.
Acarreo de desmante	12,2 min.
Carguío de mineral	5,0 min.

Se pide:

1. Simular el sistema para un turno para determinar el número de viajes, para cada uno de los tipos de material.

5.3.3 Criterios a considerar.

Como bien se sabe que existen dos grandes categorías de simulación: La de eventos continuos y eventos discretos, ambos se rigen por el cambio de estado en el transcurso del tiempo.

En una simulación continua los cambios en el estado del sistema ocurren continuamente en el tiempo, por ejemplo, la posición de un avión en vuelo que cambia de manera continua en el tiempo.

Cuando se habla de simulación discreta se refiere a sistemas cuyos cambios de estado ocurren de manera instantánea en puntos aleatorios del tiempo como resultado de la ocurrencia de eventos discretos, es decir los cambios se producen cada cierto tiempo, intervalo de tiempo a incremento fijo o próximo evento.

El presente caso-estudio corresponde a una simulación de eventos discretos, y dado que fue prácticamente imposible tomar datos reales, del sistema de carguío y transporte en el open pit de cobre; se recurrió al muestreo simulado del Método de Montecarlo, para generar los datos requeridos para este modelo de simulación.

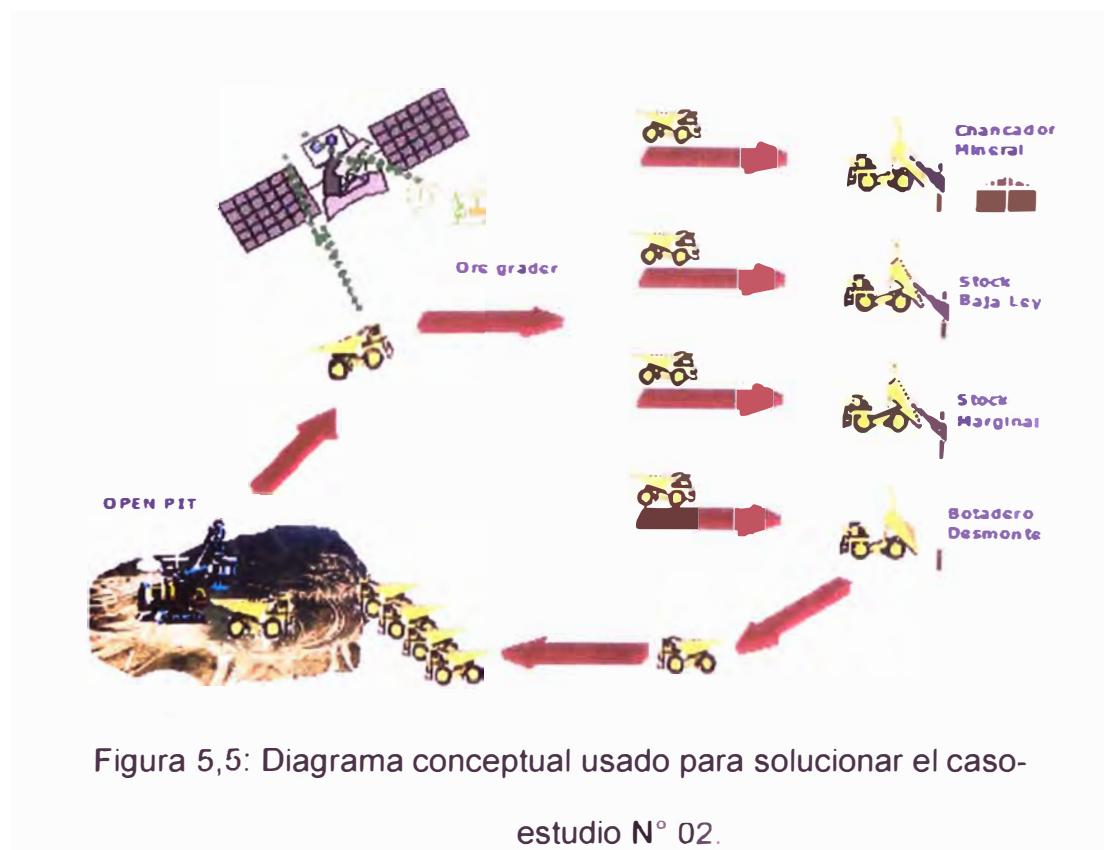


Figura 5,5: Diagrama conceptual usado para solucionar el caso-estudio N° 02.

5.3.4 Proceso de simulación.

Para determinar el número de viajes para cada tipo de material en un turno se necesita saber la cantidad de

tiempo empleado, para establecer un límite en las iteraciones, por ello se asumió lo siguiente:

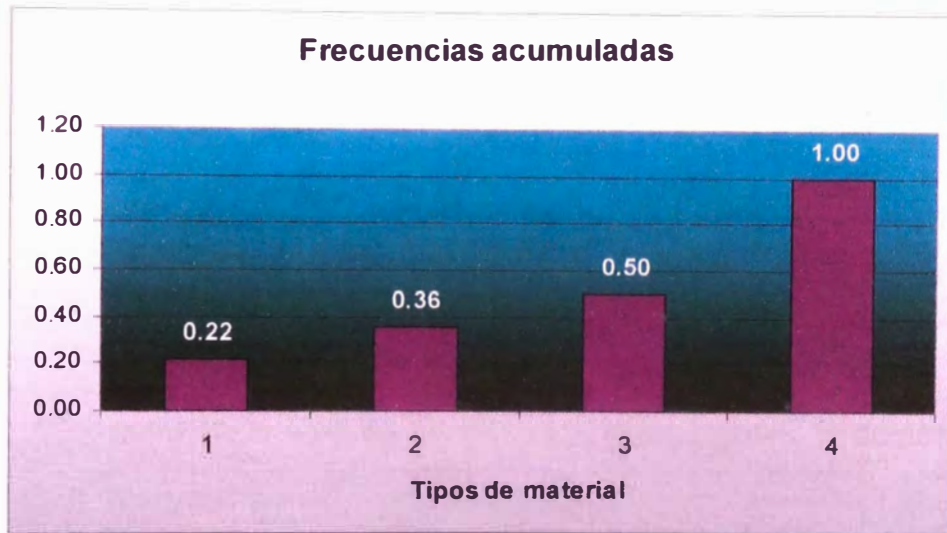
- HT: n° de horas empleadas en un turno de trabajo (12 horas = 720 minutos)
- HP: n° de horas en labores de preparación (2 horas = 120 minutos)
- HE: n° de horas efectivas de trabajo de carguío y acarreo
- Luego:
- $HE = HT - HP = 600$ minutos

Del problema se tiene la tabla N° 5.5 que muestra la distribución de probabilidades para una demanda aleatoria:

Tabla N° 5.5

Tipo de material	Probabilidad	Acumulada
Mineral	0.22	0.22
Mineral de baja ley	0.14	0.36
Mineral marginal	0.14	0.50
Desmante	0.50	1.00

Con ello se tiene la distribución de frecuencias acumuladas:



Asimismo, para simular los viajes es necesario contar con los tiempos de ida y retorno, dado que no se cuenta con estos últimos, se asumirá valores aproximados tomando en cuenta que los camiones vacíos se desplazan a mayor velocidad, luego:

Tabla N° 5.6

Tiempos	Ida *	Retorno *	T. Demora *
Acarreo de mineral	4.5	4	8.5
Acarreo de mineral baja ley	8.6	8	16.6
Acarreo de mineral marginal	6.4	6	12.4
Acarreo de desmonte	12.2	12	24.2
Carguío de mineral	5.0	--	--

(*) Tiempo en minutos

Cabe resaltar que, el tiempo de retorno incluye la descarga de material y regreso al sistema de colas. En la simulación del sistema se trabajara con los tiempos de carguío y demora porque son éstos los que determinan los cambios de estado.

Generando muestras aleatorias, en el rango de 0 a 1, de acuerdo al Método de Montecarlo se ingresa la población de datos:

Tabla N° 5.7

Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Demora	H. Llegada
0.198	1	0	5	8.5	13.5
0.280	2	5	10	16.6	26.6
0.470	3	10	15	12.4	27.4
0.854	4	15	20	14.2	34.2
0.200	1	20	25	8.5	33.5
0.300	2	25	30	16.6	46.6
0.450	3	30	35	12.4	47.4
0.987	4	35	40	14.2	54.2

Una forma de simular el sistema, sería de acuerdo a la secuencia de la tabla descrita anteriormente, pero en un caso real los eventos ocurren de manera aleatoria; por ello es que el modelo de simulación será como se observa a continuación.

5.3.5 Simulación de un turno de 8 horas de trabajo.

Aquí se va a tomar en cuenta que los trabajadores ingresan a las 8:00 a.m. empleando 100 minutos en prepararse y trasladarse, luego empiezan a trabajar a las 9:40 a.m. hasta las 11:30 a.m. Luego emplean 60 minutos en refrigerio y retorno a la labor, para luego continuar su trabajo hasta completar su turno.

Tabla N° 5.8

OPEN PIT MINA DE COBRE ABC.					
N° Total de viajes en el 1er bloque del turno simulado de 8 horas = 21					
Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Ciclo	Llegada
0.477	3	0	5	12.4	17.4
0.767	4	5	10	24.2	34.2
0.316	2	10	15	16.6	31.6
0.854	4	15	20	24.2	44.2
0.997	4	20	25	24.2	49.2
0.869	4	25	30	24.2	54.2
0.204	1	31.6	36.6	8.5	45.1
0.872	4	36.6	41.6	24.2	65.8
0.185	1	44.2	49.2	8.5	57.7
0.134	1	49.2	54.2	8.5	62.7
0.538	4	54.2	59.2	24.2	83.4
0.687	4	59.2	64.2	24.2	88.4
0.422	3	64.2	69.2	12.4	81.6
0.202	1	69.2	74.2	8.5	82.7
0.555	4	74.2	79.2	24.2	103.4
0.137	1	81.6	86.6	8.5	95.1
0.345	2	86.6	91.6	16.6	108.2
0.583	4	91.6	96.6	24.2	120.8
0.417	3	96.6	101.6	12.4	114
0.650	4	101.6	106.6	24.2	130.8
0.288	2	106.6	111.6	16.6	128.2

Tabla N° 5.9

OPEN PIT MINA DE COBRE ABC.					
N° Total de viajes en el 2do bloque del turno simulado de 8 horas = 39					
Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Ciclo	Llegada
0.477	3	0	5	12.4	17.4
0.767	4	5	10	24.2	34.2
0.316	2	10	15	16.6	31.6
0.854	4	15	20	24.2	44.2
0.997	4	20	25	24.2	49.2
0.869	4	25	30	24.2	54.2
0.204	1	31.6	36.6	8.5	45.1
0.872	4	36.6	41.6	24.2	65.8
0.185	1	44.2	49.2	8.5	57.7
0.134	1	49.2	54.2	8.5	62.7
0.538	4	54.2	59.2	24.2	83.4
0.687	4	59.2	64.2	24.2	88.4
0.422	3	64.2	69.2	12.4	81.6
0.202	1	69.2	74.2	8.5	82.7
0.555	4	74.2	79.2	24.2	103.4
0.037	1	81.6	86.6	8.5	95.1
0.946	4	86.6	91.6	24.2	115.8
0.583	4	91.6	96.6	24.2	120.8
0.931	4	96.6	101.6	24.2	125.8
0.650	4	101.6	106.6	24.2	130.8
0.628	4	106.6	111.6	24.2	135.8
0.255	2	115.8	120.8	16.6	137.4
0.653	4	120.8	125.8	24.2	150
0.956	4	125.8	130.8	24.2	155
0.239	2	130.8	135.8	16.6	152.4
0.825	4	135.8	140.8	24.2	165
0.261	2	140.8	145.8	16.6	162.4
0.068	1	150	155	8.5	163.5
0.390	3	155	160	12.4	172.4
0.152	1	160	165	8.5	173.5
0.933	4	165	170	24.2	194.2
0.173	1	170	175	8.5	183.5
0.225	2	175	180	16.6	196.6
0.497	3	180	185	12.4	197.4
0.306	2	185	190	16.6	206.6
0.368	3	190	195	12.4	207.4
0.125	1	195	200	8.5	208.5
0.124	1	200	205	8.5	213.5
0.511	4	205	210	24.2	234.2
T. Ocioso 1		6.60		T. Efectivo 1	111.60
T. Ocioso 2		15.00		T. Efectivo 2	210.00

Donde:

T. Ocioso 1: Tiempo que la pala estuvo sin trabajar en el 1er bloque de las horas efectivas de trabajo

T. Ocioso 2: Tiempo que la pala estuvo sin trabajar en el 2do bloque de las horas efectivas de trabajo

T. Efectivo 1: Tiempo transcurrido en el 1er bloque de horas de efectivas de trabajo

T. Efectivo 2: Tiempo transcurrido en el 2do bloque de horas de efectivas de trabajo

T. Ocioso pala	21.60	T. Efectivo	298.40
T. Lab. extras	160.00	T. Total turno	480.00
T. no trabajado	181.60	Eficiencia	0.622

Donde:

T. Ocioso pala: Tiempo que la pala estuvo sin trabajar en las horas efectivas de trabajo

T. Lab. Extras: Tiempo empleado en traslado de personal, labores de perforación y voladura, etc.

T. no trabajado: Tiempo total que la pala no trabaja en el turno de 8 horas (T. ocioso pala + T. Lab. Extras)

T. Efectivo: Tiempo en que la pala realmente estuvo trabajando en el turno de 8 horas

T. Total turno: Es el tiempo total empleado en el turno de trabajo de 8 horas

Eficiencia: Eficiencia de la pala en el sistema

En la simulación realizada se toma en cuenta dos bloques de tiempo debido al intermedio de descanso en el refrigerio y retorno a las labores, cuyo tiempo acumulado es de 60 minutos. De la tabla de eventos generados con elementos aleatorios se tiene que:

- N° Total de viajes para un turno simulado = 60
- N° de viajes a la Chancadora de Mineral = 15
- N° de viajes al Stock de Baja Ley = 9
- N° de viajes al Stock de M. Marginal = 8
- N° de viajes al Botadero Desmonte = 28

$$T_{total\ turno} = 480.0\ min \rightarrow T_{Efectivo} = 480\ min - 181.6\ min = 298.4\ min$$

$$\therefore Eficiencia\ de\ la\ pala = 0.622$$

5.3.6 Simulación de un turno de 12 horas de trabajo

Otra forma de simular el sistema, sería de acuerdo a la secuencia de la tabla descrita anteriormente, pero en un

caso real los eventos ocurren de manera aleatoria; por ello es que este modelo de simulación será como sigue hasta el instante $t = 600$ min:

Tabla N° 5.10

OPEN PIT MINA DE COBRE ABC.					
N° Total de viajes realizados para 01 turno simulado de 12 horas					
Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Ciclo	Llegada
0.477	3	0	5	12.4	17.4
0.767	4	5	10	24.2	34.2
0.316	2	10	15	16.6	31.6
0.854	4	15	20	24.2	44.2
0.997	4	20	25	24.2	49.2
0.869	4	25	30	24.2	54.2
0.204	1	31.6	36.6	8.5	45.1
0.872	4	36.6	41.6	24.2	65.8
0.185	1	44.2	49.2	8.5	57.7
0.134	1	49.2	54.2	8.5	62.7
0.538	4	54.2	59.2	24.2	83.4
0.687	4	59.2	64.2	24.2	88.4
0.422	3	64.2	69.2	12.4	81.6
0.202	1	69.2	74.2	8.5	82.7
0.555	4	74.2	79.2	24.2	103.4
0.037	1	81.6	86.6	8.5	95.1
0.946	4	86.6	91.6	24.2	115.8
0.583	4	91.6	96.6	24.2	120.8
0.931	4	96.6	101.6	24.2	125.8
0.650	4	101.6	106.6	24.2	130.8
0.628	4	106.6	111.6	24.2	135.8
0.255	2	115.8	120.8	16.6	137.4
0.653	4	120.8	125.8	24.2	150
0.956	4	125.8	130.8	24.2	155
0.239	2	130.8	135.8	16.6	152.4
0.825	4	135.8	140.8	24.2	165
0.261	2	140.8	145.8	16.6	162.4
0.068	1	150	155	8.5	163.5
0.390	3	155	160	12.4	172.4
0.152	1	160	165	8.5	173.5
0.933	4	165	170	24.2	194.2
0.173	1	170	175	8.5	183.5

Tabla N° 5.11

OPEN PIT MINA DE COBRE ABC.					
N° Total de viajes realizados para 01 turno simulado					
Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Ciclo	Llegada
0.767	4	175	180	24.2	204.2
0.497	3	180	185	12.4	197.4
0.950	4	185	190	24.2	214.2
0.769	4	190	195	24.2	219.2
0.703	4	195	200	24.2	224.2
0.124	1	200	205	8.5	213.5
0.511	4	205	210	24.2	234.2
0.262	2	213.5	218.5	16.6	235.1
0.676	4	218.5	223.5	24.2	247.7
0.224	2	223.5	228.5	16.6	245.1
0.534	4	228.5	233.5	24.2	257.7
0.626	4	234.2	239.2	24.2	263.4
0.957	4	239.2	244.2	24.2	268.4
0.918	4	245.1	250.1	24.2	274.3
0.729	4	250.1	255.1	24.2	279.3
0.950	4	257.7	262.7	24.2	286.9
0.285	2	263.4	268.4	16.6	285
0.558	4	268.4	273.4	24.2	297.6
0.132	1	274.3	279.3	8.5	287.8
0.373	3	279.3	284.3	12.4	296.7
0.637	4	285	290	24.2	314.2
0.753	4	290	295	24.2	319.2
0.164	1	295	300	8.5	308.5

Continua tabla N° 5.11					
OPEN PIT MINA DE COBRE ABC.					
N° Total de viajes realizados para 01 turno simulado					
Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Ciclo	Llegada
0.426	3	300	305	12.4	317.4
0.294	2	305	310	16.6	326.6
0.304	2	310	315	16.6	331.6
0.311	2	315	320	16.6	336.6
0.305	2	320	325	16.6	341.6
0.214	1	325	330	8.5	338.5
0.976	4	330	335	24.2	359.2
0.819	4	335	340	24.2	364.2
0.336	2	340	345	16.6	361.6
0.925	4	345	350	24.2	374.2
0.022	1	350	355	8.5	363.5
0.617	4	359.2	364.2	24.2	388.4
0.470	3	364.2	369.2	12.4	381.6
0.105	1	369.2	374.2	8.5	382.7
0.402	3	374.2	379.2	12.4	391.6
0.027	1	379.2	384.2	8.5	392.7
0.653	4	384.2	389.2	24.2	413.4
0.592	4	389.2	394.2	24.2	418.4
0.710	4	394.2	399.2	24.2	423.4
0.298	2	399.2	404.2	16.6	420.8
0.049	1	404.2	409.2	8.5	417.7
0.676	4	413.4	418.4	24.2	442.6
0.584	4	418.4	423.4	24.2	447.6
0.216	1	423.4	428.4	8.5	436.9

Tabla N° 5.12

OPEN PIT MINA DE COBRE ABC					
N° Total de viajes realizados para 01 turno simulado					
Muestra	Destino	H. Inicio	H. Salida	T. Ciclo	Llegada
0.932	4	428.4	433.4	24.2	457.6
0.612	4	433.4	438.4	24.2	462.6
0.167	1	438.4	443.4	8.5	451.9
0.394	3	443.4	448.4	12.4	460.8
0.766	4	448.4	453.4	24.2	477.6
0.523	4	453.4	458.4	24.2	482.6
0.812	4	458.4	463.4	24.2	487.6
0.451	3	463.4	468.4	12.4	480.8
0.954	4	468.4	473.4	24.2	497.6
0.616	4	477.6	482.6	24.2	506.8
0.683	4	482.6	487.6	24.2	511.8
0.479	3	487.6	492.6	12.4	505
0.242	2	492.6	497.6	16.6	514.2
0.644	4	497.6	502.6	24.2	526.8
0.280	2	505	510	16.6	526.6
0.541	4	510	515	24.2	539.2
0.594	4	515	520	24.2	544.2
0.983	4	520	525	24.2	549.2
0.126	1	526.6	531.6	8.5	540.1
0.620	4	531.6	536.6	24.2	560.8
0.375	3	539.2	544.2	12.4	556.6
0.112	1	544.2	549.2	8.5	557.7
0.021	1	549.2	554.2	8.5	562.7
0.311	2	554.2	559.2	16.6	575.8
0.823	4	559.2	564.2	24.2	588.4
0.405	3	564.2	569.2	12.4	581.6
0.214	1	569.2	574.2	8.5	582.7
0.894	4	574.2	579.2	24.2	603.4
0.375	3	579.2	584.2	12.4	596.6
0.181	1	584.2	589.2	8.5	597.7
0.027	1	589.2	594.2	8.5	602.7
0.181	1	594.2	599.2	8.5	607.7
0.393	3	599.2	604.2	12.4	616.6

De la tabla de eventos generados con elementos aleatorios se tiene que:

- N° Total de viajes para un turno simulado = 112
- N° de viajes a la Chancadora de Mineral = 25
- N° de viajes al Stock de Baja Ley = 16
- N° de viajes al Stock de M. Marginal = 15
- N° de viajes al Botadero Desmonte = 56

Asimismo, con los datos del modelo se puede saber el porcentaje de utilización del servidor del sistema:

$$\text{Eficiencia de la pala} = (T.Efectivo) / (T.Total \text{ turno})$$

$$T.Efectivo = (T.Total \text{ turno} - T.no \text{ trabajado})$$

Donde:

- T. Ocioso pala: Tiempo que la pala estuvo sin trabajar en las horas efectivas de trabajo
- T. Lab. extras: Tiempo empleado en traslado de personal, actividades de mantenimiento, labores de perforación y voladura, etc.
- T. no trabajado: Tiempo total que la pala no trabaja en el turno de 12 horas dado por: T. ocioso pala + T. Lab. Extras

–T. Efectivo: Tiempo en que la pala realmente estuvo trabajando en el turno de 12 horas

–T. Total turno: Es el tiempo total empleado en el turno de trabajo de 12 horas

–Eficiencia: De la pala en el sistema

Luego:

T. Ocioso pala	44.20
T. Lab. extras	120.00
T. no trabajado	164.20

T. Efectivo	555.80
T. Total turno	720.00
Eficiencia	0.772

T. total turno = 720.0 min.

$$T.Efectivo = 720.0 \text{ min} - 164.20 \text{ min} = 555.8 \text{ min}$$

Finalmente:

$$Eficiencia \text{ de la pala} = 0.772$$

Ahora bien, si en el open pit se trabajara con camiones Cat 793C, cuya capacidad neta de transporte es de 235 Tm, considerando el factor de esponjamiento del mineral; se tendrá que en un turno se produce:

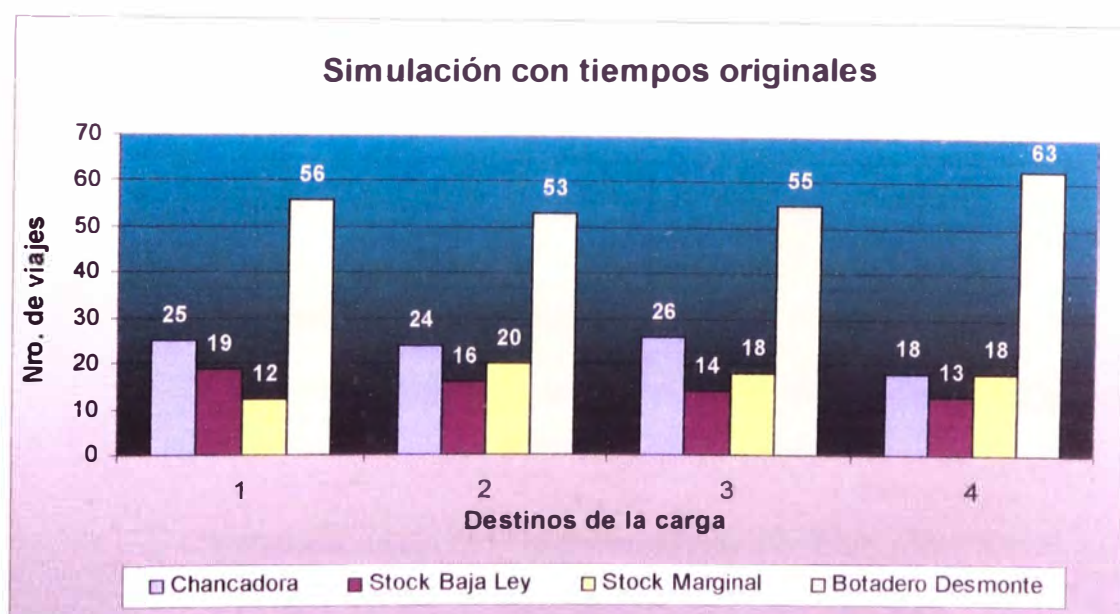
–5875 Tm de mineral

–3760 Tm de mineral de baja ley

–3525 Tm de mineral marginal

-13160 Tm de desmorte

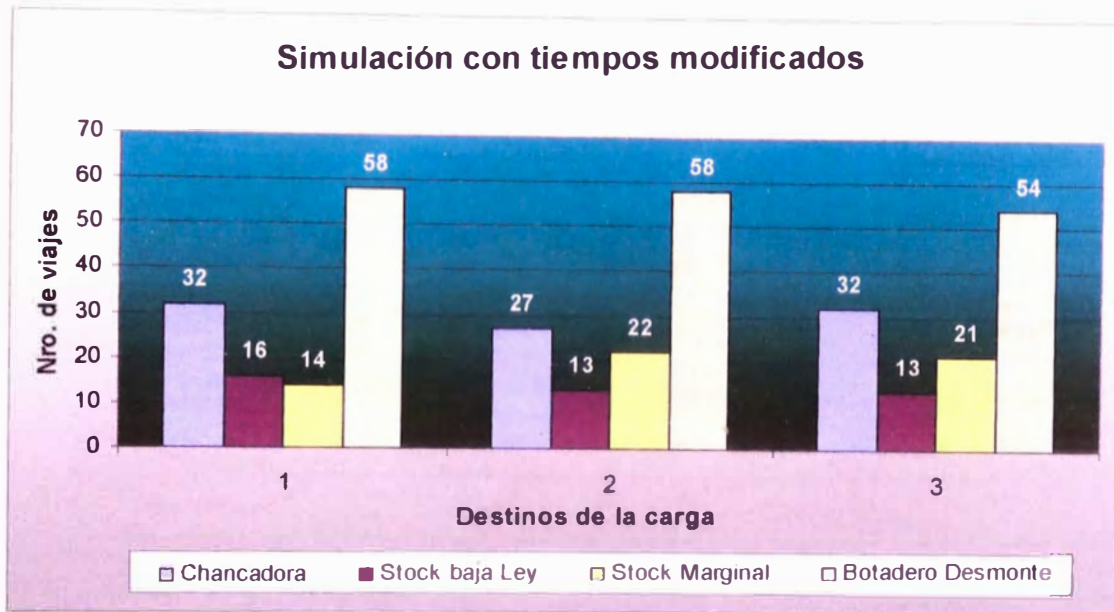
Por otro lado, a manera de comprobación de resultados se realizaron 4 simulaciones adicionales, obteniéndose el siguiente cuadro comparativo:



De igual forma simulando el sistema acortando tiempos se obtuvo lo siguiente:

Tabla N° 5.13

Tiempos	Ida	Retorno	T. Demora
Acarreo de mineral	4.5	4	8.5
Acarreo de mineral baja ley	5.6	5	10.6
Acarreo de mineral marginal	6.4	6	12.4
Acarreo de desmorte	7.2	7	14.2



5.3.7 Evaluación de resultados

En el turno de 08 horas simulado del total de viajes: el 25% se va a la chancadora de mineral, el 15% se va al stock de mineral de baja ley, 13.33% se va al stock de mineral marginal y el 46.67% se va al botadero de desmorte.

Alternativamente para el turno de 12 horas simulado del total de viajes: el 22.33% se va a la chancadora de mineral, el 14.28% se va al stock de mineral de baja ley, 13.39% se va al stock de mineral marginal y el 50% se va al botadero de desmorte.

Se recomienda estudiar la posibilidad de construir un botadero más cercano a la zona de operación a fin de incrementar el número de viajes a la chancadora.

El porcentaje de utilización de la pala es de 62.2% para un turno de 08 horas y de 77,2% para un turno de 12horas, en ambos casos incrementaría el porcentaje si se concretara lo sugerido en el comentario anterior.

CAPITULO VI: INTERPRETACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS CASOS-ESTUDIO.

6.1 Introducción.

Para efectuar la interpretación y análisis correspondiente; los resultados obtenidos usando la simulación de Montecarlo para un turno de trabajo de 8 horas y para otro de 12 horas serán analizados y evaluados desde un punto de vista: Técnico-económico, los que serán expresados en US\$/Tm transportada.

6.2 Contratación de la hipótesis.

Como se podido demostrar en los dos casos-estudio que aplicando el modelo matemático de simulación en las operaciones mineras binomiales de carguío y acarreo se ha logrado en los resultados disminuir los tiempos de trabajo no productivos en el sistema pala-camión.

Cuyo resultado usando este modelo matemático se demostrará en los casos-estudio lográndose mejorar producción y productividad en US\$/Tm. transportada.

Los resultados más significativos de la simulación de un turno de 8 horas son los siguientes:

Como se puede apreciar en la tabla N° 5.8, el número total de viajes en el primer bloque del turno simulado es de 21.

En la tabla N° 5.7, el número total de viajes en el segundo bloque del turno es de 39.

Analizando y sintetizando el presente caso-estudio se debe expresar que en la simulación realizada se toma en cuenta dos bloques de tiempo debido al intermedio del descanso en el refrigerio y retorno a las labores, cuyo tiempo acumulado es de 60 minutos. De la tabla de eventos generados con elementos aleatorios, se tiene que:

N° total de viajes para un turno simulado = 60

N° de viajes a la chancadora = 15

N° de viajes al stock de baja ley = 9

N° de viajes al stock de mineral marginal = 8

N° de viajes al botadero de desmonte = 28

Calculo de la eficiencia (turno 8 horas)

Tiempo total 480 min.

Tiempo efectivo = 480 min - 181.6 min = 298.4 min.

$$\therefore \text{Eficiencia} = \frac{298.4 \text{ min}}{480 \text{ min}} = 0.621$$

$$\therefore \text{Eficiencia} = 62.2\%$$

Por otro lado, en este caso del total de viajes, el 25% se va a la chancadora de mineral, el 15% se va al stock de mineral de baja ley, el 13.33% se va al stock de mineral marginal y el 46.64% se va al botadero de desmonte.

Simulación de un turno de 12 horas de trabajo.

El número total de viajes realizados para un turno simulado de 12 horas; se muestran en las tablas respectivas.

De las tablas de eventos generados con elementos aleatorios se puede concluir con lo siguiente:

N° total de viajes para un turno simulado = 112

N° de viajes a la chancadora de mineral = 25

N° de viajes al stock de baja ley = 16

N° de viajes al stock de mineral marginal = 15

N° de viajes al botadero de desmonte = 56

El porcentaje de utilización del servicio del sistema será:

$$\text{Eficiencia de la pala} = (T.\text{Efectivo}) / (T.\text{Total turno})$$

$$T.\text{Efectivo} = (T.\text{Total turno} - T.\text{no trabajado})$$

Donde:

T. Ocioso pala: Tiempo que la pala estuvo sin trabajar en las horas efectivas de trabajo

T. Lab. Extras: Tiempo empleado en traslado de personal, labores de perforación y voladura.

T. no trabajado: Tiempo total que la pala no trabaja en el turno de 8 horas (T. ocioso pala + T. Lab. Extras)

T. Efectivo: Tiempo en que la pala realmente estuvo trabajando en el turno de 12 horas

T. Total turno: Es el tiempo total empleado en el turno de trabajo de 12 horas.

Calculo de la eficiencia de la pala en el sistema. De los resultados, se tiene:

T. Ocioso pala	44.20
T. Lab. Extras	120.00
T. No trabajado	164.20
T. Efectivo	555.8
T. Total turno	720
Eficiencia	0.772

Total turno: 720 min

Tiempo efectivo = 720 min – 164.20 min = 555.8 min.

Luego:

$$EFF = \frac{555.8 \text{ min}}{720 \text{ min}} = 0.772$$

$$\therefore \text{Eficiencia} = 77.2\%$$

También, se debe mencionar que para la simulación de un turno de 12 horas; del total de viajes el 22.33% se van a la chancadora de mineral, el 14.28 va al stock de mineral de baja ley, 13.39% se va al stock de mineral marginal y el 50% se va al botadero de desmonte.

En el anexo 1, se adjunta que la FIGMM-UNI actualmente está haciendo esfuerzos en motivar e incentivar a los profesores y alumnos para llevar a cabo investigaciones aplicadas. Esto conlleva que uno de los objetivos de la UNI se esta cumpliendo.

CONCLUSIONES.

Después de realizar el presente trabajo de investigación se pueden esgrimir las siguientes principales conclusiones:

1. Se ha demostrado que el modelo matemático gerencial llamado simulación usado para encontrar la mejor alternativa para dar solución al sistema minero: Pala-camión es la más adecuada; porque permite usar eventos aleatorios que es justamente los que ocurren en dichas operaciones mineras.
2. Aplicando simulación a los sistemas mineros usando pala-camión permite obtener costos adecuados e . US\$/Tm transportada.
3. Se debe estudiar la posibilidad de construir un botadero más cercado a la zona de operación con el fin de incrementar el número de viajes al chancador.
4. En todas las operaciones mineras tanto nacionales como internacionales se debe usar el modelo matemático de simulación en los diversos sistemas de carguío y acarreo, etc.

RECOMENDACIONES.

Después de realizar el presente estudio de investigación aplicada, se arriban a las siguientes recomendaciones:

1. Para minimizar los costos operacionales en US\$/Tm explotada o transportada en todas y cada una de las operaciones mineras unitarias que componen el ciclo total de minado, se deben aplicar los modelos matemáticos que ofrece la investigación de operaciones. Se debe continuar aplicando el modelo matemático de simulación en minera Southern copper.
2. Por lo tanto, se debe establecer e instalar en todas las operaciones mineras, ya sea subterráneas y/o superficiales un departamento de investigación de operaciones, así como lo hacían las compañías mineras americanas en el Perú en la década de los sesenta antes del golpe de estado.

4. Se ha demostrado a través de uno de los casos-estudio que la simulación de Montecarlo, es un modelo matemático gerencial moderno, útil y fácil de aplicar para dar soluciones adecuadas, oportunas y confiables a cualquier problema del mundo industrial moderno.

BIBLIOGRAFÍA.

1. **Agreda C.** "Investigación de operaciones" - Teoría y aplicaciones, Lima – Perú.
2. **Calder, P:** "Open pit mine design", Canada.
3. **Fishman, G.** "Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos", Limusa. México.
4. **Gordon, G.** "Simulación de sistemas"- Edit. Diana, Mexico.
5. **Fishman G.S.** "Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos", Limusa, México, 1978.
6. **Law A.M., Kelton W.D.** "Simulation Modeling & Analysis", Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.
7. **Shannon, R. E.** "Systems simulation", USA, 2009.
8. **Sturgal, J.** "Simulation models to study the effect of computerized truck dispatching in a mine". E&MJ.
9. **Taha, H. A.** "Simulation modeling and SIMNET" – Prentice, Hall.
10. **Wyman, F. P.** "Simulation modeling". Jhon Willey and sons. N.Y.
11. **Wilson E:** "Operations Research", Canada.