



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**Simulación del impacto de interferencias operacionales para
la planificación de producción**

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas

Por:

Sebastián Horacio Troncoso Bórquez

Profesor guía:

Enrique Rubio Esquivel

Miembros de la Comisión:
Francisco Walther Salamanca y Andrés Susaeta Margulis

Santiago de Chile – Diciembre 2006

Texto completo en: www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2006/troncoso_s/sources/troncoso_s.pdf

Resumen

El objetivo principal de este trabajo de título es cuantificar el impacto que generan las interferencias operacionales (colgaduras, sobretamaño, barro, enlampamientos) en la productividad de una mina subterránea, explotada mediante el método panel caving, con el objeto de generar planes mineros, que reflejen las capacidades productivas reales del sistema minero.

La planificación minera generalmente se realiza incorporando supuestos sobre el comportamiento productivo de la mina que se incorporan de manera heurística ex-post a la construcción de un plan, a través de factores de ajuste, generando resultados no reproducibles y que no utilizan formalmente la valiosa información recopilada en la operación de la mina, obteniendo como resultado planes mineros difícilmente alcanzables por la operación.

Se estudió la frecuencia histórica de ocurrencia de eventos de interferencia en puntos de extracción para identificar sectores de alta, media y baja tendencia a la interrupción en el nivel de producción de la mina III Panel LHD de Andina entre los años 2003 y 2004. Mediante un modelo de simulación computacional, que describe el funcionamiento de una unidad productiva básica del sistema minero estudiado, se estimó la capacidad productiva máxima de los cruzados de acarreo de cada uno de los sectores identificados. Además se realizaron análisis de sensibilidad de la capacidad productiva en torno a distintas estrategias operativas y cantidad de recursos disponibles. Esto permitió construir nomogramas de productividad que permiten incorporar en el plan de producción una restricción que considera la productividad máxima potencial de distintos sectores de la mina, en función de una estrategia y una cantidad de recursos mineros disponibles.

Los resultados muestran que la productividad del sistema minero depende al menos de la frecuencia de ocurrencia de eventos en sus diferentes componentes de infraestructura, del número de cuadrillas de reducción secundaria y de la estrategia de cierre de cruzados de producción para su reparación. Se observan diferencias desde un 1% hasta un 35% en la productividad mensual de los cruzados de acarreo por cambios de estrategia en el cierre de cruzados de producción y desde un 3% hasta un 77% por cambios en la cantidad de cuadrillas de reducción secundaria.

De acuerdo a lo anterior, se recomienda integrar al proceso de planificación minera los nomogramas presentados en esta memoria de modo de disminuir las diferencias entre el plan y lo actual.

Índice de contenidos

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
	Objetivos generales	3
	Objetivos específicos	3
1.2	Alcances.....	3
1.3	Metodología	4
2	Antecedentes.....	6
2.1	Planificación de la producción	6
2.2	Interferencias operacionales.....	8
	Fragmentación.....	8
	Puntos de extracción	10
	Piques de traspaso	13
	Buzones	16
2.3	Simulación.....	17
3	Tonelaje entre eventos de interferencia	20
3.1	Información de puntos de extracción	20
	Base de datos de extracción histórica.....	20
	Base de datos de estado de puntos de extracción.....	22
	Frecuencia de registro de estado de puntos de extracción.....	25
	Metodología de búsqueda	25
	Registros de tonelaje entre eventos de interferencia	27
3.2	Información de piques de traspaso.....	28
3.3	Análisis estadístico de información.....	29
	Estadísticas grupo General.....	30
	Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2.....	31
	Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4	33
4	Sectorización del nivel de producción	36
4.1	Fundamentos de la sectorización	36
4.2	Sectorización global	36
4.3	Sectorización normalizada.....	41
	Entre 0 – 50 Kt extraídas	42
	Entre 50 -150 Kt extraídas	44
	Entre 150 – 250 Kt extraídas	46
4.4	Sectorización final y ajuste de distribuciones por sectores	48

4.5	Fenomenología de las distribuciones de TEE por sectores	53
5	Construcción del Modelo de simulación	55
5.1	Infraestructura de la mina	55
5.2	Entidades operativas	57
5.3	Especificaciones de funcionamiento	58
	Puntos de extracción	58
	Tiempo entre llegadas	58
	Eventos de interferencia	59
	Equipo LHD	61
	Ciclo de carguío	63
	Mineral	63
	Piques de traspaso	64
	Eventos de interferencia	65
	Cuadrillas de reducción secundaria	66
	Reparación de puntos de extracción	66
	Reparación de piques de traspaso	67
	Camiones	69
	Ciclo de transporte	69
	Buzones	70
	Reparación de buzones	71
5.4	Parámetros del modelo	74
	Parámetros generales	74
	Parámetros constantes entre experimentos	75
	Parámetros variables entre simulaciones	76
5.5	Validación del modelo de simulación	77
	Información histórica	77
	Variables de ajuste	79
	Convergencia y tiempos de simulación	83
6	Resultados	86
6.1	Resultados de experimentos de simulación	87
	Sector A	87
	Sector B	88
	Sector C	89
6.2	Análisis de resultados	90
	Impacto del TEE a nivel de puntos de extracción	90
	Impacto del número de cuadrillas de reducción secundaria	91

Impacto de la estrategia de cierre de cruzados de producción.....	92
Impacto del TEE a nivel de piques de traspaso y buzones	95
6.3 Nomogramas de productividad	96
Sector A.....	96
Sector B.....	98
Sector C	100
7 Conclusiones y recomendaciones	102
7.1 Conclusiones.....	102
7.2 Recomendaciones.....	104
8 Bibliografía.....	105
9 Anexos	107
9.1 Anexo A: Software de simulación	107
9.2 Anexo B: Detalle estadístico por grupos y rangos de tonelaje	108
0 – 50(Kt) extraídas	109
Estadísticas grupo General	109
Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2	109
Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4.....	110
50 – 150(Kt) extraídas	112
Estadísticas grupo General	112
Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2	112
Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4.....	113
150 – 250(Kt) extraídas	115
Estadísticas grupo General	115
Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2	116
Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4.....	116
9.3 ANEXO C: Detalle estadístico por sectores y rangos de tonelaje	119
9.4 ANEXO D: Test de hipótesis del ajuste de distribuciones.....	121

Índice de figuras

Diagrama esquemático del proceso de hundimiento.....	9
Distintos tipos de colgadas.	10
Colgada en pique de traspaso.	13
Interferencias operacionales en piques de traspaso.	14
Alternativas para solventar colgadas en piques de traspaso.....	15
Partes fijas de un buzón.	16
Partes móviles de un buzón.....	16
Formato de la información de extracción histórica entregada.	20
Formato de la información de estado de puntos de extracción entregada.....	22
Formato transformado de la información de estado de puntos de extracción.....	22
Formato final de la información del estado de puntos de extracción.	23
Formato de la información de intervalos de tiempo entre eventos.....	24
Diagrama conceptual de la obtención del tonelaje entre eventos.....	27
Nivel de producción clasificado según eventos entre 0 – 250Kt.....	38
Nivel de producción sectorizado.	39
Nivel de producción clasificado según eventos entre 0 – 50Kt.....	43
Nivel de producción clasificado según eventos entre 50 – 150Kt.....	45
Nivel de producción clasificado según eventos entre 150 – 250Kt.....	47
Sectorización final del nivel de producción.....	50
Nivel de producción (contacto primario / secundario).....	53
Puntos de extracción colapsados.....	54
Relaciones de conectividad del modelo de simulación implementado.	56
Modelamiento del ingreso de entidades al sistema y conexión entre puntos de extracción y piques de traspaso.	61
Estructura conceptual del pique de traspaso.	64
Modelamiento de ocurrencia de eventos de interferencia y reparación de puntos de extracción.	67
Modelamiento de la ocurrencia de eventos y reparación de piques de traspaso.....	68
Modelamiento de interrupción de flujos por piques llenos.	69
Modelamiento de la ocurrencia de interferencias y reparación de buzones.	72
Vista general del modelo de simulación completo.....	73
Distancias relacionadas al ciclo del equipo LHD.....	76
Distancias relacionadas al ciclo de camiones.	76
Estructura jerárquica del funcionamiento de Arena 7.01.....	107

Índice de gráficos

Diferencias entre la producción planificada y la obtenida (actual), para un cruzado de acarreo específico.	2
Número de muestreos de estado de puntos de extracción en el tiempo.	25
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (0 – 250Kt).	30
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Fenomenológico 1 (0 – 250Kt).	31
Número de registros de interferencias operacionales en el tiempo.	32
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Fenomenológico 2 (0 – 250Kt).	32
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 1 (0 – 250Kt).	33
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 2 (0 – 250Kt).	34
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 3 (0 – 250Kt).	34
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 4 (0 – 250Kt).	35
Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (0 – 250Kt).	37
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo General (0 – 250Kt) por sectores.	40
Productividad promedio mensual por punto (sectorizado).	41
Evolución de la frecuencia de eventos a nivel de puntos de extracción en el tonelaje extraído.	41
Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (0 – 50Kt).	42
Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (50 – 150Kt).	44
Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (150 – 250Kt).	46
Evolución del TEE promedio del grupo General.	48
Evolución del TEE promedio del grupo Fenomenológico 1.	49
Evolución del TEE promedio grupo Fenomenológico 2.	49
Comparación cuantil a cuantil de distribuciones ajustadas por sectores.	51
Histograma y estadísticas básicas de TEE utilizados para el ajuste de distribuciones por sectores.	52
Evolución de la productividad del cruzado de acarreo (simulación).	80
Dispersión entre el tonelaje real obtenido y el mejor ajuste del modelo de simulación.	81
Dispersión de tonelajes plan-actual (2005).	82
Dispersión de tonelajes actual (2005)-resultados modelo de simulación (promedio replicaciones).	82
Convergencia del modelo de simulación.	83
Error promedio de las simulaciones.	84
Relación del tiempo de ejecución de experimentos de simulación y el lapso simulado.	84
Impacto del TEE en puntos de extracción (sectores) en la productividad del cruzado de acarreo, 30Kt/evento en piques y buzones.	90

Impacto del número de cuadrillas en la productividad del cruzado de acarreo, 30Kt/evento en piques y buzones.....	91
Impacto de la estrategia de reducción secundaria, 30Kt/evento en piques y buzones.	92
Relación entre estrategia de reducción secundaria y TEE en puntos de extracción (30Kt/evento en piques de traspaso y buzones).	93
Impacto de la tasa de ocurrencia de eventos en piques y buzones.....	95
Nomograma de productividad máxima potencial, sector A.....	96
Nomograma de productividad máxima potencial, sector B.....	98
Nomograma de productividad máxima potencial, sector C.....	100
Frecuencia de eventos en el tonelaje extraído.....	108
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (0 – 50Kt).....	109
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 1 (0 – 50Kt).	109
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 2 (0 – 50Kt).	110
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 1 (0 – 50Kt).....	110
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 2 (0 – 50Kt).....	111
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 3 (0 – 50Kt).....	111
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (50 – 150Kt).	112
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 1 (50 – 150Kt).	112
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 2 (50 – 150Kt).	113
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 1 (50 – 150Kt).....	113
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 2 (50 – 150Kt).....	114
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 3 (50 – 150Kt).....	114
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 4 (50 – 150Kt).....	115
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (150 – 250Kt).	115
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 1 (150 – 250Kt).	116
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 2 (150 – 250Kt).	116
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 1 (150 – 250Kt).....	117
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 2 (150 – 250Kt).....	117
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 3 (150 – 250Kt).....	118
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 4 (150 – 250Kt).....	118
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (0 – 50Kt) por sectores.	119

Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (50 – 150Kt) por sectores.....	120
Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (150 – 250Kt) por sectores.....	121

Índice de tablas

Interferencias operacionales a nivel de puntos de extracción y su fenomenología.....	10
Diferencias generadas por el tipo de búsqueda.	27
Grupos de tipos de eventos de interferencia considerados en el análisis.....	29
Tabla resumen de estadísticas básicas por grupos de datos (0-250Kt).	35
Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (0 – 250Kt).....	37
Rangos de tonelaje extraído considerados.	42
Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (0 – 50Kt).	43
Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (50 – 150Kt)...	44
Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (150 – 250Kt).	46
Número de puntos de extracción asociados a cada sector.	50
Parámetros generales de los experimentos de simulación.....	74
Parámetros fijos utilizados en los experimentos de simulación.	75
Infraestructura considerada para la validación.	78
Productividad histórica utilizada para la validación.	79
Subdivisión temporal considerada para la validación.	79
Valores de variables utilizadas en la validación,	85
Resultados obtenidos, sector A.	87
Resultados obtenidos, sector B.	88
Resultados obtenidos, sector C.	89
Productividad normal y factor de ajuste para nomograma de productividad máxima potencial, sector A.	97
Productividad normal y factor de ajuste para nomograma de productividad máxima potencial, sector B.	99
Productividad normal y factor de ajuste para nomograma de productividad máxima potencial, sector C.	101
Intervalos de tonelaje extraído considerados en el análisis.....	108
Resultados del test Chi-2 de bondad de ajuste.....	122

1 Introducción

La planificación minera es la actividad que define cuándo y cómo se extraerán los recursos económicos presentes en un yacimiento mineral. Su importancia es vital para el desarrollo de la actividad, debido a que permite enlazar los objetivos estratégicos de una compañía minera dada con el recurso. Una de las principales tareas de la planificación es generar el plan minero que define los tonelajes y las leyes respectivas a ser extraídas durante la vida de la mina, lo que se traduce finalmente en una cuantificación del potencial económico de un yacimiento dado en el tiempo. Es por esto, que en el proceso de planificación se está apostando no tan solo por un determinado comportamiento productivo a nivel mina, si no además se compromete el porvenir económico de la faena completa, tanto en sus labores de extracción como de beneficio.

La minería en general, y en particular la de hundimiento por bloques o paneles, puede asimilarse, a grandes rasgos, a una máquina que toma el macizo rocoso in situ y lo entrega fragmentado para los procesos posteriores de concentración. Dada la incertidumbre asociada al conocimiento de las características de este cuerpo mineral muchas veces, en el proceso de planificación deben introducirse supuestos empíricos que den cuenta del comportamiento que tendrá esta materia prima (roca) en la máquina productora (sistema minero), generalmente estos supuestos son incorporados ex post a la ejecución de un determinado plan lo que genera resultados no reproducibles y planes mineros difícilmente alcanzables por la operación. Puntualmente, en la minería de Block Caving, suele considerarse como un cuello de botella a la productividad en la planificación, la velocidad máxima de extracción de un punto en un periodo de tiempo dado (geomecánica), es decir la productividad total del sistema se obtiene como la suma de las productividades de cada punto, olvidándose que el sistema de acarreo asociado también es limitado y afectado por numerosos eventos dependientes de la operación o del macizo rocoso propiamente tal que interfieren en su funcionamiento, por lo que la productividad de la mina está asociada a todas las componentes del sistema de manejo de materiales, lo que puede reflejar o no la posible existencia de un cuello de botella a nivel de puntos de extracción.

La siguiente gráfica muestra de manera cuantitativa las diferencias entre la producción planificada y la realmente obtenida a nivel mina, para un cruzado de acarreo en particular en el periodo 2005:

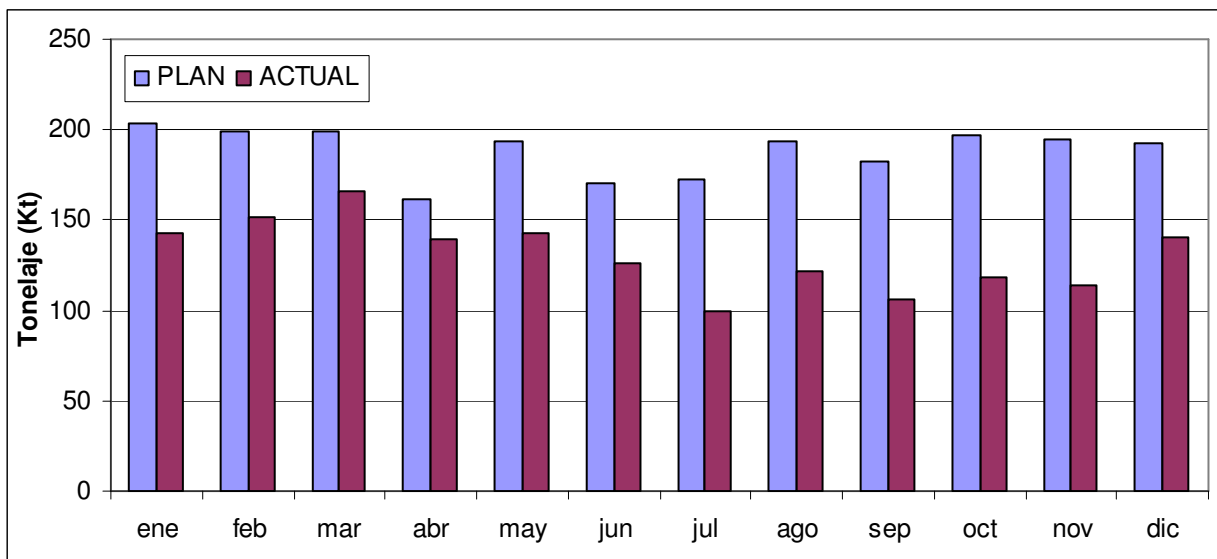


Gráfico 1-1. Diferencias entre la producción planificada y la obtenida (actual), para un cruzado de acarreo específico.

Estas diferencias producen que la operación se vea obligada a considerar conductas inapropiadas como la minería de dilución, la extracción de producción no planificada desde puntos más cercanos a los piques de traspaso (para reducir el ciclo del LHD y aumentar su productividad), entre otras que se traducen en una pérdida del valor que el recurso mineral es capaz de entregar al adelantar la entrada de la dilución, por ejemplo.

Resultan particularmente relevantes en el cumplimiento de un plan de producción dado, las interferencias operacionales (colgadas, sobretamaño, barro, enlampamientos, entre otras que no fueron consideradas en este trabajo), que dependiendo su magnitud, disponibilidad de recursos para solucionarlas, estrategias de operación existentes, etc. impactan de diferente manera en la promesa productiva. Para estudiar el impacto de éstas en la productividad se implementará en el programa de simulación Arena de Rockwell software, una unidad productiva básica que se vea afectada a través del tiempo por diferentes interrupciones operacionales introducidas como una distribución de probabilidad de ocurrencia. La simulación pretende cuantificar la capacidad productiva máxima potencial de esta unidad (con determinadas distribuciones de probabilidad para distintos sectores de la mina, obtenidas del análisis de la ocurrencia histórica), de manera de generar una restricción al proceso de planificación que

considere las interferencias operacionales, cuantificando el tonelaje máximo que un cruzado de transporte es capaz de sostener en un tiempo determinado.

1.1 Objetivos

Objetivos generales

- Cuantificar el impacto en la productividad del sistema minero que generan las interferencias operacionales.
- Generar una metodología para incorporar el impacto de las interferencias operacionales en la planificación de producción.

Objetivos específicos

- Identificar problemas operacionales puntuales que influyen en el cumplimiento del plan de producción, filtro y clasificación.
- Estudiar la frecuencia de ocurrencia de interferencias operacionales en base a la información histórica recopilada.
- Incorporar las distribuciones de probabilidad de ocurrencia de eventos en un modelo de simulación que permita cuantificar la productividad máxima de los cruzados de producción.
- Enlazar la productividad de los cruzados de producción con los cruzados de acarreo.
- Analizar el impacto en la productividad de diferentes estrategias y cantidad de recursos disponibles para la planificación.
- Validar el modelo de simulación con las productividades históricas de la mina en estudio.

1.2 Alcances

Este trabajo se engloba en la minería de hundimiento por bloques o paneles. La cuantificación del impacto de las interferencias operacionales en la productividad apunta hacia la planificación de la producción de mediano plazo (plan minero anual, con escala mensual, que sustenta el presupuesto de operaciones). Sólo se considerarán interferencias relacionadas con el comportamiento geotécnico del macizo rocoso, por lo que eventualidades en la no disponibilidad de equipos o recursos en general quedan fuera del alcance del estudio.

La mina en estudio corresponde al III Panel LHD de la División Andina de Codelco Chile. La información recopilada de los periodos 2003 y 2004 se utiliza para cuantificar las restricciones

de productividad generadas por interferencias operativas. La información del 2005 se utiliza en la validación del modelo computacional de simulación utilizado (simulación computacional de eventos discretos).

Los eventos de interferencia operacional considerados en el trabajo a desarrollar son los siguientes:

- Colgadas.
- Sobretamaño.
- Barro.
- Enllampamientos.

1.3 Metodología

Para llevar a cabo el trabajo en cuestión, primeramente se identificarán aquellos problemas operacionales que razonablemente puedan influir en el cumplimiento de un determinado plan de producción. El filtraje y clasificación de la información obtenida constituye una parte importante del trabajo de título desarrollado de modo de facilitar la posterior identificación de sectores en el nivel de producción con distintas probabilidades de ocurrencia de las diferentes interferencias consideradas. Se ajustarán posteriormente distribuciones de probabilidad a los datos recopilados, separados por los sectores identificados, para introducirlas en el modelo de simulación, que debe representar de la mejor manera posible la disposición geométrica y funcional del sistema minero considerado, de modo que el nivel de producción y el nivel de transporte estén correctamente enlazados.

Posterior a la validación del correcto funcionamiento del modelo de simulación con información histórica, el paso a seguir es realizar variados análisis, de modo de entender como varía la productividad de un cruzado de acarreo determinado con la ejecución de distintas estrategias operativas (reducción secundaria), distintas probabilidades de ocurrencia de eventos de interferencia en las componentes de infraestructura asociadas y el número de recursos disponibles para resolverlas. Con lo anterior se pretende generar diversas curvas de diseño que permitan al planificador cuantificar la productividad potencial máxima de los cruzados de acarreo de distintos sectores de la mina en base a sus recursos disponibles y al comportamiento del sistema minero, en lo que a interferencias se refiere, para ser consideradas en la construcción de un plan de producción.

Más puntualmente, los diferentes hitos a alcanzar durante el desarrollo del trabajo son los siguientes:

- Identificación de diferentes tipos de eventos de interferencia a considerar en el estudio.
- Obtención de registros del tonelaje entre eventos de interferencia (TEE) a partir de la información histórica.
- Filtraje y clasificación de información. Estudio estadístico por grupos de datos asociados a fenomenología de ocurrencia.
- Sectorización del nivel de producción en base a diferentes frecuencias de ocurrencia de eventos de interferencia observadas.
- Ajuste de distribuciones de probabilidad de ocurrencia (como TEE) para los sectores encontrados en el punto anterior.
- Construcción de un modelo de simulación capaz de reproducir el funcionamiento del sistema minero en estudio.
- Validación del modelo de simulación con información histórica.
- Análisis en el modelo de simulación del impacto en la productividad de las interferencias operacionales y distintas estrategias de operación y número de recursos en la productividad del sistema minero.
- Conclusiones y recomendaciones.

2 Antecedentes

2.1 Planificación de la producción

La planificación minera puede definirse como el proceso mediante el cual el recurso mineral se transforma en el mejor negocio productivo para el dueño, que se alinea con los objetivos estratégicos de la compañía. Este negocio está sujeto a restricciones derivadas del recurso mineral además del mercado, disponibilidad de recursos humanos y de capital, tecnología y el entorno social y medioambiental en el cual se desenvuelve. Pueden distinguirse entonces diversos subgrupos en la planificación:

- Planificación estratégica: tiene que ver con aquellos factores que determinan el valor del recurso minero y cómo estos se relacionan con el mercado respectivo.
- Planificación conceptual: es el proceso que delinea los recursos minerales y físicos existentes para conducir a la meta productiva definida como parte de la planificación estratégica y generalmente se enmarca dentro de un ámbito de proyecto. En esta etapa es donde se definen la capacidad y vida de la mina, además de las reservas.
- Planificación operativa: una vez que la mina es puesta en operación, se realizan diversas actividades de optimización de equipos y procesos que conducen a la consecución del plan minero definido en la planificación conceptual. En esta etapa se produce retroalimentación hacia la planificación conceptual de modo de redefinir algunos conceptos y generar los proyectos que permitan alinearse con el plan minero. El aporte de la planificación operativa es fundamental desde el punto de vista de la definición de indicadores operacionales y retro análisis de planificación.

La planificación, orientada a la minería de hundimiento debe considerar diferentes modelos que describan el comportamiento del recurso minero de la mejor manera posible, de esta forma pueden identificarse al menos los siguientes:

- Modelos de fragmentación (block caving): estima la granulometría del mineral y es base para el diseño minero, incorpora parámetros de mezcla, equipos mineros y productividad de puntos de extracción.
- Modelo geomecánico: debe representar la condición de esfuerzos existentes en el sistema minero. Idealmente debe ser continuamente actualizado de modo de reflejar la condición actual de la mina en lo que a esfuerzos y deformaciones se refiere, debido a que cada excavación o movimiento de mineral produce modificaciones en éstos.

- Modelo geológico: relaciona información relacionada a las estructuras, litologías y mineralogías con la recuperación metalúrgica.
- Modelo de reconciliación: provee la información para analizar el comportamiento histórico, además de alimentar los modelos de fragmentación y geomecánico para una adecuada calibración.

Los horizontes temporales en la planificación se definen como una herramienta para tratar la incertidumbre dentro del proceso minero, de esta manera pueden definirse planificación de largo, mediano y corto plazo, que se explican a continuación:

- Planificación de largo plazo: define la envolvente económica, el método de explotación, ritmos de extracción, secuencias de explotación y las leyes de corte.
- Planificación de mediano plazo: se encarga de adaptar los modelos que sustentan la planificación de largo plazo. Produce planes de producción que permiten conducir la operación a las metas de producción definidas.
- Planificación de corto plazo: su rol más importante es la recopilación y utilización de la información operacional de modo de retroalimentar al largo plazo. Por otro lado, se preocupa de definir indicadores de modo de corregir los modelos que sustentan la planificación.

Orientándose hacia la planificación de la producción en la minería de block o panel caving, normalmente al momento de realizar los planes de mediano plazo, que sustentan los presupuestos de operaciones para el año siguiente, se suele aproximar la capacidad productiva del sistema minero como la suma de las capacidades productivas individuales de cada punto de extracción, que se encuentran restringidas por la denominada velocidad de extracción, que corresponde al tonelaje máximo que puede extraerse en un periodo de tiempo (normalmente días) por un determinado punto.

Por otro lado, suele dejarse a la operación minera la planificación de las actividades de reparación de interferencias operacionales, no existiendo una relación clara y objetiva entre éstas y la planificación de la producción de mediano plazo. Sumado al hecho que cualquier interferencia en cualquier componente productiva del sistema minero impacta en la productividad (en mayor o menor grado), se deduce que dado que la planificación de mediano plazo no incorpora de manera efectiva la ocurrencia y reparación de eventos interferentes con la

producción, difícilmente pueden generarse planes mineros anuales que la operación pueda alcanzar.

2.2 Interferencias operacionales

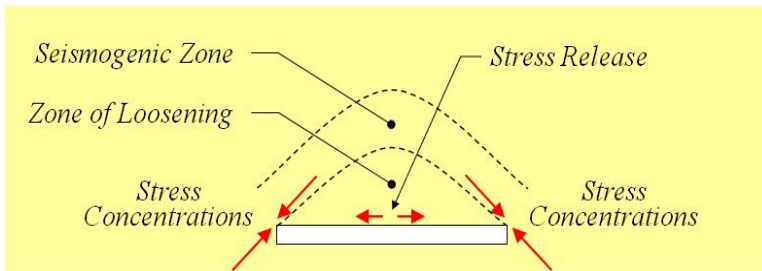
Fragmentación

El proceso de fragmentación es fundamental en la minería de hundimiento por bloques o paneles, debido a que una de las principales perturbaciones en el sistema productivo minero es la aparición de sobretamaño y bloques que se generan en el proceso de hundimiento en el nivel de producción, debido a que rocas de tamaños excesivos elevan las tasas de colgaduras e interrumpen el carguío, inhabilitando puntos de extracción o dejando inoperantes piques de traspaso. Por lo anterior, es de suma importancia comprender cómo se produce el proceso de fragmentación del macizo rocoso producido por el proceso de hundimiento (fragmentación primaria).

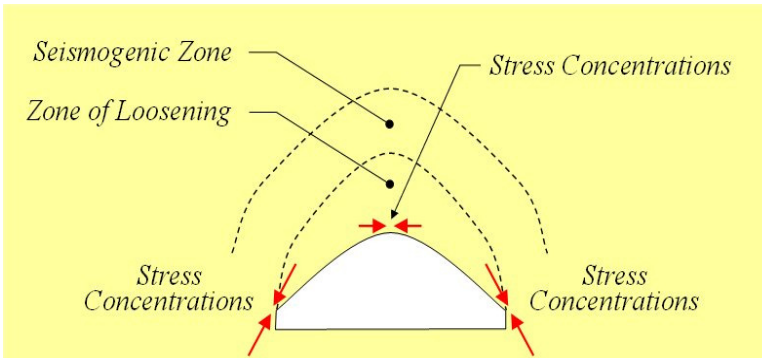
Se distinguen al menos las siguientes etapas:

- Socavación: ocurre previo a la producción minera, cuando la extracción se realiza mayoritariamente para desarrollar el hundimiento de un determinado sector.
- Tiraje inicial: la remoción de importantes volúmenes de roca resulta en el cambio de la condición de esfuerzos en los sectores donde se realiza la extracción.
- Iniciación del hundimiento: se inicia el hundimiento cuando el radio hidráulico del área efectiva abierta en el nivel de producción ha alcanzado el valor crítico, que depende de la calidad del macizo rocoso.
- Conexión inicial: se ha producido la falla del pilar entre la socavación y la superficie y la mayor redistribución del esfuerzo.
- Conexión: aparecen fracturas evidentes en la superficie asociadas al quiebre generado por el hundimiento, este evento muestra que el área abierta en producción en el nivel de producción a alcanzado una dimensión crítica para sustentar el proceso de quiebre.

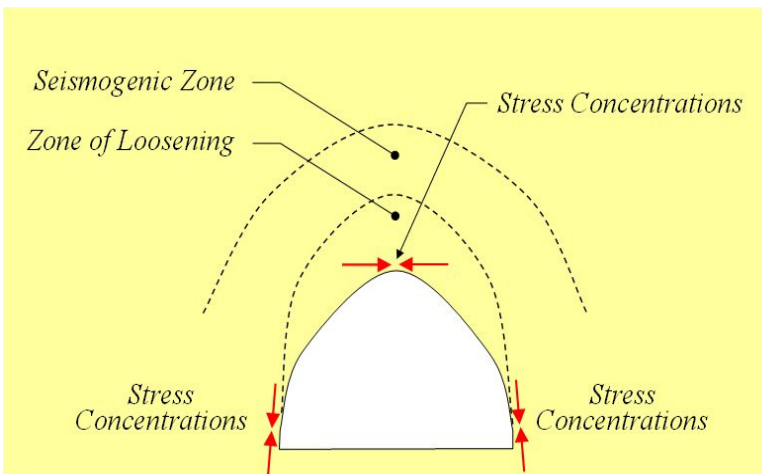
Las siguientes imágenes aclaran y resumen lo anteriormente expresado:



Corte inicial define una excavación tabular la cual induce el hundimiento por efecto viga y el modo de falla es básicamente por tracción.



La geometría del frente de la cavidad comienza a curvarse producto de fallas por corte o cizalle



En altura sigue predominando el efecto de esfuerzos de corte actuando sobre el techo del hundimiento

Figura 2-1. Diagrama esquemático del proceso de hundimiento.

Por otro lado, el descenso de la columna ya fragmentada debido a la extracción en niveles inferiores genera también reducciones en la granulometría debido principalmente a la fricción y los impactos generados por la traslación (fragmentación secundaria).

Puntos de extracción

A nivel de puntos de extracción, pueden identificarse al menos los siguientes tipos de interferencias operacionales, asociados a su fenomenología:

FENOMENOLOGÍA	INTERFERENCIAS OPERATIVAS
Grado de fragmentación	Colgadas
	Sobretamaño
Humedad	Barro
	Enlompamientos
Campo de esfuerzos	Inestabilidades
	Colapsos

Tabla 2-1. Interferencias operacionales a nivel de puntos de extracción y su fenomenología.

Una colgadura a nivel de puntos de extracción se refiere a la formación de un arco estable de rocas de mineral o bloques que se atascan en lo alto de la columna de mineral, que impide el libre flujo gravitacional, dejando inoperante el o los puntos de extracción afectados. Dependiendo a la altura donde se genere este arco, el impacto en la operación es diferente:

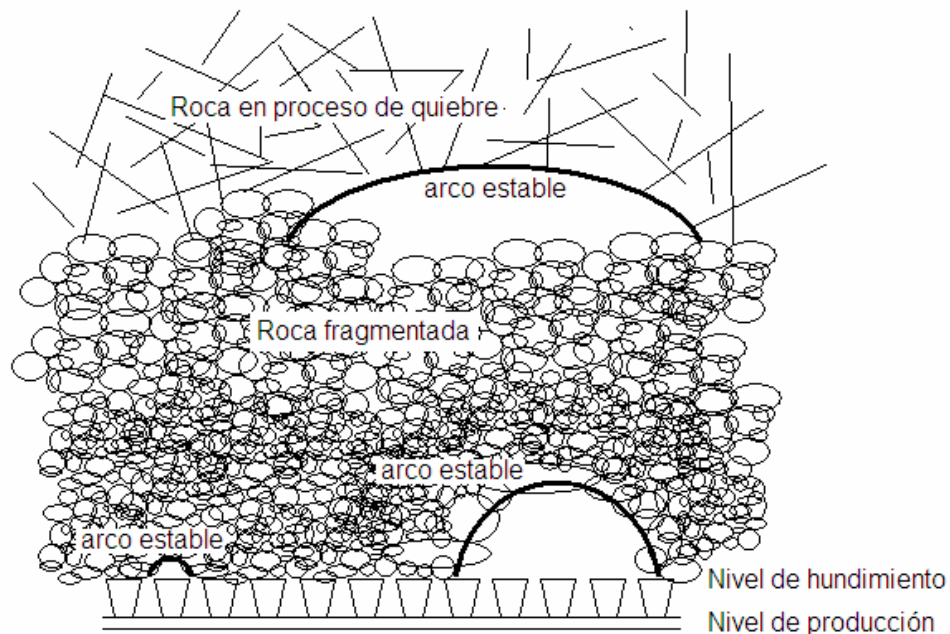


Figura 2-2. Distintos tipos de colgadas.

Colgadas a baja altura afectarán en el mejor caso a un único punto de extracción, problema que puede ser resuelto con técnicas de fragmentación secundaria especificadas más adelante.

Un arco a altura media resulta ya inaccesible para su fragmentación forzada convencional y puede afectar a varios puntos de extracción, sin embargo, una característica en común entre ambas es que el arco estable se forma en material ya fragmentado por el proceso de hundimiento y pueden detectarse tempranamente por la simple observación del punto de extracción. Un tercer y más peligroso tipo de colgaduras son aquellas que se forman debido a que el proceso natural de quiebre se la roca se ha detenido y la extracción en niveles inferiores ha continuado.

Otro tipo de interferencias a nivel de puntos de extracción es el sobretamaño, entendiéndose como la aparición colpas (rocas de un tamaño superior al manejable por equipos de carguío o parrillas) en los puntos de extracción, interrumpiendo el carguío de material. La reducción de sobretamaño se puede realizar principalmente de tres formas:

- Carga superficial (conos APD, parches): carga explosiva que se aplica en la superficie de la colpa y que al detonar provoca la fragmentación de ella. Se considera como una mala práctica, ya que el explosivo debe tener confinamiento para su buen aprovechamiento y en este caso no ocurre por lo que la eficiencia de la tronadura es muy baja y la proyección de material es alta, provocando daños en los alrededores (cables, tuberías, caja, etc.).
- Cachorro: consiste en perforar la colpa con un equipo manual o mecanizado, de modo que el explosivo quede confinado como corresponde. En este caso la eficiencia del explosivo es mayor, pero debe considerarse el tiempo que demora la perforación y además se necesita personal (cuadrilla) que realice la perforación.
- Martillo rompedor, picador o demoledor: equipo diseñado para demolición por impacto, puede ser neumático o hidráulico, manual o mecanizado. Las ventajas que presenta son su eficiencia y su independencia (no requiere paralizar la faena o el sector, sólo el punto donde se encuentra el problema). El monto de la inversión es mucho más significativo en comparación de los anteriores métodos.

Las interferencias operativas por barro se deben a la aparición de un flujo violento de este material a través del punto de extracción. Este evento se produce por la infiltración de aguas desde la superficie o napas subterráneas, a través del material fragmentado propio de una explotación por panel caving, que llega hasta los puntos de extracción. Su magnitud es

altamente variable, así como también su impacto en la productividad del sistema. Por un lado, flujos menores de barro a través de puntos de extracción no implican su paralización, debido a que si bien resulta una práctica peligrosa, puede accederse al punto en el equipo LHD y retirar mineral utilizando extracción controlada. En otras ocasiones, el flujo de material es de tal magnitud, que se hace imperativo cerrar cruzados de producción completos por razones de seguridad.

Por su naturaleza, los eventos de barro ocurren esporádicamente en el tiempo, aumentando su frecuencia en épocas de deshielo, para faenas situadas en la alta cordillera. Asimismo, un punto de extracción afectado por esta interferencia debe esperar el cese, la disminución natural del flujo de material o bien que el barro se seque para volver a realizar extracción de mineral.

Los enlompamientos son otro tipo de interferencia operacional que se detecta a nivel de puntos de extracción. Se produce por la compactación del material fino, que junto a la presencia de agua y bajas temperaturas genera un aglomerado de material que imposibilita el carguío de material, requiriéndose reducción secundaria para su reparación.

Por otro lado, una explotación minera por métodos de hundimiento genera una gran redistribución de esfuerzos al interior del macizo rocoso, debido a que en general, el material fragmentado no puede transmitir esfuerzos. Por tal motivo, la infraestructura minera debe diseñarse de manera tal de poder resistir la condición de esfuerzos a que está sometida de manera de evitar inconvenientes dado que los grandes volúmenes de roca involucrados en el hundimiento por paneles producen esfuerzos inducidos de gran magnitud. En este aspecto, la adecuada fortificación de las componentes del sistema minero es vital pues soporta las deformaciones resultantes de la pérdida de la condición de equilibrio en el macizo rocoso una vez que este ha sido intervenido por alguna excavación subterránea. Sin embargo lo anterior, eventualmente la infraestructura minera no es capaz de resistir la condición de esfuerzos imperante, generándose deformaciones importantes en las excavaciones o inestabilidades puntuales que hacen imposible la utilización del sector por motivos de seguridad. En un caso extremo, la roca alcanza sus límites máximos de deformación y colapsa bajo su propio peso. Ambas situaciones anteriores (inestabilidad y colapsos) se traducen puntualmente en el nivel de producción en la inutilización de puntos, es decir, en interferencias operativas, que no son de rápida solución.

Piques de traspaso

El escurrimiento del mineral a través de piques debe ser totalmente expedito y libre. Al almacenarse material en los conductos se produce un problema, ya que si el material se deja en un pique o un silo éste tiende a compactarse a medida que la columna crece, la roca tiende a formar un arco natural conocido como colgadura de un pique.

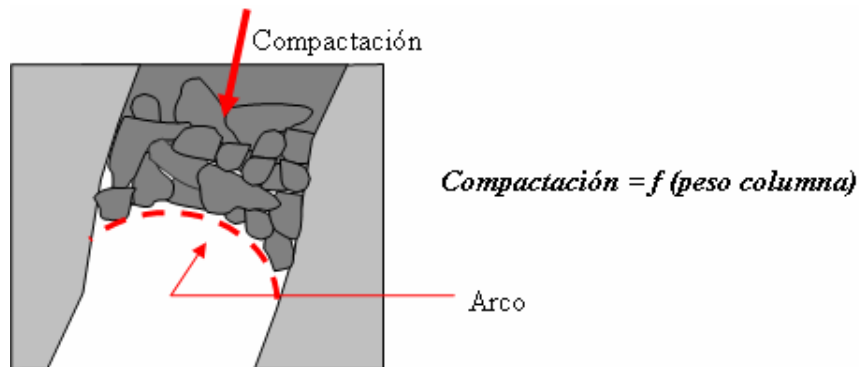


Figura 2-3. Colgadura en pique de traspaso.

Los factores que influyen en la formación del arco son al menos:

- Distribución de tamaños de los fragmentos de roca.
- Tamaño máximo de los fragmentos.
- Forma de los fragmentos.
- Viscosidad de la roca.
- Material fino entre las colpas.
- Contenido de humedad.
- Efectos de trituración que sufre la roca al pasar por el pique.

Se debe esperar que un buen diseño evite este problema, ya que al aumentar el diámetro del pique el arco pierde resistencia. Asumiendo que al aumentar el diámetro se soluciona el problema se debe asumir también el costo que ello significa (excavación), por lo que se analiza si realmente es necesaria realizar una excavación mayor siendo que la probabilidad de que se forme el arco es baja (para evento), pero como su frecuencia de uso es bastante alta la ocurrencia de este suceso se hace más probable.

También se deben considerar otros aspectos relacionados con la operación y de la faena en particular. Por ejemplo en faenas ubicadas en zonas de bajas temperaturas puede que sea frecuente el congelamiento del material (agua entre los espacios del material), lo cual genera

colgadas (1). Otra consideración es que el material fino puede generar compactación en las paredes de la chimenea produciéndose el enlampamiento (y la consecuente disminución de la sección del pique) (2). Por último la erosión que sufre el pique puede causar un caseroneo (derrumbe), el cual puede ser de ayuda si se trata de una erosión en fragmentos similares a los que fluyen por éste (aumenta la sección y escurren junto con el mineral) (3), pero también podría darse el caso que el material desprendido de las paredes sea de una magnitud tal que bloquee el pique por completo (dependiendo de las estructuras presentes), lo cual puede ser inmanejable e inutilizar total y definitivamente esta componente de infraestructura (4).

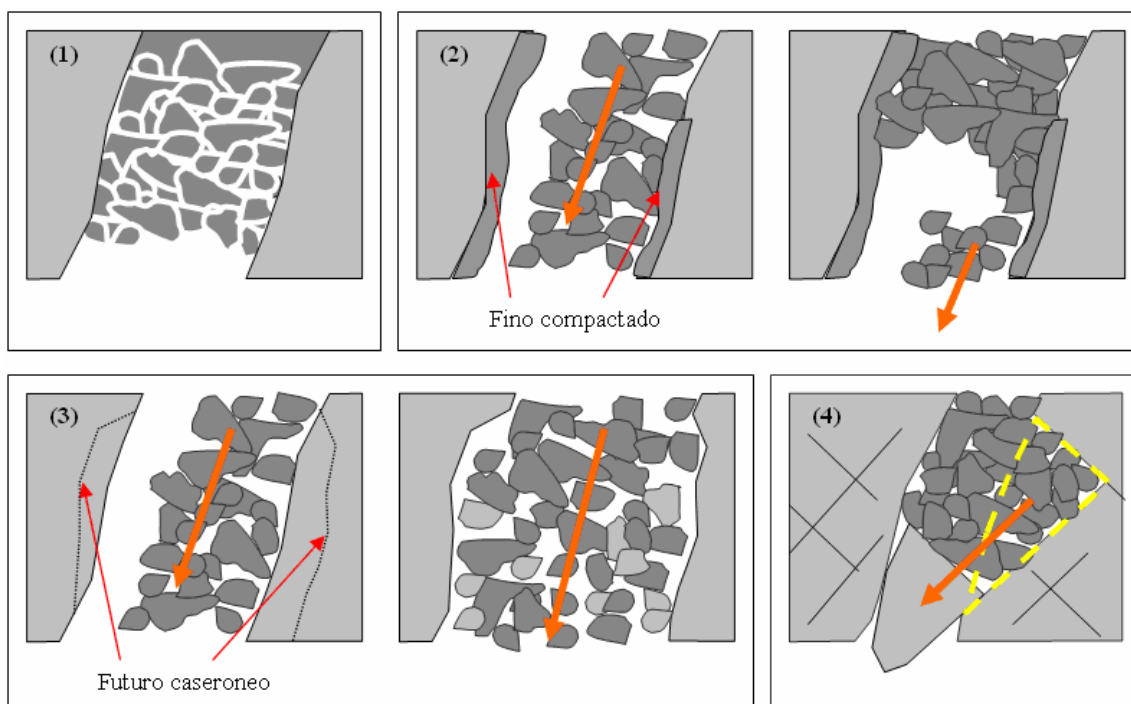


Figura 2-4. Interferencias operacionales en piques de traspaso.

Para evitar una colgadura debe realizarse un diseño adecuado sobre la base de un buen conocimiento de las características del material y de la explotación en sí. Ya en operación también se pueden intercalar parrillas previamente al paso del material, evitando que el sobretamaño entre a los piques (este material tendrá que ser reducido de alguna forma).

Operacionalmente ante la ocurrencia de un problema de colgadura se puede optar por diversas soluciones, de las cuales se destacan las siguientes tres:

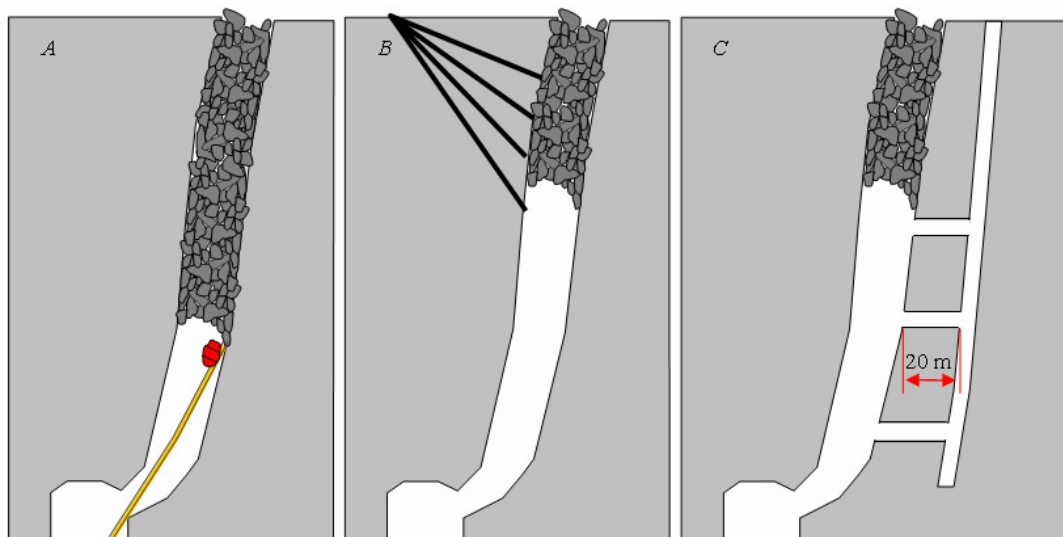


Figura 2-5. Alternativas para solventar colgaduras en piques de traspaso.

- A. En este caso la colgadura se encuentra a corta distancia del buzón, de modo que se puede acceder a ella con una vara con explosivos en un extremo. Debe notarse que esta operación es muy peligrosa, por lo que se debe realizar un tapado especial (corta saca) de modo que la descolgadura no provoque un accidente y a la vez debe encontrarse abierto el sistema de descarga del buzón, de modo que no sufra daños por la explosión.
- B. En este caso la colgadura no puede ser alcanzada con una vara, por lo que se recurre a la perforación (llamada a veces perforación coyote), que va tanteando donde se encuentra el material colgado y posteriormente se introducen explosivos para descolgarla. Este método es muy caro, ya que encontrar el punto buscado en el primer intento es muy poco probable.
- C. En este caso se aprecia la construcción de una chimenea adicional, con comunicación directa a la chimenea de traspaso, permitiendo un acceso a ella y aplicar algún método de descolgamiento desde las pequeñas estocadas o galerías que unen a ambas chimeneas (niveles de control). El costo es alto, ya que debe considerarse la construcción de una chimenea extra más los niveles de control, pero se tiene un acceso más expedito.

Buzones

Puede decirse que un buzón cumple funciones de regulación de flujo de material, es decir actúa como una válvula de descarga. El sistema del buzón en sí, consta de partes metálicas principalmente, el sistema de accionamiento puede ser por aire comprimido o hidráulico (depende de la capacidad), debe ser capaz de abrirse y cerrarse cuando sea necesario y su descarga debe ser siempre sobre un equipo de transporte. El buzón debe cumplir con dejar pasar el material sin obstaculizarlo (cuando se requiera) y cumplir con las condiciones de diseño y sus dimensiones son las que permitirán cumplir con ello, de acuerdo al sistema de transporte y la granulometría del material. Se pretende lograr una operación simple, de bajo costo, sin riesgo y de alto rendimiento.

Básicamente el buzón se compone por elementos fijos, móviles y una unidad de fuerza. Los elementos fijos se encuentran anclados a la roca misma, en cambio los elementos móviles forman parte de la estructura y son accionados por cilindros hidráulicos o neumáticos.

Los elementos fijos son el socucho, la tolva y la estructura de soporte, y los elementos móviles son las cortinas de cadenas y la boca de descarga (buzón). La unidad de fuerza es la que permite accionar los cilindros, semáforos y la ventilación exterior y que se encuentra en una estocada lateral del sistema.

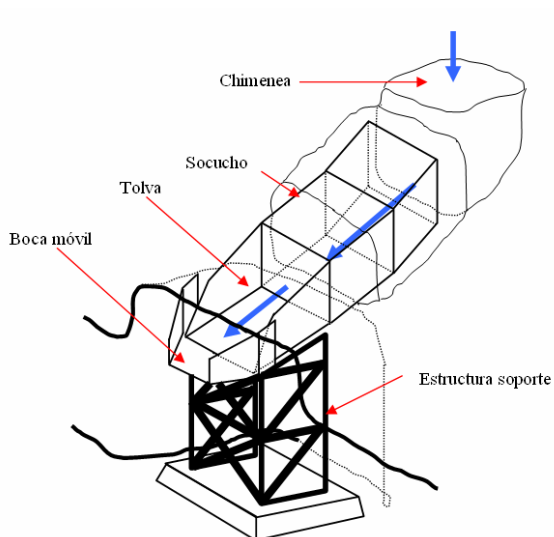


Figura 2-6. Partes fijas de un buzón.

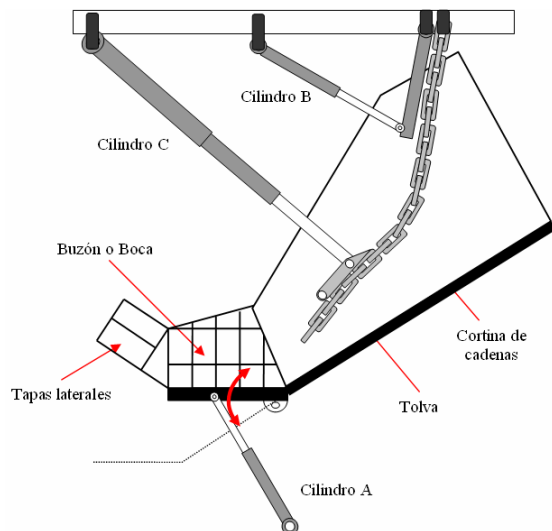


Figura 2-7. Partes móviles de un buzón.

Su funcionamiento está sujeto a fuertes desgastes por el continuo flujo de material, eventuales impactos de colpas de mineral y la necesidad de soportar parte del peso de una columna de

mineral importante. Claramente un buzón es una componente mecánica y por ende está sujeta a interrupciones debidas a la imperiosa necesidad de mantención, ya sea programada o de reparación eventual, por lo que su productividad con la del sistema minero están íntimamente ligadas.

2.3 Simulación

La simulación es una gran gama de métodos y aplicaciones para imitar el comportamiento de sistemas reales. Ésta, como muchos métodos de análisis involucra sistemas y modelamiento de éstos. Existen varios tipos de modelos de simulación, que se describen brevemente a continuación:

- Modelos físicos: básicamente consiste en construir réplicas o escalas del sistema, que sean funcionales. Su principal limitación es que muchos comportamientos físicos no pueden escalarse o bien su construcción a escala 1:1 (o similares) no es factible. Un buen ejemplo de este tipo de modelos, aplicados a la minería, son las cajas de arena utilizadas por Kvapil para estudiar el flujo gravitacional de materiales granulares.
- Modelos lógicos o matemáticos: consisten en una serie de aproximaciones y suposiciones, ambas siempre cuantitativas, acerca de cómo funciona el sistema. Normalmente pueden expresarse mediante ecuaciones de varias variables. Su principal limitación es que resultan de difícil aplicación en sistemas complejos de numerosas variables en que no se conocen exactamente las interrelaciones entre éstas. Ejemplo de éste tipo de modelos es la reconocida ecuación de Newton $F = M * a$ (fuerza es el producto de la masa por la aceleración).
- Modelos de simulación computacional: consiste en la evaluación del comportamiento de un sistema dado mediante valoración numérica de éste, basándose en la construcción previa de un modelo imitativo del comportamiento del sistema en un ambiente computacional (software). Si bien pueden aplicarse a gran variedad de sistemas, simples y complejos, existen casos en que la naturaleza aleatoria de variables de entrada desestabilizan completamente los resultados.

La base de la simulación son los modelos, antes que deben representar el comportamiento del sistema de la manera más fiel posible. Por su parte el sistema de simulación debe poder representar las características de éste. En orden de clasificar los distintos tipos de simulación, la siguiente estructuración resulta útil:

- Estática vs. dinámica: cuando el tiempo no juega un rol en la simulación se habla de simulación estática, en caso contrario, dinámica.
- Continua vs. discreta: un modelo continuo es aquel en que el estado del sistema cambia de manera continua con el correr del tiempo (por ejemplo, el nivel de agua en una represa). En un modelo discreto, los cambios ocurren separadamente en el tiempo. Obviamente en un mismo modelo global pueden existir componentes continuas y discretas, en este caso se habla de *modelos mixtos*.
- Determinístico vs. estocástico: modelos que no tienen entradas aleatorias son determinísticos. Modelos estocásticos tienen entradas aleatorias, que pueden incorporarse mediante distribuciones de probabilidad.

Para resolver un problema mediante simulación es preciso primeramente comprender el funcionamiento del sistema y tener claridad en las metas que se requieren, de modo que el proceso de formulación del modelo represente fielmente el comportamiento del mismo, la implementación de este modelo en un software apropiado no deja de ser relevante, pues éste debe ser capaz de reproducir las diferentes características que se requieran. La validación del modelo mediante información real es igualmente importante de manera de asegurar que el comportamiento del modelo es el esperado, finalmente el análisis de los resultados generados a partir de la simulación permiten comprender de que manera pueden afectar diferentes estrategias de operación en el sistema modelado.

Orientándose hacia la minería, los procesos de manufactura son constituidos por un proceso industrial repetitivo, que puede dividirse en etapas fáciles de optimizar y administrar. Estos procesos han desarrollado herramientas de administración de operaciones (*operations management tools*), como la Teoría de Restricciones (TOC, *Theory of constraints*)¹ y la simulación, que se han traducido en importantes mejoras en la productividad. La minería de hundimiento por bloques o paneles por su parte posee en su ciclo productivo condiciones que pueden compararse de buena manera con los procesos de producción industrial mencionados: ambos son de naturaleza repetitiva y se desarrollan en un espacio de trabajo determinado. Resulta importante entonces comprender de qué manera pueden utilizarse estas herramientas de administración de operaciones en la minería, de manera de mejorar su productividad y

¹ DESSUREAULT, S., SCOBLE, M., RUBIO, E. Simulation Block Cave Secondary Breakage – An Application of Information and Operations Management Tools in Mass Mining Systems. En: Massmin 2000. 29 Octubre - 2 Noviembre, 2000. Brisbane. 4p.

comprender de mejor manera como se relacionan las diferentes variables que entran en este proceso.

Se ha estudiado mediante simulación, por ejemplo, de qué forma el proceso de reducción secundaria afecta el ciclo de marina. Ambos están relacionados principalmente debido a que el primero permite mantener el acceso a los puntos de extracción y la capacidad de movilizar material hacia los puntos de traspaso. Debido a lo anterior, el proceso de reducción secundaria incide fuertemente en la posibilidad de lograr interacción en el tiraje y retardar la entrada de la dilución además de ejercer una fuerte preponderancia en el KPI (indicador de la cantidad de desarrollos necesarios para mantener una producción dada)².

Pueden estudiarse entonces mediante la aplicación de herramientas de administración de operaciones, de qué forma influyen en la productividad, y en el cumplimiento del plan de producción, distintas decisiones aplicables al sistema minero como por ejemplo, cuándo tronar, el número crítico de puntos bloqueados para cerrar una calle, etc. Sin la necesidad de implementarlos efectivamente en la mina para analizar sus resultados.

² DESSUREAULT, S., SCOBLE, M., RUBIO, E. Simulation Block Cave Secondary Breakage – An Application of Information and Operations Management Tools in Mass Mining Systems. En: Massmin 2000. 29 Octubre - 2 Noviembre, 2000. Brisbane. 4p.

3 Tonelaje entre eventos de interferencia

Se entenderá como tonelaje entre eventos de interferencia (TEE) a todo el material (medido en toneladas) que pase a través de una componente del sistema minero (puntos de extracción, piques de traspaso y buzones) entre dos eventos de interferencia consecutivos (colgaduras, sobretamaño, barro y enlompamientos).

La información experimental de TEE necesaria para el desarrollo de este análisis será recopilada del registro histórico (periodos 2003-2004) de producción y estado de puntos de extracción, en el III Panel LHD de la División Andina de Codelco Chile.

3.1 Información de puntos de extracción

La información base para la obtención del tonelaje entre eventos de interferencia se encuentra en dos bases de datos diferentes, una contiene la información de la extracción histórica de la mina y la otra el estado de los puntos de extracción, el manejo de ambas, en post de encontrar registros del tonelaje entre eventos (TEE) de cada punto de extracción se especifica en los siguientes títulos.

Base de datos de extracción histórica

Esta base de datos recopila turno a turno, los tonelajes extraídos desde cada punto de extracción. Contiene información desde el 10 de junio de 1997 hasta el 1 de abril de 2006. La siguiente figura es una parte demostrativa de la base de datos antes mencionada:

PUNTO	FECHA	TURNO	TONELAJE	LEY
67C28W	11/11/1999	3	59.921	1.658
69A32E	11/11/1999	3	77.378	1.421
69A33E	11/11/1999	3	77.378	1.586
69A34E	11/11/1999	3	77.378	1.105
69A35E	11/11/1999	3	77.378	1.543
69A36E	11/11/1999	3	77.378	1.932
69A37E	11/11/1999	3	77.378	1.336

Figura 3-1. Formato de la información de extracción histórica entregada.

Pueden observarse en la figura anterior 5 campos (columnas), descritos a continuación:

- PUNTO: especifica el punto de extracción del que fueron extraídas las toneladas especificadas en el campo TONELAJE, en el turno especificado en el campo TURNO, el día especificado en el campo FECHA.
- FECHA: corresponde al día específico en que fue realizada la extracción del tonelaje especificado.
- TURNO: corresponde al turno específico en que fue realizada la extracción del tonelaje especificado. La codificación 1, 2, 3 hace referencia a los turnos C, A, B respectivamente.
- TONELAJE: especifica el tonelaje extraído, en toneladas métricas, por cada punto de extracción, en el turno y fecha específicos.
- LEY: corresponde a la ley de cobre del tonelaje especificado.

Debido a que la base de datos del estado de puntos de extracción, especificada más adelante, se encuentra detallada con frecuencia temporal de días, no turnos, la única modificación necesaria de realizar sobre la base de datos de extracción histórica es la acumulación del tonelaje extraído turno a turno a día a día, de modo que ambas bases de datos sean comparables, esta nueva tabla será reconocida mediante el nombre de “Movimientos”.

Base de datos de estado de puntos de extracción

La base de datos del estado de puntos de extracción analizada contiene información relativa al estado operacional de los puntos de extracción en el periodo que va desde el 1 de enero de 2003 hasta el 31 de diciembre del 2004. Para obtener el tonelaje entre eventos de interferencia de cada punto de extracción, el formato de la base de datos original entregada por la división Andina de CODELCO Chile no es adecuado para el estudio presentado en éste informe, por lo que fue necesario realizar algunas reestructuraciones de formato, que se detallan a continuación:

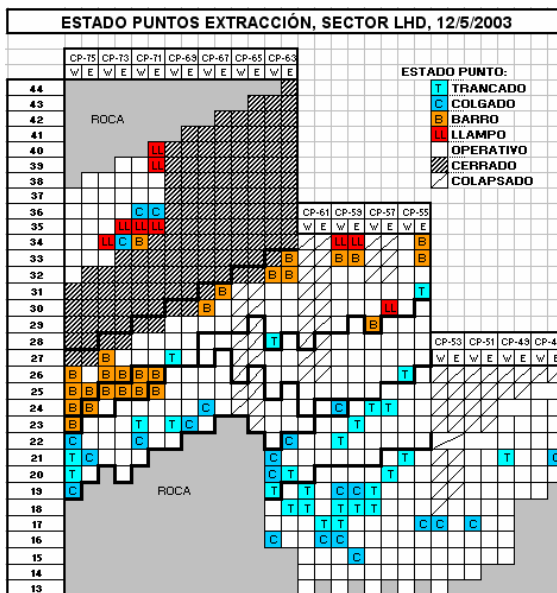


Figura 3-2. Formato de la información de estado de puntos de extracción entregada.

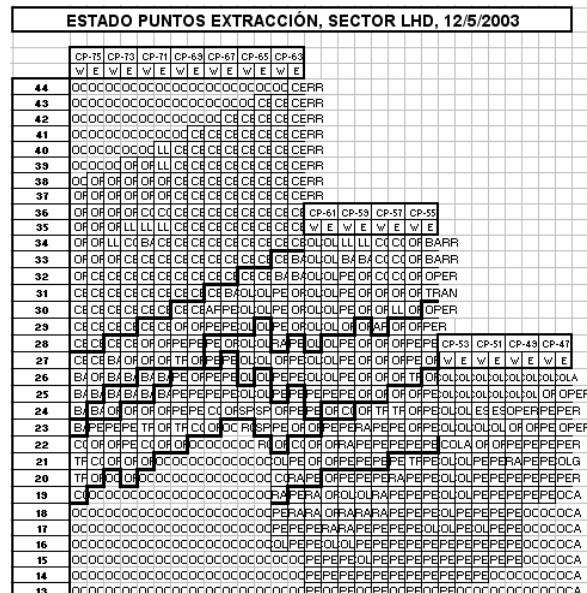


Figura 3-3. Formato transformado de la información de estado de puntos de extracción.

La información del estado de puntos de extracción se encuentra en numerosas planillas similares a la mostrada en la figura anterior (izquierda). El principal problema de este formato es que la codificación de algunos de los estados es únicamente visual, en base a colores, por lo que primeramente debió ser codificada a caracteres, como lo especifica la imagen anterior (derecha).

Seguidamente, es necesario almacenar la información de las distintas planillas, en una sola tabla, como la que se muestra y detalla continuación, en la denominada tabla “Estados 1”:

	A	B	C
1	PUNTO	FECHA	ESTADO
2	7544W	04/05/2004	ROCA
3	7543W	04/05/2004	ROCA
4	7542W	04/05/2004	ROCA
5	7541W	04/05/2004	ROCA
6	7540W	04/05/2004	ROCA
7	7539W	04/05/2004	ROCA
8	7538W	04/05/2004	ROCA
9	7537W	04/05/2004	COLG
10	7536W	04/05/2004	TRAN
11	7535W	04/05/2004	BARR
12	7534W	04/05/2004	BARR
13	7533W	04/05/2004	COLG
14	7532W	04/05/2004	BARR
15	7531W	04/05/2004	CERR
16	7530W	04/05/2004	CERR

Figura 3-4. Formato final de la información del estado de puntos de extracción.

La tabla anterior recopila la misma información entregada por la División, pero en un formato distinto, en forma de tabla, cuyos campos se especifican a continuación:

- PUNTO: especifica el punto de extracción para el cual se detalla su estado operacional en la fecha indicada.
- FECHA: Corresponde a la fecha específica en que fue realizada la observación del estado del punto. Es importante detallar que el muestreo del estado de puntos de extracción no es uniforme, por lo que eventualmente pueden existir interferencias operacionales que no fueron registradas.
- ESTADO: detalla el estado del punto de extracción específico para la fecha correspondiente.

Posteriormente, con el fin de obtener los intervalos temporales entre eventos de interferencia, es decir, el tiempo transcurrido entre un evento y el siguiente, se extrajo información desde la base de datos anterior con el siguiente formato (tabla “Intervalos”):

2		INICIO	TERMINO
3	5904W	27/10/2004	03/11/2004
4	5906E	27/10/2004	17/11/2004
5	6106E	27/10/2004	17/11/2004
6	6107W	23/07/2004	05/08/2004
7		05/08/2004	27/10/2004
8		27/10/2004	03/11/2004
9	5908E	19/10/2004	17/11/2004
10	6108W	30/07/2004	09/09/2004
11		09/09/2004	29/09/2004
12		29/09/2004	08/10/2004
13		08/10/2004	12/10/2004
14		12/10/2004	19/10/2004

Figura 3-5. Formato de la información de intervalos de tiempo entre eventos.

En la tabla anterior se rescata, para cada punto de extracción, la fecha de inicio y término del lapso en que el punto se encuentra operativo, obviamente pueden encontrarse distinta cantidad de registros para cada punto. Es importante notar que para la tabla mostrada anteriormente pueden obtenerse, cada vez, los intervalos temporales entre tipos específicos de interferencia o como conjunto, dependiendo el filtro aplicado al momento de realizar la búsqueda de la fecha de termino del intervalo.

Frecuencia de registro de estado de puntos de extracción

El registro del estado de los puntos de extracción no responde a una metodología específica. Lo anterior genera fluctuaciones importantes de la frecuencia de observación del estado de puntos de extracción en el tiempo, lo que a su vez produce distorsiones en los resultados de tonelaje entre eventos obtenidos.

La distorsión se genera en el hecho que eventualmente existirán puntos que son afectados por eventos de interferencia y que vuelven a ser operativos sin que el registro de estado de puntos los detecte, lo que produciría TEE más altos de los reales. El siguiente gráfico muestra la variabilidad de la frecuencia de registro de estado de puntos de extracción en el tiempo:

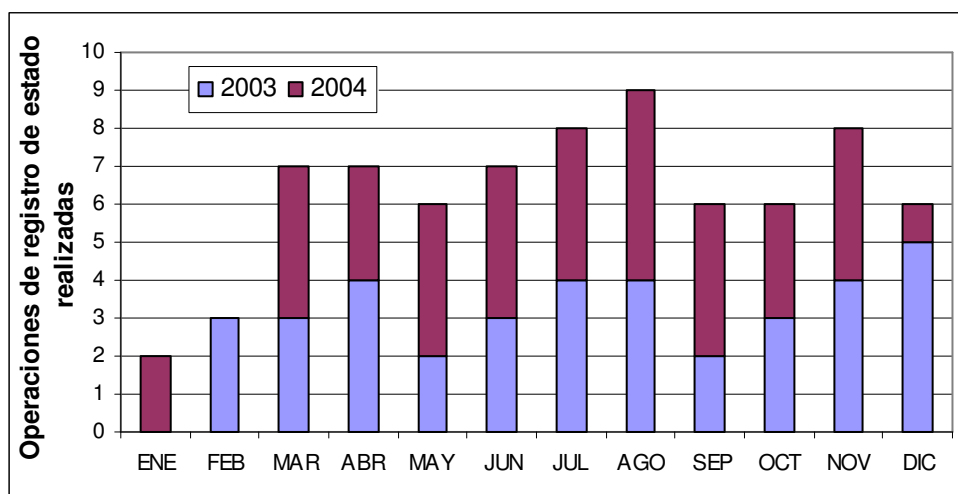


Gráfico 3-1. Número de muestreos de estado de puntos de extracción en el tiempo.

Metodología de búsqueda

La metodología de búsqueda de intervalos temporales entre ocurrencia de eventos de interferencia se explica mediante el siguiente algoritmo:

- Identificar tipo de interferencia a considerar (por ejemplo, colgadas y sobretamaño).
- Para cada punto de extracción, buscar dentro de la tabla Estados la primera fecha de ocurrencia del tipo de evento considerado (si el tipo de evento considerado es colgadura, se busca el primer registro que especifique este tipo de interferencia; por otro lado, si el tipo de evento considerado es colgadura y sobretamaño, se debe buscar la primera ocurrencia de cualquiera de éstos, es decir, no se hace diferencia entre ambos

tipos de interferencia, pues se está considerando el conjunto). Esta fecha queda asignada como el inicio del intervalo.

- Para el mismo punto de extracción anterior, buscar el siguiente registro que especifique el mismo tipo de interferencia operacional previamente establecido, nuevamente, si se consideran varios tipos de evento, aquí no se hace diferencia entre éstos. La fecha encontrada se almacena como el término del intervalo inicializado en el paso anterior del algoritmo y el inicio de un nuevo registro.
- En caso de no encontrarse registros que especifiquen el mismo tipo de interferencia (o cualquiera de los especificados si se trata de un conjunto) se termina la búsqueda para ese punto de extracción.
- En caso que se encuentre sólo un registro para el tipo de evento de interferencia considerado, este dato no puede tomarse en cuenta debido a que no puede estimarse la extensión del intervalo.
- Se repite el algoritmo anterior para cada punto de extracción.

Es importante mencionar que la metodología anterior está diseñada para obtener posteriormente, mediante el cruce de información con la tabla Movimientos, registros del tonelaje entre eventos de cada punto de extracción, por lo que eventualmente existirán intervalos en los que se hayan extraído cero toneladas por un punto de extracción específico, dependiendo de si la frecuencia del muestreo del estado del punto es elevada. En contrapartida, pueden existir eventos de interferencia no considerados, en que un punto de extracción cambie de estado en un intervalo de tiempo que el registro del estado no alcance a considerar. Lo anteriormente expresado toma importancia al considerar que la frecuencia de observación de estado de puntos es bastante dispersa y parece no responder a una metodología específica.

También es importante considerar que el número de intervalos encontrados es dependiente de si se está estudiando la frecuencia de ocurrencia de un tipo de eventos puntual o un conjunto de tipos, debido a que la condición de búsqueda del primer caso es más restrictiva que la de segundo, al considerar sólo un tipo específico. De tal manera, si por ejemplo, realizando una búsqueda de intervalos entre eventos de colgadura se obtienen n registros y una búsqueda entre interferencias por sobretamaño resulta en m registros, ambas por separado, el número de registros encontrados no necesariamente es $n+m$ si es que ahora se realiza una búsqueda por colgaduras y sobretamaño como conjunto, pues un intervalo puede iniciarse por un evento de colgadura y cerrarse con uno de sobretamaño, no siendo así para el primer caso planteado, en que las fechas de inicio y término están restringidas a la aparición de un tipo de evento

específico, lo que tiene directo impacto en la media y desviación estándar obtenidas. Por ejemplo, para un punto de extracción específico se tiene lo siguiente:

	TIPO DE EVENTOS CONSIDERADOS EN LA BÚSQUDA		
	Colgadas	Sobretamaño	Colgadas y sobretamaño
Nº de Registros TEE	21	10	32
Media TEE (t)	1693	3398	1141
Desv. Est TEE (t)	4219	5985	2918

Tabla 3-1. Diferencias generadas por el tipo de búsqueda.

Registros de tonelaje entre eventos de interferencia

Finalmente, pueden cruzarse las tablas Movimientos e Intervalos con el fin de obtener los registros del tonelaje entre eventos de interferencia, acumulando el tonelaje encontrado en la base de datos de extracción histórica entre las fechas de inicio y término obtenidas desde la base de datos de estado de puntos, para cada punto de extracción, generando la denominada tabla Registros. La siguiente imagen es representativa de lo especificado anteriormente:

Tabla Movimientos

PUNTO	FECHA	TURNO	TONELAJE	LEY
63A35E	10/06/1997	2	280.426	1,629
63A35E	11/06/1997	1	280.426	1,629
63A35E	11/06/1997	2	327.163	1,629
63A35E	12/06/1997	3	186.95	1,629
63A35E	13/06/1997	1	93.475	1,629
63A35E	13/06/1997	2	186.95	1,629
63A35E	13/06/1997	3	46.738	1,629
63A35E	14/06/1997	1	747.802	1,629
63A35E	14/06/1997	3	93.475	1,629
63A35E	15/06/1997	1	747.802	1,629
63A35E	15/06/1997	2	186.95	1,629
63A35E	15/06/1997	3	93.475	1,629
63A35E	16/06/1997	1	280.426	1,629
63A35E	16/06/1997	1	93.475	1,629
63A35W	20/06/1997	1	692.8	1,629
63A35W	20/06/1997	3	445.372	1,629

Tabla Intervalos

	INICIO	TERMINO
2		
3	27/10/2004	03/11/2004
4	5906E	27/10/2004
5	6106E	27/10/2004
6	6107W	23/07/2004
7		05/08/2004
8		27/10/2004
9	5908E	19/10/2004
10	6108W	30/07/2004
11		09/09/2004
12		29/09/2004
13		08/10/2004
14		12/10/2004

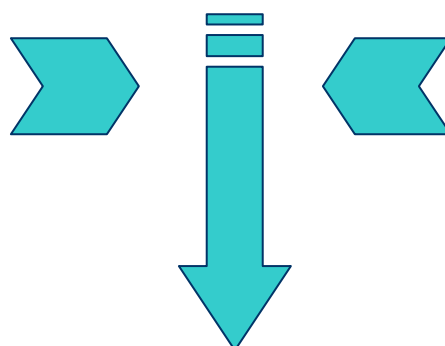


Tabla Registros

PUNTO	NÚMERO DE DATOS	TONELAJE PROMEDIO ENTRE FALLAS	TONELAJE PREVIO	DATOS ENCONTRADOS						
4911W	1	6479.008	148.64	6479.01						
5111W	2	3320.7685	178.37	1538.45	5103.09					
5311W	2	14160.464	3780.17	22248.56	6072.37					
5511W	1	11568.7	32343.70	11568.70						
5112E	2	4539.357	133.78	1322.92	7755.80					
5312E	2	14218.909	0.00	25005.23	3432.59					
6112E	2	2150.406	9639.23	3896.71	404.10					
4912W	1	8485.774	248.57	8485.77						
5113E	5	1312.3074	5478.78	940.14	630.41	676.12	2602.45	1712.43		

Figura 3-6. Diagrama conceptual de la obtención del tonelaje entre eventos.

La tabla Registros contiene 5 campos principales, descritos a continuación:

- PUNTO: detalla el punto de extracción al que corresponden los registros de tonelaje entre eventos encontrados.
- NÚMERO DE DATOS: detalla el número de registros de tonelaje entre eventos encontrados para cada punto de extracción.
- TONELAJE PROMEDIO ENTRE FALLAS: detalla el tonelaje promedio entre eventos de interferencia de todos los registros de tonelaje entre eventos distintos de cero encontrados para cada punto de extracción específico.
- TONELAJE PREVIO: detalla el tonelaje extraído por el punto de extracción especificado previo a los registros de la tabla Intervalos, debido a que la información proveniente del muestreo del estado de los puntos de extracción no necesariamente se lleva desde el inicio de la vida productiva de éste.
- DATOS ENCONTRADOS: este campo esta dividido en tantas columnas como registros de tonelaje entre eventos hayan sido encontrados y detalla en cada una de ellas los registros de tonelaje entre eventos encontrados.

3.2 Información de piques de traspaso

En la división Andina de Codelco Chile no existe información histórica relativa a los estados operacionales de los piques de traspaso ni de buzones, sin embargo, se reconoce que éstos son susceptibles a interferencias operativas. Según la oficina de planificación de corto plazo de la mina, la mayor causa de detención de piques, que requiere reparaciones, es decir, se obvian los casos de piques llenos por acumulación de material, son los enlampamientos, sin embargo, como se dijo anteriormente, no existe un registro numérico que de cuenta de esto. Por otro lado, los buzones de cada pique son susceptibles a mantenciones preventivas y correctivas, que afectan directamente sobre la disponibilidad operativa de esta componente, pero tampoco existe información adecuada en este aspecto que permita el análisis requerido.

Obviamente la necesidad de reparación de un pique o buzón incide directamente en la producción, debido a que la detención de un pique por problemas operativos significa la detención de al menos uno y hasta dos cruzados de producción y la eventual no disponibilidad de un buzón, dada la configuración en Y que conecta los piques de dos calles con un único buzón, dependiendo a que altura dentro del pique se sitúe el evento.

Teniendo en cuenta el objetivo de entregar una herramienta a la producción de largo plazo que considere para la planificación de la producción este tipo de interferencias resulta poco exacto obviar este tipo de acontecimientos, por lo que en este punto se considerarán distintas tasas de ocurrencia de eventos de interferencia y se analizará su influencia en la productividad, de modo de entregar a la planificación de largo plazo una curva que muestre la variación del tonelaje producido por cruzado de acarreo para distintas tasas de ocurrencia de eventos a nivel de piques de traspaso, considerando sus respectivos buzones.

3.3 Análisis estadístico de información

A nivel de puntos de extracción, el estudio realizado contempla las siguientes interferencias operacionales:

- Colgaduras.
- Sobretamaño (trancaduras).
- Barro.
- Enllampamientos.

Las anteriores pueden considerarse en conjunto como interferencias operacionales, por tipos independientes o bien por grupos asociados a su fenomenología de ocurrencia. Con el fin de comprender de mejor manera las posibles diferencias resultantes de lo anteriormente expresado, se considerarán los siguientes grupos para el análisis estadístico:

GRUPO	EVENTOS CONSIDERADOS
General	Colgaduras, sobretamaño, barro, llampo.
Fenomenológico 1	Colgaduras, sobretamaño.
Fenomenológico 2	Barro, llampo.
Puntual 1	Colgaduras.
Puntual 2	Sobretamaño.
Puntual 3	Barro.
Puntual 4	Llampo.

Tabla 3-2. Grupos de tipos de eventos de interferencia considerados en el análisis.

El estudio estadístico presentado a continuación no hace distinciones entre rangos de tonelaje extraído para los puntos de extracción, en otras palabras el rango de tonelaje analizado es entre 0 y 250 Kt para cada punto de extracción (el detalle por rangos de tonelaje y grupos de tipos de eventos se encuentra en anexos).

Estadísticas grupo General

En la presente sección se presenta el análisis estadístico de todos los registros de tonelaje entre eventos encontrados obtenidos de considerar las interferencias operacionales de colgadura, sobretamaño, barro y llampo como un conjunto en el rango de tonelaje extraído 0-250Kt. Se muestra a continuación el histograma y estadísticos básicos que describen el grupo de datos:

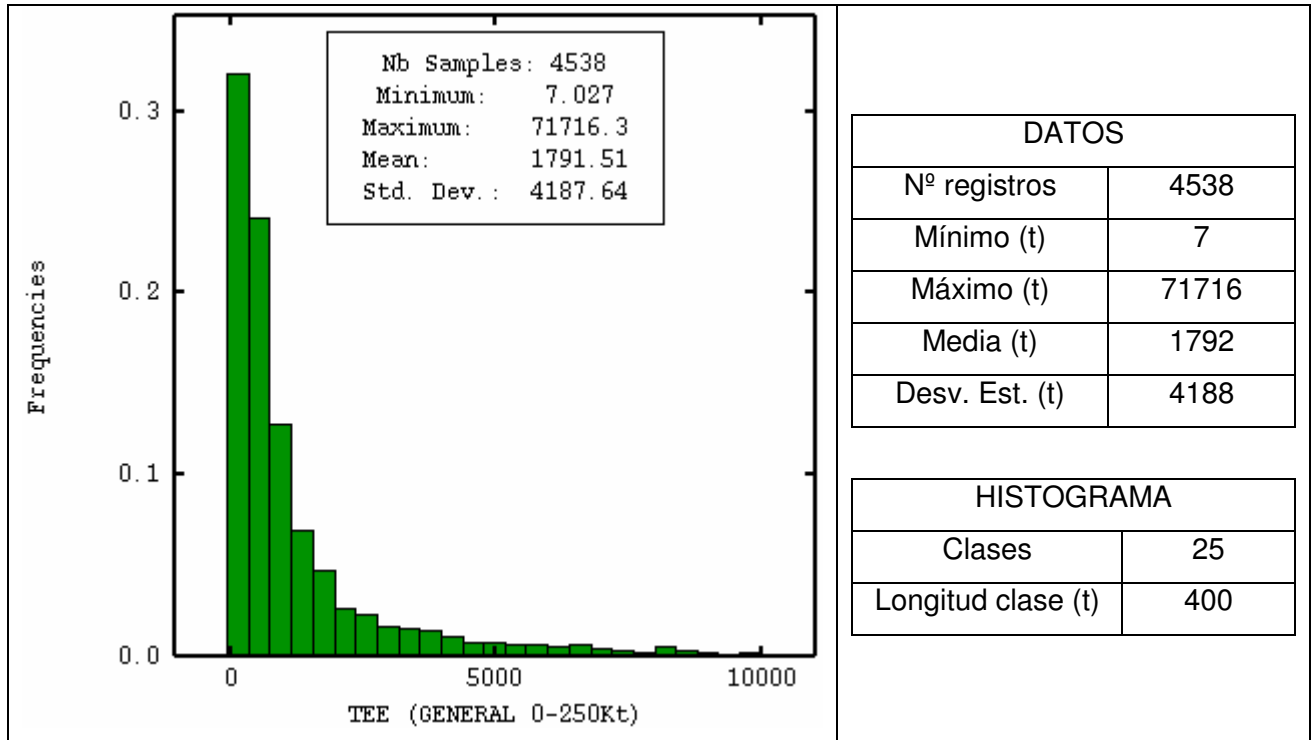


Gráfico 3-2. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (0 – 250Kt).

Se observa que existe una varianza muy elevada en la población que se debe por un lado a la existencia de valores de TEE muy altos debido al registro no adecuado del estado de puntos de extracción, por otro lado se suma el hecho que se están agrupando diversos tipos de eventos de interferencia cuya variabilidad intrínseca es diferente y que dado que las características geomecánicas del macizo rocoso son diferentes, pueden estarse agrupando varias poblaciones de datos.

Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2

El siguiente gráfico y tablas detallan las estadísticas básicas del grupo de datos fenomenológico 1 (colgaduras y sobretamaño como conjunto) en el rango de tonelaje extraído 0-250Kt:

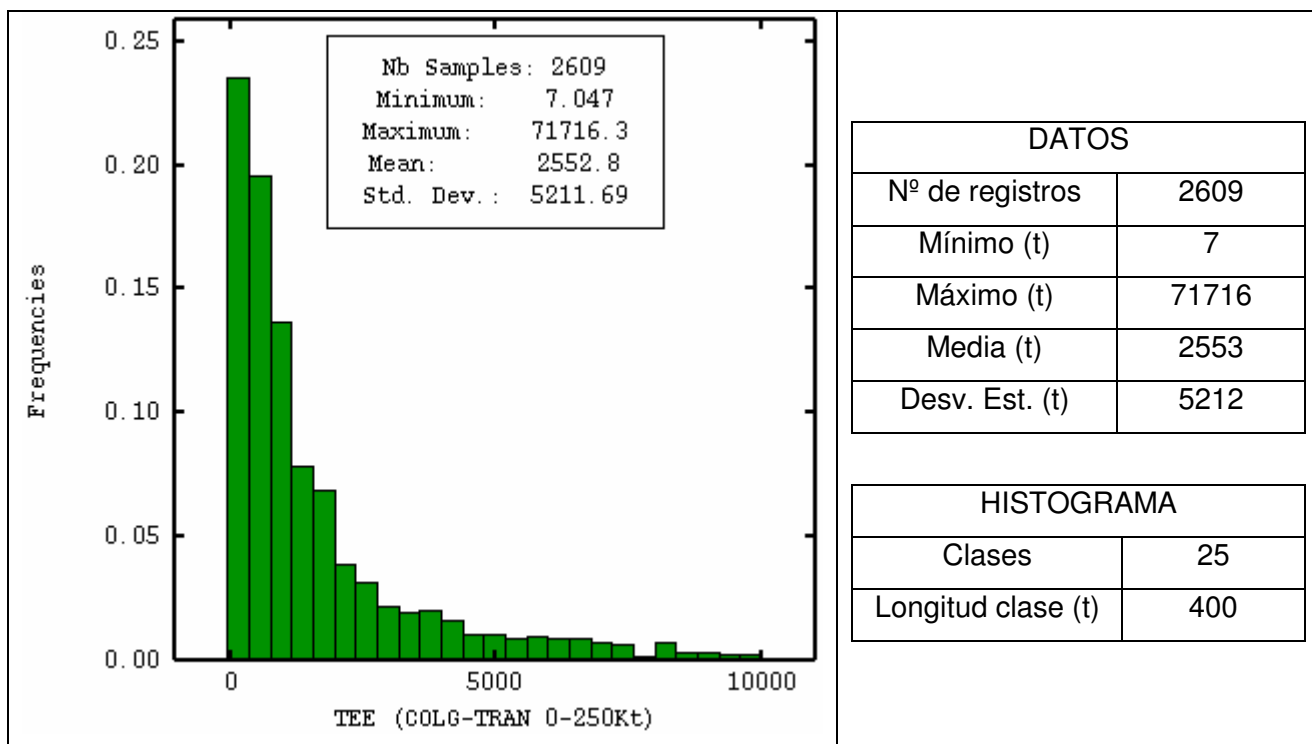


Gráfico 3-3. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Fenomenológico 1 (0 – 250Kt).

Por otro lado, debido a la naturaleza de los eventos de interferencia considerados en el grupo Fenomenológico 2, se podría pensar que el número de eventos registrados puede variar con los distintos periodos del año, debido a las fluctuaciones en las precipitaciones, las épocas de deshielo, etc. En relación a lo anterior, el siguiente gráfico muestra el número de registros de tonelaje entre eventos de interferencia en el tiempo encontrados:

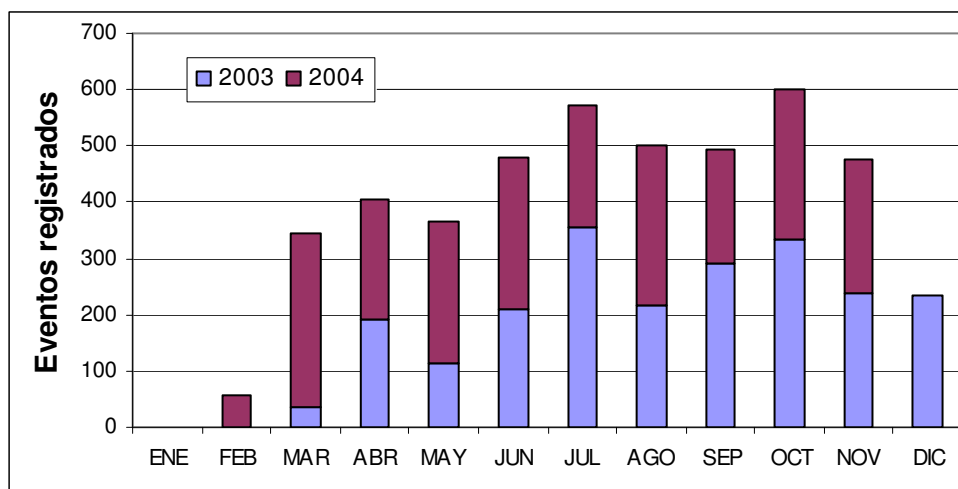


Gráfico 3-4. Número de registros de interferencias operacionales en el tiempo.

Así, el siguiente gráfico y tablas detallan las estadísticas básicas del grupo de datos fenomenológico 2 (barro y llampo como conjunto):

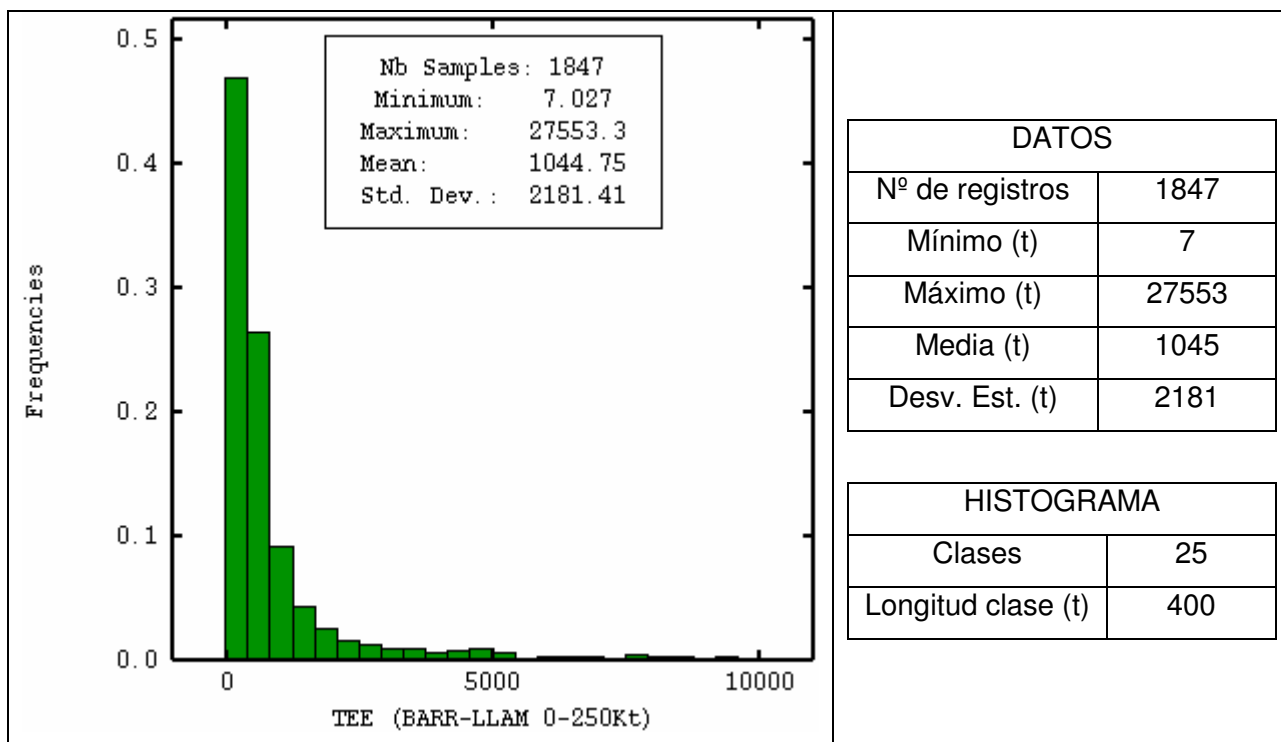


Gráfico 3-5. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Fenomenológico 2 (0 – 250Kt).

Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4

Finalmente, los siguientes histogramas y tablas detallan las estadísticas básicas de cada tipo de evento de interferencia operativa a nivel de puntos de extracción considerados en el rango de tonelaje extraído 0-250Kt:

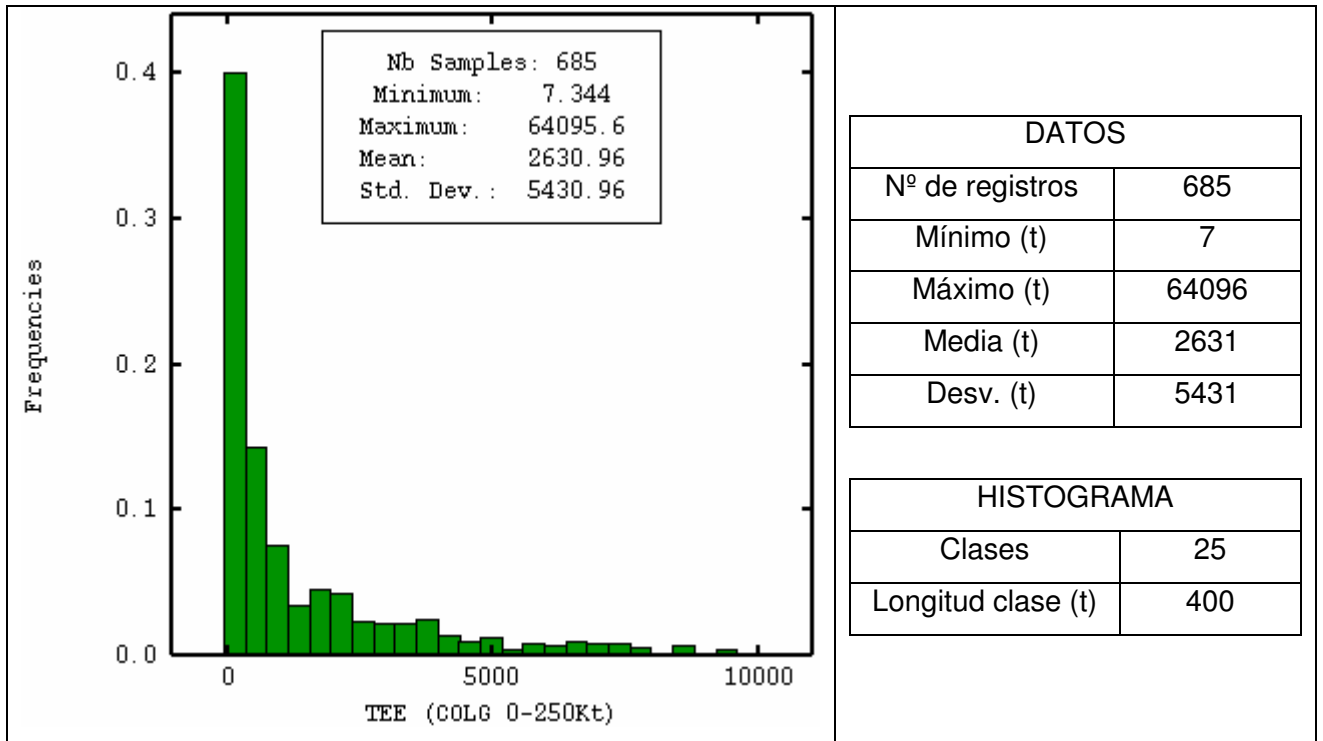


Gráfico 3-6. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 1 (0 – 250Kt).

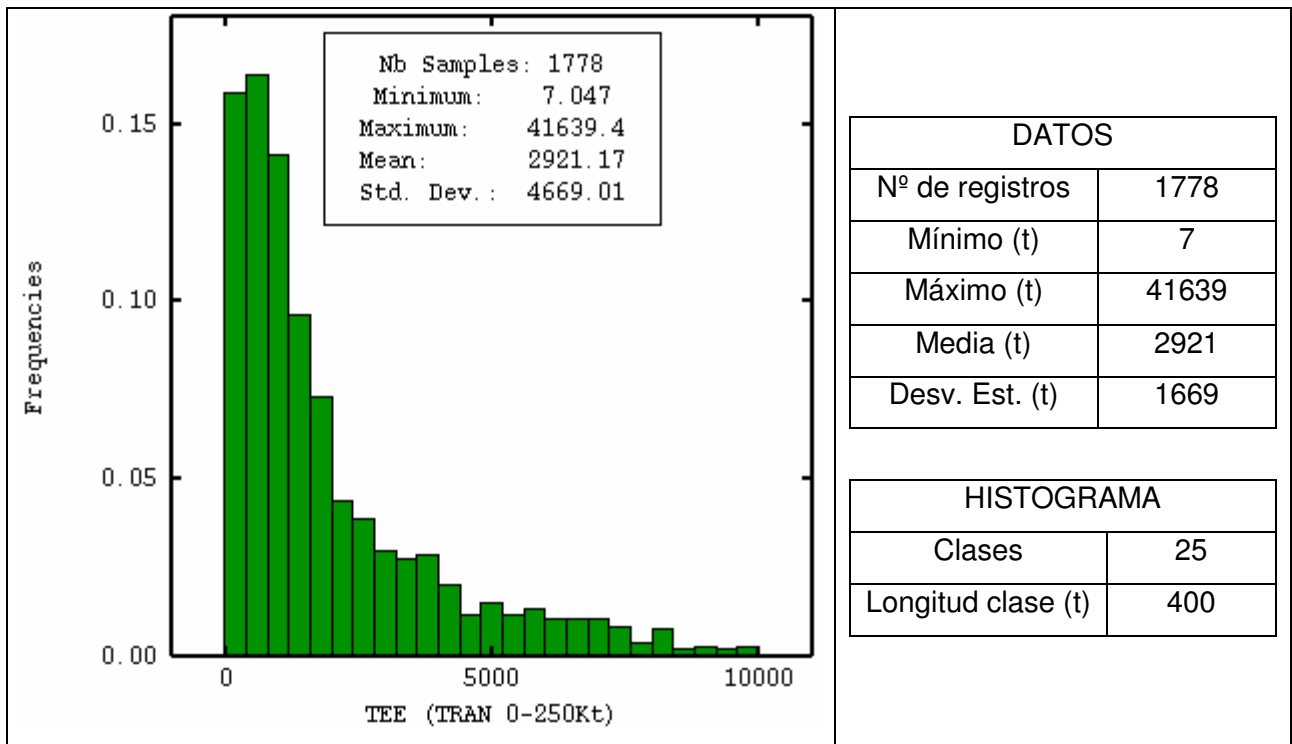


Gráfico 3-7. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 2 (0 – 250Kt).

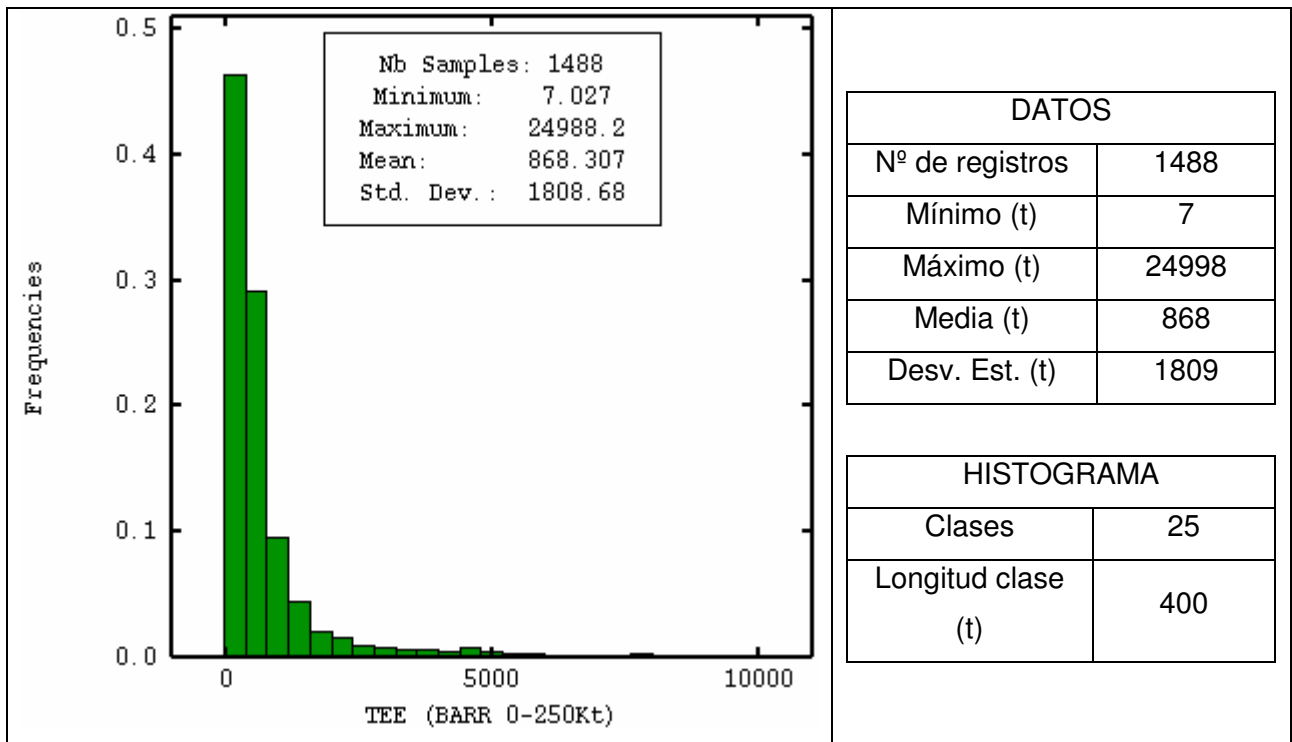


Gráfico 3-8. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 3 (0 – 250Kt).

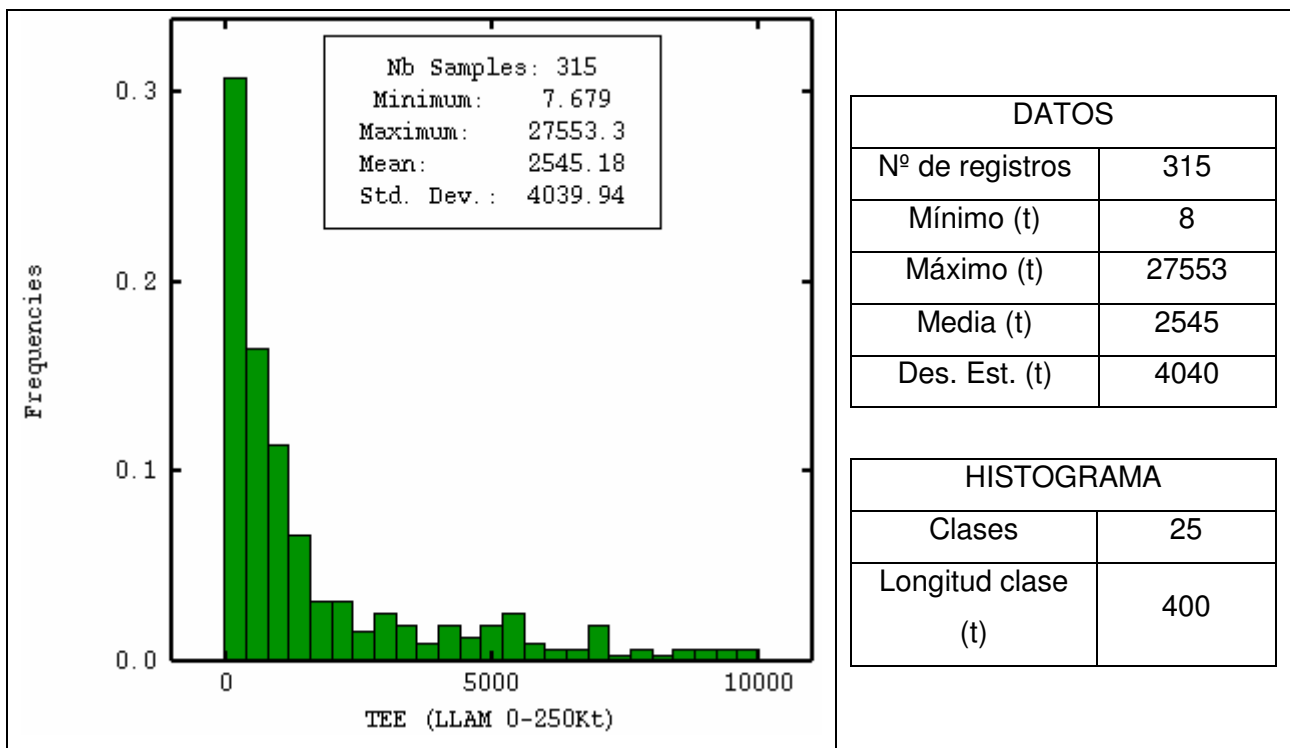


Gráfico 3-9. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo Puntual 4 (0 – 250Kt).

A modo de resumen, la siguiente tabla detalla las estadísticas básicas de los grupos mostrados anteriormente:

GRUPO	Nº REGISTROS	MEDIA (t)	DESV. EST. (t)	MÍNIMO (t)	MÁXIMO (t)
General	4538	1792	4188	7	71716
Fenomenológico 1	2609	2553	5212	7	71716
Fenomenológico 2	1847	1045	2181	7	27553
Puntual 1	685	2631	5431	7	64096
Puntual 2	1778	2921	1669	7	41639
Puntual 3	1488	868	1809	7	24998
Puntual 4	315	2545	4040	8	27553

Tabla 3-3. Tabla resumen de estadísticas básicas por grupos de datos (0-250Kt).

4 Sectorización del nivel de producción

4.1 Fundamentos de la sectorización

Una mina de panel caving puede entenderse como un sistema compuesto de n componentes (puntos de extracción, piques de traspaso, buzones, etc.) sujeto a la eventual ocurrencia de eventos de interferencia debido al desgaste por el funcionamiento del mismo y al tipo de material que se moviliza dentro de él, que se traducen en la detención de ciertos sectores que agrupan una o varias componentes del sistema, por sus relaciones de conectividad. Sin embargo, una característica fundamental de este sistema es que sus componentes son reparables y que la probabilidad de ocurrencia de dichos eventos de interrupción depende de la utilización de sus componentes y su grado de madurez, tanto como de sus características propias (por ejemplo: calidad de la roca donde están emplazadas las excavaciones, calidad de la fortificación utilizada, etc.).

La idea de sectorizar el nivel de producción nace al comprender que si bien su funcionalidad global es única, su extensión en planta es importante. Sumado al hecho que el macizo rocoso es de naturaleza variable y que las operaciones mineras influyen en su estabilidad, resulta natural pensar que cada componente del nivel de producción tiene una probabilidad de ocurrencia de eventos de interferencia puntual y distinta de sus pares, sin embargo, presumiblemente pueden encontrarse sectores con un comportamiento similar, cuyo funcionamiento en conjunto a otras componentes del sistema minero tienen una productividad intrínseca asociada, que dependerá, entre otros factores, de la frecuencia de ocurrencia de interferencias.

La alta variabilidad observada del TEE refuerza lo observado anteriormente y la necesidad de subdividir el nivel de producción en varios sectores para un estudio adecuado, en los siguientes títulos detalla como se realizó esta labor.

4.2 Sectorización global

Para zonificar el nivel de producción es necesario caracterizar cada punto de extracción con un tonelaje entre eventos representativo de su funcionamiento. Una primera aproximación al problema es calificar cada punto por su tonelaje entre eventos de interferencia promedio, de manera de tener una idea general de la frecuencia de ocurrencia de eventos.

El siguiente histograma muestra la distribución de la variable anteriormente mencionada, tonelaje entre eventos promedio de cada punto de extracción con información concerniente, considerando el grupo General de tipos de eventos de interferencia:

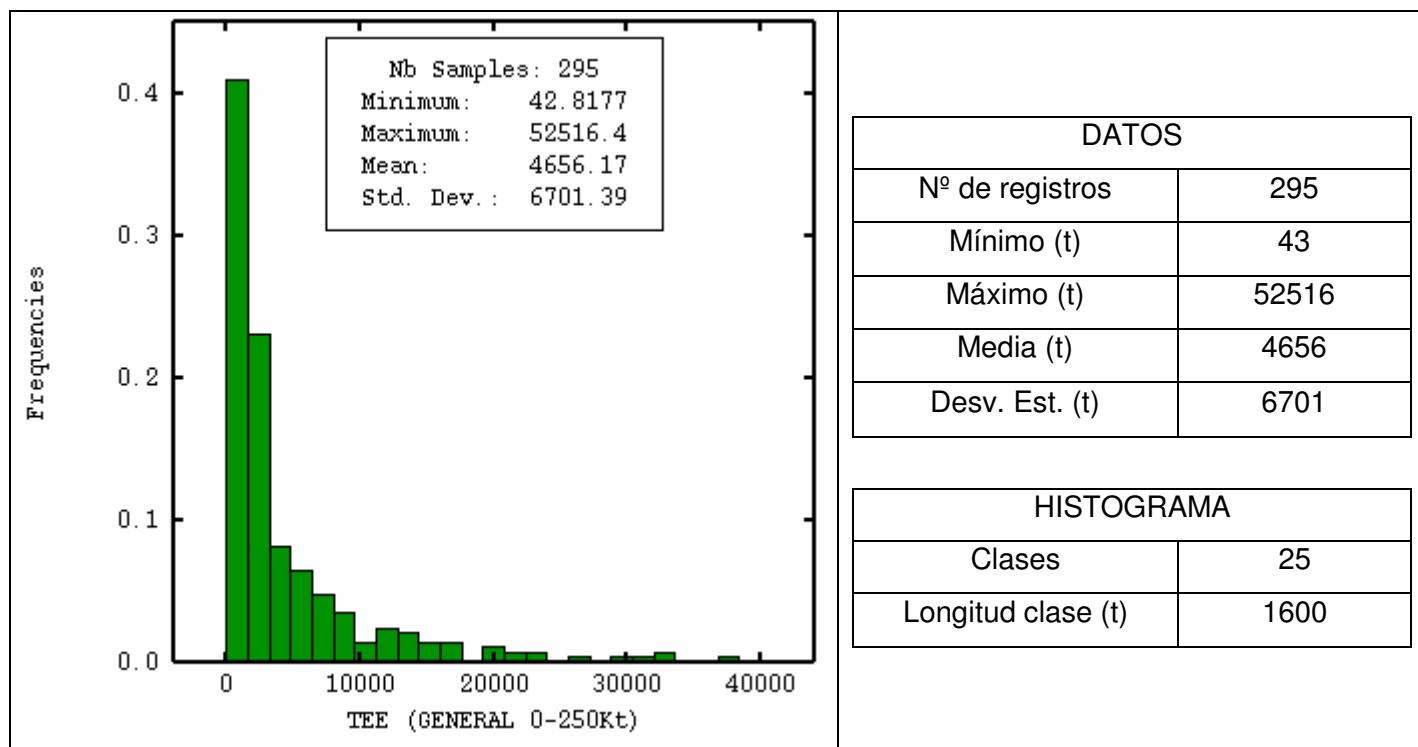


Gráfico 4-1. Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (0 – 250Kt).

Con el fin de identificar zonas en el nivel de producción más susceptibles a la ocurrencia de eventos de interferencia, se definen las siguientes categorías del tonelaje entre eventos, para el rango 0 – 250 Kt extraídas, es decir, considerando toda la vida de cada punto:

CATEGORÍA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR	PORCENTAJE DE DATOS
Tonelaje entre eventos bajo	0	1226	33.3%
Tonelaje entre eventos medio	1226	3417	33.3%
Tonelaje entre eventos alto	3417	52516	33.4%

Tabla 4-1. Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (0 – 250Kt).

Los intervalos de la tabla anterior aparecen al separar la distribución del promedio de datos del grupo general por sus cuantiles 33% y 66%, respectivamente. Con lo anterior, la visualización en planta de puntos de extracción que se encuentran en los diferentes intervalos se muestran a continuación:

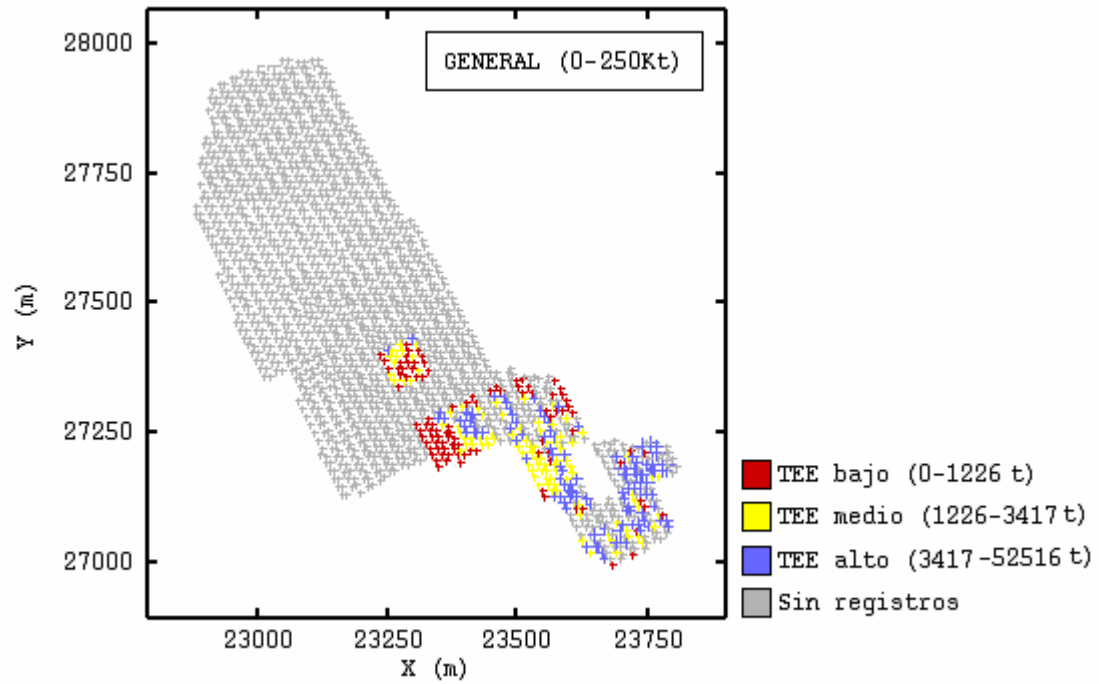


Figura 4-1. Nivel de producción clasificado según eventos entre 0 – 250Kt.

Si bien en la figura anterior existe cierta dispersión espacial de las distintas categorías especificadas, pueden identificarse al menos tres sectores con un comportamiento relativo diferente, especificados en la siguiente imagen:

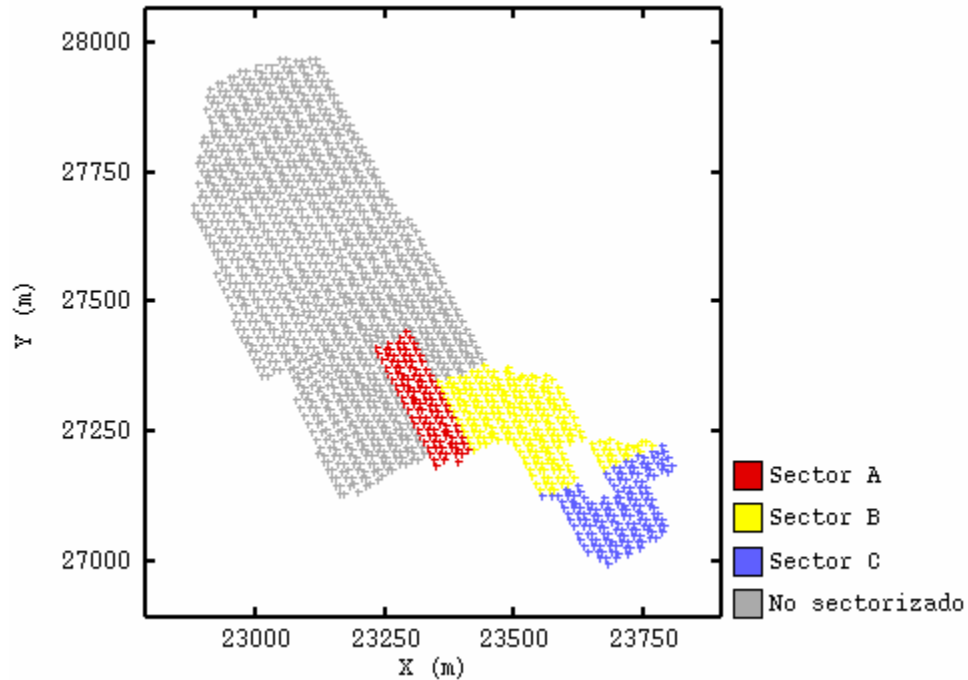


Figura 4-2. Nivel de producción sectorizado.

Cada uno de los sectores presentados engloba puntos de extracción con un comportamiento similar, esto es, para el sector A se espera encontrar un tonelaje entre eventos bajo pues engloba en su mayoría puntos de extracción con TEE promedio en este rango, según los límites especificados anteriormente. Similar, pero contrariamente, para el sector C agrupa mayoritariamente puntos con un tonelaje entre eventos promedio alto, es decir es un sector con menor ocurrencia de interrupciones operacionales. Por otro lado, el sector B agrupa puntos no sólo donde el TEE promedio se encuentra en el rango medio, si no también donde la proporción de puntos con TEE alto y bajo son relativamente similares.

Continuando con lo anterior, si se agrupan todos los registros de tonelaje entre eventos de cada sector, se obtiene lo siguiente:

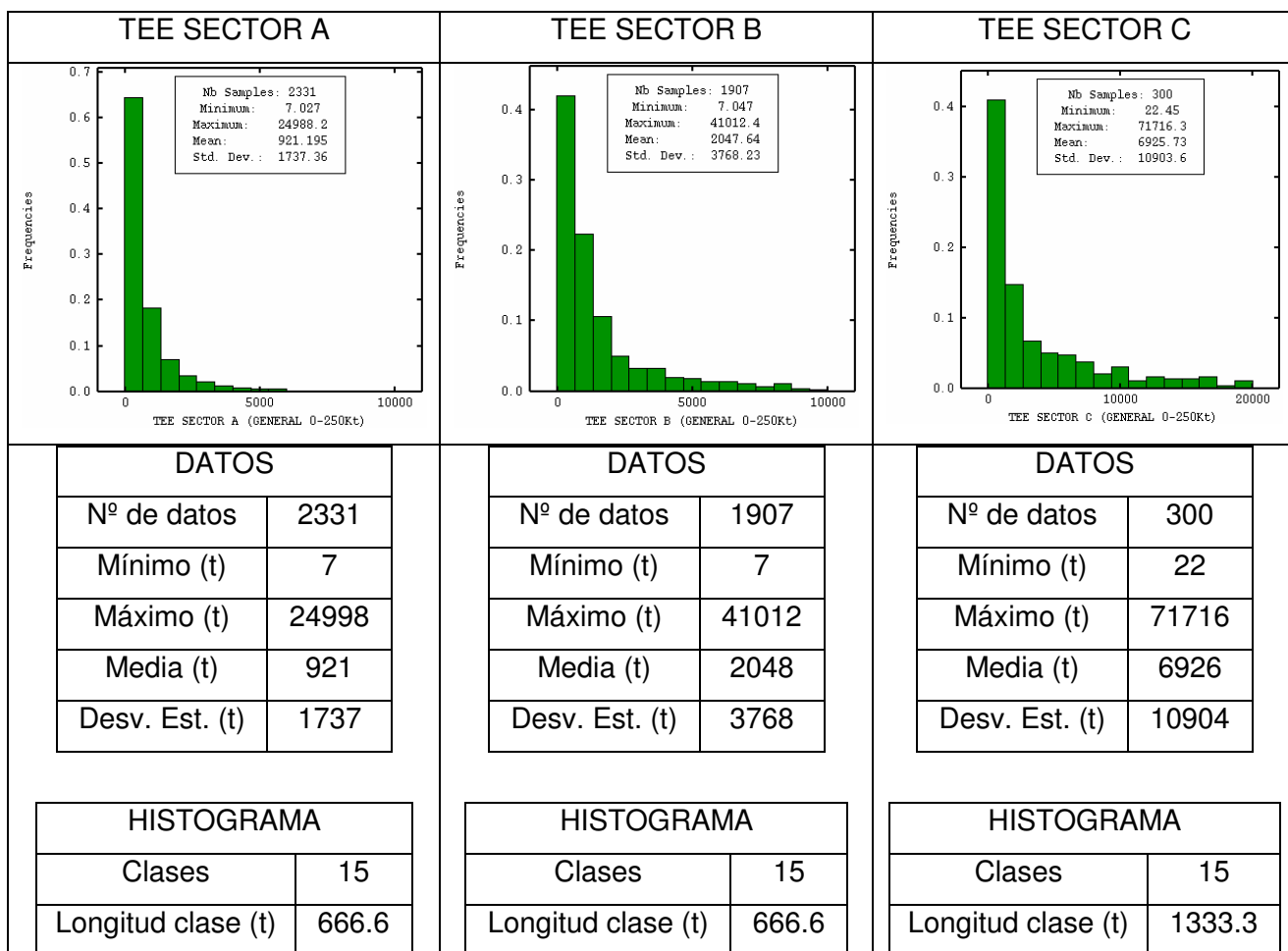


Gráfico 4-2. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo General (0 – 250Kt) por sectores.

Donde puede observarse claramente que el TEE promedio de distintos sectores es diferente, es más, se tiene que $TEE(\text{sector A}) < TEE(\text{sector B}) < TEE(\text{sector C})$, lo que corrobora de alguna forma que la sectorización aplicada al nivel de producción rescata los resultados esperados sobre la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia. A su vez, puede apreciarse que conforme aumenta el TEE promedio de diversos sectores, la variabilidad de este parámetro aumenta, lo que se atribuye al efecto proporcional.

Finalmente, a modo de ejemplo, el siguiente gráfico muestra la productividad promedio mensual de los puntos de extracción por sectores para el periodo 2004, donde se aprecian notorias diferencias para las distintas zonas identificadas:

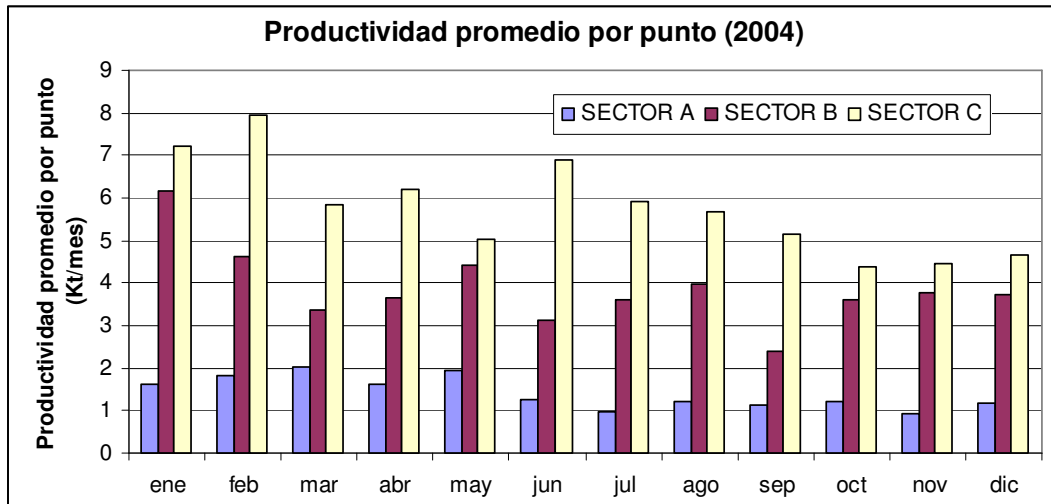


Gráfico 4-3. Productividad promedio mensual por punto (sectorizado).

4.3 Sectorización normalizada

Sin embargo lo expresado en párrafos anteriores, por causa del método de explotación utilizado (panel caving), el tonelaje acumulado para una misma fecha de distintos puntos de extracción es altamente variable, debido a que continuamente se suman puntos de extracción nuevos a la producción y se cierran antiguos (razones logísticas) y según lo que muestra el siguiente gráfico, la frecuencia de eventos de interferencia, definida como el inverso del TEE parece depender de su tonelaje extraído o madurez:

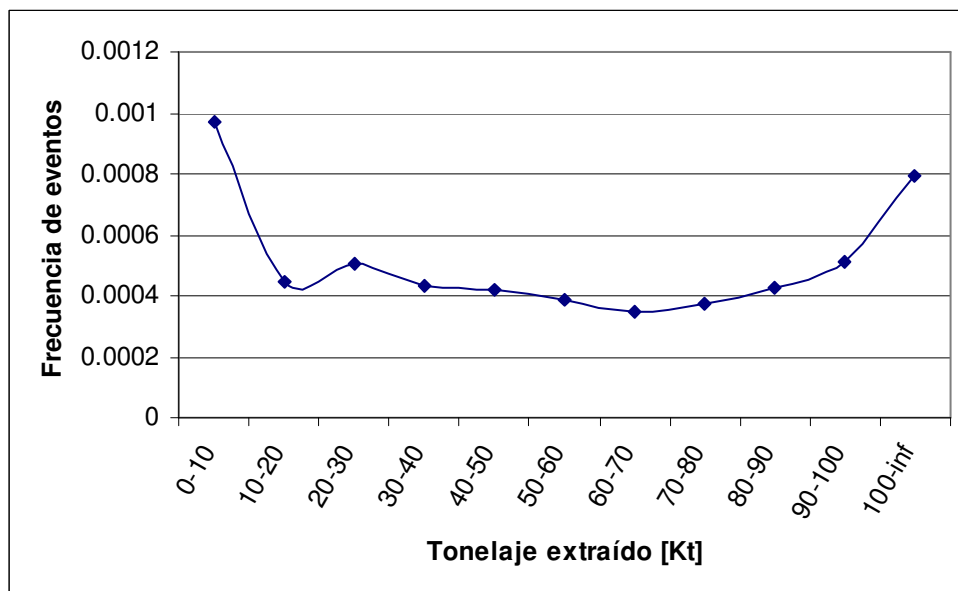


Gráfico 4-4. Evolución de la frecuencia de eventos a nivel de puntos de extracción en el tonelaje extraído.

Es por esto, que resulta necesario normalizar por una medida de madurez de los puntos de extracción, su tonelaje extraído. Para lo anterior, se definen tres rangos, especificados en la siguiente tabla, que serán analizados independientemente:

RANGO DE TONELAJE EXTRAÍDO (MILES DE TONELADAS)
0 - 50
50 - 150
150 - 250

Tabla 4-2. Rangos de tonelaje extraído considerados.

Entre 0 – 50 Kt extraídas

El siguiente gráfico resume las estadísticas básicas del TEE promedio por punto del grupo general, considerando únicamente los registros entre 0 y 50Kt extraídas:

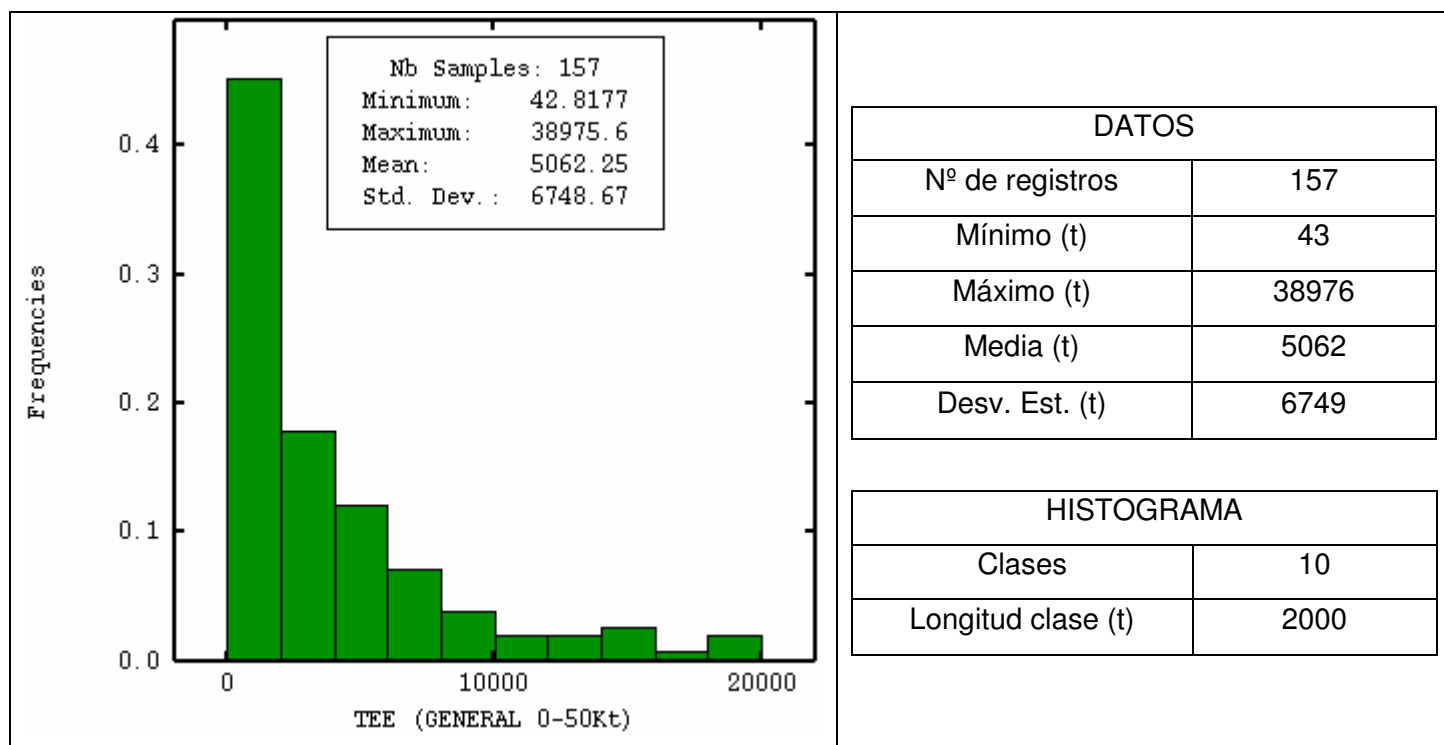


Gráfico 4-5. Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (0 – 50Kt).

Desde donde nace la siguiente categorización de puntos de extracción:

CATEGORÍA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR	PORCENTAJE DE DATOS
Tonelaje entre eventos bajo	0	1418	33.3%
Tonelaje entre eventos medio	1418	4274	33.3%
Tonelaje entre eventos alto	4274	38976	33.4%

Tabla 4-3. Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (0 – 50Kt).

Los intervalos de la tabla anterior aparecen al separar la distribución del promedio de datos del grupo general por sus cuantiles 33% y 66%, respectivamente. Con lo anterior, la visualización en planta de puntos de extracción que se encuentran en los diferentes intervalos se muestran a continuación:

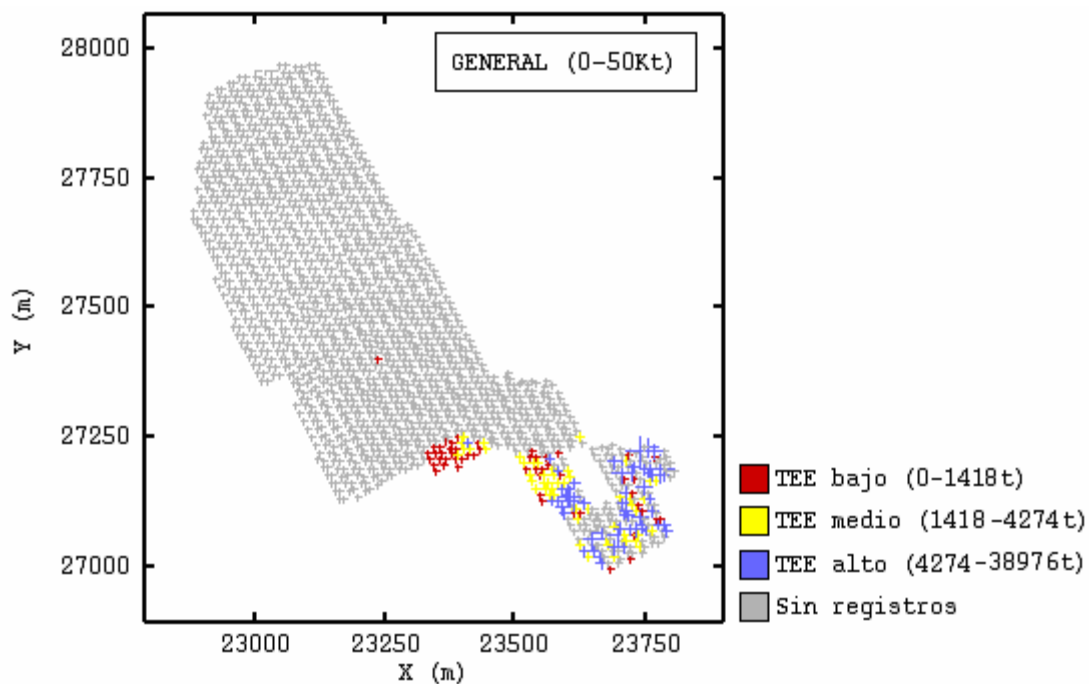


Figura 4-3. Nivel de producción clasificado según eventos entre 0 – 50Kt.

Entre 50 -150 Kt extraídas

El siguiente gráfico resume las estadísticas básicas del TEE promedio por punto del grupo general, considerando únicamente los registros entre 50 y 150Kt extraídas:

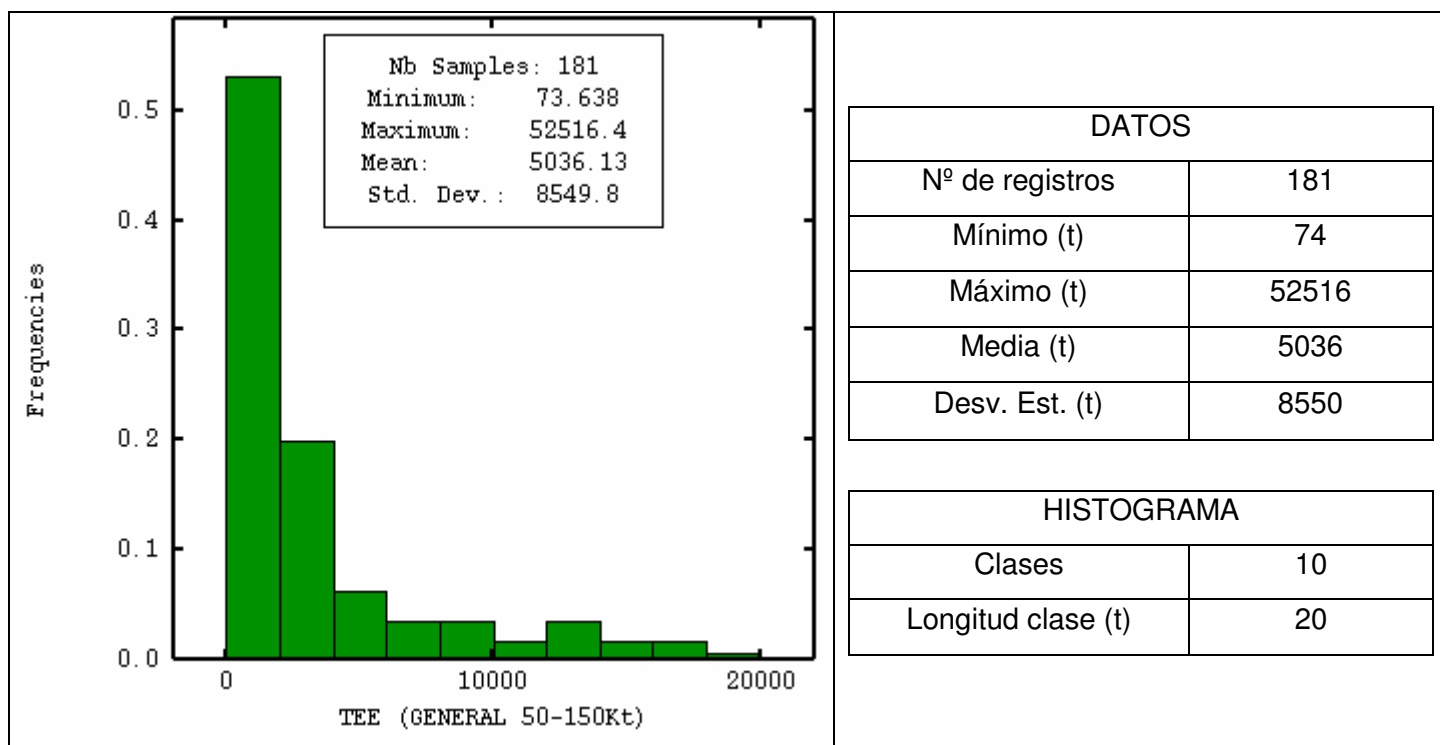


Gráfico 4-6. Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (50 – 150Kt).

Desde donde nace la siguiente categorización de puntos de extracción:

CATEGORÍA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR	PORCENTAJE DE DATOS
Tonelaje entre eventos bajo	0	1059	33.3%
Tonelaje entre eventos medio	1059	3052	33.3%
Tonelaje entre eventos alto	3052	52516	33.4%

Tabla 4-4. Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (50 – 150Kt).

Los intervalos de la tabla anterior aparecen al separar la distribución del promedio de datos del grupo general por sus cuantiles 33% y 66%, respectivamente. Con lo anterior, la visualización en planta de puntos de extracción que se encuentran en los diferentes intervalos se muestran a continuación:

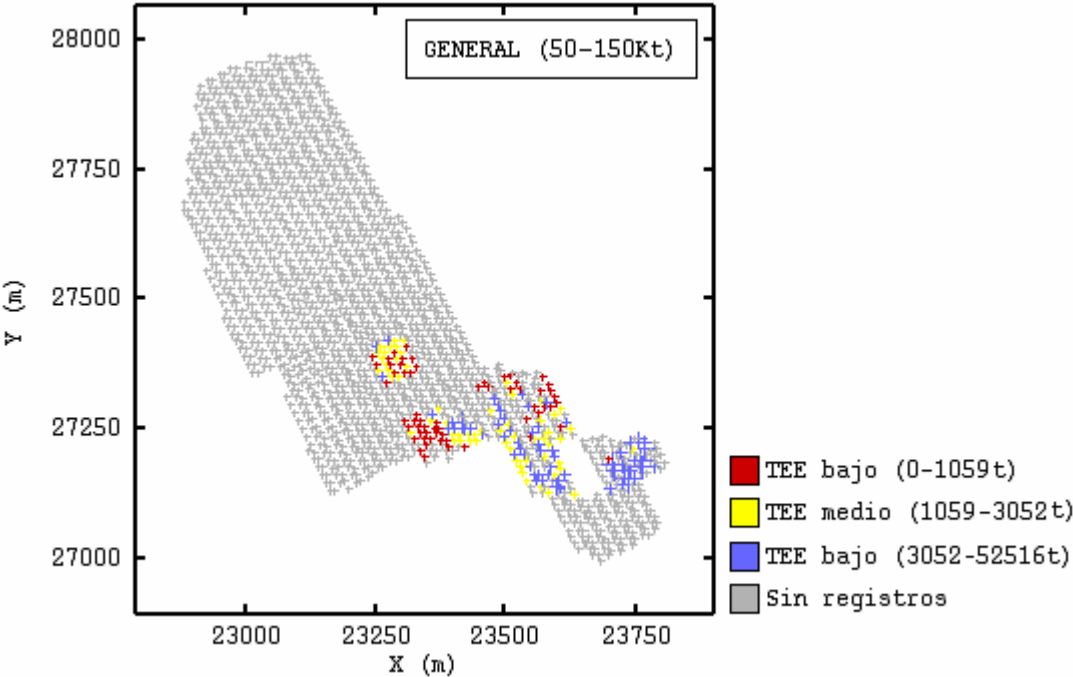


Figura 4-4. Nivel de producción clasificado según eventos entre 50 – 150Kt.

Entre 150 – 250 Kt extraídas

El siguiente gráfico resume las estadísticas básicas del TEE promedio por punto del grupo general, considerando únicamente los registros entre 150 y 250Kt extraídas:

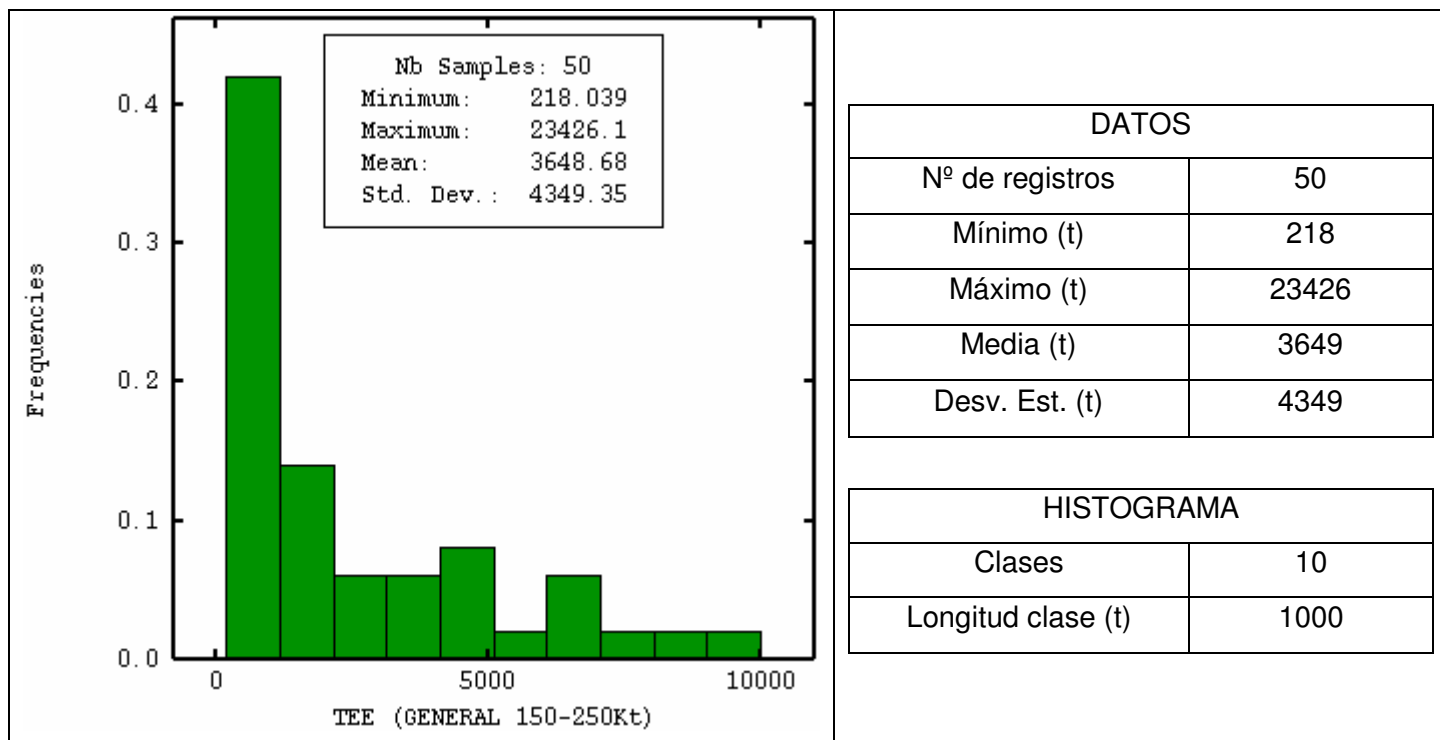


Gráfico 4-7. Histograma y estadísticas básicas de TEE promedio del grupo General (150 – 250Kt).

Desde donde puede generarse la siguiente categorización de puntos de extracción:

CATEGORÍA	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR	PORCENTAJE DE DATOS
Tonelaje entre eventos bajo	0	896	33.3%
Tonelaje entre eventos medio	896	3834	33.3%
Tonelaje entre eventos alto	3834	23426	33.4%

Tabla 4-5. Categorías y TEE límites asociados para clasificación de puntos de extracción (150 – 250Kt).

Los intervalos de la tabla anterior aparecen al separar la distribución del promedio de datos del grupo general por sus cuantiles 33% y 66%, respectivamente. Con lo anterior, la visualización en planta de puntos de extracción que se encuentran en los diferentes intervalos se muestran a continuación:

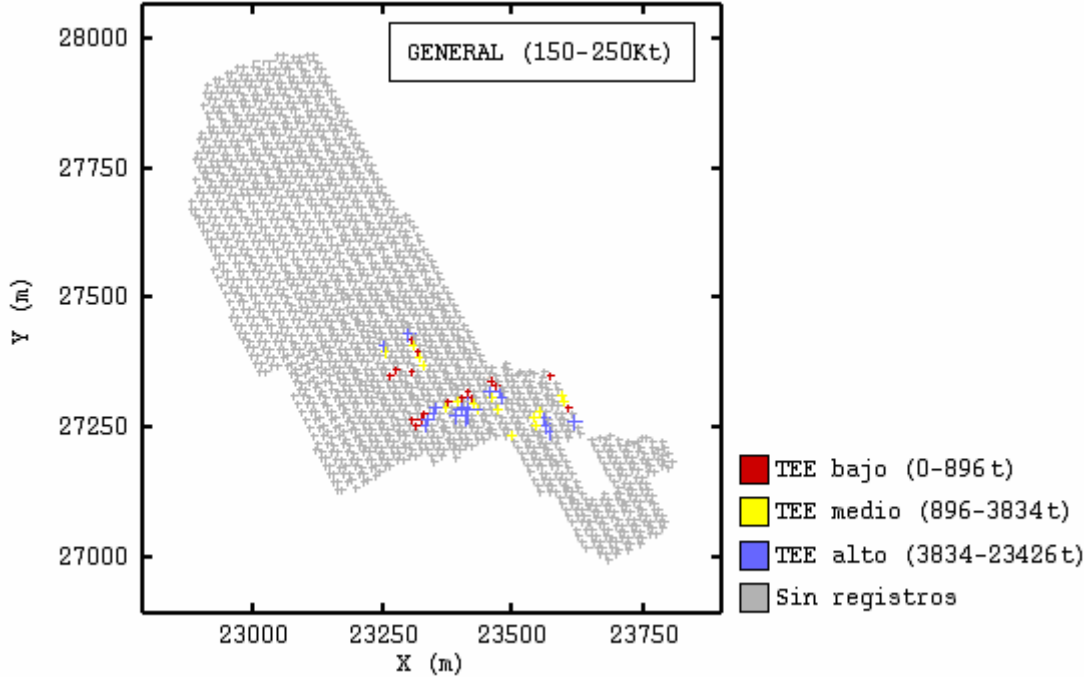


Figura 4-5. Nivel de producción clasificado según eventos entre 150 – 250Kt.

4.4 Sectorización final y ajuste de distribuciones por sectores

Puede observarse de manera general que las envolventes de frecuencia de eventos tienden a mantenerse para los distintos intervalos de tonelaje extraído analizados, observándose que sistemática y relativamente, los puntos asociados al sector A presentan una mayor frecuencia de eventos promedio que los del sector B y a su vez éstos una frecuencia promedio mayor a la observada en el sector C. Lo anterior puede apreciarse de mejor manera en la siguiente gráfica:

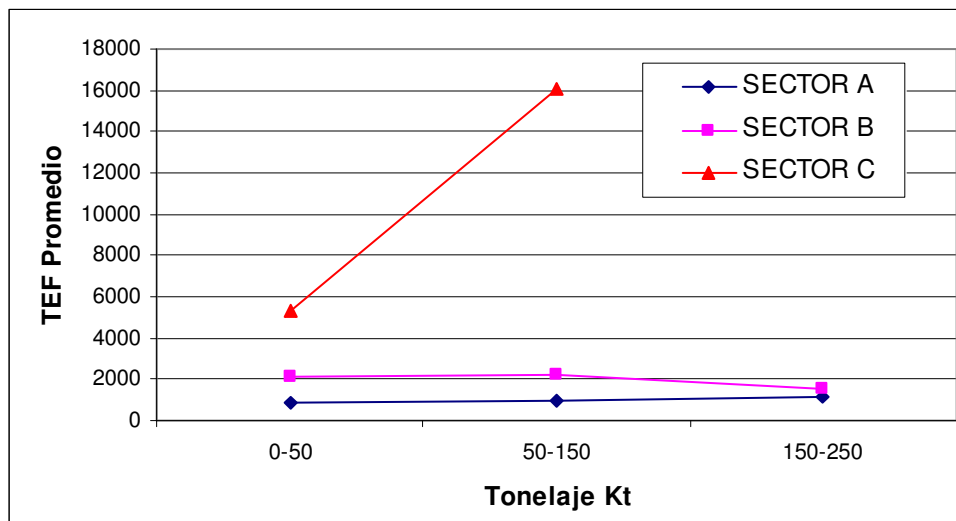


Gráfico 4-8. Evolución del TEE promedio del grupo General.

La gráfica anterior muestra el tonelaje entre eventos promedio de cada sector para cada intervalo de tonelaje especificado, sin embargo, debe tenerse en cuenta que cada sector posee una distribución de valores que obviamente tiene asociada una cierta dispersión. Por otro lado, el número de registros recuperado para cada sector es variable por lo que un valor promedio podría no ser el indicador más adecuado, sin embargo permite apreciar una tendencia. El detalle estadístico por sectores y rangos de tonelaje se encuentra en la sección de anexos.

De manera similar, puede observarse en la siguiente gráfica, la evolución del tonelaje entre eventos promedio por sectores para distintos grupos de eventos (fenomenológicos 1 y 2):

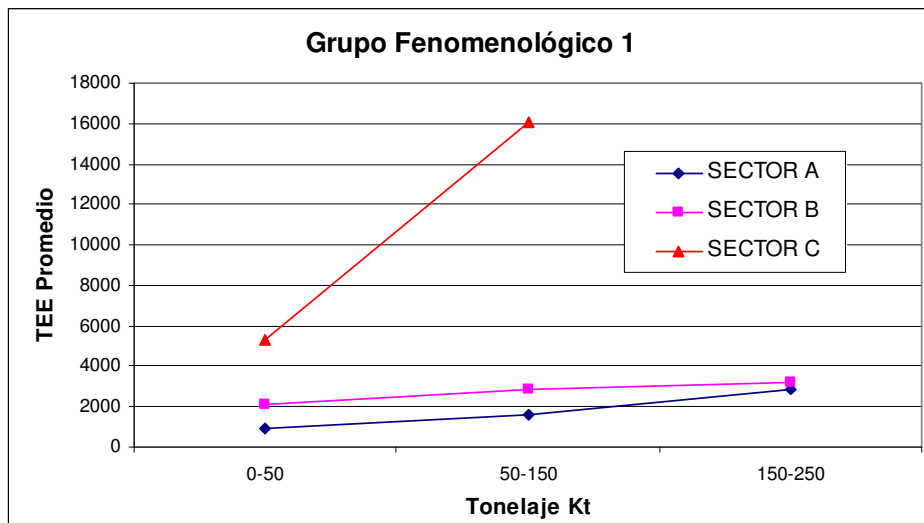


Gráfico 4-9. Evolución del TEE promedio del grupo Fenomenológico 1.

Puede observarse de manera general en la gráfica anterior, que para el grupo de datos Fenomenológico 1 (colgaduras, sobretamaño) se mantiene la tendencia observada: relativamente para cada rango de tonelaje, el sector A presenta una frecuencia de ocurrencia de eventos mayor que la del sector B y a su vez menor que la del sector C, para distintos rangos de tonelaje. Por otro lado, para el grupo de datos Fenomenológico 2 se tiene lo siguiente:

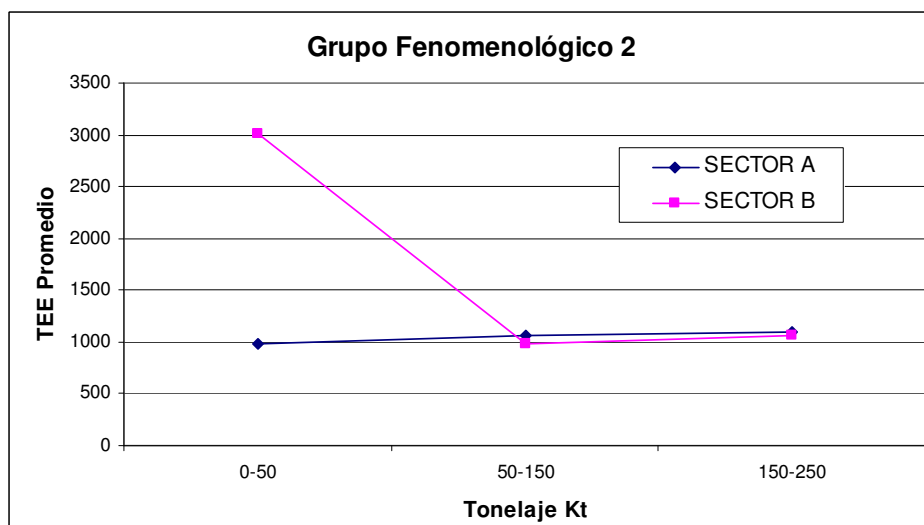


Gráfico 4-10. Evolución del TEE promedio grupo Fenomenológico 2.

Para el caso del grupo fenomenológico 2, puede observarse que numéricamente se pierde el ordenamiento relativo observado anteriormente que muestra al sector A como el más propenso a la ocurrencia de eventos de interferencia, en los rangos de tonelaje 50 – 150Kt y 150 – 250Kt.

Sin embargo las diferencias de TEE promedio entre ambos sectores, en los rangos de tonelaje analizados son menores y debe considerarse además que el número de datos con que se calcula el promedio de tonelaje entre eventos es reducido.

Considerando lo expresado en los párrafos anteriores de este capítulo, la sectorización del nivel de producción a utilizar para analizar la productividad del sistema minero en estudio es la mostrada en la figura siguiente, por considerar que los puntos asociados a cada sector tienen en general un comportamiento de ocurrencia de eventos de interferencia similar:

SECTOR	# PUNTOS DE EXTRACCIÓN
A	118
B	257
C	165

Tabla 4-6. Número de puntos de extracción asociados a cada sector.

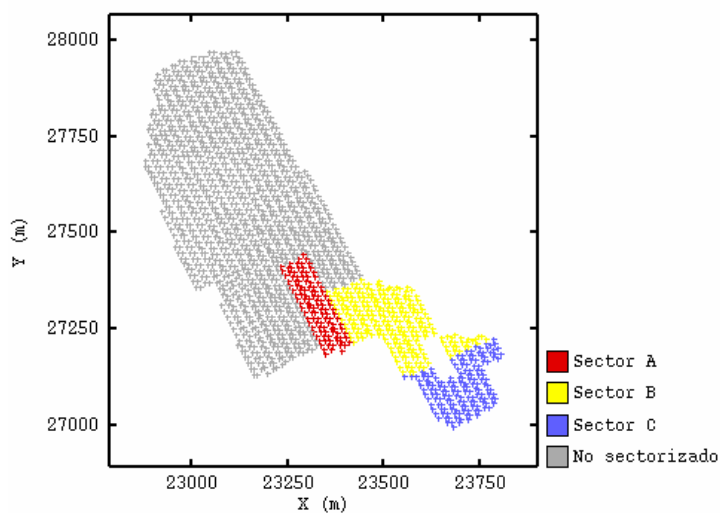


Figura 4-6. Sectorización final del nivel de producción.

Dada la sectorización, los modelos de distribuciones de probabilidad de ocurrencia ajustadas para alimentar el modelo de simulación son las siguientes (el detalle del test de hipótesis se encuentra en el capítulo de anexos):

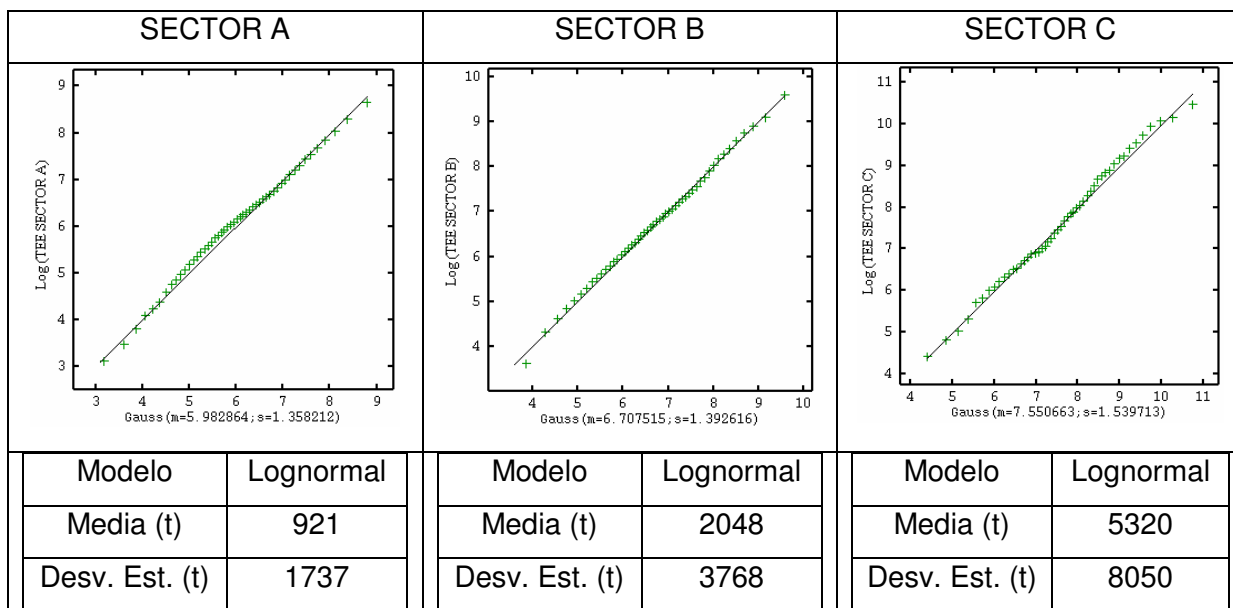


Gráfico 4-11. Comparación cuantil a cuantil de distribuciones ajustadas por sectores.

Resulta importante mencionar que los modelos de distribución de probabilidad de TEE ajustados consideran para los sectores A y B los registros de tonelaje entre eventos en el rango 0 – 250Kt extraídas. Lo anterior se debe principalmente a que para realizar un buen ajuste es necesario contar con el mayor número de datos posibles además del hecho que la evolución del TEE promedio del grupo de datos General no presenta grandes variaciones.

Distinto es el caso del sector C, en que puede observarse una fluctuación importante entre los rangos de tonelaje 0 – 50Kt y 50-150Kt. Para el ajuste de los modelos asociados es considerado el rango 0-50Kt únicamente, debido principalmente a que el rango descartado presenta un número reducido de registros.

Para aclarar lo expresado en los párrafos anteriores, a continuación se presentan los histogramas y estadísticas básicas de los registros por sectores utilizados para el ajuste de modelos de distribuciones de probabilidad:

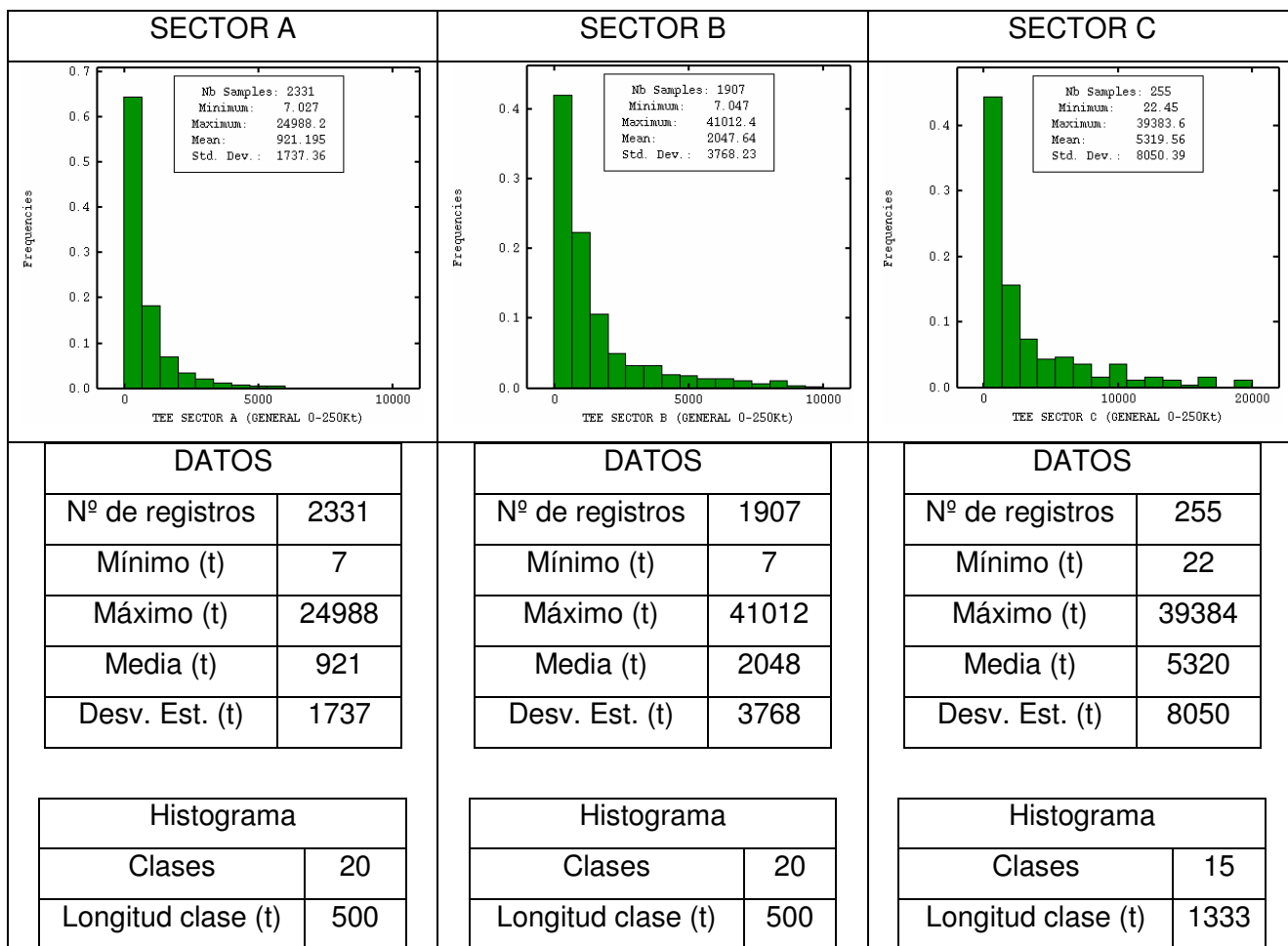


Gráfico 4-12. Histograma y estadísticas básicas de TEE utilizados para el ajuste de distribuciones por sectores.

4.5 Fenomenología de las distribuciones de TEE por sectores

El sector C presenta el tonelaje entre eventos de interferencia promedio más elevado de los tres sectores definidos, es decir es la zona con menor frecuencia de ocurrencia de interrupciones. Observando la siguiente figura puede comprenderse este hecho:

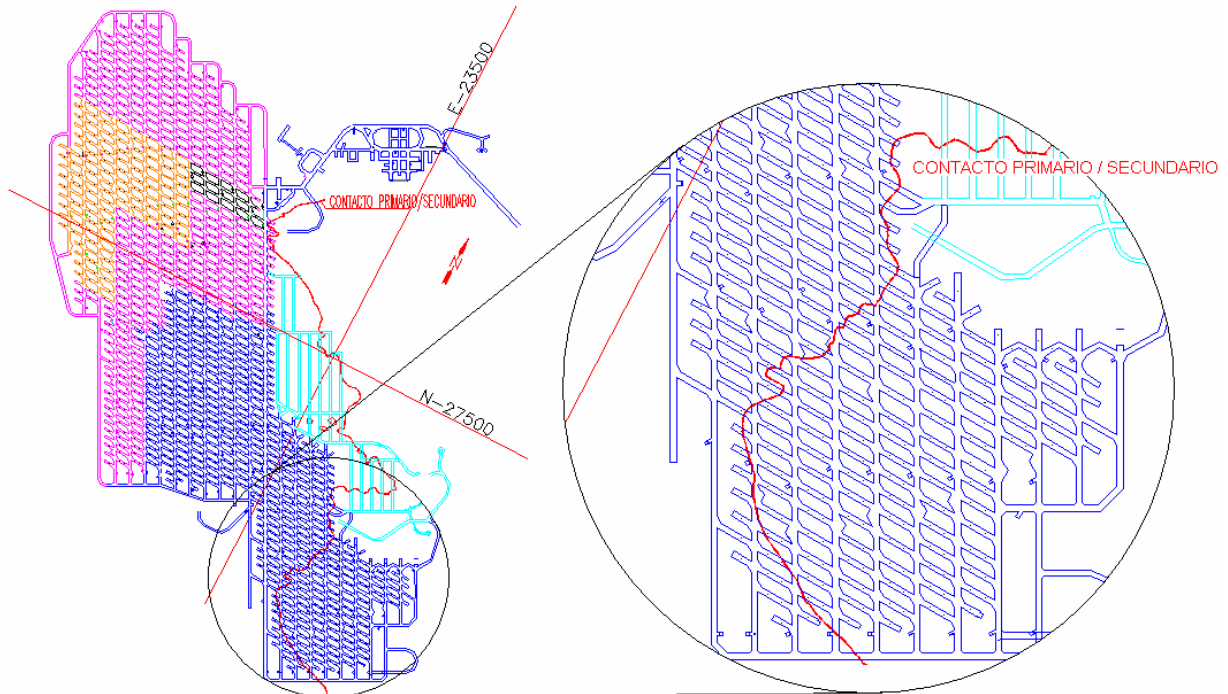


Figura 4-7. Nivel de producción (contacto primario / secundario).

El sector C está situado en el extremo sur-este del nivel de producción. Si se observa detalladamente la imagen ampliada del sector en cuestión se observa una línea en color rojo que delimita donde la superficie del contacto entre material primario y secundario intersecta el nivel de producción. Esta superficie es inclinada y manta hacia el este, en términos generales. Es decir, los puntos de extracción asociados al sector C presentan mayoritariamente en sus columnas material secundario, o sea de granulometría comparativamente menor a la del material primario debido a sus características geotécnicas, lo que puede explicar por un lado la baja frecuencia de colgadas y de eventos de sobretamaño.

Por otro lado, el sector C posee una malla de extracción tipo teniente de 13m x 13m aproximadamente (existen zonas puntuales con cierta distorsión) cuyo diseño y dimensiones resultan más adecuadas para columnas de material de granulometría mayor. Este hecho se traduce en que los elipses de extracción asociados a cada punto son más angostas, por lo que el grado de interacción y por ende la movilización del pilar de material entre puntos es escasa o

nula. Lo anterior se traduce en la compactación del material en cuestión y en la eventual transmisión de esfuerzos a través de estos pilares hacia el nivel de producción con la posible generación de sectores inestables que pueden incluso llegar al colapso, como lo ocurrido en los puntos de extracción especificados en la siguiente figura:

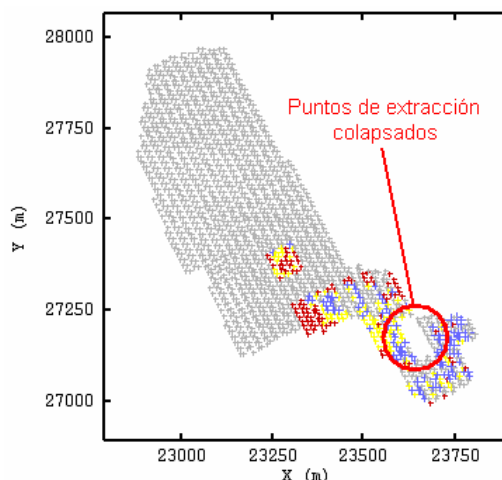


Figura 4-8. Puntos de extracción colapsados.

Finalmente, la baja frecuencia de eventos asociados a la presencia de agua (barro, llampo) puede explicarse por el hecho que el sector tiene, comparativamente, un menor tonelaje extraído, por lo que la movilización y quiebre de material probablemente no ha alcanzado la superficie, con lo cual la probabilidad de infiltración de aguas superficiales es menor.

La alta frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia operacional del sector A puede entenderse por el hecho que las columnas de mineral de los puntos de extracción asociados al sector en cuestión poseen mayoritariamente material primario, de granulometría más gruesa que naturalmente generará un mayor número de eventos de colgaduras y sobretamaño. Sin embargo, puede esperarse que una vez que la extracción alcance el material secundario situado más cerca de la superficie este sector disminuya su frecuencia de ocurrencia de eventos. Con lo anterior puede inferirse que la sectorización del nivel de producción no es estática, es decir evoluciona conjuntamente con la evolución de la mina. Por tal motivo resulta interesante plantearse la posibilidad de encontrar sectores en función de otros parámetros que permitan sustentar un análisis más predictivo de la productividad potencial máxima del sistema minero, como por ejemplo el RMR (Rock mass rating) o similares, incluso llegar a relacionar la frecuencia de ocurrencia de eventos con variables relacionadas por ejemplo la uniformidad de la extracción, los diseños del nivel de producción, etc.

5 Construcción del Modelo de simulación

El objetivo principal de la construcción del modelo de simulación es analizar el impacto que tienen en la productividad del sistema minero las diferentes combinaciones posibles entre una frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia dada, el número de recursos para repararlas y las diferentes estrategias de reparación asociadas, sin necesariamente tener que realizar experimentos a escala real en la mina para analizar sus impactos.

El modelo de simulación implementado para el estudio del impacto de las interferencias operacionales en la productividad del sistema minero analizado se describe de manera general como una simulación computacional estocástica de eventos discretos. Los detalles de funcionamiento específico e implementación se describen en los siguientes títulos.

5.1 Infraestructura de la mina

Las componentes de estructura implementadas en el modelo de simulación son las siguientes:

- Puntos de extracción.
- Cruzados de producción.
- Piques de traspaso.
- Buzones.
- Cruzado de acarreo.

Las anteriores interactúan entre si según el siguiente diagrama esquemático:

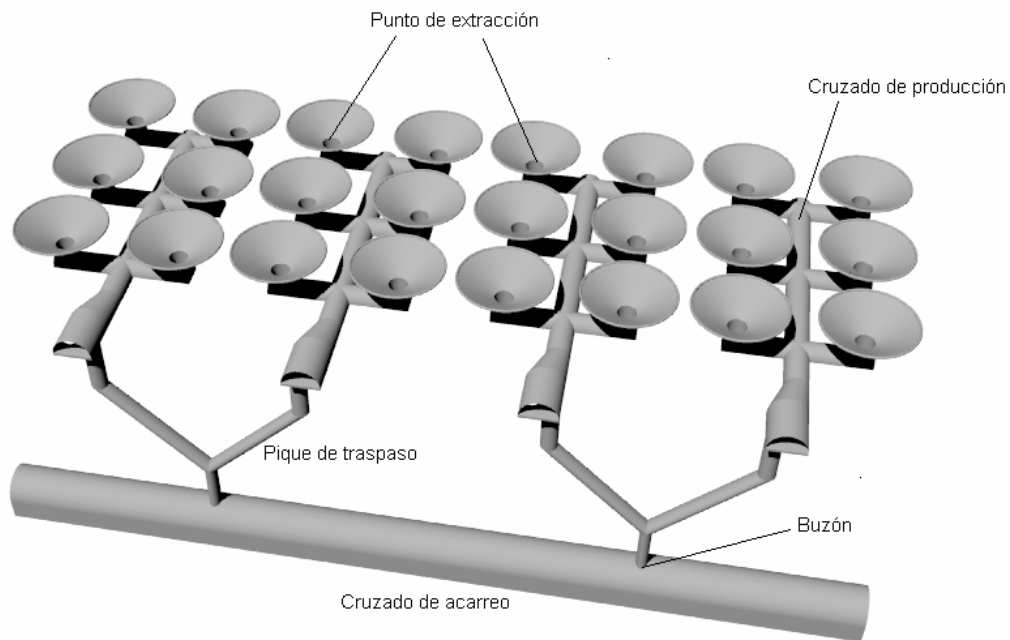


Figura 5-1. Relaciones de conectividad del modelo de simulación implementado.

Es preciso destacar que en el modelo de simulación existen las siguientes relaciones de conectividad:

- 8 cruizados de producción independientes uno del otro. Cada uno especificado por la distancia entre cada punto de extracción y el pique de traspaso respectivo de cada calle.
- 20 puntos de extracción por cada cruzado de producción, por lo que el sistema cuenta en total con 160 puntos de extracción.
- 1 pique de traspaso de material por cada cruzado de producción, por lo que el sistema completo cuenta con 8 piques de traspaso. Cada pique queda especificado por su capacidad de almacenamiento de mineral.
- 4 buzones, pues existe un buzón por cada dos piques de traspaso, conectados en forma de Y.
- 1 cruzado de acarreo, donde se encuentran los 4 buzones del sistema anteriormente mencionados, especificado por las distancias entre cada buzón y la salida del sistema. Eventualmente, se pueden desacoplar buzones de un cruzado específico y adaptar el modelo para simular la existencia de 2 cruizados de acarreo.

Cabe mencionar que para el caso en que se necesite simular el comportamiento del sistema minero con un número menor de componentes de infraestructura pueden bloquearse

convenientemente las redundantes, de manera de asemejar el modelo de simulación a las singularidades de la mina.

5.2 Entidades operativas

Las entidades operativas consideradas en el modelo de simulación, que se movilizan dentro la infraestructura antes mencionada son las siguientes:

- Mineral.
- Equipos LHD.
- Camiones.
- Cuadrillas de reducción secundaria.
- Cuadrillas de reparación de buzones.

Es preciso destacar ciertos aspectos que dicen relación a las cantidades y capacidades de las entidades operativas disponibles durante el funcionamiento del modelo, se especifica a continuación:

- El flujo entrante de mineral al sistema se realiza a través de los puntos de extracción. Éste debe ser tal que siempre exista material disponible para cargar en el punto, si es que no está detenido por algún evento de interferencia.
- Existe un equipo LHD por cada cruzado de producción, según lo especificado existen entonces un total de 8 equipos LHD. Cada unidad queda especificada por su velocidad, la capacidad de su balde y su cruzado correspondiente.
- El número de cuadrillas de reducción secundaria puede modificarse a voluntad, previo a ejecutarse la simulación, con el objetivo de estudiar su impacto en la productividad del sistema. Cada cuadrilla queda especificada por el tiempo unitario necesario para resolver tipos específicos de interferencias en el sistema a nivel de puntos de extracción y piques de traspaso.
- El número de cuadrillas de reparación de buzones puede modificarse a voluntad, previo a ejecutarse la simulación, con el objetivo de estudiar su impacto en la productividad del sistema. Cada cuadrilla queda especificada por el tiempo unitario necesario para resolver eventos de interferencias en el sistema a nivel de buzones.
- El número de camiones también puede modificarse a voluntad, previo a ejecutarse la simulación. Cada unidad queda especificada por su velocidad y la capacidad de su tolva.

5.3 Especificaciones de funcionamiento

Durante la ejecución de cada simulación, el estado de las componentes de infraestructura y entidades operativas se modifican constantemente de acuerdo a diversas condiciones impuestas por el usuario previo a la ejecución de la simulación, como pueden ser la probabilidad de ocurrencia de eventos de interferencia a nivel de puntos de extracción o el tiempo empleado por las cuadrillas de reducción secundaria en resolver problemas de sobretamaño. Cualquiera sean estas condiciones, son específicas del modelo de simulación utilizado y los resultados obtenidos están íntimamente ligados con éstas, por lo que en las siguientes secciones se procede a detallar de qué forma se comportan las diversas variables operativas conforme se ejecuta la simulación.

Puntos de extracción

Tiempo entre llegadas

A través de cada punto de extracción se realiza la entrada de una unidad de mineral en el sistema cada lapsos específicos (tiempo entre llegadas, para simulación de eventos discretos), que se detallan previo a la ejecución del experimento. Este tiempo puede ser constante o responder a una distribución de probabilidades, cualquiera sea la opción escogida, es preciso comprender que éste tiene directa relación con la productividad del sistema completo, pues nunca podrán salir del sistema un mayor número de unidades que las que alguna vez ingresaron. Por lo anterior, este tiempo entre llegadas debe ser tal que en un punto de extracción exista material para cargar cada vez que el equipo LHD acceda al punto, si es que este no está bloqueado por algún tipo de interferencia operacional. Con lo anterior puede asegurarse que la productividad total del sistema no se verá afectada por restricciones que dependen únicamente del tipo de simulación utilizado y no del funcionamiento propio del sistema modelado.

Una buena forma de asegurarse que el tiempo entre llegadas de unidades de material no interfiere con la productividad del sistema minero es analizar el ciclo productivo de la entidad a cargo de retirar el mineral desde los puntos de extracción, el LHD. Como el tiempo de ciclo del equipo de carguío varía con la distancia de cada punto de extracción y el pique de traspaso, si se especifica un tiempo entre llegadas de unidades de mineral menor o igual al mínimo tiempo del ciclo del equipo de carguío esperado, se asegura que cada vez que éste acceda a un punto de extracción operativo ya exista una unidad de mineral que éste pueda cargar.

Existe un aspecto puntual relacionado con lo expresado en el párrafo anterior que es la situación al inicio de la simulación, cuando aún no existen entidades de mineral en ningún punto de extracción. Podría darse la eventualidad que, dependiendo la posición inicial del equipo LHD, éste no deba gastar el tiempo de un ciclo completo en acceder al punto de extracción, con el resultado no deseado que el equipo deba esperar en el punto a la llegada del material, debido a que el tiempo entre llegadas ha sido especificado, en el peor caso, igual al tiempo del ciclo de carguío. Este problema puede solventarse al imponer dos condiciones al inicio de la simulación:

1. La posición inicial del equipo LHD no debe ser un punto de extracción. Puede especificarse por ejemplo, el pique de traspaso respectivo de cada calle.
2. La primera llegada de una unidad de mineral a cada punto de extracción debe producirse en tiempo cero, es decir debe existir material disponible para el carguío antes de que se ejecute cualquier otro evento en la simulación.

Eventos de interferencia

La ocurrencia de eventos de interferencia a nivel de puntos de extracción puede entenderse como aleatoria, con una cierta distribución de probabilidades. Este trabajo pretende incorporar esta situación mediante el análisis del comportamiento histórico de los eventos de interferencia, de manera de generar una distribución de probabilidades de ocurrencia de eventos específica para distintos sectores de la mina, para así estudiar cual es la productividad del sistema minero analizado.

El modelo de simulación puede incorporar la naturaleza aleatoria de esta variable de manera eficaz, sin embargo, es preciso condicionar el funcionamiento del sistema de manera tal que la unidad de medición de dicha frecuencia tenga relación con las toneladas extraídas desde cada punto mas que con el tiempo cronológico de operación de éste. En este sentido, resulta fundamental comprender como el modelo incorpora la posibilidad de que un punto de extracción específico falle con una probabilidad dada. Específicamente, las distribuciones incorporadas al modelo de simulación consideran los siguientes tipos de eventualidades a nivel de puntos de extracción:

- Colgaduras (puntuales, de baja altura).
- Sobretamaño.
- Barro.
- Llampo.

Cada vez que el equipo LHD retira una baldada de mineral desde un punto de extracción, puede cuantificarse su tonelaje asociado y dejar registro de cuantas toneladas se han extraído desde dicho punto, de manera acumulativa, desde la última vez que se registró un evento de interferencia en el mismo o desde el inicio del experimento de simulación, para el caso del primer incidente. Suponiendo conocida la distribución de probabilidades de ocurrencia de interferencias operacionales del punto específico, gatillado por el vaciado de la baldada en el pique de traspaso, se realiza el experimento de muestrear dicha distribución, que entregará, basado en la probabilidad de ocurrencia de acontecimientos de interferencia del punto desde el cual se extrajo la baldada, un valor de tonelaje entre eventos puntual. Si el tonelaje acumulado extraído por el punto de extracción específico es mayor o igual al tonelaje entregado por el muestreo de la distribución, entonces el punto falla, es decir, queda inhabilitado para que el equipo LHD pueda cargar material desde éste, hasta que el problema sea solucionado.

Naturalmente, si desde el punto de extracción no se está retirando material, existirá una acumulación de mineral, que en casos extremos puede causar un error en el modelo de simulación por limitaciones de memoria en el computador. Claramente en la realidad el sistema minero no se ve afectado por dicha interferencia, por lo que un buen modo de asegurarse que ésta no ocurrirá bajo ninguna circunstancia es limitar adecuadamente la cantidad de unidades que pueden acumularse en el sistema de la siguiente manera:

- Para cada punto de extracción, fijar un límite máximo de unidades minerales acumulables.
- Cada vez que el número de elementos en la cola de unidades materiales del punto de extracción sea superior al límite previamente fijado, por cualquier motivo, se debe cancelar la entrada de mineral por el punto de extracción respectivo.
- Sólo cuando el número de elementos en la cola de unidades materiales sea menor al límite fijado, el punto puede ingresar unidades minerales al sistema.

La siguiente figura muestra como se modelo lo expresado anteriormente respecto al ingreso de mineral al sistema:

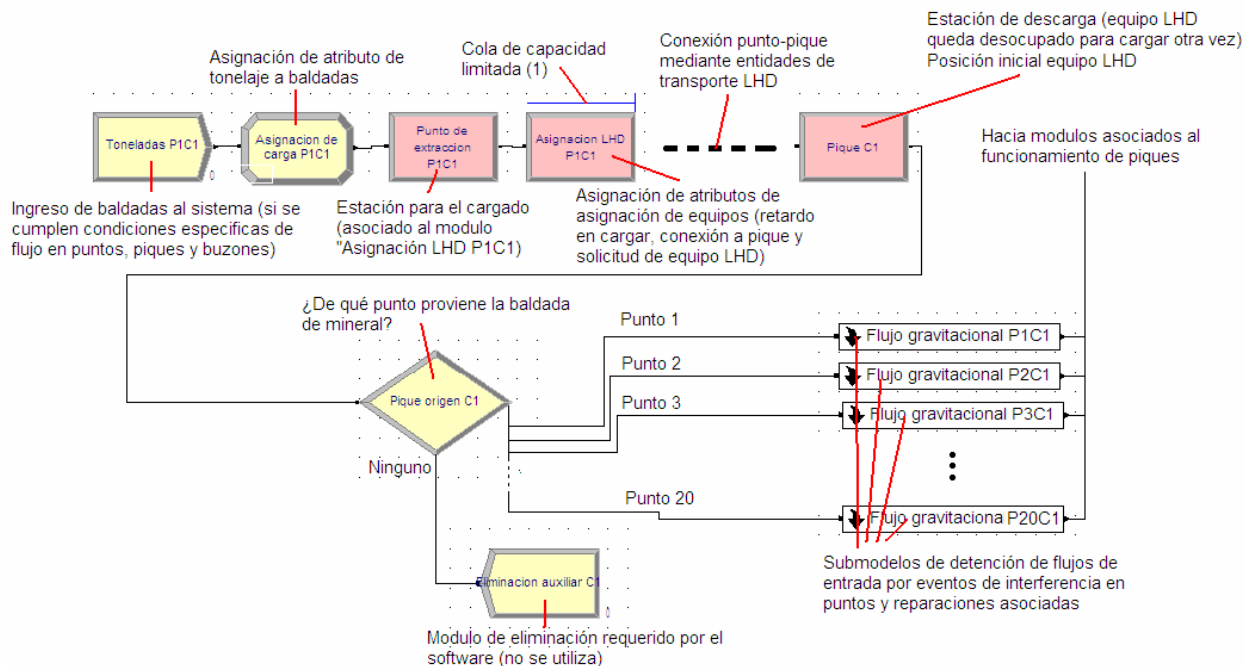


Figura 5-2. Modelamiento del ingreso de entidades al sistema y conexión entre puntos de extracción y piques de traspaso.

Equipo LHD

Los equipos LHD son especificados mediante la capacidad de su balde, en unidades volumétricas y su velocidad. Éstos son los encargados de retirar el mineral desde los puntos de extracción y vaciarlo en los piques de traspaso respectivo, para que éste siga su camino a través del sistema minero. Su funcionamiento es modelado considerando los siguientes aspectos:

- Sólo puede transitar un equipo LHD a la vez por cada cruzado de producción.
- Cada unidad puede trabajar en un único cruzado de producción específico.
- No se consideran fallas mecánicas de éstos. Lo anterior se debe a que el impacto generado por este tipo de interferencias queda fuera de los alcances de éste estudio.
- Asignación de puntos de extracción uniforme, es decir, el LHD no debe privilegiar ningún punto de extracción disponible por sobre otro.

Debido a que el LHD transita por un cruzado de producción que puede ser comprendido como un sistema redundante en que existe más de un punto de extracción desde donde se puede extraer material. Resulta fundamental considerar una estrategia que no privilegie ningún punto sobre otro, al momento de realizar la extracción. Considerando además que el estado de los puntos puede cambiar a lo largo del experimento de simulación entre disponible para cargar y no disponible para cargar (cuando se ve afectado por algún evento operacional), resulta fundamental incorporar en el algoritmo de asignación de puntos el hecho que el equipo LHD sólo puede cargar material desde los puntos disponibles. Para solventar lo expresado anteriormente, se le asigna a cada unidad material, al momento de ser creada por el sistema, un valor de prioridad para el carguío obtenido de una distribución de probabilidades uniforme, una vez ocurrido esto, la entidad material solicita al equipo de carguío para su extracción. Cada vez que el LHD tenga que decidir desde que punto extraer material, tomará en cuenta las prioridades de cada unidad material, debido al modo de asignación de prioridades, ningún punto de extracción tendrá siempre prioridad sobre otro, con lo que se obtiene el resultado deseado.

Debe considerarse además que los puntos de extracción fallados son incapacitados de crear unidades de mineral, por lo que el LHD no accederá a éstos debido a que ninguna entidad de mineral lo ha solicitado.

Anteriormente, se habló sobre fijar un límite en la capacidad de la cola de unidades materiales del punto de extracción. Este límite tiene directa relación con el algoritmo de asignación del carguío del LHD pues puede ocurrir el evento no deseado que por ejemplo, en un punto de extracción específico exista un número en cola de unidades de mineral $n > 1$ y que el punto aún este disponible para el carguío, el equipo LHD puede retirar una unidad mineral desde este punto y gatillar la interrupción de éste, por lo que el punto cesaría su ingreso de unidades en el sistema, sin embargo podrían quedar elementos en la cola que si están disponibles para el carguío pues ya tienen asignada una prioridad y han solicitado al equipo LHD, lo que luego de su eventual extracción, causaría el hecho que desde un punto en estado no disponible, se esté retirando material. Una buena manera de evitar esta eventualidad es entonces limitar el número de elementos en cola del punto de extracción a 1. De esta forma, en la eventualidad que el punto falle, ya no existirán unidades que soliciten al equipo LHD y si el tiempo entre llegadas de éstas es debidamente especificado, siempre habrá material disponible para el carguío si es que el punto está disponible.

Ciclo de carguío

En el modelo de simulación utilizado, el ciclo de carguío fue construido considerando los siguientes aspectos:

- La velocidad del equipo LHD es constante e igual en los casos en que el equipo transite cargado o descargado.
- La distancia de transporte se especifica entre cada punto y el pique de traspaso.
- El equipo demora un tiempo dado por una distribución de probabilidades (o como una constante, si se quiere), especificada por el usuario, en realizar el carguío de mineral.
- El equipo demora un tiempo dado por una distribución de probabilidades (o como una constante, si se quiere), especificada por el usuario, en realizar la descarga de mineral de mineral en el pique de traspaso.
- Cualquier tiempo de maniobras extra puede incorporarse como una demora adicional en el tiempo de cargado o descarga, que puede ser una distribución de probabilidades o una constante.

Mineral

La unidad básica de mineral en el sistema es una baldada de LHD, que posee los siguientes atributos:

- Tonelaje: calculado como el producto de la densidad del material a cargar por la capacidad del balde del LHD por el factor de llenado del balde (que puede especificarse como una distribución de probabilidades o como una constante).
- Prioridad para el carguío. Asignado aleatoriamente según una distribución de probabilidades uniforme para evitar distorsiones en la asignación del carguío del equipo LHD.
- Origen: especifica el punto de extracción desde donde se extrajo la unidad mineral. Su finalidad es corroborar que ningún punto de extracción esté siendo sistemáticamente preferido para el carguío.

Piques de traspaso

La función del pique de traspaso es recibir el material proveniente de los puntos de extracción, que ha sido previamente transportado por el equipo LHD y transportarlo gravitacionalmente hasta el nivel de acarreo, situado más abajo. Esta componente de infraestructura queda definida por: su capacidad de almacenamiento, sus relaciones de conectividad con otras partes del sistema minero y su tasa de ocurrencia de eventos de interferencia.

Debido a la configuración del sistema de manejo de materiales del Tercer Panel LHD de la División Andina, los piques de traspaso de dos cruzados de producción diferentes convergen en un buzón en el nivel de acarreo, como lo muestra la siguiente figura esquemática:

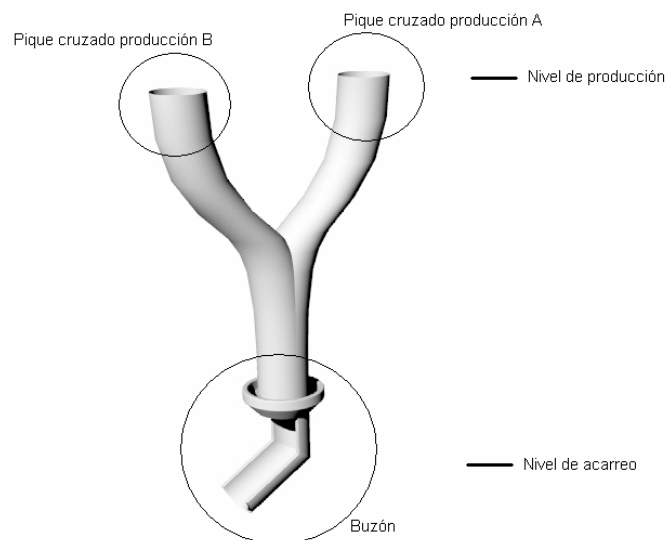


Figura 5-3. Estructura conceptual del pique de traspaso.

Así, las relaciones de conectividad del pique de traspaso quedan determinadas: cada buzón del nivel de acarreo es alimentado por 2 piques de traspaso, cada uno de ellos asociado a un cruzado de producción diferente.

La capacidad de almacenamiento del pique completo debe ser incorporada de manera tal que la eventualidad de piques llenos en una calle de producción no afecte a la otra, pues ambas ramas del pique son independientes hasta el punto donde convergen. Para solventar lo anterior, la capacidad global de almacenamiento del pique debe especificarse por sectores, esto es:

- Capacidad de las ramas: cabida de mineral desde la boca del pique en uno de los cruzados de producción hasta el punto de convergencia de ambas ramas.

- Capacidad del troncal: cabida de mineral desde el punto de convergencia de ambas ramas hasta el buzón.

Eventos de interferencia

Cualquier tipo de eventos de interferencia a nivel de piques de traspaso distinto al caso de piques llenos, y dejando fuera por ahora el buzón respectivo, puede entenderse como aleatoria con una cierta distribución de probabilidades. Nuevamente, al igual que el caso de los puntos de extracción, la frecuencia de ocurrencia de eventos depende del tonelaje movilizado a través del pique y no del tiempo cronológico de operación de éste.

La forma de incorporar los eventos de interferencia del pique de traspaso es muy similar al de los puntos de extracción: cada vez que un camión retira mineral desde un buzón, se supone que el flujo de salida del buzón es el flujo de mineral a través del pique (conservación de masa), puede cuantificarse su tonelaje asociado y dejar registro de cuantas toneladas han pasado por el pique respectivo, de manera acumulativa, desde la última vez que se registro una evento de interferencia en el mismo o desde el inicio del experimento de simulación, para el caso del primer incidente. Suponiendo conocida la distribución de probabilidades de ocurrencia de interferencias operacionales del pique específico, cada vez que se retira material desde el buzón, se muestrea dicha distribución, y se obtiene como resultado, un valor de tonelaje entre eventos puntual (eventualmente puede restringirse el sistema para que este valor sea constante). Si el tonelaje acumulado extraído por el pique específico es mayor o igual al tonelaje entregado por el muestreo de la distribución, entonces el pique falla, es decir, el flujo de material a través de éste se interrumpe, dejando el buzón respectivo imposibilitado de cargar cualquier camión, además de detener las calles de producción asociadas, debido a que el pique debe repararse.

La eventualidad de piques llenos depende del funcionamiento del sistema minero simulado. En cualquier momento en que la tasa de entrada de material al pique se mayor que la de salida, lo que puede deberse por ejemplo a reparaciones en otro pique del mismo cruzado de acarreo, el pique comenzará a llenarse. Una vez lleno el troncal del pique, alimentado por dos calles de producción, comenzarán a llenarse las ramas, de manera independiente. Eventualmente, puede coparse la capacidad de almacenamiento de éstas con el resultado que el equipo LHD no tenga donde vaciar el mineral y la necesidad de cerrar la calle de producción (operacionalmente, el LHD podría vaciar el mineral de ese cruzado de producción en piques cercanos, pero este hecho no es considerado en el modelo de simulación). Obviamente, en ningún momento el

pique o el buzón han dejado de funcionar por interferencias operacionales que requieran reparación, por lo que cuando un camión acceda nuevamente a cargar mineral desde el buzón en cuestión, el mineral extraído generará espacio en las ramas del pique de traspaso, reactivando la operación en los cruzados de producción.

Cuadrillas de reducción secundaria

Las cuadrillas de reducción secundaria son las encargadas de solucionar los eventos de interferencia operacionales consideradas a nivel de puntos de extracción y piques de traspaso, es decir su misión es modificar el estado de dichas componentes de infraestructura desde no disponible a disponible.

Su operación está restringida principalmente a que no pueden acceder a puntos o piques detenidos si es que el LHD del cruzado de producción respectivo esta operativo, por lo que resulta preciso detallar las estrategias consideradas para el cierre de calles, de modo que la cuadrilla pueda operar adecuadamente.

Reparación de puntos de extracción

Debido a que el sistema minero, a nivel de puntos de extracción es redundante, resulta necesario definir una estrategia que indique el número de puntos detenidos por cruzados de producción para tomar la decisión de su cierre. El impacto de éste número crítico de puntos de extracción detenidos en la productividad del sistema pretende ser analizado con el modelo de simulación.

Cada vez que un punto de extracción es afectado por una interferencia operativa, incrementa en uno una variable acumulativa que especifica el número de puntos fallados del cruzado de producción específico. Los puntos detenidos permanecen en estado stand by hasta que un evento de interferencia de un nuevo punto genera que esta variable acumulativa sobrepase el número crítico de puntos fallados para tomar la decisión del cierre del cruzado completo. En este momento el equipo LHD se detiene y se permite el acceso de la cuadrilla, que tomará un tiempo determinado en resolver los problemas de cada punto. La cuadrilla no se retira del cruzado de producción hasta que todos los puntos de extracción estén nuevamente disponibles para cargar.

La siguiente figura muestra aquella parte del modelo de simulación implementado que permite realizar la reparación de puntos de extracción antes explicada, a modo de ejemplo, para un punto de extracción arbitrario (los demás son análogos):

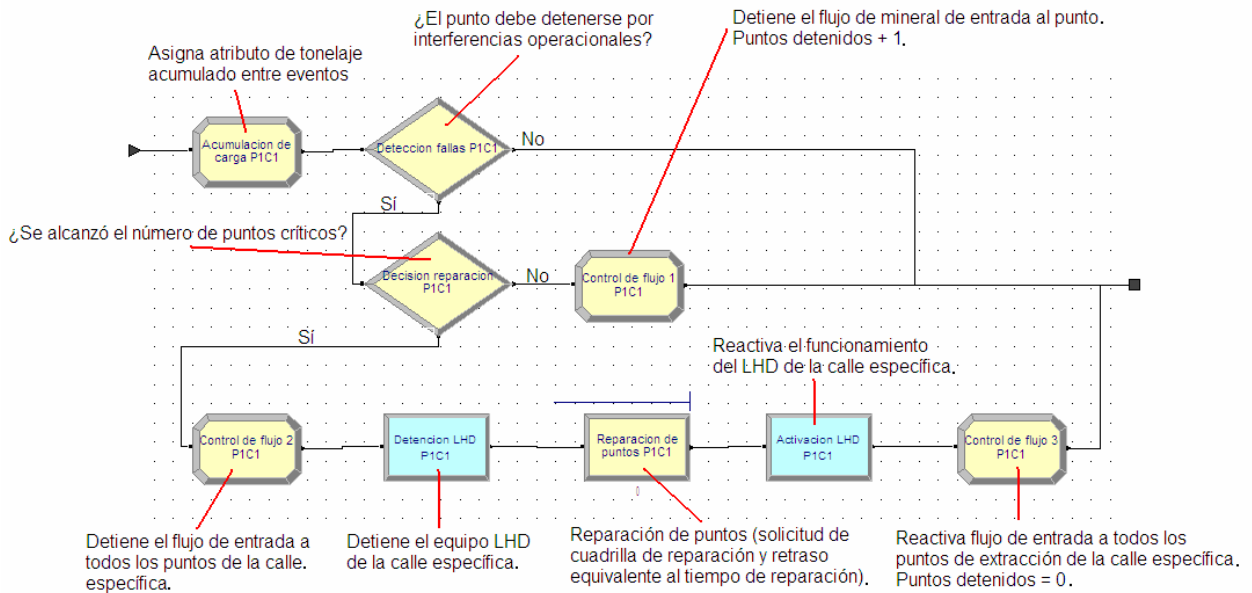


Figura 5-4. Modelamiento de ocurrencia de eventos de interferencia y reparación de puntos de extracción.

Reparación de piques de traspaso

Otro evento que gatilla la detención de los cruzados de producción son las interferencias a nivel de piques de traspaso. Pueden distinguirse dos tipos de eventualidades operativas en este aspecto:

- Pique lleno: no se debe a ninguna falla de la infraestructura minera, sólo a que la capacidad de almacenamiento de mineral del pique ha sido alcanzada, por lo que no produce la intervención de las cuadrillas de reducción secundaria.
- Eventos de interferencia del pique: como eventuales colgadas o enlampamientos, por ejemplo, que si requieren la acción de una cuadrilla de reducción secundaria para su reparación.

Pueden especificarse cualquier número de cuadrillas de reducción secundaria y estudiar como este número afecta en la producción total del cruzado de acarreo. Sin embargo, las cuadrillas

son idénticas entre sí, es decir el tiempo que demoran en resolver los distintos problemas, son similares. Otro aspecto relevante relativo a la reparación de eventualidades operativas es el hecho que, debido a que las cuadrillas de reducción secundaria deben solventar los problemas a nivel de puntos de extracción y piques de traspaso, los segundos siempre tienen prioridad por sobre los primeros, en el caso que la cuadrilla esté desocupada y deba decidir que evento resolver.

Un aspecto relevante relativo a la incorporación de eventos de interrupción operacional a nivel de piques de traspaso es que el modelo de simulación supone que las interferencias operativas de éstos se producen en las ramas. Por lo que para su reparación, ha de detenerse el cruzado de producción asociado a la rama específica.

Las siguientes figuras muestran como se modeló el funcionamiento del pique de traspaso y la ocurrencia y reparación de interferencias operacionales:

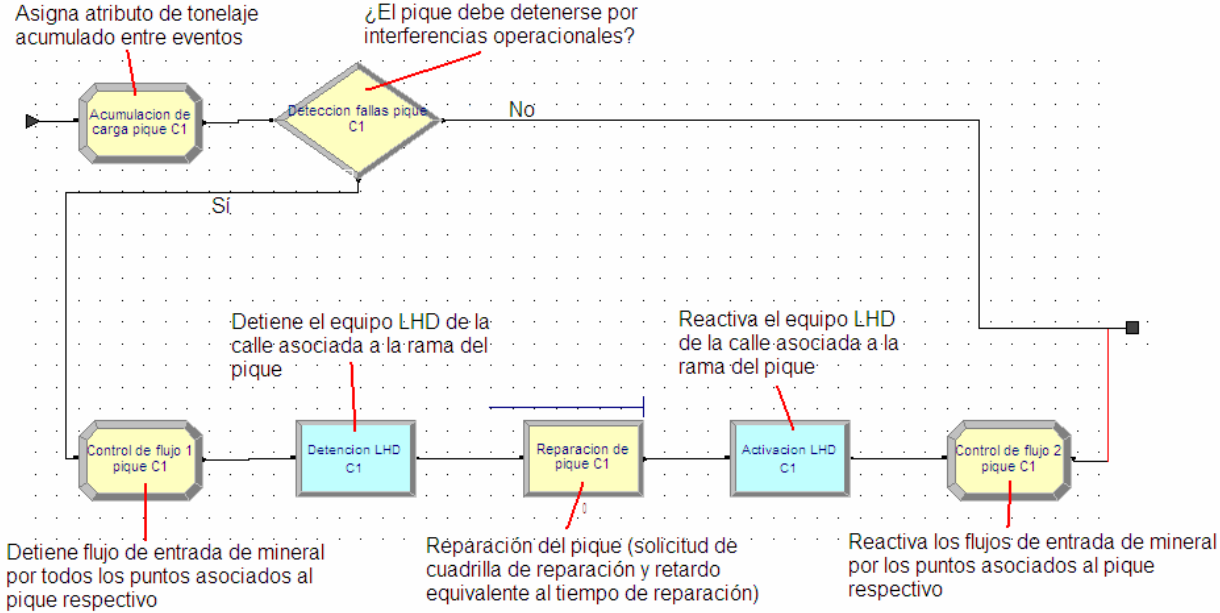


Figura 5-5. Modelamiento de la ocurrencia de eventos y reparación de piques de traspaso.

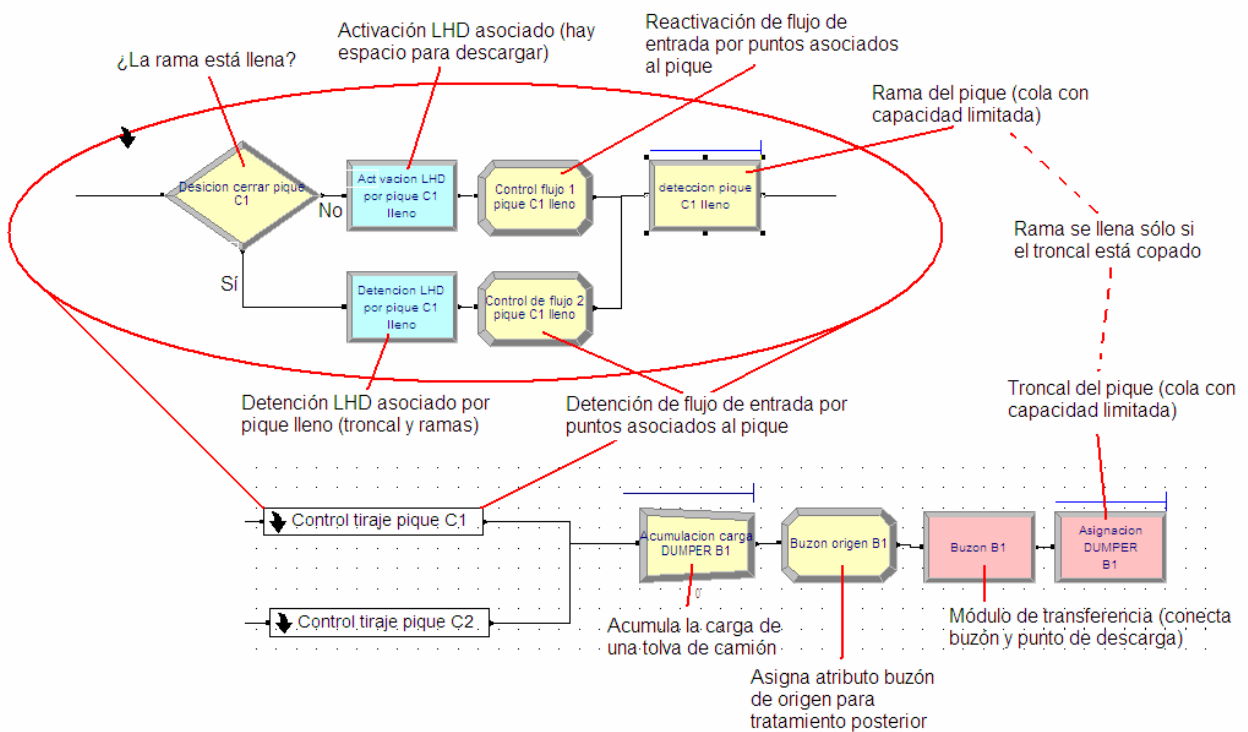


Figura 5-6. Modelamiento de interrupción de flujos por piques llenos.

Camiones

Los camiones del sistema de acarreo quedan determinados por la capacidad de su tolva, en toneladas y su velocidad de movilización. Estos son los encargados de retirar el mineral desde los buzones y movilizarlo a través del cruzado de acarreo, para descargarlo en estaciones de chancado. Su funcionamiento es modelado considerando los siguientes aspectos:

- Sólo puede existir un camión cargando a la vez en cada cruzado de acarreo.
- Un buzón puede cargar un camión a la vez.
- Un camión se carga completamente en un buzón cada vez que accede a éste.
- No se consideran fallas mecánicas de éstos. Lo anterior se debe a que el impacto generado por este tipo de interferencias queda fuera de los alcances de este trabajo.
- Asignación de buzones es uniforme, es decir, el camión no debe privilegiar ningún buzón disponible por sobre otro.

Ciclo de transporte

En el modelo de simulación utilizado, el ciclo de transporte fue construido considerando los siguientes aspectos:

- La velocidad del camión es constante e igual en los casos en que el equipo transite cargado o descargado.
- La distancia de transporte se especifica entre cada buzón y el punto de descarga (chancado).
- El equipo demora un tiempo dado por una distribución de probabilidades (o como una constante, si se quiere), especificada por el usuario, en ser cargado de mineral en un buzón.
- El equipo demora un tiempo dado por una distribución de probabilidades (o como una constante, si se quiere), especificada por el usuario, en realizar la descarga de mineral de mineral en la estación de chancado
- Cualquier tiempo de maniobras extra puede incorporarse como una demora adicional en el tiempo de cargado o descarga, que puede ser una distribución de probabilidades o una constante.

Buzones

Los buzones regulan el flujo de salida de mineral de los piques de traspaso. Son equipos mecánicos compuestos de numerosas componentes y por ende sujetos fallas debido a su funcionamiento. Como cualquier componente mecánica está sujeta a dos tipos de detenciones: programadas y no programadas. Las primeras se producen por la necesidad de realizar mantenencias preventivas en los equipos, de manera de asegurar dentro de cierto rango una disponibilidad para el mismo, sin que necesariamente se haya registrado alguna falla. Este tipo de detenciones no se incorporan dentro del modelo de simulación, debido a que no afectan en la producción planificada.

Por su parte, las detenciones no programadas se deben a la necesidad imperativa de detener el equipo debido a que éste se ha averiado y resulta imposible seguir operándolo. Debido a que este tipo de interrupciones son de carácter aleatorio afectan directamente en el cumplimiento de la producción planificada debido a que una eventual falla se traduce en tiempos no operativos que se supusieron operativos al momento de planificar.

El modelo de simulación considera las detenciones no planificadas de los buzones de manera similar a las detenciones a nivel de piques de traspaso, es decir, cada vez que un camión retira mineral desde un buzón, puede cuantificarse su tonelaje asociado y dejar registro de cuantas toneladas se han extraído desde éste, de manera acumulativa, desde la última vez que se registro una evento de interferencia en el mismo o desde el inicio del experimento de

simulación, para el caso del primer incidente. Suponiendo conocida la distribución de probabilidades de ocurrencia de interferencias operacionales del buzón específico, cada vez que se retira material desde el buzón, se muestrea dicha distribución, y se obtiene como resultado, un valor de tonelaje entre eventos puntual (puede ajustarse el modelo de manera que este valor sea constante). Si el tonelaje acumulado extraído por el buzón específico es mayor o igual al tonelaje entregado por el muestreo de la distribución, entonces éste falla, es decir, el flujo de material a través del buzón se interrumpe quedando imposibilitado de cargar cualquier camión, además de detener las calles de producción asociadas, debido a que el equipo debe repararse.

Reparación de buzones

En la División Andina, la reparación de buzones está a cargo de cuadrillas especializadas, distintas de las cuadrillas de reducción secundaria.

Cada vez que un buzón falla, el aporte de mineral a los piques desde los cruzados de producción cesa, pero el flujo de camiones continúa con el objetivo de vaciar los piques para la reparación de los buzones. Una vez vacíos, el cruzado de acarreo se cierra, interrumpiendo el flujo de camiones a través de éste para dar cabida al ingreso de las cuadrillas de reparación de buzones, que tardarán el tiempo especificado en resolver las eventualidades para luego retirarse y reestablecer el flujo de camiones y la producción en las calles respectivas.

La siguiente figura muestra como se modelo la ocurrencia de eventos de interferencia en buzones y su reparación, además del vaciado del pique asociado:

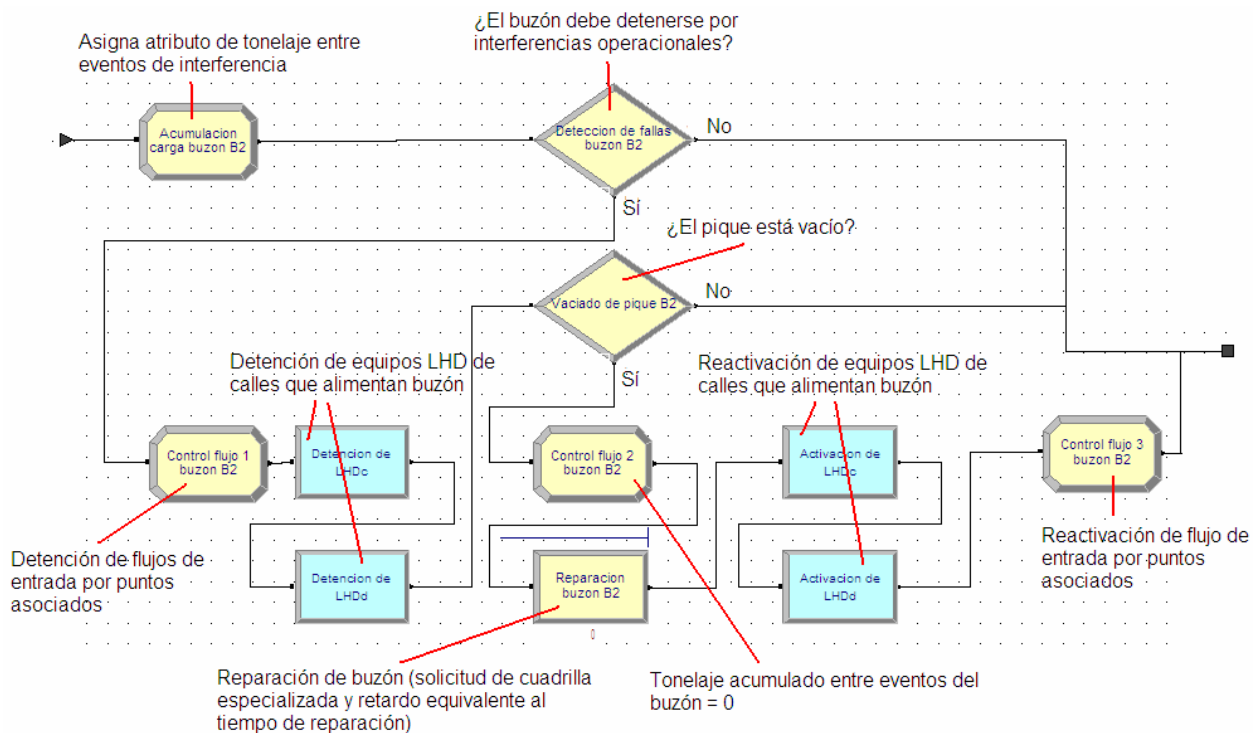


Figura 5-7. Modelamiento de la ocurrencia de interferencias y reparación de buzones.

Finalmente, cuando se han conectado todos los módulos de las diferentes componentes de infraestructura modeladas el modelo de simulación completo se observa de la siguiente manera:



Figura 5-8. Vista general del modelo de simulación completo.

5.4 Parámetros del modelo

Parámetros generales

El intervalo de tiempo simulado y el número de replicaciones realizadas tienen directa implicancia en la exactitud de los resultados obtenidos. En relación a lo anterior, la siguiente tabla resume los valores de estos parámetros, que permanecerán constantes para todos los experimentos realizados:

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Lapso simulado	meses	6
Replicaciones	#	10
Error promedio esperado	%	2.5
Varianza error	%	1.5

Tabla 5-1. Parámetros generales de los experimentos de simulación.

En el capítulo de validación del modelo de simulación puede observarse la evolución del error promedio esperado y el tiempo de simulación conforme varía el lapso simulado, desde donde se obtienen los parámetros presentados en la tabla anterior.

Parámetros constantes entre experimentos

En el modelo de simulación implementado existen variables relacionadas con el funcionamiento del sistema minero cuyo valor permanece constante durante la ejecución de un experimento dado y que además se consideraron invariantes para todos los experimentos realizados, debido a que no resulta de interés para este estudio analizar su impacto sobre la productividad del sistema minero o bien sus valores son relativamente constantes en cada caso analizado. Estas variables se enuncian y especifican a continuación:

COMPONENTE	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
LHD	Número de equipos	#	8 (1 por calle)
	Capacidad balde	m ³	5.35
	Velocidad	Km/h	25
	Retardo en cargar	s	TRIANGULAR(30,40,60)
	Retardo en vaciar	s	TRIANGULAR(5,10,18)
Camión	Número de equipos	#	20 ³
	Capacidad tolva	t	50
	Velocidad	Km/h	30
	Retardo en cargar	s	TRIANGULAR(40,60,80)
	Retardo en vaciar	s	TRIANGULAR(30,40,50)
Piques de traspaso	Capacidad del troncal	t	260
	Capacidad de la rama	t	955
Cuadrillas de reducción secundaria	Tiempo perforación y actividades asociadas	min/punto	30
	Tiempo de ventilación	min	30
	Tiempo de reparación piques	turnos	3
Cuadrillas de reparación de buzones	Número	#	2
	Tiempo de reparación de buzones	turnos	2
Cruzados de producción (calles)	Número de puntos de extracción	#/calle	16
	Número de cruzados de producción	#	8
Cruzados de acarreo	Número de cruzados de acarreo	#	2
	Número de buzones por cruzado	#	2
	Número crítico de buzones detenidos	#	1

Tabla 5-2. Parámetros fijos utilizados en los experimentos de simulación.

³ El número de camiones utilizado en los experimentos es superior al existente en la mina en estudio (10 para el periodo 2005) debido a que se desea analizar el impacto en la productividad de las interferencias operacionales asociadas a los componentes de infraestructura del sistema, no de los equipos de producción asociados.

Las distancias de transporte de los camiones y equipos LHD se especifican a continuación, mediante las siguientes figuras:

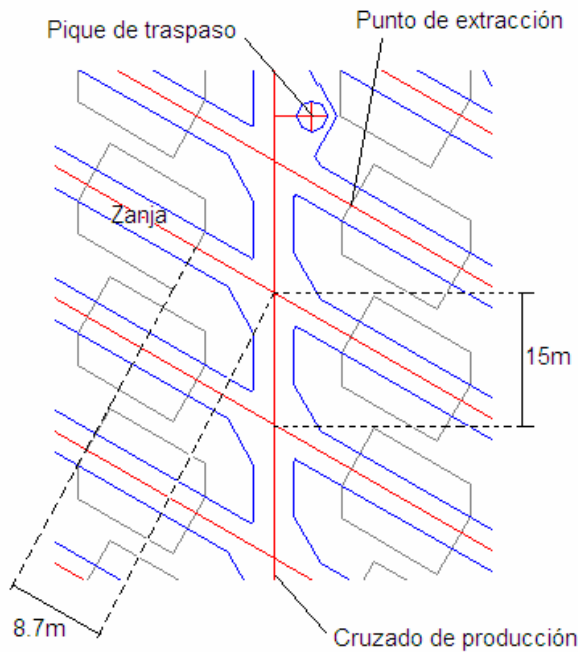


Figura 5-9. Distancias relacionadas al ciclo del equipo LHD.

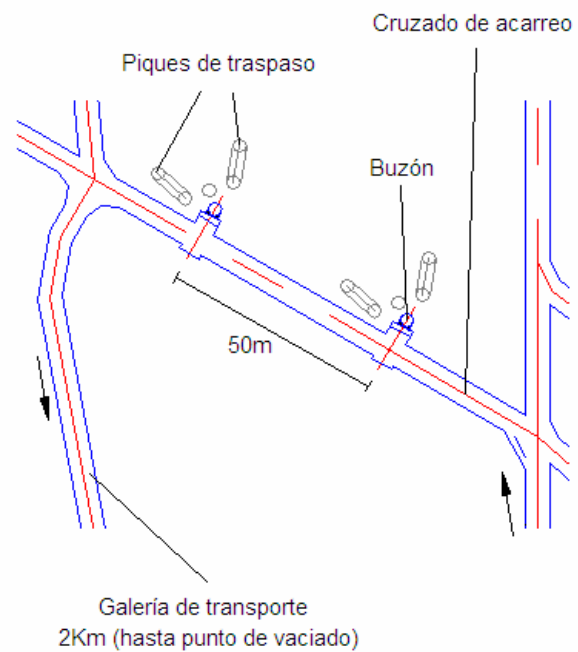


Figura 5-10. Distancias relacionadas al ciclo de camiones.

Parámetros variables entre simulaciones

Las variables de entrada al modelo de simulación que varían de un experimento a otro, con el fin de analizar su impacto en la productividad del sistema minero, se enuncian a continuación:

- Frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia (como distribución de probabilidades de TEE por sectores identificados).
- Número de puntos críticos para detener un cruzado de producción para iniciar las labores de trabadura secundaria.
- Número de cuadrillas de reducción secundaria.
- Tasa de ocurrencia de eventos de interferencia en piques de traspaso y buzones.

Las anteriores serán analizadas mediante la ejecución de variadas simulaciones, en que se estudiará la productividad de diversas combinaciones entre éstas.

5.5 Validación del modelo de simulación

Con el objetivo de validar el modelo de simulación, es decir, ajustar las variables del sistema para que sus resultados sean similares a los obtenidos en la realidad se procederá de la siguiente manera:

- Buscar en la base de datos de extracción histórica de la mina un cruzado de acarreo con información suficiente para obtener la productividad del sector. Lo anterior se refiere a que exista un número de puntos de extracción adecuado, para no subestimar las capacidades productivas.
- Adaptar consecuentemente el modelo de simulación para que su infraestructura considerada sea similar a aquélla desde donde se obtiene la información para la validación.
- Realizar varias corridas en el modelo de simulación ajustando las variables del sistema con el fin de obtener resultados similares a los obtenidos del análisis de la información histórica.

Adicionalmente a lo mencionado, es preciso detallar que el periodo utilizado para validar debe tener como mínimo un año de extensión y ser posterior al año 2004. Esto último debido a que la información del tonelaje entre eventos utilizada para sectorizar el nivel de producción se encuentra en este periodo.

Información histórica

El periodo utilizado para validar el sistema corresponde a la producción extraída desde el 1 de enero de 2005 hasta el 31 de diciembre del mismo año. Debido a que no se cuenta con la productividad a nivel de buzón, esta será inferida a través de la productividad de los puntos de extracción, asumiendo que la productividad conjunta de los puntos de extracción que alimentan a un determinado buzón, corresponde a la productividad de éste.

La metodología anterior puede no ser exacta puesto que el sistema minero cuenta con capacidad de almacenamiento en los piques de traspaso, por lo que en el intervalo temporal analizado puede ocurrir que lo que entra en un pique no sea igual a lo que salga, sin embargo esta capacidad se estima en el orden de 2000 toneladas (por la configuración en Y de los piques asociados a un buzón, una separación de 51m entre el nivel de producción y el de

transporte y un diámetro de pique de 4m), que resulta ser menos de un 1.25% de la producción mensual estimada de un buzón (0.25% del total anual).

Otra posible fuente de error es el hecho que el control de producción asigna un valor de 8.5 toneladas por baldada de material extraída, lo que en comparación a la realidad puede no ser exacto, debido a que el factor de llenado del balde del equipo LHD varía con cada extracción. Sin embargo se asume que esta fuente de error es mínima y que en promedio debería acercarse al valor real.

Por último, y quizás más importante es el hecho que la información de la extracción a nivel de puntos se encuentra ajustada por un balance metalúrgico realizado en la planta de procesamiento de minerales. Debido a que no se cuenta con la información sin este ajuste, resulta imposible cuantificar las posibles diferencias.

No obstante lo anterior, en las siguientes tablas se resume la información utilizada para la validación:

INFRAESTRUCTURA	
Número de cruzados de acarreo	1
Número de buzones por cruzado de acarreo	2
Número de calles por cruzado de acarreo	4
Número de puntos de extracción por calle	13

Tabla 5-3. Infraestructura considerada para la validación.

PRODUCTIVIDAD		
Parámetro	Unidad	Valor
Número de registros en DPT (asociados a buzón 1)	#	228
Número de registros en DPT (asociados a buzón 2)	#	312
Ubicación cruzados de producción	-	SECTOR C
Tonelaje mensual promedio calle 1 (buzón 1)	Kt	31
Tonelaje mensual promedio calle 2 (buzón 1)	Kt	39
Tonelaje mensual promedio calle 3 (buzón 2)	Kt	32
Tonelaje mensual promedio calle 4 (buzón 2)	Kt	28
Tonelaje mensual promedio buzón 1	Kt	71
Tonelaje mensual promedio buzón 2	Kt	60
Tonelaje promedio mensual cruzado de acarreo	Kt	131

Tabla 5-4. Productividad histórica utilizada para la validación.

DUBDIVISIÓN TEMPORAL	
Turnos por día	3
Horas nominales por turno	8
Horas efectivas por turno	5

Tabla 5-5. Subdivisión temporal considerada para la validación.

Variables de ajuste

Las variables a manipular del modelo de simulación para su ajuste son las siguientes:

- Número crítico de puntos de extracción detenidos para cerrar calle.
- Número crítico de buzones detenidos para cerrar cruzado.
- Tonelaje entre eventos de interferencia en piques.
- Tonelaje entre eventos de interferencia en buzones.

La siguiente gráfica muestra, para una combinación de las variables anteriores específica (mostrada al final de este capítulo), la evolución de la productividad mensual entregada por el modelo de simulación:

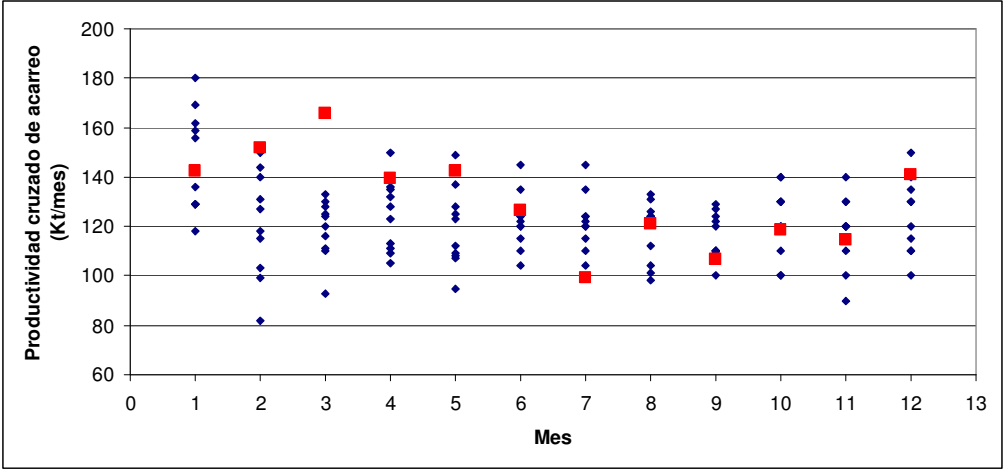


Gráfico 5-1. Evolución de la productividad del cruzado de acarreo (simulación).

Para construir la gráfica anterior se realizaron 10 replicaciones de 1 año de duración cada una en el modelo de simulación y luego se identificó la productividad del cruzado de acarreo obtenida para cada mes (los primeros 30 días corresponden a enero, los siguientes a febrero y así sucesivamente). Los puntos azules corresponden a una replicación específica, los puntos rojos corresponden a la productividad observada en el periodo 2005 en un cruzado de acarreo específico de la mina (el mismo mostrado en el capítulo de introducción).

Puede observarse que para casi todos los meses existe al menos una replicación que logra reproducir la productividad real obtenida. El siguiente gráfico muestra la dispersión existente entre la productividad real y la replicación que mejor se ajusta a ésta:

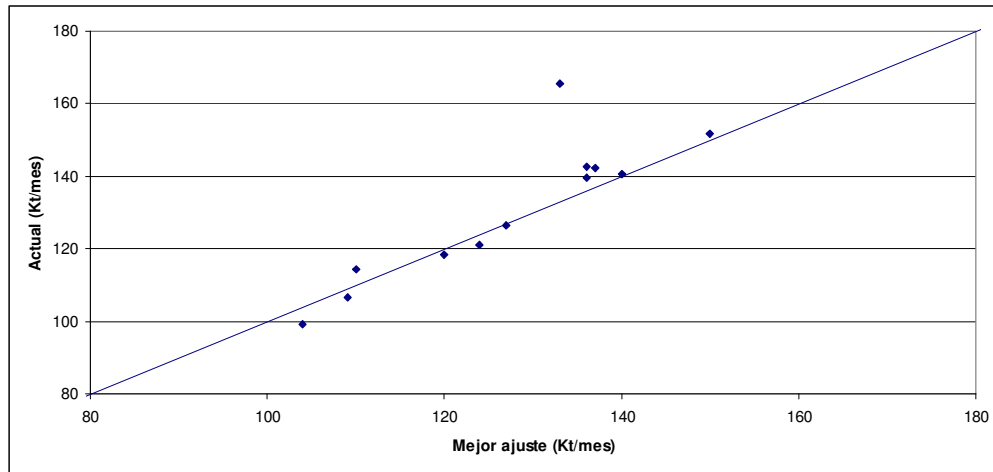


Gráfico 5-2. Dispersión entre el tonelaje real obtenido y el mejor ajuste del modelo de simulación.

La siguiente expresión mide las diferencias entre la identidad y las observaciones, por lo que permite cuantificar de manera acertada la calidad del ajuste:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{n-2}} = 10992 \text{ Kt / mes}$$

Donde:

n : número de puntos.

X_i : tonelaje observado mes i .

\hat{X}_i : tonelaje simulado mes i .

El valor de s anterior corresponde a un 8% de la productividad mensual promedio actual obtenida en periodo 2005.

La siguiente gráfica muestra la dispersión existente entre el tonelaje planificado y el tonelaje actual obtenido (2005) para el cruzado de acarreo en cuestión:

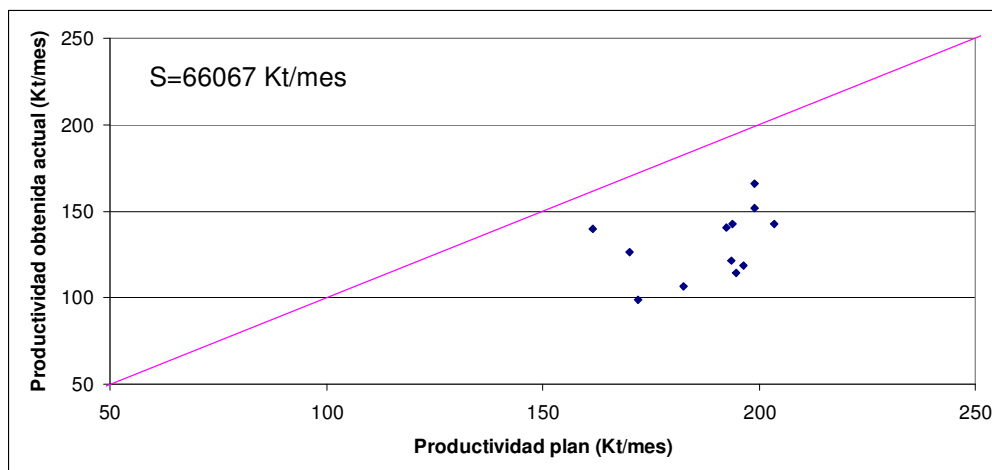


Gráfico 5-3. Dispersión de tonelajes plan-actual (2005).

Puede observarse que claramente la productividad requerida por el plan sobreestima las capacidades reales de la mina pues todos los puntos se encuentran bajo la identidad ($s=51\%$ de la productividad mensual actual promedio obtenida). El siguiente gráfico muestra la dispersión entre el tonelaje actual (2005) y el promedio de replicaciones del modelo de simulación:

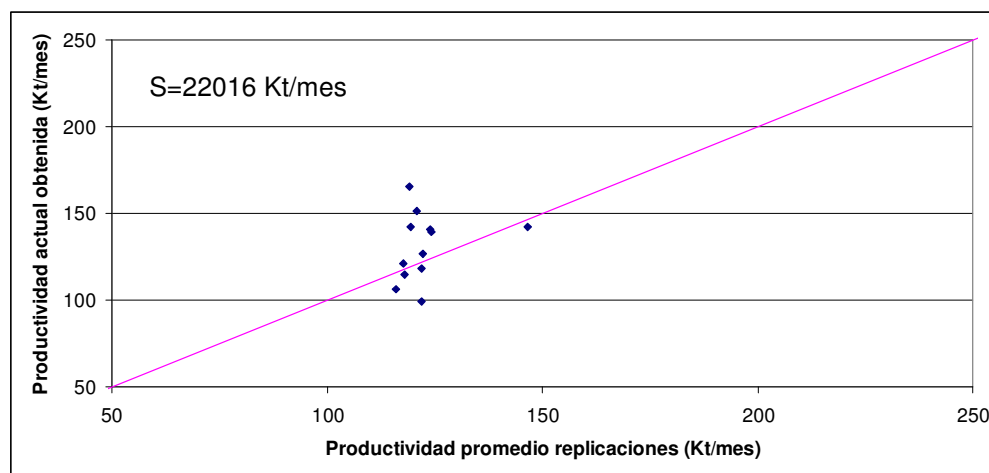


Gráfico 5-4. Dispersión de tonelajes actual (2005)-resultados modelo de simulación (promedio replicaciones).

Puede observarse que el ajuste del promedio de las replicaciones, apunta de mejor manera las productividades obtenidas a nivel mina al ser el valor de s menor que en el caso plan-actual ($s=17\%$ de la productividad mensual promedio actual obtenida). Sin embargo, debe considerarse que la simulación considera una estrategia de reparación fija en todo el periodo, lo

que no necesariamente ocurre en la realidad, por lo que el ajuste para otro cruzado de acarreo u otras estrategias podría resultar diferente.

Convergencia y tiempos de simulación

Debido a la naturaleza aleatoria de las variables de entrada al modelo de simulación implementado (simulación computacional estocástica de eventos discretos), los resultados obtenidos poseen también esta característica, es decir, si se realiza un mismo experimento múltiples veces, los resultados obtenidos cada vez serán diferentes.

Normalmente, a medida que se aumenta el lapso simulado, la variabilidad asociada a las variables de salida es cada vez menor, sin embargo, esta es una característica propia de cada modelo de simulación y debe ser comprobada. Al mismo tiempo, debido a la utilización dada a los resultados de este modelo es necesario además que el valor al que converge el modelo sea similar a los resultados obtenidos registrados en la operación minera, en la unidad que el modelo representa, para parámetros de entrada específicos. El siguiente gráfico muestra la convergencia del modelo de simulación implementado para los parámetros especificados, puede observarse que la media de las replicaciones converge al valor 131 Kt/mes aproximadamente:

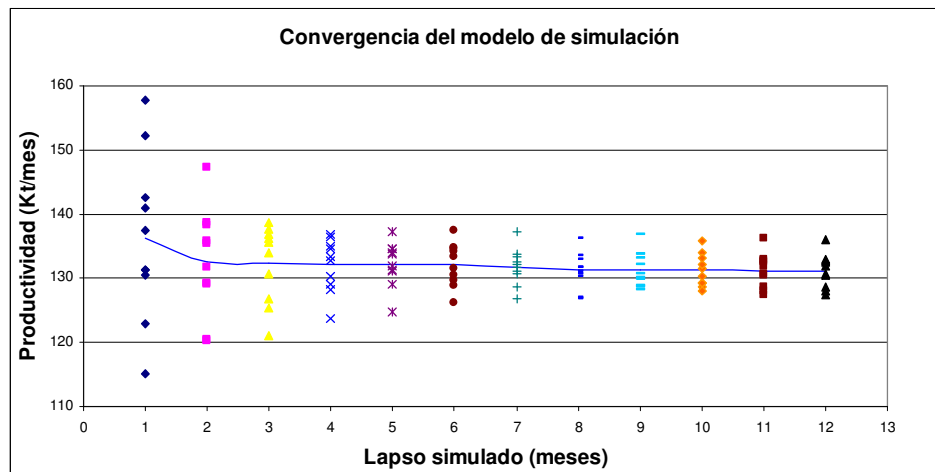


Gráfico 5-5. Convergencia del modelo de simulación.

Cada punto del gráfico corresponde al resultado de productividad mensual para una replicación específica, la línea corresponde al promedio de replicaciones.

Relativo a lo anterior, la siguiente gráfica muestra la evolución del error promedio de las repeticiones de cada experimento a medida que aumenta el lapso simulado, se observa un comportamiento asintótico al valor 1.55% aproximadamente:

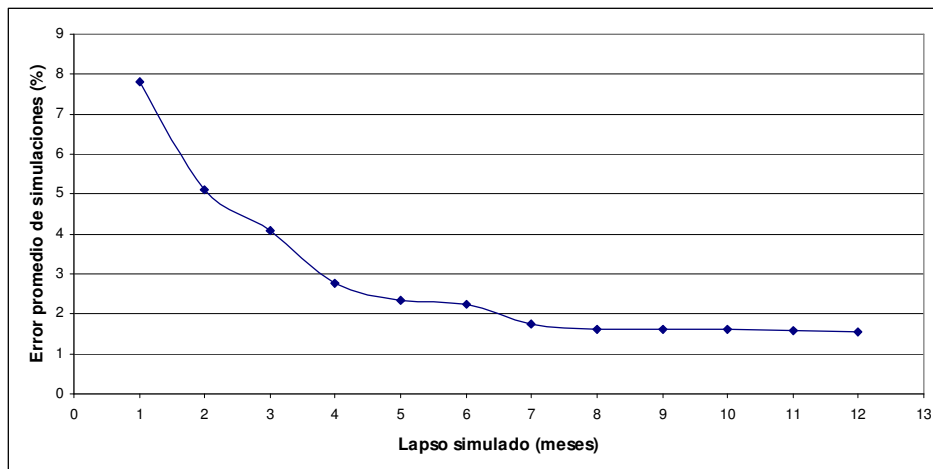


Gráfico 5-6. Error promedio de las simulaciones.

Por otro lado, la ejecución de cada simulación naturalmente no es instantánea, depende tanto del intervalo de tiempo simulado (pues simular un mes de producción es distinto a simular un año completo, en lo que a tiempo de ejecución se refiere) tanto como de las características del computador donde se ejecuten los experimentos (capacidad de procesamiento de información). La siguiente gráfica resume los tiempos unitarios observados necesarios para la ejecución de experimentos de distintos lapsos simulados:

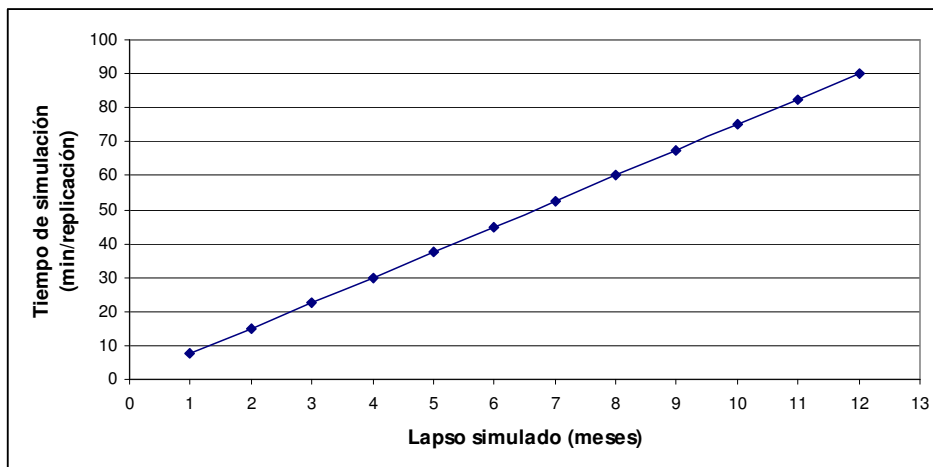


Gráfico 5-7. Relación del tiempo de ejecución de experimentos de simulación y el lapso simulado.

Es decir, si por ejemplo se desea simular la operación minera de 8 meses corridos, el tiempo que tarda en realizarse cada replicación es de aproximadamente 1 hora, y si se considera que

como mínimo han de realizarse 10 replicaciones, el tiempo total requerido para obtener resultados es de 8 horas.

Por otro lado, se observa que el error promedio de las replicaciones disminuye conforme aumenta el periodo simulado, es decir, la dispersión entre los valores obtenidos de cada replicación disminuye, lo que resulta conveniente desde el punto de vista que se desea obtener un valor resultado con la menor incertidumbre posible.

Según lo anterior, es necesario entonces balancear de manera adecuada la exactitud requerida y el tiempo necesario para lograrla, debido a que la ejecución de numerosos experimentos para analizar el impacto de diversas variables puede tomar un tiempo considerable, haciendo impracticable el uso de esta herramienta (simulación).

Finalmente, a modo de detalle se muestran a continuación el valor final de las variables para la validación del modelo:

VARIABLE	UNIDAD	VALOR
TEE	t	LOGN(5319.56,8050.39)
Número de camiones	#	10
Número de LHD	#	1 por calle
Número de replicaciones	#	10
Número crítico de puntos detenidos	#	3
Número crítico de buzones detenidos	#	1
Tasa de falla piques	Kt/falla	30
Tasa de falla buzones	Kt/falla	30
Cuadrillas de reducción secundaria	#	1
Cuadrillas de reparación de buzones	#	2
Tiempo de reparación de puntos (perforación y actividades asociadas)	min/punto	30
Tiempo de reparación de puntos (ventilación)	min	30
Tiempo de reparación de piques	turnos	3
Tiempo de reparación de buzones	turnos	2

Tabla 5-6. Valores de variables utilizadas en la validación,

6 Resultados

Las variables de entrada al modelo de simulación que varían de un experimento a otro, con el fin de analizar su impacto en la productividad del sistema minero, se enuncian a continuación:

- Frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia (como distribución de probabilidades de TEE por sectores identificados).
- Número de puntos críticos para detener un cruzado de producción para iniciar las labores de trabadura secundaria.
- Número de cuadrillas de reducción secundaria.
- Tasa de ocurrencia de eventos de interferencia en piques de traspaso y buzones.

Las anteriores serán analizadas mediante la ejecución de variadas simulaciones, en que se estudiará la productividad (promedio de replicaciones) de diversas combinaciones entre éstas.

6.1 Resultados de experimentos de simulación

Sector A

En la siguiente tabla se detallan los resultados obtenidos (productividad cruzado de acarreo, promedio de replicaciones) de las simulaciones realizadas para el sector A, con diversas combinaciones de número de cuadrillas de reducción secundaria, puntos críticos para el cierre de cruzados de producción y frecuencia de ocurrencia de eventos en piques y buzones:

SECTOR	TEE PROMEDIO PUNTOS (t/evento)	TEE PIQUES Y BUZONES (Kt/evento)	CUADRILLAS REDUCCIÓN SECUNDARIA (#)	PUNTOS CRÍTICOS (#)	PRODUCTIVIDAD CRUZADO ACARREO (Kt/mes)
A	921.20	30	1	1	52.51
A	921.20	30	1	4	58.26
A	921.20	30	1	7	60.17
A	921.20	30	1	10	61.13
A	921.20	30	1	13	60.47
A	921.20	30	3	1	137.21
A	921.20	30	3	4	150.27
A	921.20	30	3	7	154.50
A	921.20	30	3	10	158.02
A	921.20	30	3	13	157.42
A	921.20	30	5	1	148.40
A	921.20	30	5	4	184.09
A	921.20	30	5	7	207.29
A	921.20	30	5	10	225.96
A	921.20	30	5	13	243.74
A	921.20	45	1	1	54.59
A	921.20	45	1	4	59.51
A	921.20	45	1	7	63.03
A	921.20	45	1	10	63.15
A	921.20	45	1	13	63.27
A	921.20	45	3	1	145.00
A	921.20	45	3	4	158.63
A	921.20	45	3	7	162.04
A	921.20	45	3	10	162.04
A	921.20	45	3	13	164.19
A	921.20	45	5	1	163.82
A	921.20	45	5	4	222.10
A	921.20	45	5	7	236.67
A	921.20	45	5	10	243.99
A	921.20	45	5	13	251.31
A	921.20	60	1	1	55.88
A	921.20	60	1	4	62.66
A	921.20	60	1	7	64.36
A	921.20	60	1	10	64.88
A	921.20	60	1	13	65.41
A	921.20	60	3	1	147.73
A	921.20	60	3	4	163.74
A	921.20	60	3	7	167.74
A	921.20	60	3	10	169.05
A	921.20	60	3	13	170.36
A	921.20	60	5	1	182.01
A	921.20	60	5	4	231.96
A	921.20	60	5	7	244.44
A	921.20	60	5	10	250.90
A	921.20	60	5	13	257.36

Tabla 6-1. Resultados obtenidos, sector A.

Sector B

En la siguiente tabla se detallan los resultados obtenidos (productividad cruzado de acarreo, promedio de replicaciones) de las simulaciones realizadas para el sector B, con diversas combinaciones de número de cuadrillas de reducción secundaria, puntos críticos para el cierre de cruzados de producción y frecuencia de ocurrencia de eventos en piques y buzones:

SECTOR	TEE PROMEDIO PUNTOS (t/evento)	TASA PIQUES Y BUZONES (Kt/evento)	CUADRILLAS REDUCCIÓN SECUNDARIA (#)	PUNTOS CRÍTICOS (#)	PRODUCTIVIDAD (Kt/mes)
B	2047.64	30	1	1	68.57
B	2047.64	30	1	4	84.34
B	2047.64	30	1	7	87.00
B	2047.64	30	1	10	89.81
B	2047.64	30	1	13	89.84
B	2047.64	30	3	1	157.92
B	2047.64	30	3	4	205.12
B	2047.64	30	3	7	218.34
B	2047.64	30	3	10	228.54
B	2047.64	30	3	13	240.72
B	2047.64	30	5	1	219.33
B	2047.64	30	5	4	277.43
B	2047.64	30	5	7	285.77
B	2047.64	30	5	10	296.02
B	2047.64	30	5	13	304.64
B	2047.64	45	1	1	72.42
B	2047.64	45	1	4	89.54
B	2047.64	45	1	7	93.82
B	2047.64	45	1	10	95.09
B	2047.64	45	1	13	96.36
B	2047.64	45	3	1	183.83
B	2047.64	45	3	4	224.03
B	2047.64	45	3	7	234.08
B	2047.64	45	3	10	245.77
B	2047.64	45	3	13	257.45
B	2047.64	45	5	1	234.81
B	2047.64	45	5	4	321.31
B	2047.64	45	5	7	342.93
B	2047.64	45	5	10	347.92
B	2047.64	45	5	13	352.91
B	2047.64	60	1	1	74.57
B	2047.64	60	1	4	92.97
B	2047.64	60	1	7	97.56
B	2047.64	60	1	10	98.76
B	2047.64	60	1	13	99.95
B	2047.64	60	3	1	190.60
B	2047.64	60	3	4	232.75
B	2047.64	60	3	7	243.28
B	2047.64	60	3	10	255.37
B	2047.64	60	3	13	267.45
B	2047.64	60	5	1	254.99
B	2047.64	60	5	4	328.36
B	2047.64	60	5	7	359.80
B	2047.64	60	5	10	363.68
B	2047.64	60	5	13	367.55

Tabla 6-2. Resultados obtenidos, sector B.

Sector C

En la siguiente tabla se detallan los resultados obtenidos (productividad cruzado de acarreo, promedio de replicaciones) de las simulaciones realizadas para el sector C, con diversas combinaciones de número de cuadrillas de reducción secundaria, puntos críticos para el cierre de cruzados de producción y frecuencia de ocurrencia de eventos en piques y buzones:

SECTOR	TEE PROMEDIO PUNTOS (t/evento)	TASA PIQUES Y BUZONES (Kt/evento)	CUADRILLAS REDUCCIÓN SECUNDARIA (#)	PUNTOS CRÍTICOS (#)	PRODUCTIVIDAD (Kt/mes)
C	5319.56	30	1	1	112.61
C	5319.56	30	1	4	152.30
C	5319.56	30	1	7	163.89
C	5319.56	30	1	10	170.91
C	5319.56	30	1	13	173.82
C	5319.56	30	3	1	279.69
C	5319.56	30	3	4	280.74
C	5319.56	30	3	7	290.83
C	5319.56	30	3	10	303.45
C	5319.56	30	3	13	306.24
C	5319.56	30	5	1	276.57
C	5319.56	30	5	4	276.46
C	5319.56	30	5	7	283.02
C	5319.56	30	5	10	304.47
C	5319.56	30	5	13	302.64
C	5319.56	45	1	1	116.83
C	5319.56	45	1	4	162.84
C	5319.56	45	1	7	174.34
C	5319.56	45	1	10	180.74
C	5319.56	45	1	13	187.14
C	5319.56	45	3	1	302.33
C	5319.56	45	3	4	378.80
C	5319.56	45	3	7	397.91
C	5319.56	45	3	10	402.18
C	5319.56	45	3	13	406.44
C	5319.56	45	5	1	374.61
C	5319.56	45	5	4	382.59
C	5319.56	45	5	7	391.11
C	5319.56	45	5	10	399.08
C	5319.56	45	5	13	407.06
C	5319.56	60	1	1	122.76
C	5319.56	60	1	4	167.97
C	5319.56	60	1	7	187.35
C	5319.56	60	1	10	192.52
C	5319.56	60	1	13	197.69
C	5319.56	60	3	1	317.40
C	5319.56	60	3	4	421.85
C	5319.56	60	3	7	441.13
C	5319.56	60	3	10	452.49
C	5319.56	60	3	13	460.78
C	5319.56	60	5	1	436.18
C	5319.56	60	5	4	471.89
C	5319.56	60	5	7	487.19
C	5319.56	60	5	10	490.70
C	5319.56	60	5	13	494.22

Tabla 6-3. Resultados obtenidos, sector C.

6.2 Análisis de resultados

Impacto del TEE a nivel de puntos de extracción

Puede observarse en los resultados obtenidos que la sectorización del nivel de producción utilizada permite encontrar diferencias sustanciales en la productividad máxima potencial de la unidad productiva analizada, dado un número de cuadrillas de reducción secundaria y una estrategia de cierre de cruzados de producción para su reparación.

A modo de ejemplificar el comportamiento observado, las siguientes curvas son representativas:

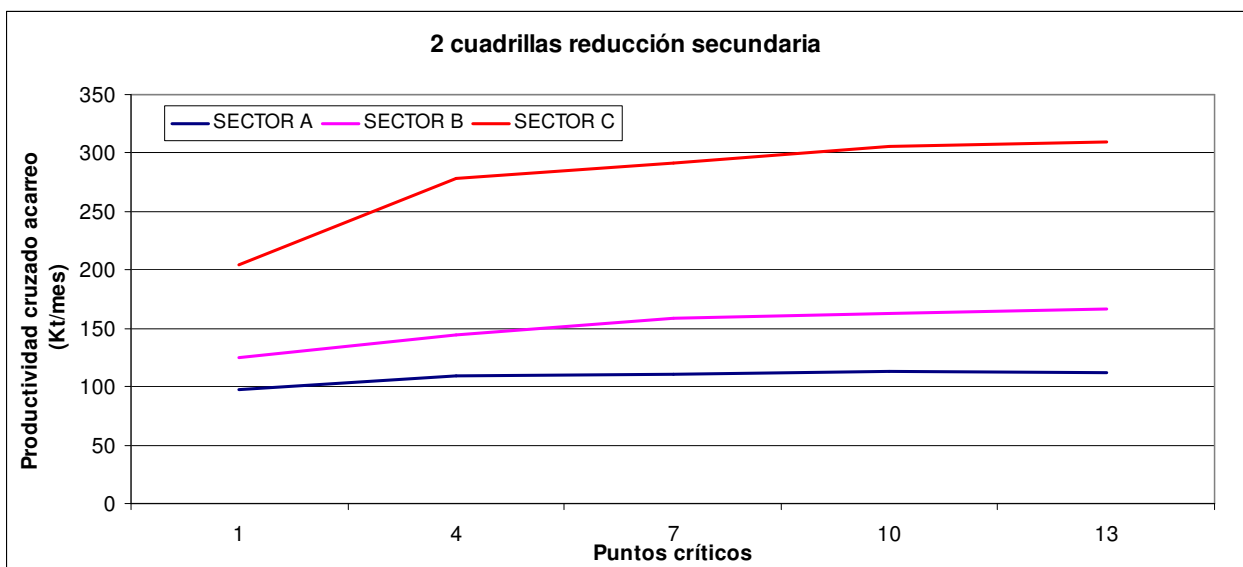


Gráfico 6-1. Impacto del TEE en puntos de extracción (sectores) en la productividad del cruzado de acarreo, 30Kt/evento en piques y buzones.

La figura anterior muestra que existen diferencias importantes en la productividad máxima potencial del cruzado de acarreo debido a que los puntos de extracción se ven afectados por frecuencias de ocurrencia de eventos de interferencia diferentes (cada sector representa una frecuencia distinta). En este aspecto puede inferirse que sectores con mayor probabilidad de ocurrencia de eventos poseen una productividad máxima potencial menor que aquellos sectores con una frecuencia menor, lo que resulta intuitivamente correcto al comprender que un sector con una mayor probabilidad de interrumpirse pasa una mayor proporción del tiempo en reparaciones.

Impacto del número de cuadrillas de reducción secundaria

Debe tenerse siempre en cuenta que el recurso cuadrillas de reducción secundaria es común para todos los sectores de la mina, realidad que el modelo de simulación es incapaz de reproducir debido a que éste emula una unidad productiva básica y no la mina por completo, sin embargo es posible observar en los resultados obtenidos que el número de recursos disponibles afecta en la productividad del sistema debido principalmente a que el número de puntos de extracción y piques de traspaso implementado para realizar los experimentos es elevado (128 puntos de extracción distribuidos en 8 calles, cada una con un pique de traspaso propio) por lo que las cuadrillas de reducción secundaria no son en general un recurso redundante en el modelo de simulación, sin embargo antes de extrapolar los resultados obtenidos es necesario normalizarlos, es decir, comprender que cuando se habla de, por ejemplo, 4 cuadrillas de reducción secundaria, éstas han sido asignadas a un total de 8 calles, por lo que resulta más preciso hablar de 0.5 cuadrillas por calle, al momento de extrapolar los resultados a la planificación del global de la mina.

La gráfica siguiente ejemplifica el impacto en la productividad de la utilización de diferentes números de cuadrillas de reducción secundaria:

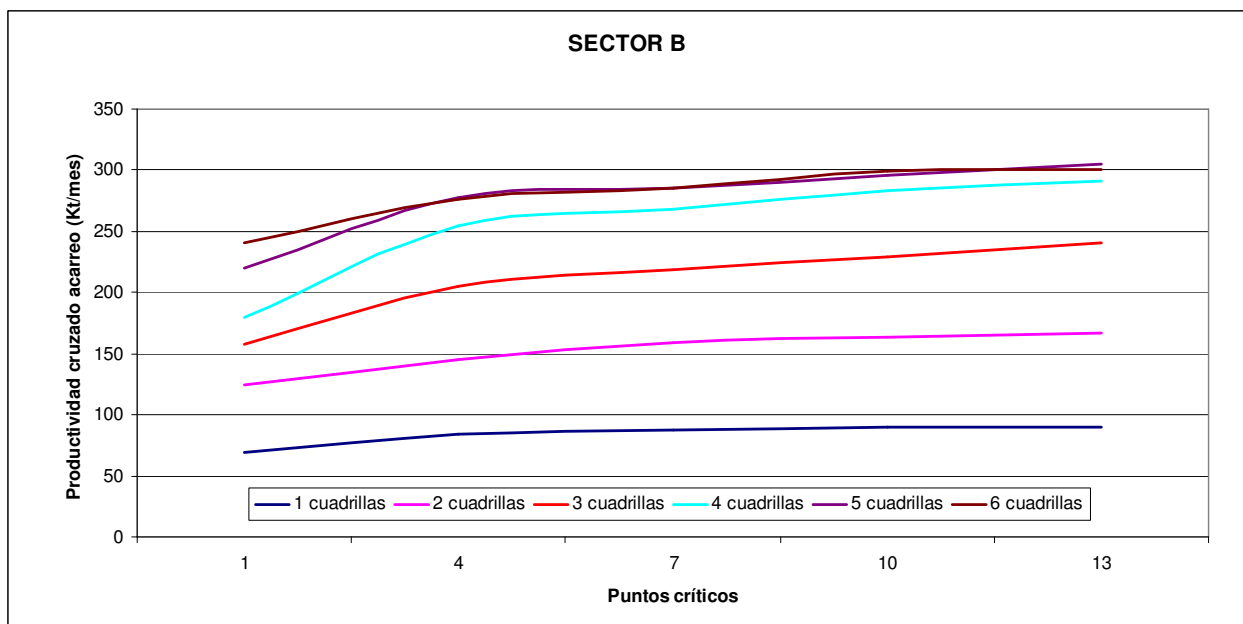


Gráfico 6-2. Impacto del número de cuadrillas en la productividad del cruzado de acarreo, 30Kt/evento en piques y buzones.

En la gráfica anterior puede observarse que la productividad del cruzado de acarreo está directamente relacionado con el número de cuadrillas de reducción secundaria. A medida que aumenta el número de recursos se observan incrementos en la productividad, lo que resulta

natural al entender que las cuadrillas de reducción secundaria se encargan de devolver a producción componentes de infraestructura que se encontraban inoperantes por causa de interferencias operativas.

A su vez, puede observarse que los incrementos en productividad, conforme aumenta el número de recursos, son cada vez menores hasta llegar a un límite por sobre el cual la productividad máxima potencial no presenta variaciones con el aumento del número de cuadrillas de reducción secundaria. Lo anterior se debe principalmente a que la capacidad productiva del sistema no está limitada únicamente por las interferencias operacionales, que resuelven las cuadrillas, si no también por otros factores como la productividad de los equipos LHD situados aguas arriba, por lo que naturalmente existe una productividad límite por sobre la cual las cuadrillas de reducción secundaria comienzan a ser subutilizadas, pues son redundantes.

Impacto de la estrategia de cierre de cruzados de producción

El siguiente gráfico permite observar las diferencias en productividad generadas por la utilización de distintas estrategias de reducción secundaria, a modo de ejemplo, para un sector específico de la mina:

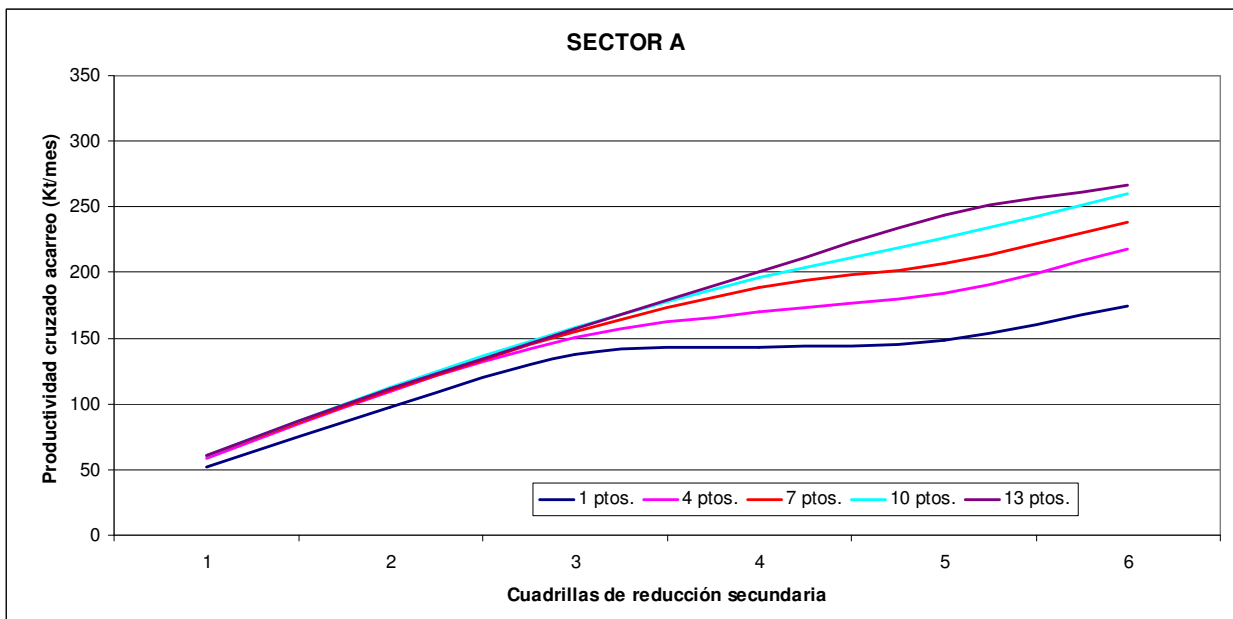


Gráfico 6-3. Impacto de la estrategia de reducción secundaria, 30Kt/evento en piques y buzones.

Puede observarse que la estrategia de reducción secundaria utilizada (puntos críticos detenidos para el cierre del cruzado de producción) impacta de manera importante dado un número de

recursos, sin embargo para un número reducido de cuadrillas las diferencias de productividad observadas para distintas estrategias son menores que en el caso de un número mayor de recursos, es decir, la estrategia de operaciones si impacta la productividad en la escala de tiempo observada.

Por otro lado, para un número de recursos dado, resulta interesante cuestionarse qué estrategia de operaciones maximiza la productividad potencial del cruzado de acarreo. En este sentido puede observarse en las siguientes gráficas, que la estrategia óptima es dependiente de la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia:

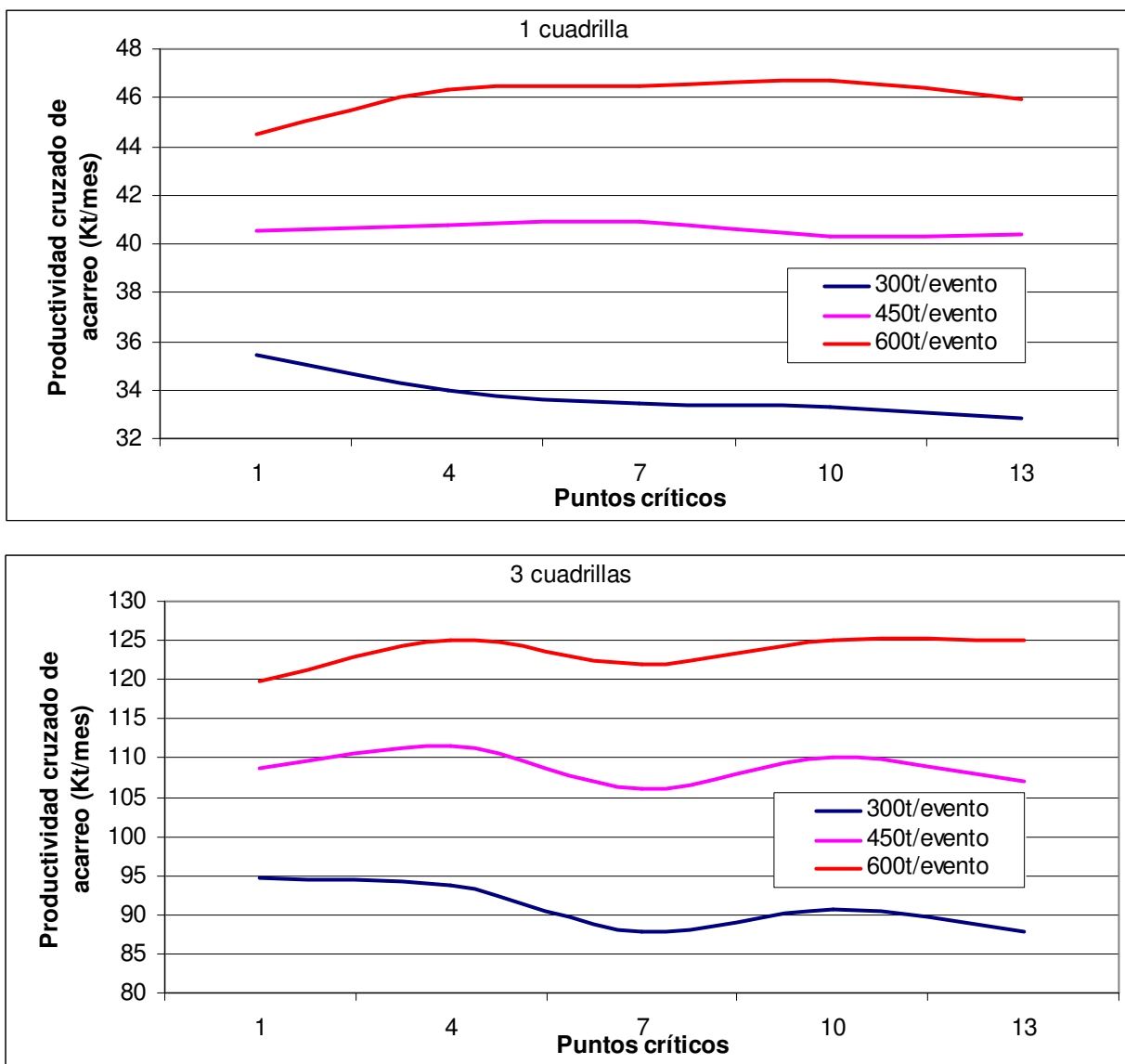


Gráfico 6-4. Relación entre estrategia de reducción secundaria y TEE en puntos de extracción (30Kt/evento en picos de traspaso y buzones).

Puede observarse por ejemplo, que para el caso de poseer 1 cuadrilla de reducción secundaria (o bien 0.125 cuadrillas por calle), para distintas frecuencias de ocurrencia de eventos la estrategia óptima de cierre de cruzados de producción es variable: 1 punto crítico para 300t/evento, 7 puntos críticos para 450t/evento y 10 puntos críticos para 600t/evento. De forma análoga, para el caso de 2 cuadrillas de reducción secundaria (o 0.25 cuadrillas por calle) se tiene que las estrategias óptimas de reducción secundaria serán las siguientes: 1 punto crítico para 300t/evento, 4 puntos críticos para 450t/evento y 10 puntos críticos para 600t/evento. Es importante destacar, que las tasas de ocurrencia de eventos de las gráficas anteriores no corresponden a ningún sector de la mina en estudio.

Con lo anterior, puede inferirse que para distintos comportamientos a nivel de ocurrencia de eventos de interferencia, es decir distintos sectores de la mina, podrían identificarse distintas estrategias óptimas de reducción secundaria. Puntualmente, debido a que la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia en la mina estudiada es relativamente baja, su estrategia óptima de cierre de cruzados de producción se da para un número elevado de puntos críticos (13 puntos críticos generalmente), en todos los sectores identificados.

Resulta interesante la evolución de las curvas de productividad versus el número de puntos críticos conforme aumenta el número de cuadrillas. Puede observarse que para un número reducido de recursos la estrategia óptima apunta hacia un número reducido de puntos críticos, sin embargo, conforme aumenta el número de cuadrillas, las estrategias que consideran un mayor número de puntos críticos comienzan a hacerse más atractivas (un efecto similar se observa cuando disminuye la frecuencia de eventos de interferencia). Lo anterior se debe a que cuando el número de recursos es reducido es necesario liberarlo lo antes posible para que pueda resolver eventualidades en otros cruzados, si el número de puntos críticos es elevado, a medida que las calles salen de producción, las cuadrillas demoran demasiado tiempo en repararlas y aún existen otras calles detenidas por la estrategia, con lo que la utilización efectiva de los cruzados de producción es reducida. En caso contrario, cuando el número de cuadrillas es elevado, cada vez que una calle sale de producción por interferencias operacionales, es mucho más probable que una cuadrilla esté disponible para repararla inmediatamente, lo que disminuye los tiempos ociosos.

Finalmente, considerando que las frecuencias de ocurrencia de eventos de interferencia para diversos sectores puede variar conforme el tonelaje extraído aumenta, podrían identificarse estrategias óptimas de operación por sectores que evolucionen el tiempo.

Impacto del TEE a nivel de piques de traspaso y buzones

Por las relaciones de conectividad de las diferentes componentes de infraestructura del sistema minero estudiado, los piques de traspaso y sus buzones respectivos resultan ser una pieza fundamental en la productividad del sistema, debido principalmente a que éstos conectan las componentes que ingresan material al sistema (cruzados de producción y sus puntos de extracción) con las componentes que lo retiran (cruzados de acarreo).

En este trabajo se estudiaron 3 tasas distintas de ocurrencia de eventos de interferencia en piques de traspaso y buzones: 30Kt/evento, 45Kt/evento y 60Kt/evento. Al mismo tiempo, debe tenerse claro que, debido a la configuración en Y que conecta dos piques con un mismo buzón, hablar de una misma tasa de ocurrencia de eventos en piques y buzones significa que ambos componentes fallen al mismo tiempo; más bien significa que el buzón se interrumpe 2 veces más seguido que un pique.

La siguiente gráfica ejemplifica la influencia en la productividad potencial de diferentes frecuencias de ocurrencia de eventos en piques de traspaso y buzones, para un mismo sector y un mismo número de cuadrillas de reducción secundaria, para distintas estrategias de cierre de cruzados de producción:

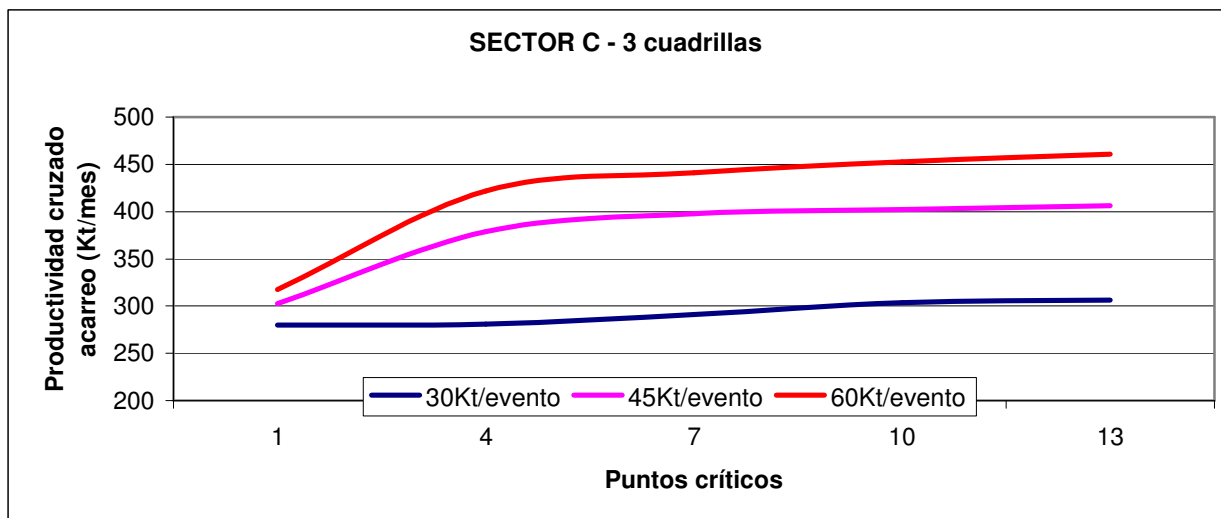


Gráfico 6-5. Impacto de la tasa de ocurrencia de eventos en piques y buzones.

Primeramente puede observarse que la productividad del sistema en estudio aumenta conforme disminuye la frecuencia de ocurrencia de eventos en piques y buzones, lo que resulta obvio al entender que todo el mineral retirado desde los puntos de extracción debe movilizarse a través

de los piques y buzones para llegar al nivel de transporte, donde se encuentran los cruzados de acarreo.

De la misma manera que a nivel de puntos de extracción, los incrementos en productividad conforme aumenta el TEE en piques y buzones son cada vez menores, lo que se asocia a que existen otros componentes que limitan la productividad del sistema, por lo que siempre debiera encontrarse que la productividad máxima potencial converge a cierto valor.

6.3 Nomogramas de productividad

Sector A

Los resultados obtenidos de los experimentos de simulación realizados pueden resumirse convenientemente mediante el siguiente nomograma, que permite relacionar la productividad potencial máxima de un cruzado de acarreo perteneciente al sector A (o sea, una frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia a nivel de puntos de extracción) con el número de recursos disponibles (cuadrillas de reducción secundaria), la estrategia de operaciones para el cierre de cruzados de producción (puntos críticos) y la tasa de ocurrencia de eventos de interferencia en piques y buzones:

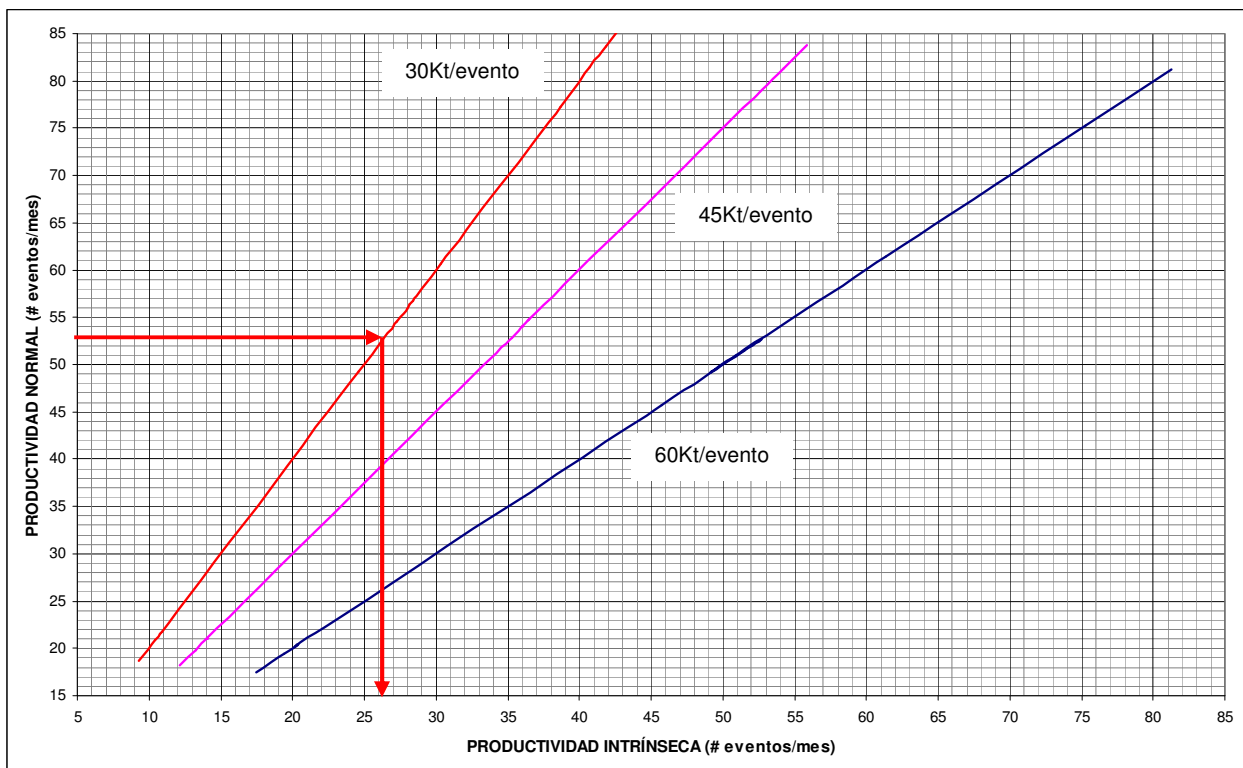


Gráfico 6-6. Nomograma de productividad máxima potencial, sector A.

La siguiente tabla relaciona el número de cuadrillas de reducción secundaria con la estrategia de operaciones utilizada con el parámetro de entrada del nomograma (productividad normal) y el factor de ajuste:

# Cuadrillas	Puntos críticos	Productividad normal (eventos/mes)	FACTOR DE AJUSTE (FA)		
			TEE piques y buzones (Kt/evento)		
			30	45	60
1	1	17.50	0.100	0.104	0.106
1	4	19.42	0.100	0.102	0.108
1	7	20.06	0.100	0.105	0.107
1	10	20.38	0.100	0.103	0.106
1	13	20.16	0.100	0.105	0.108
3	1	45.74	0.100	0.106	0.108
3	4	50.09	0.100	0.106	0.109
3	7	51.50	0.100	0.105	0.109
3	10	52.67	0.100	0.103	0.107
3	13	52.47	0.100	0.104	0.108
5	1	49.47	0.100	0.110	0.123
5	4	61.36	0.100	0.121	0.126
5	7	69.10	0.100	0.114	0.118
5	10	75.32	0.100	0.108	0.111
5	13	81.25	0.100	0.103	0.106

Tabla 6-4. Productividad normal y factor de ajuste para nomograma de productividad máxima potencial, sector A.

Finalmente, la productividad máxima potencial del cruzado de acarreo se obtiene del siguiente formulismo:

$$PMP(Kt / mes) = PI(eventos / mes) * TEE_{PIQUES_BUZONES} (Kt / evento) * FA$$

Donde:

- PMP: Productividad máxima potencial del cruzado de acarreo.
- PI: Productividad intrínseca.
- TEE: tonelaje entre eventos de interferencia en piques y buzones.
- FA: factor de ajuste.

Por ejemplo, para 3 cuadrillas de reducción secundaria y 13 puntos críticos, de la tabla presentada anteriormente se lee una productividad normal de 52.47eventos/mes y un factor de ajuste de 0.108, si se considera TEE en piques y buzones de 60Kt/evento, del nomograma anterior se lee una productividad intrínseca de 26.3eventos/mes, con lo que se obtiene una PMP de:

$$PMP(Kt / mes) = 26.3(eventos / mes) * 60(Kt / evento) * 0.108 = 170.4(Kt / mes)$$

Sector B

Análogamente a lo expresado en el título anterior, el siguiente nomograma permite reproducir los resultados obtenidos para la productividad máxima potencial de los cruzados de acarreo del sector B:

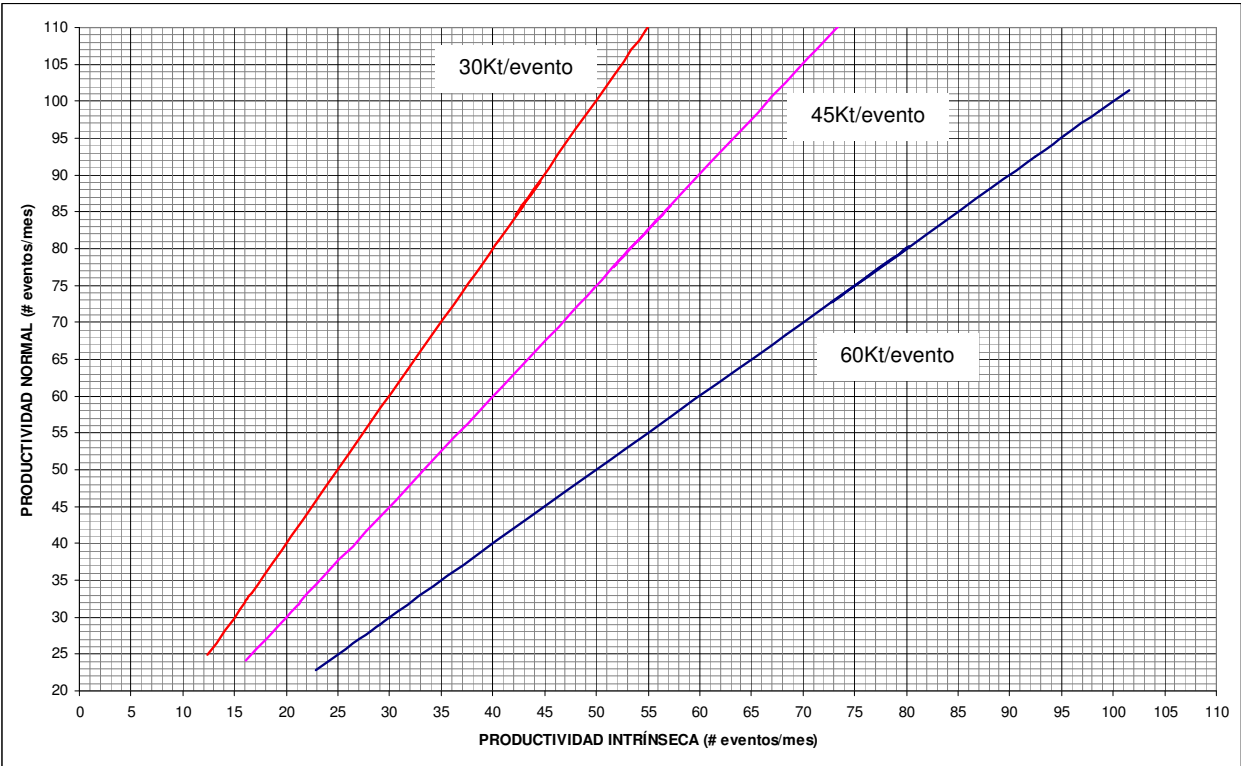


Gráfico 6-7. Nomograma de productividad máxima potencial, sector B.

En relación a lo anterior, la siguiente tabla muestra el parámetro de entrada Productividad normal, relacionado con el número de recursos y la estrategia de operaciones, y el factor de ajuste necesarios para estimar la PMP de los cruzados de acarreo del sector C:

# Cuadrillas	Puntos críticos	Productividad normal (eventos/mes)	FACTOR DE AJUSTE		
			TEE piques y buzones (Kt/evento)		
			30	45	60
1	1	22.86	0.100	0.106	0.109
1	4	28.11	0.100	0.106	0.110
1	7	29.00	0.100	0.108	0.112
1	10	29.94	0.100	0.106	0.110
1	13	29.95	0.100	0.107	0.111
3	1	52.64	0.100	0.116	0.121
3	4	68.37	0.100	0.109	0.113
3	7	72.78	0.100	0.107	0.111
3	10	76.18	0.100	0.108	0.112
3	13	80.24	0.100	0.107	0.111
5	1	73.11	0.100	0.107	0.116
5	4	92.48	0.100	0.116	0.118
5	7	95.26	0.100	0.120	0.126
5	10	98.67	0.100	0.118	0.123
5	13	101.55	0.100	0.116	0.121

Tabla 6-5. Productividad normal y factor de ajuste para nomograma de productividad máxima potencial, sector B.

Sector C

Análogamente a lo expresado en el título anterior, el siguiente nomograma permite reproducir los resultados obtenidos para la productividad máxima potencial de los cruzados de acarreo del sector C:

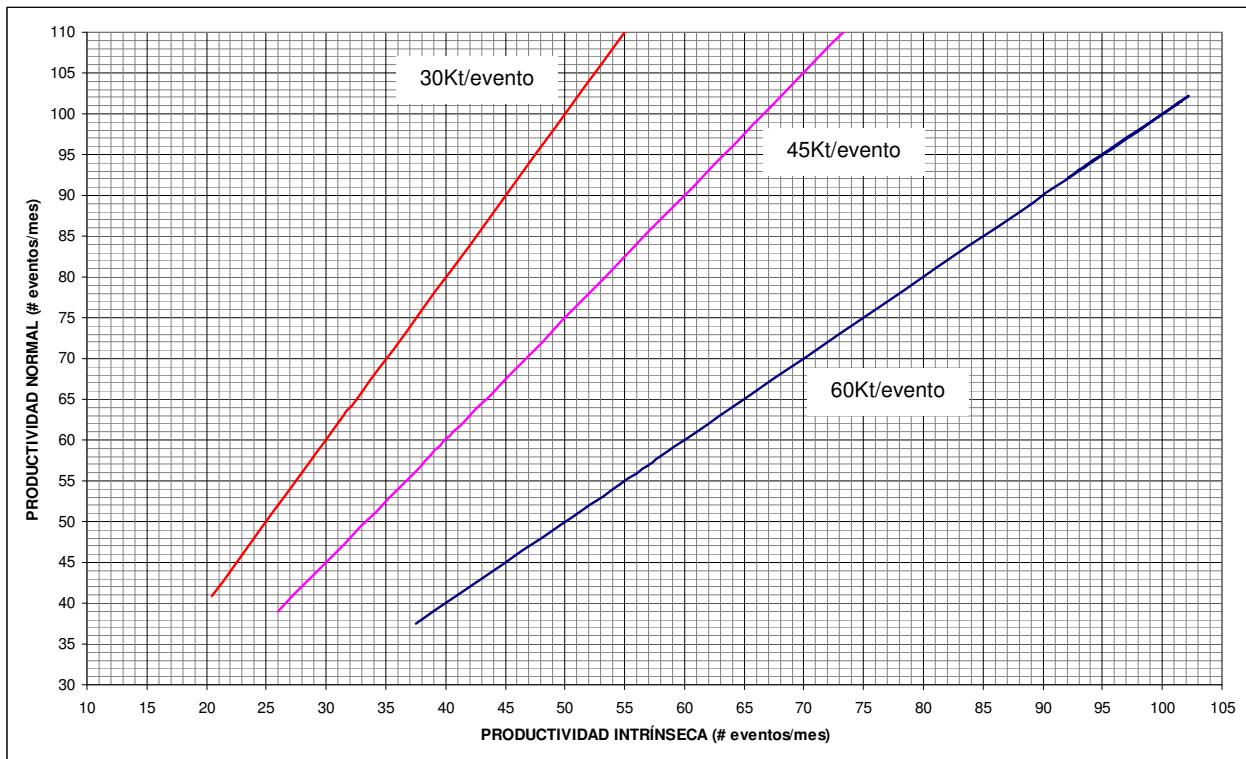


Gráfico 6-8. Nomograma de productividad máxima potencial, sector C.

En relación a lo anterior, la siguiente tabla muestra el parámetro de entrada Productividad normal, relacionado con el número de recursos y la estrategia de operaciones, y el factor de ajuste necesarios para estimar la PMP de los cruzados de acarreo del sector C:

# Cuadrillas	Puntos críticos	Productividad normal (eventos/mes)	FACTOR DE AJUSTE		
			TEE piques y buzones (Kt/evento)		
			30	45	60
1	1	37.54	0.100	0.104	0.109
1	4	50.77	0.100	0.107	0.110
1	7	54.63	0.100	0.106	0.114
1	10	56.97	0.100	0.106	0.113
1	13	57.94	0.100	0.108	0.114
3	1	93.23	0.100	0.108	0.113
3	4	93.58	0.100	0.135	0.150
3	7	96.94	0.100	0.137	0.152
3	10	101.15	0.100	0.133	0.149
3	13	102.08	0.100	0.133	0.150
5	1	92.19	0.100	0.135	0.158
5	4	92.15	0.100	0.138	0.171
5	7	94.34	0.100	0.138	0.172
5	10	101.49	0.100	0.131	0.161
5	13	100.88	0.100	0.135	0.163

Tabla 6-6. Productividad normal y factor de ajuste para nomograma de productividad máxima potencial, sector C.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Las variables relevantes en la productividad del cruzado de acarreo son al menos:

- Frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia (en las diferentes componentes de infraestructura).
- Número de cuadrillas de reducción secundaria.
- Estrategia de cierre de cruzados de producción para su reparación.

En relación a las anteriores, se observa en los resultados de los experimentos de simulación que:

- La productividad del cruzado de acarreo se relaciona de manera inversa con la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia a nivel de puntos de extracción y en piques de traspaso y buzones. Se observan diferencias desde un 23% hasta un 67% en la productividad mensual de los cruzados de acarreo para distintas frecuencias de ocurrencias de eventos en puntos de extracción y desde un 4% hasta un 40% para distintas frecuencias en piques de traspaso y buzones.
- Un mayor número de cuadrillas de reducción secundaria se relaciona con una mayor productividad, con un límite que depende al menos de la frecuencia de ocurrencia de eventos en las diferentes componentes de infraestructura analizadas. Se observan diferencias desde un 3% hasta un 77% en la productividad mensual de los cruzados de acarreo por cambios en esta variable.
- La estrategia de cierre de cruzados de producción que maximiza la PMP (productividad máxima potencial) del cruzado de acarreo depende de la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia (puntualmente para el caso estudiado esta estrategia es invariante, dado que las frecuencias de ocurrencia de eventos son relativamente bajas). Se observan diferencias desde un 1% hasta un 35% en la productividad mensual de los cruzados de acarreo por cambios en el número de puntos críticos detenidos para el cierre de cruzados de producción para su reparación.
- Relativo al punto anterior, se observó que generalmente se registran mayores niveles de productividad para un mayor número de puntos críticos (13), sin embargo los

incrementos son cada vez menores, para los sectores identificados de la mina en estudio.

- Dado que la productividad del sistema se ve afectada por las variables mencionadas entonces no necesariamente se tiene que ésta está limitada únicamente por la velocidad de extracción de cada punto, es decir, dado un número de cuadrillas de reducción secundaria y estrategias de operación resulta fundamental considerar en la planificación de mediano plazo que la infraestructura del sistema minero posee una productividad máxima potencial asociada, que puede o no ser mayor que la restricción impuesta por la geomecánica.
- Eventualmente es posible encontrar estrategias de operación diferentes para distintos sectores de la mina que maximicen la productividad total. Asimismo, esta estrategia puede ser variable en el tiempo dado que las variables que impactan en la frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia (fragmentación, humedad, uniformidad en la extracción, etc.) no necesariamente son constantes.

En relación a la aplicabilidad del modelo de simulación y las metodologías utilizadas:

- Del trabajo realizado se desprende que la metodología y las herramientas utilizadas (simulación computacional estocástica de eventos discretos) resultan ser muy útiles al momento de retroalimentar la planificación de largo plazo con la información recopilada día a día en la operación minera.
- La calidad y cantidad de información de entrada (tonelaje entre eventos de interferencia) son dos pilares fundamentales a la hora de considerar la utilización de la simulación debido a la necesidad de ajustar modelos de distribuciones de probabilidad de ocurrencia de eventos.
- Es posible identificar y cuantificar diferencias en la productividad para distintos sectores de la mina, distinguibles por su frecuencia de ocurrencia de eventos de interferencia.
- Se debe ser cuidadoso al momento de comprender que resultados se busca obtener con la simulación y como serán aplicados en la planificación (restricción a la productividad por sectores, no predicción del tonelaje a producir en el periodo a planificar).
- Un modelo de simulación reducido, que emula únicamente una unidad productiva básica permite comprender de mejor manera como afectan en la productividad las diversas variables en juego.

7.2 Recomendaciones

- Considerar en la planificación de mediano plazo el impacto en la productividad de las interferencias operacionales, considerando los nomogramas presentados en este trabajo.
- Considerar políticas o estándares para la operación de reducción secundaria (y otras actividades de reparación de componentes de infraestructura) acorde con los requerimientos de productividad de la mina.
- Implementar un sistema de control que permita recoger (con la frecuencia adecuada) y mantener en un formato apropiado para su eventual análisis, toda la información recopilada de la operación.
- Implementar un modelo en base a la información actual que optimice la productividad del sistema LHD-camión existente.

Trabajo futuro:

- Buscar relaciones entre la frecuencia de ocurrencia de eventos y variables asociadas intrínsecamente al macizo rocoso (RMR, tipos de roca, grado de fragmentación, etc.) de manera de poder extender la sectorización del nivel de producción hacia sectores en los que no necesariamente se tenga información de la ocurrencia histórica de eventos de interferencia, y contar así con una herramienta extrapolable a nuevos sectores de la mina.
- Buscar relaciones entre la frecuencia de ocurrencia de eventos y variables asociadas a la operación y diseño minero (uniformidad de la extracción, dimensiones y geometrías de las mallas de extracción, etc.) de manera de realizar los procesos de diseño y planificación de manera más integrada.

8 Bibliografía

- KELTON, David, SADOWSKI, Randall, SADOWSKI, Deborah. Simulation with Arena. 2ª ed. Internacional, Mc Graw Hill, 2002. 631p.
- SAVAGE, Sam L. Decision making with insight. 2ª ed. Internacional, Thomson Learning, 2003. 360p.
- BRADY, B. y BROWN, E. Rocks mechanics for underground mining. 3ª ed. Holanda, Kluwer Academic Publishers, 2004. 628p.
- SALINAS, Camilo. Construcción de túneles, piques y chimenas. 1ª ed. Santiago, Chile, Departamento de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, 1998. 179p.
- LE-FAUX, René. Manejo de materiales en explotaciones subterráneas, Apuntes del curso MI57G. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, 199-. 148p.
- RIGDON, Steven E. y BASU, Asit P. Statistical methods for the reliability of repairable systems. 1ª ed. Canadá, Wiley-Interscience, 2000. 281p.
- GRAMSH, Ernesto R. Manual de la gestión del mantenimiento industrial, Apuntes del curso MI55C. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, 2003.
- RUBIO Esquivel, Enrique Alfonso. Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning. Tesis (Ph. D.). Vancouver, Canadá. The University of British Columbia. The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering), 2006.
- HOHMANN Villarroel, Guillermo Bernardo. Modelo de velocidad de extracción para un módulo de minería continua. Tesis (ingeniero civil de minas). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2006.
- DUNBAR, W. Scott. Management and simulation methods in mining. 2006.

- RUBIO, Enrique A. Planificación y diseño minero. Diploma de Geo-Minero-Metalurgia. 2006.
- MOSS A., RUSSELL F., JONES C. Caving fragmentation at palabora: prediction to production. En: Massmin 2004. 22-25 Agosto, 2004. Santiago, Chile. 6p.
- RUBIO E., CÁCERES C., SCOBLE, M. Towards an integrated approach to block cave planning. En: Massmin 2004. 22-25 Agosto, 2004. Santiago, Chile. 7p.
- DESSUREAULT, S., SCOBLE, M., RUBIO, E. Simulation block cave secondary breakage – An application of information and operations management tools in mass mining systems. En: Massmin 2000. 29 Octubre - 2 Noviembre, 2000. Brisbane. 4p.

9 Anexos

9.1 Anexo A: Software de simulación

El modelo de simulación utilizado está implementando en el software ARENA, versión 7.1 de Rockwell Software. El anterior es un programa computacional que permite modelar un sistema funcional determinado en un entorno computacional para evaluar su comportamiento. Su funcionamiento posee una estructura jerárquica mostrada a continuación:

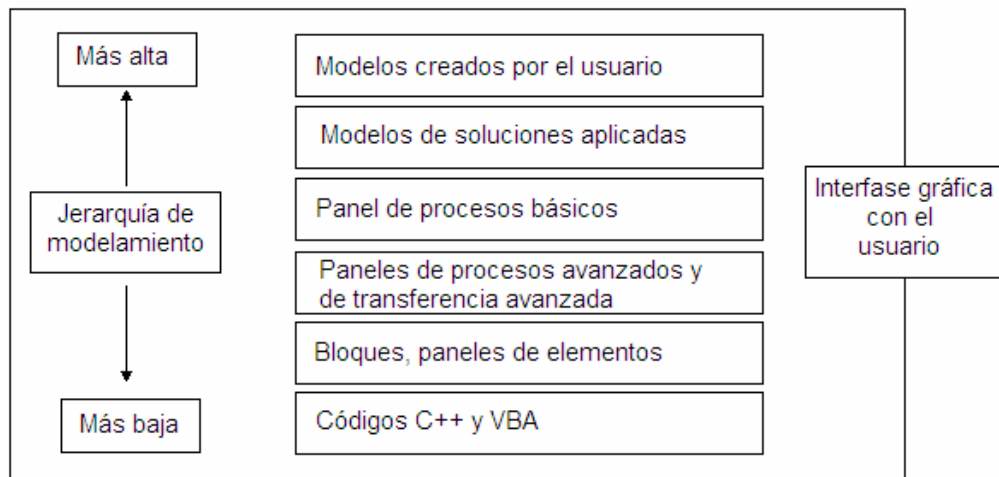


Figura 9-1. Estructura jerárquica del funcionamiento de Arena 7.01.

9.2 Anexo B: Detalle estadístico por grupos y rangos de tonelaje

La frecuencia de eventos de interferencia puede entenderse como una característica de partes específicas del sistema minero. Puntualmente, a nivel de puntos de extracción, puede observarse el siguiente comportamiento en el tonelaje extraído:

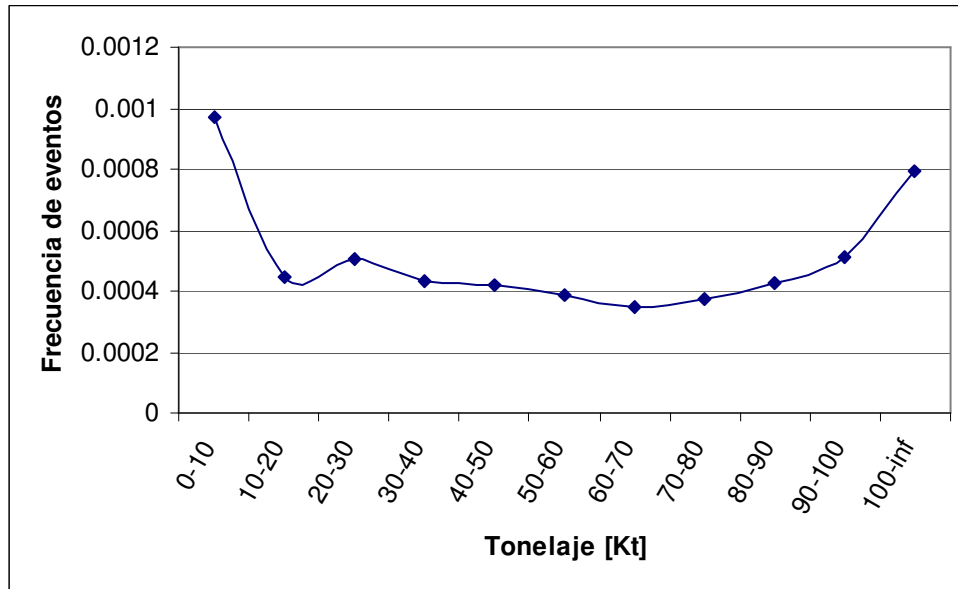


Gráfico 9-1. Frecuencia de eventos en el tonelaje extraído.

En el gráfico anterior, cada punto corresponde a la frecuencia de eventos promedio de todas las interferencias ocurridas a nivel de puntos de extracción en los intervalos de tonelaje especificados. Puede observarse que la frecuencia de fallas es variable de acuerdo al tonelaje extraído y presenta, en términos generales, la forma de una U.

Debido a lo expresado anteriormente el estudio estadístico también considerará el siguiente agrupamiento de la información de tonelaje entre eventos:

RANGO DE TONELAJE EXTRAÍDO (MILES DE TONELADAS)
0 - 50
50 - 150
150 - 250

Tabla 9-1. Intervalos de tonelaje extraído considerados en el análisis.

0 – 50(Kt) extraídas

Estadísticas grupo General

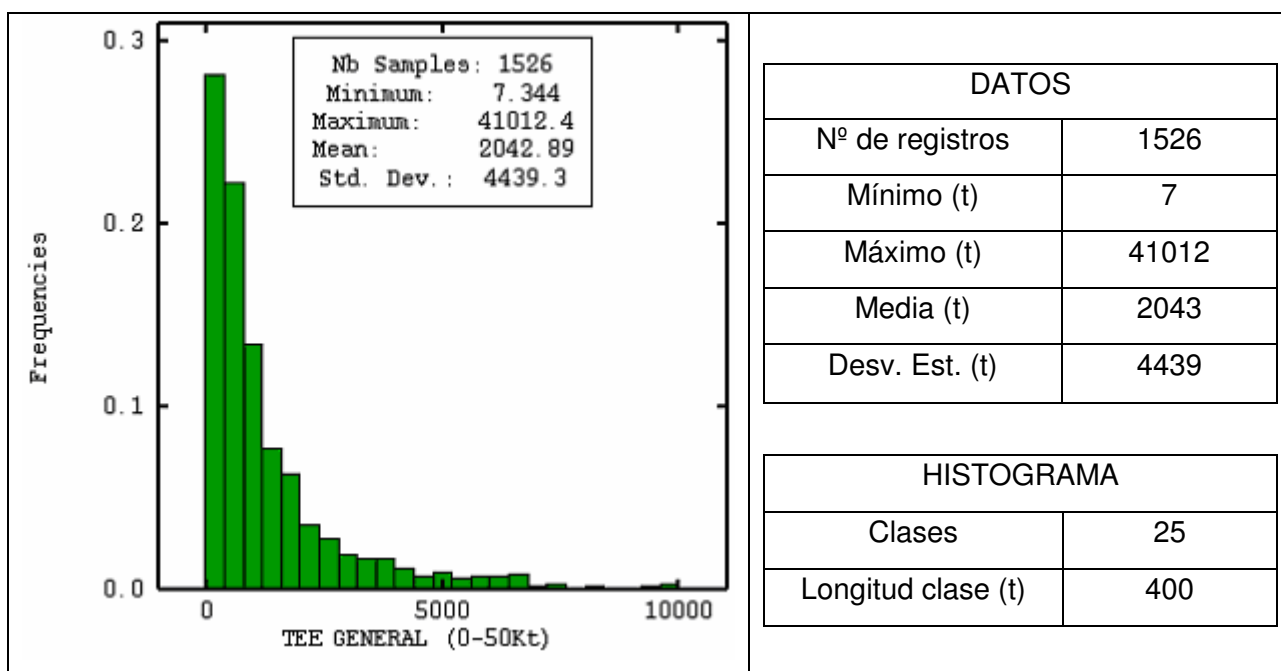


Gráfico 9-2. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (0 – 50Kt).

Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2

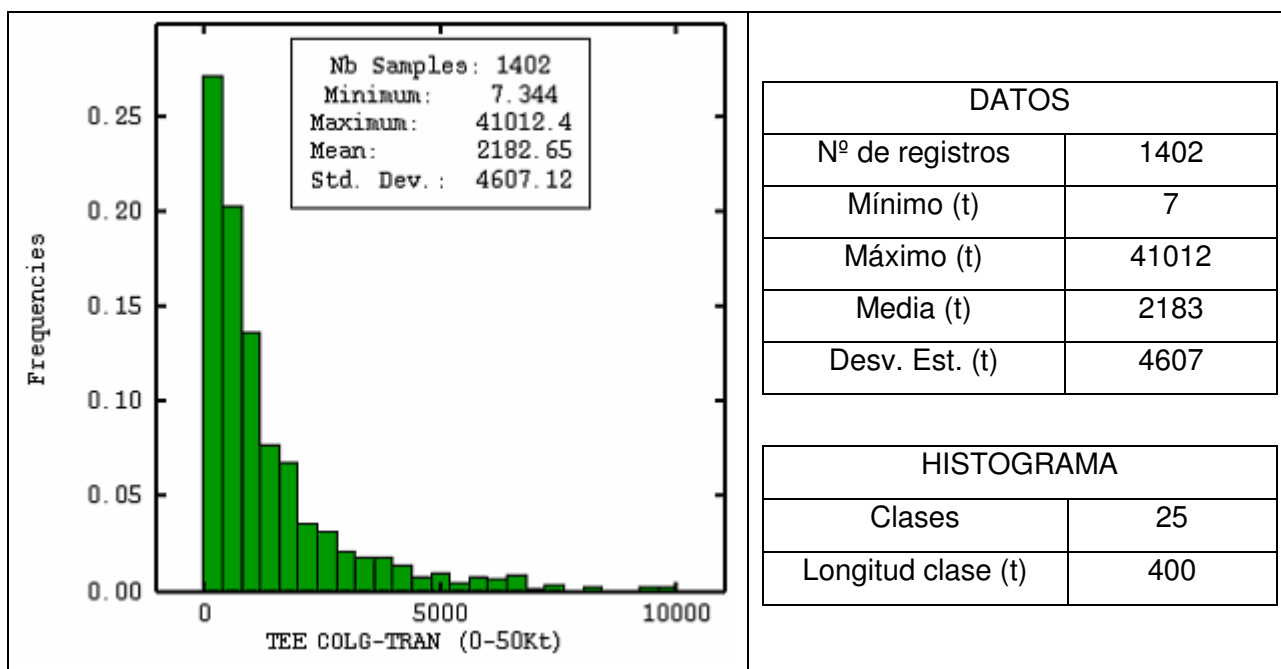


Gráfico 9-3. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 1 (0 – 50Kt).

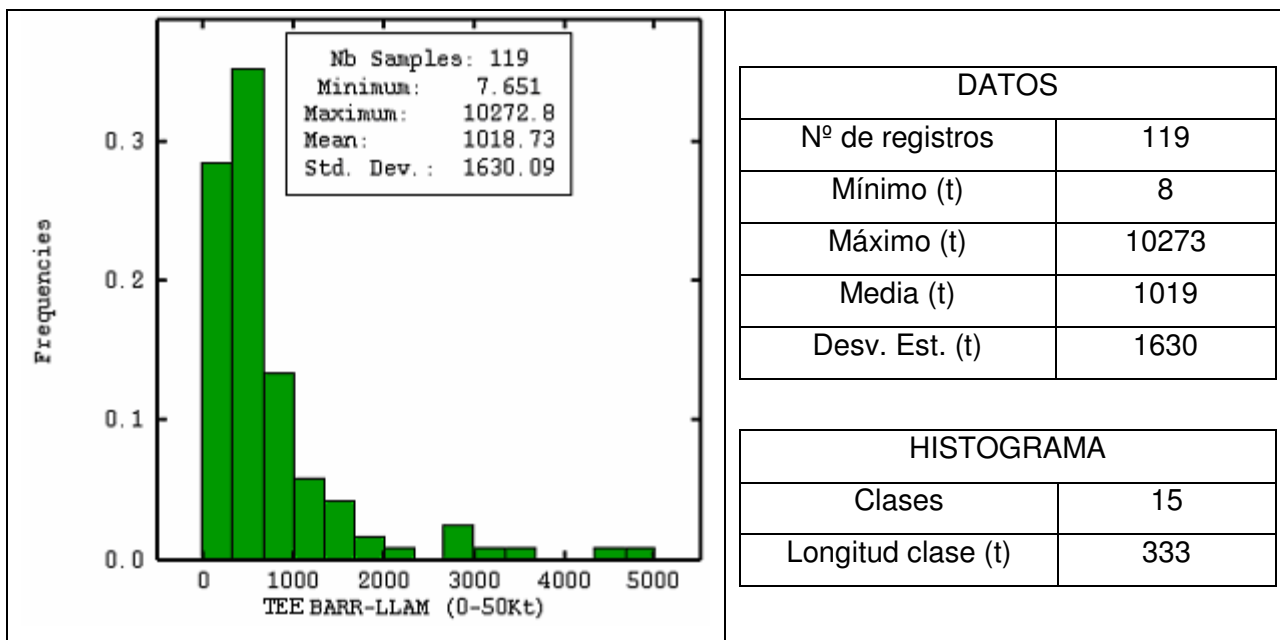


Gráfico 9-4. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 2 (0 – 50Kt).

Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4

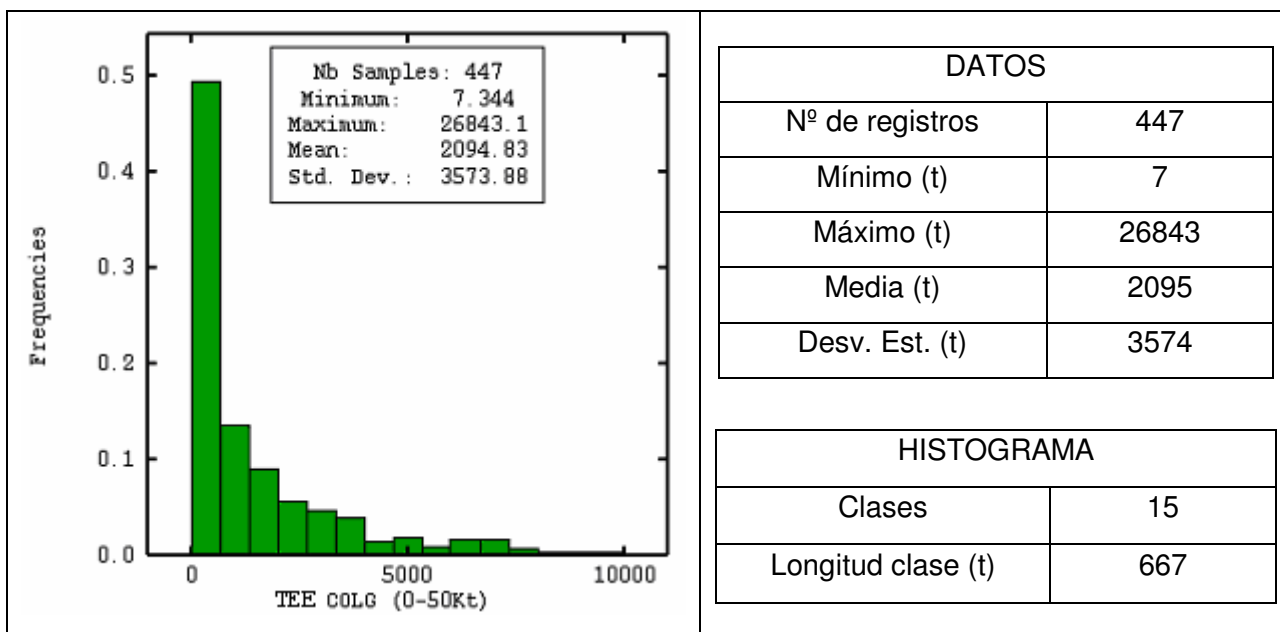


Gráfico 9-5. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 1 (0 – 50Kt).

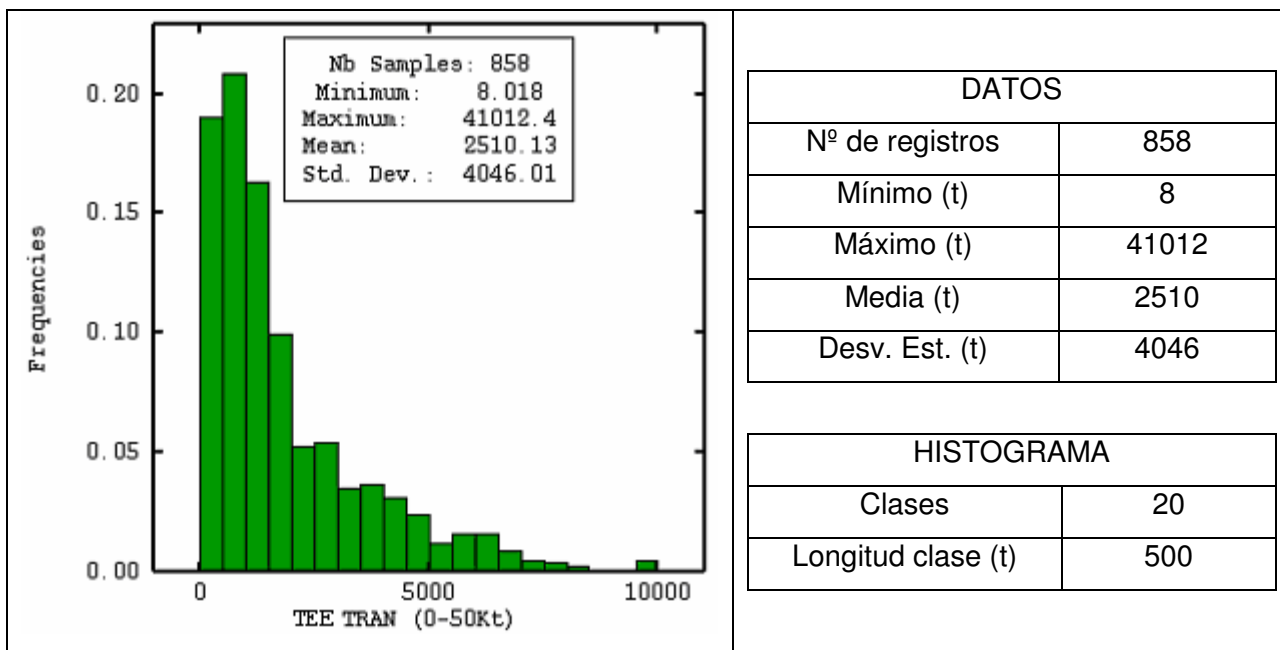


Gráfico 9-6. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 2 (0 – 50Kt).

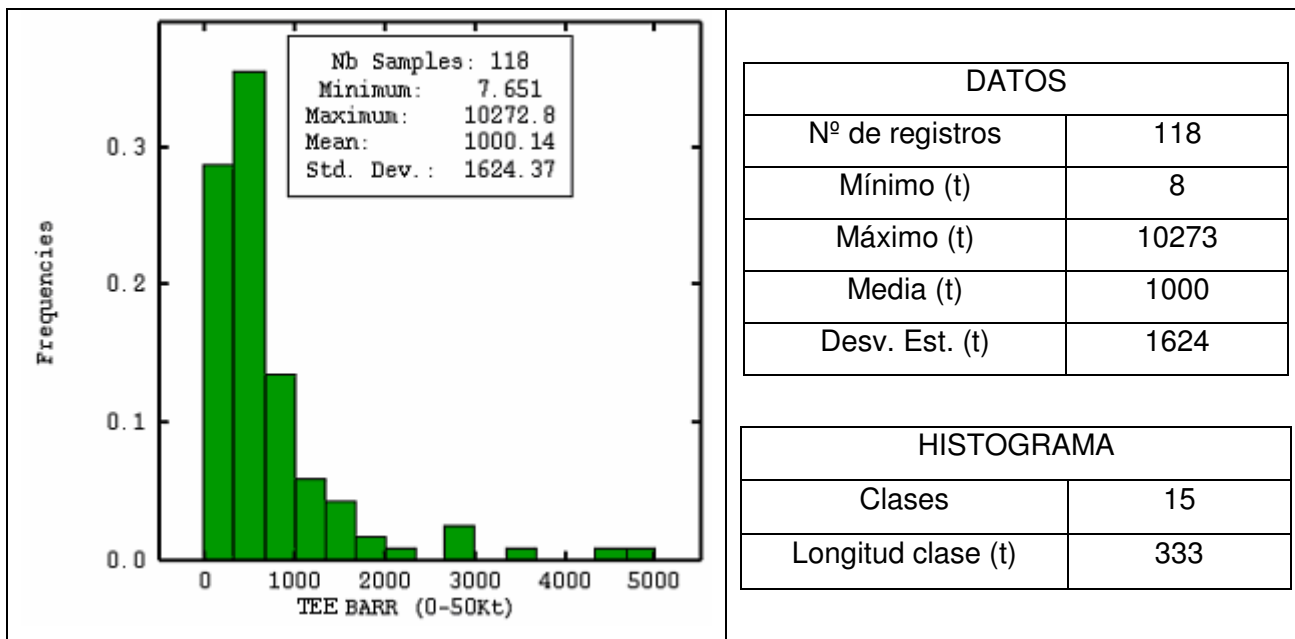


Gráfico 9-7. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 3 (0 – 50Kt).

No existen registros de tonelaje entre eventos de interferencia para el grupo de datos Puntual 4 (llampo) para el intervalo de tonelaje extraído especificado (0-50 Kt).

50 – 150(Kt) extraídas

Estadísticas grupo General

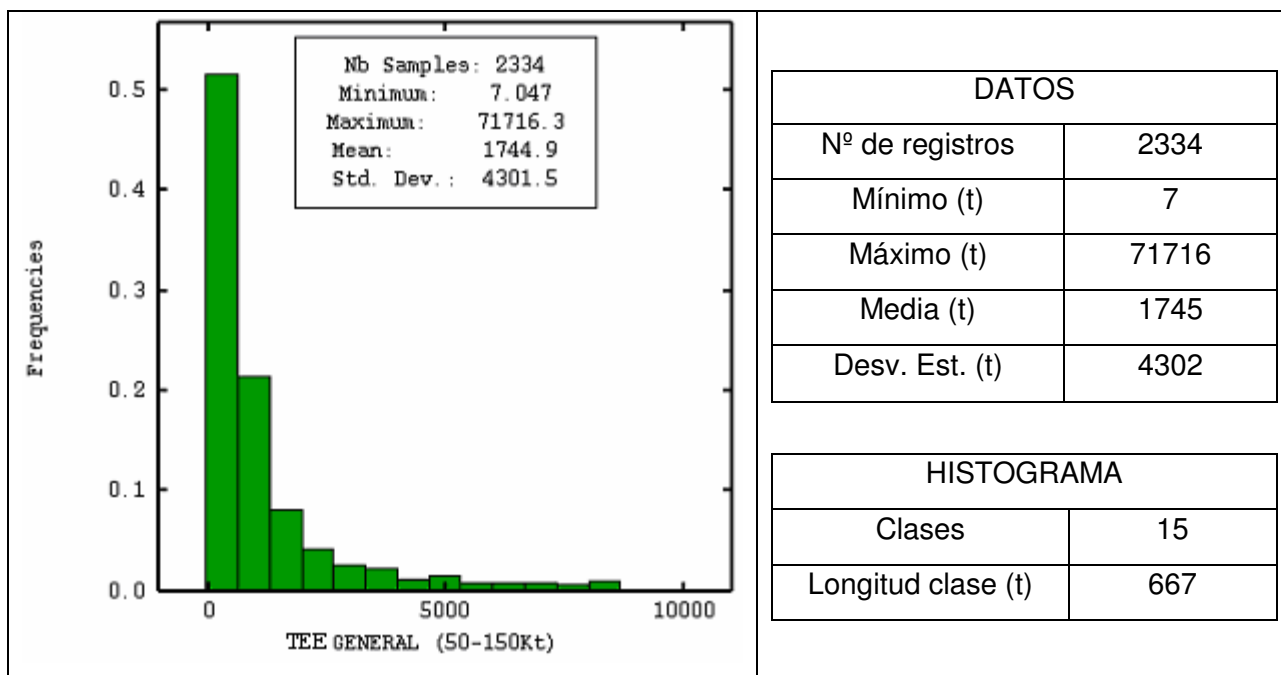


Gráfico 9-8. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (50 – 150Kt).

Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2

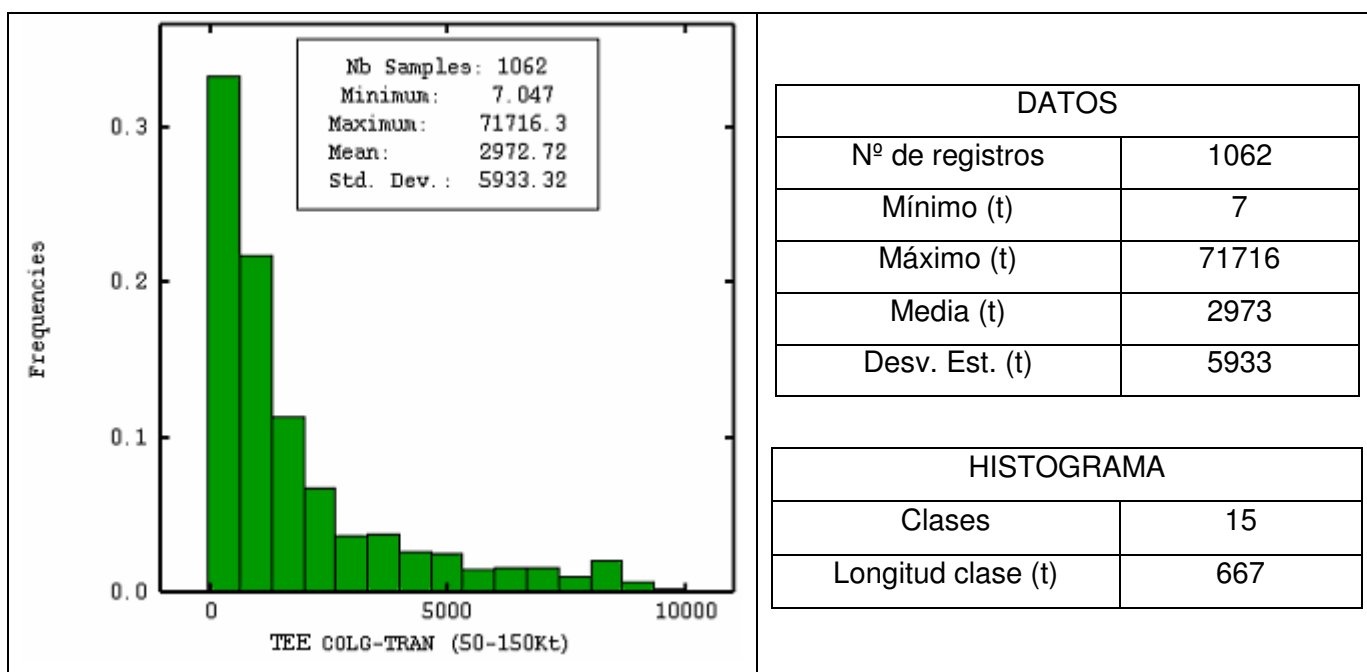


Gráfico 9-9. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 1 (50 – 150Kt).

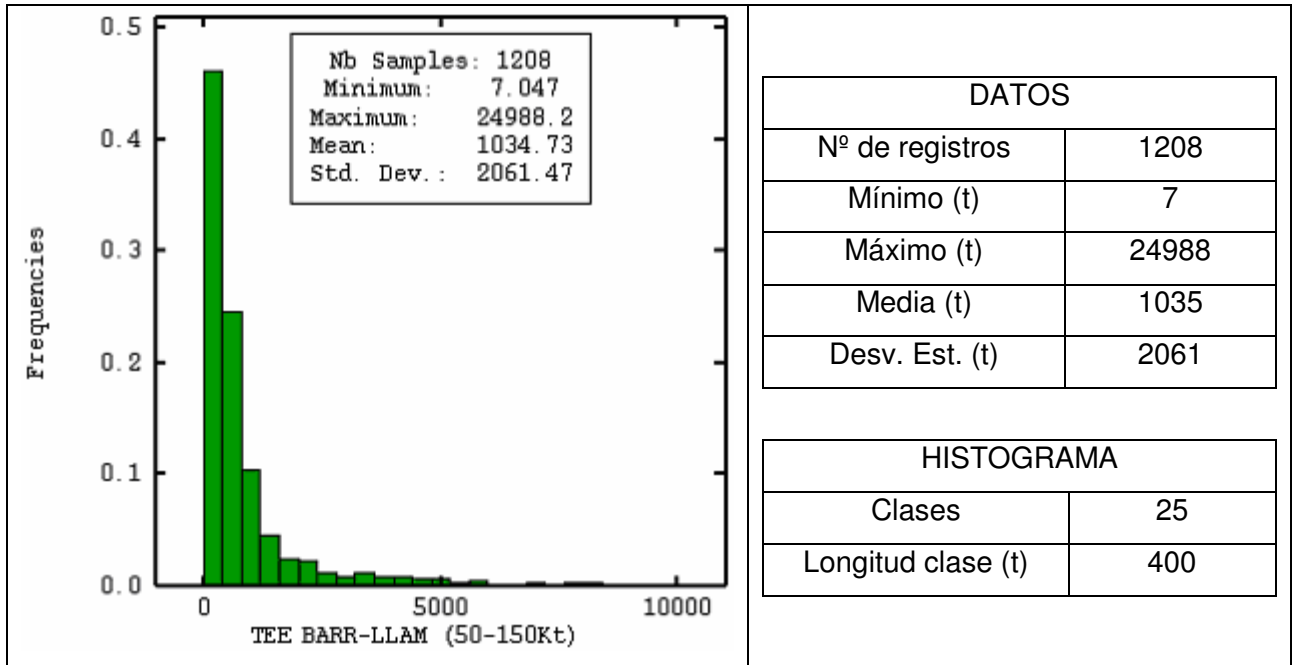


Gráfico 9-10. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 2 (50 – 150Kt).

Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4

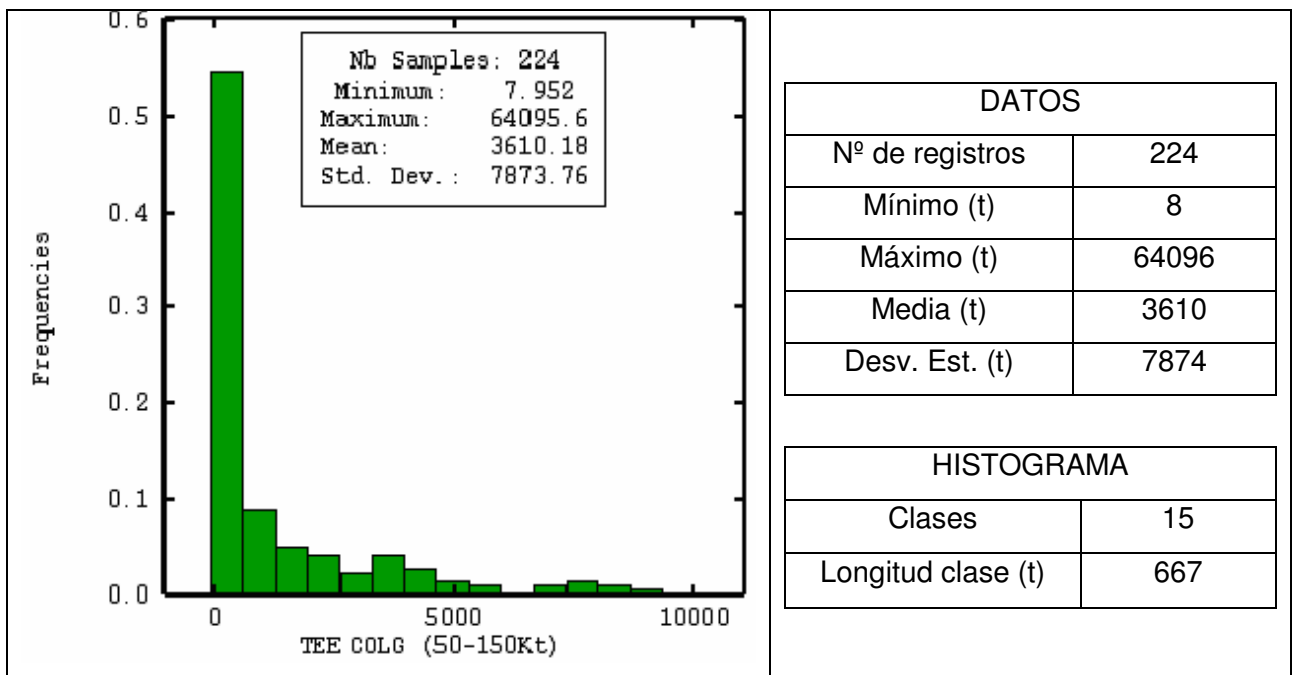


Gráfico 9-11. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 1 (50 – 150Kt).

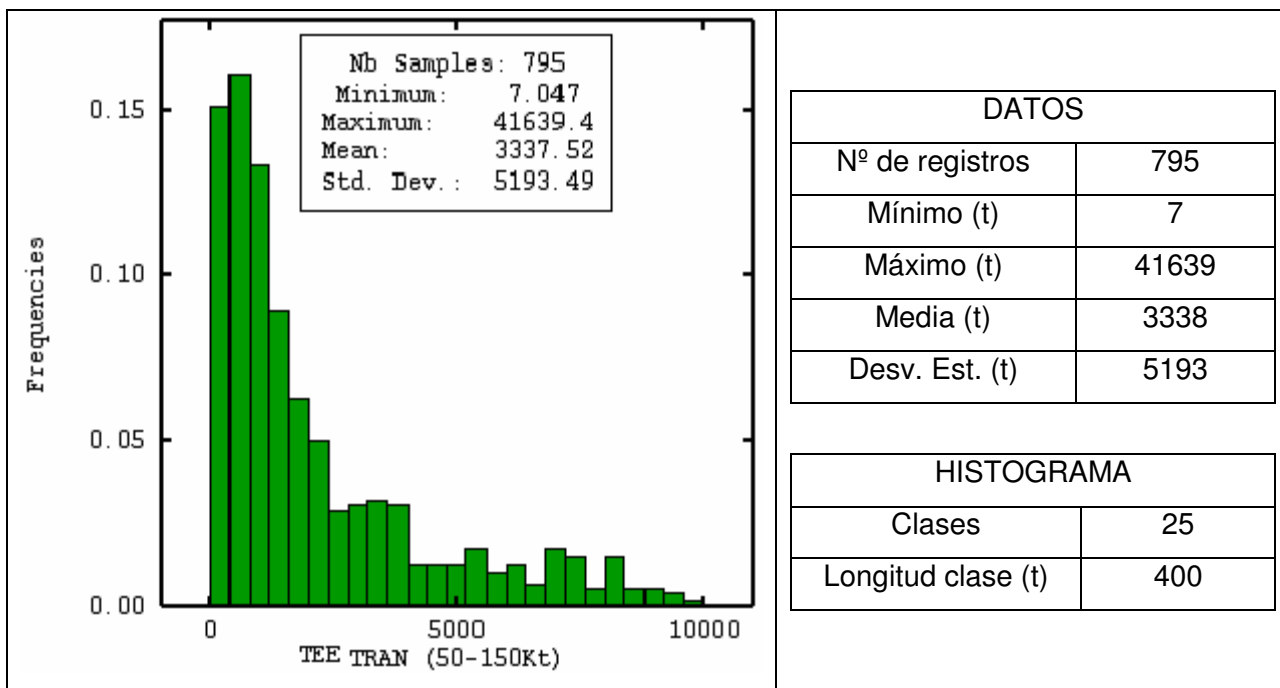


Gráfico 9-12. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 2 (50 – 150Kt).

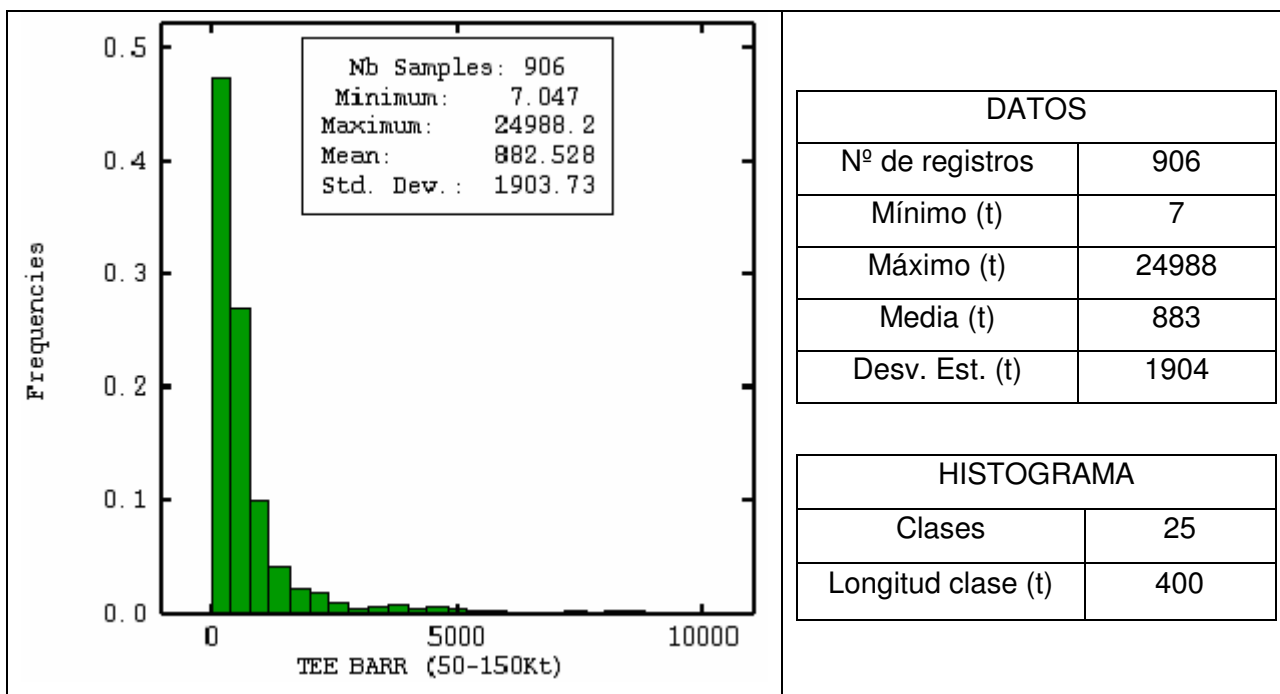


Gráfico 9-13. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 3 (50 – 150Kt).

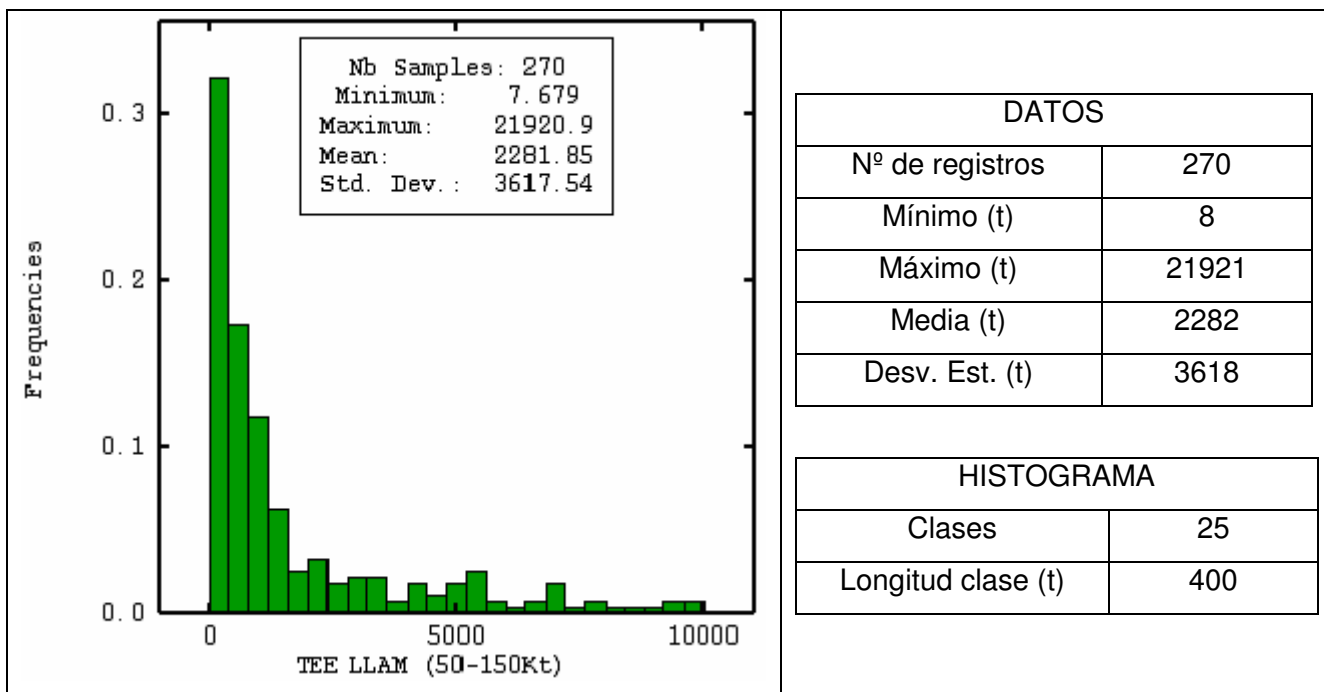


Gráfico 9-14. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 4 (50 – 150Kt).

150 – 250(Kt) extraídas

Estadísticas grupo General

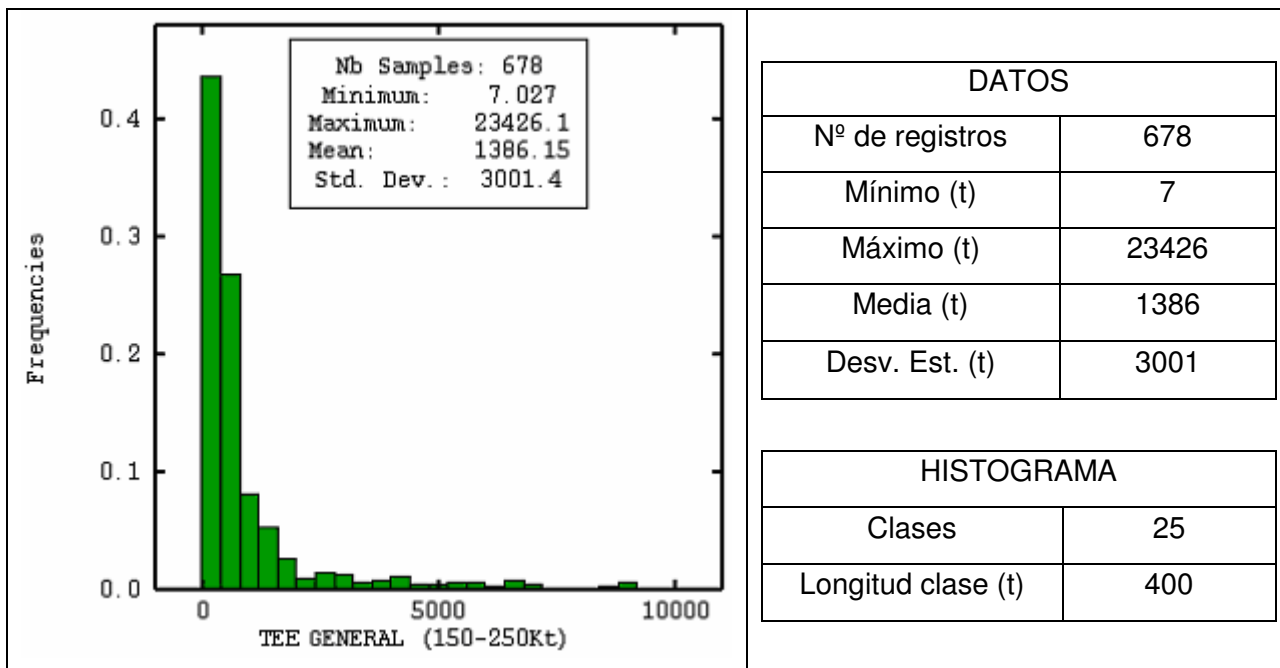


Gráfico 9-15. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (150 – 250Kt).

Estadísticas grupos Fenomenológico 1 y 2

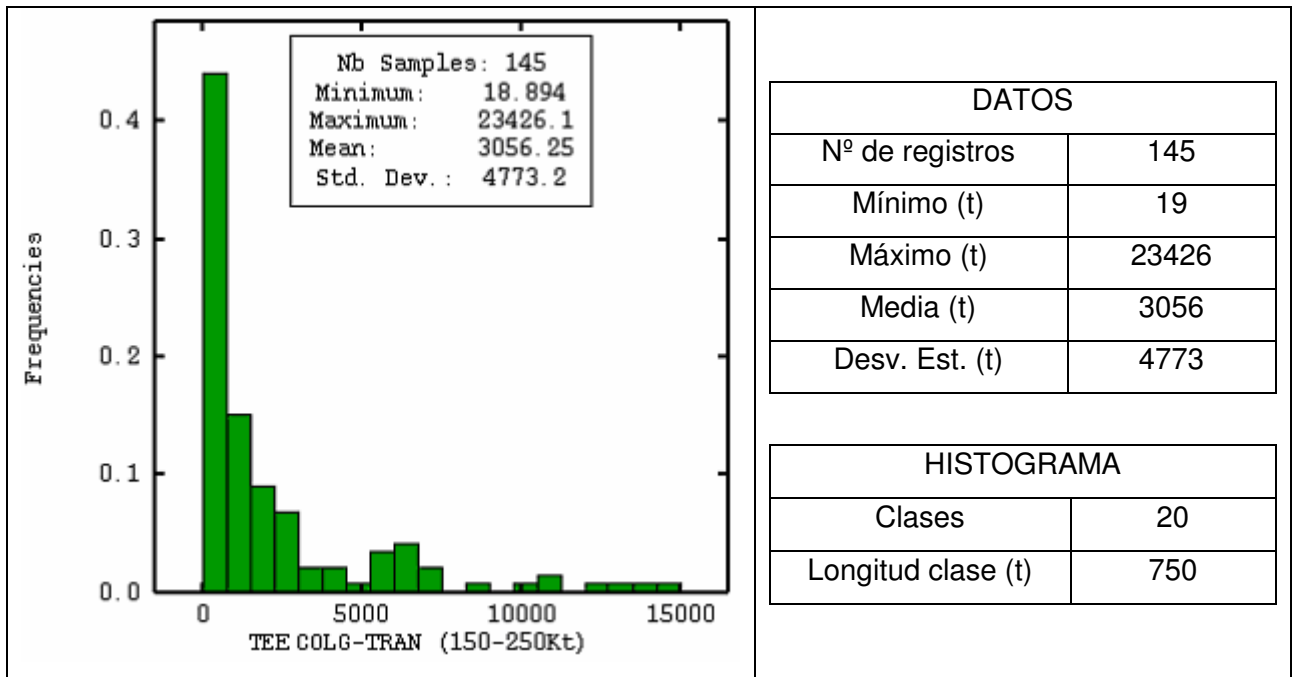


Gráfico 9-16. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 1 (150 – 250Kt).

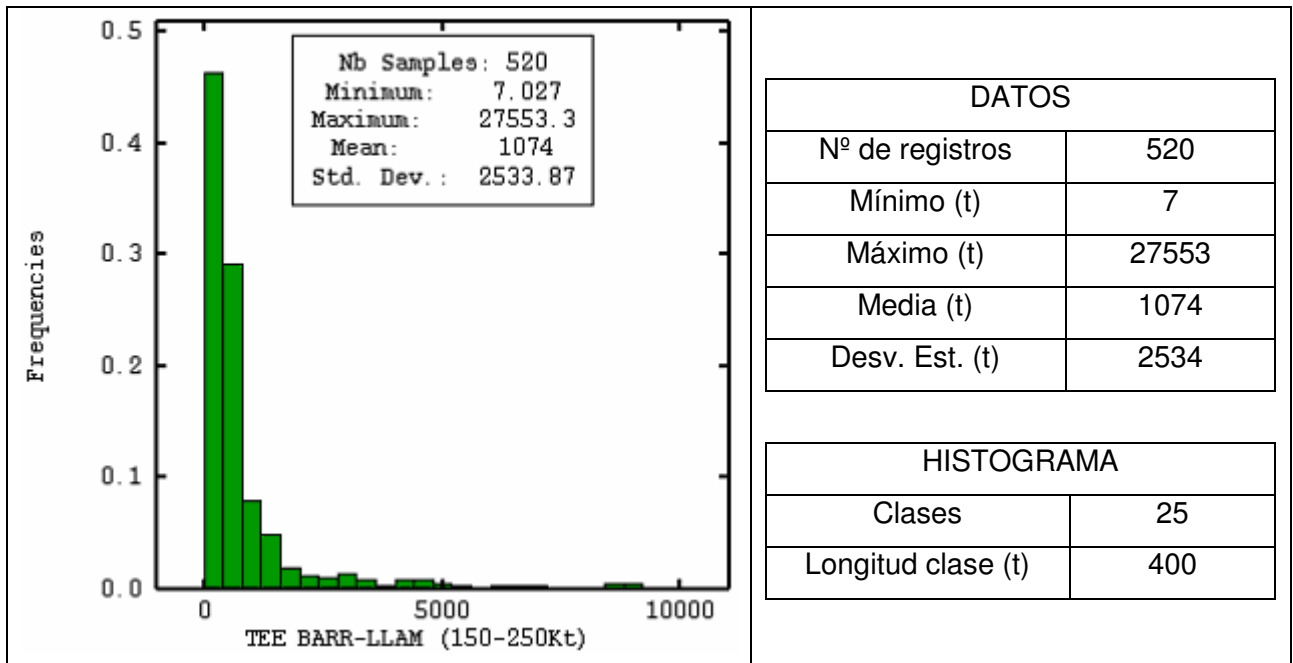


Gráfico 9-17. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Fenomenológico 2 (150 – 250Kt).

Estadísticas grupos Puntual 1, 2, 3 y 4

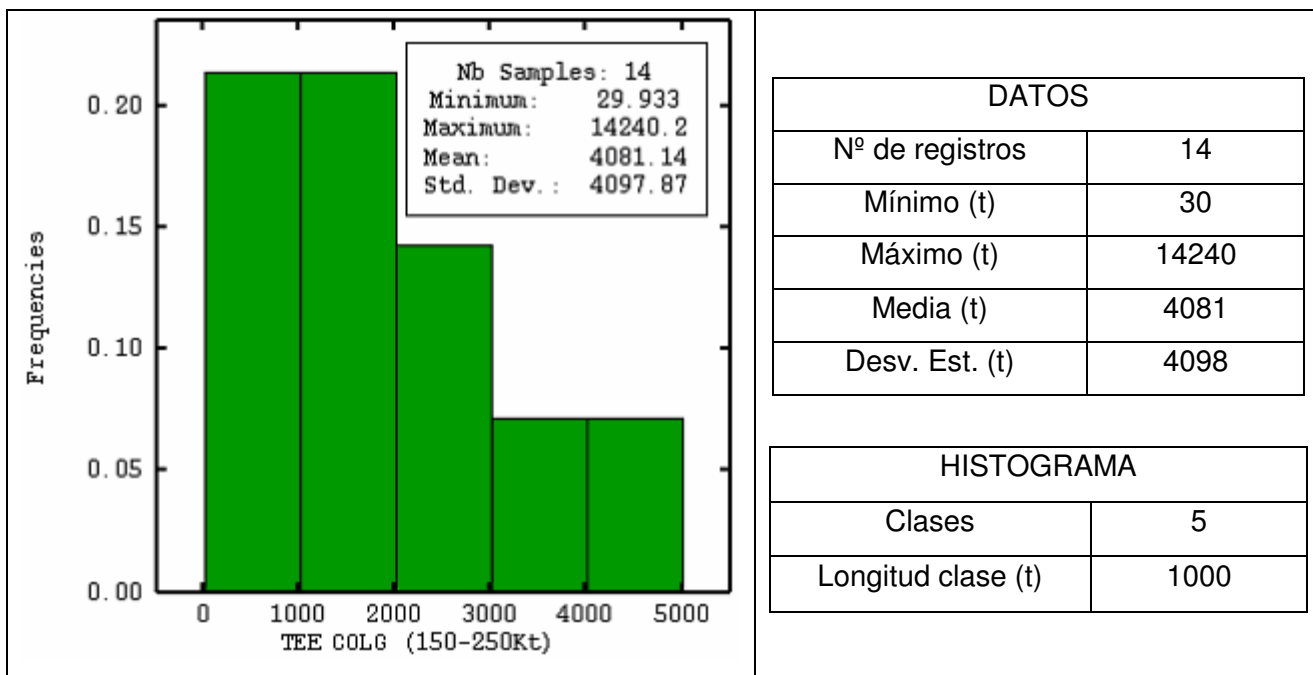


Gráfico 9-18. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 1 (150 – 250Kt).

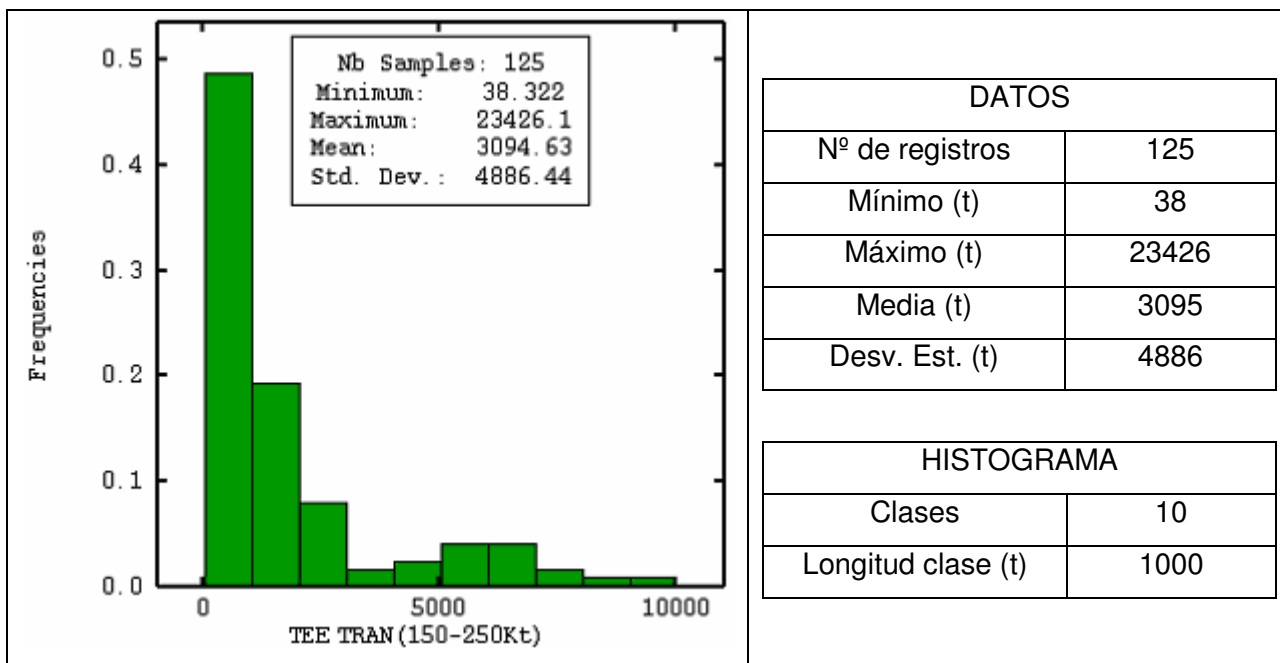
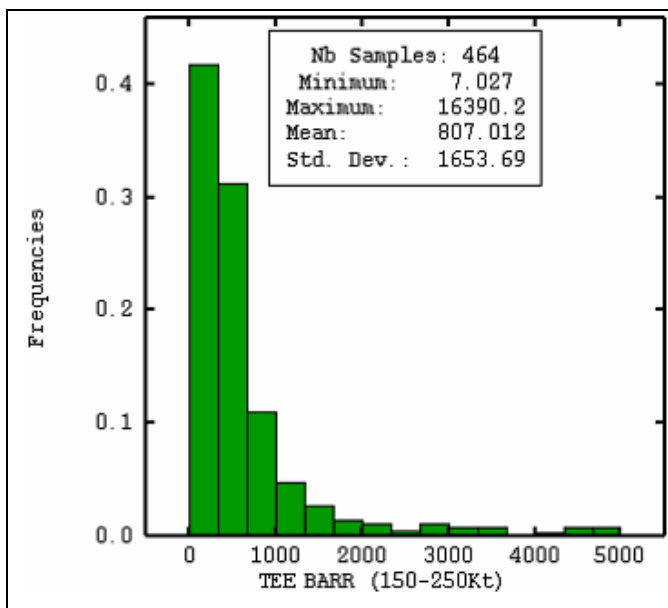


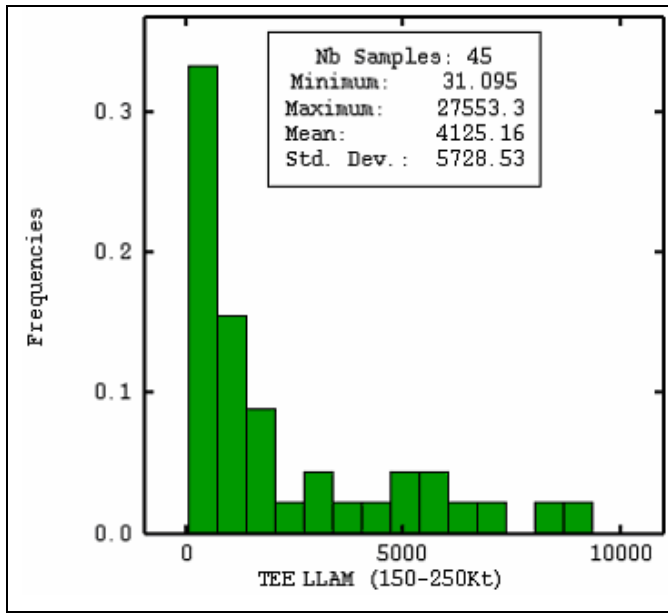
Gráfico 9-19. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 2 (150 – 250Kt).



DATOS	
Nº de registros	464
Mínimo (t)	7
Máximo (t)	16390
Media (t)	807
Desv. Est. (t)	1654

HISTOGRAMA	
Clases	15
Longitud clase (t)	333

Gráfico 9-20. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 3 (150 – 250Kt).



DATOS	
Nº de registros	45
Mínimo (t)	31
Máximo (t)	27553
Media (t)	4125
Des. Est. (t)	5729

HISTOGRAMA	
Clases	10
Longitud clase (t)	1000

Gráfico 9-21. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos Puntual 4 (150 – 250Kt).

9.3 ANEXO C: Detalle estadístico por sectores y rangos de tonelaje

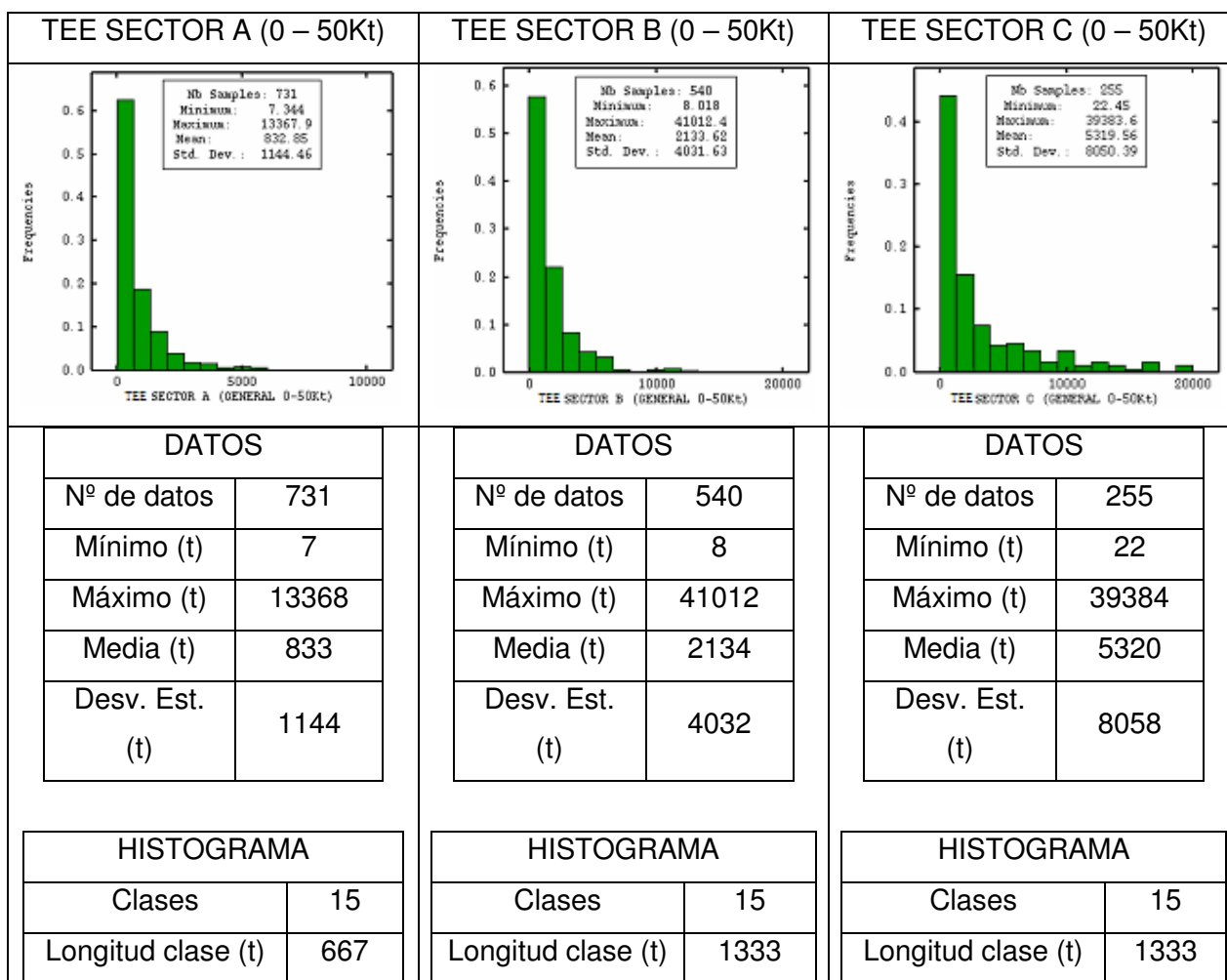


Gráfico 9-22. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (0 – 50Kt) por sectores.

TEE SECTOR A (50 – 150Kt)	TEE SECTOR B (50 – 150Kt)	TEE SECTOR C (50 – 150Kt)
---------------------------	---------------------------	---------------------------

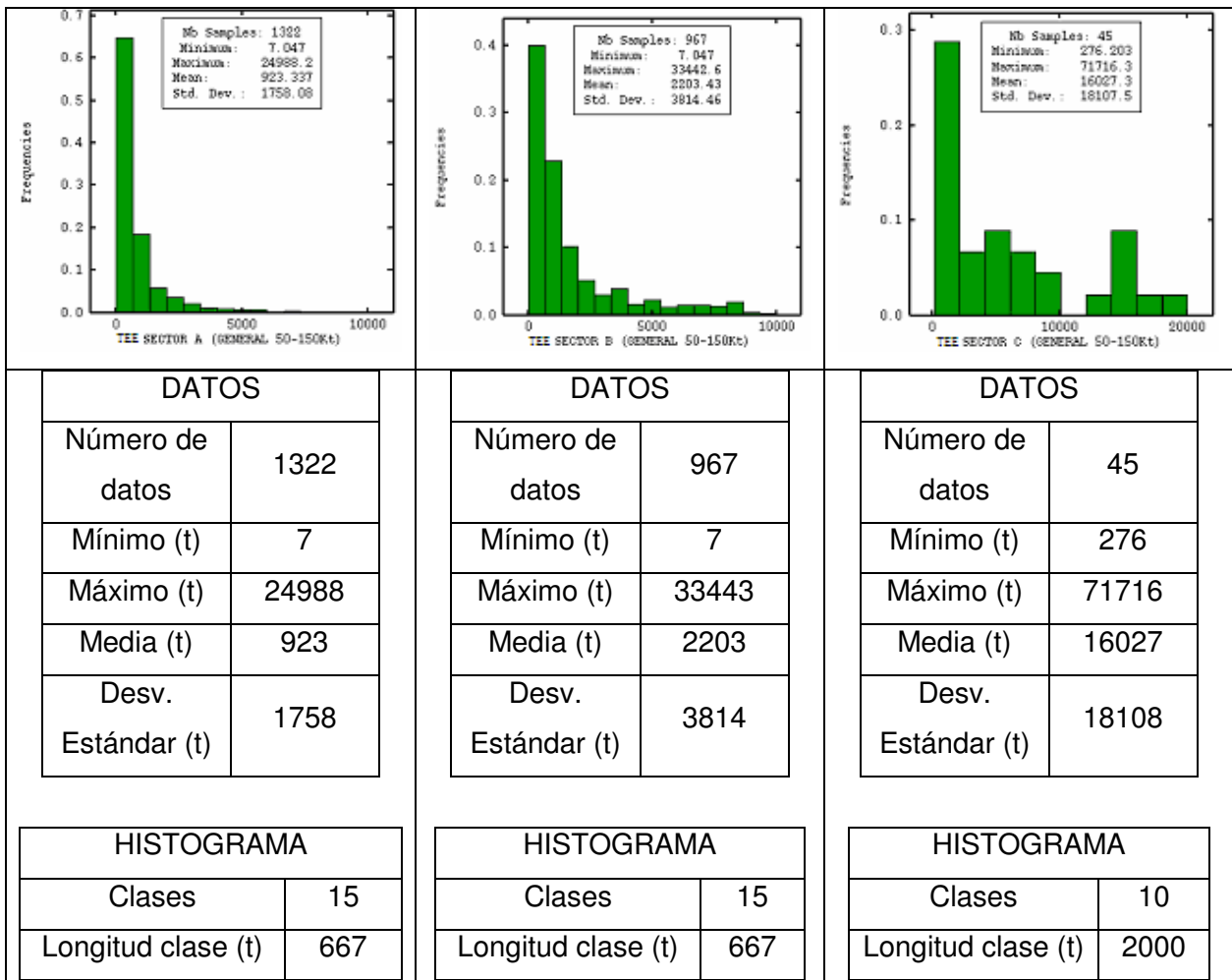


Gráfico 9-23. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (50 – 150Kt) por sectores.

TEE SECTOR A (150 – 250Kt)	TEE SECTOR B (150 – 250Kt)
----------------------------	----------------------------

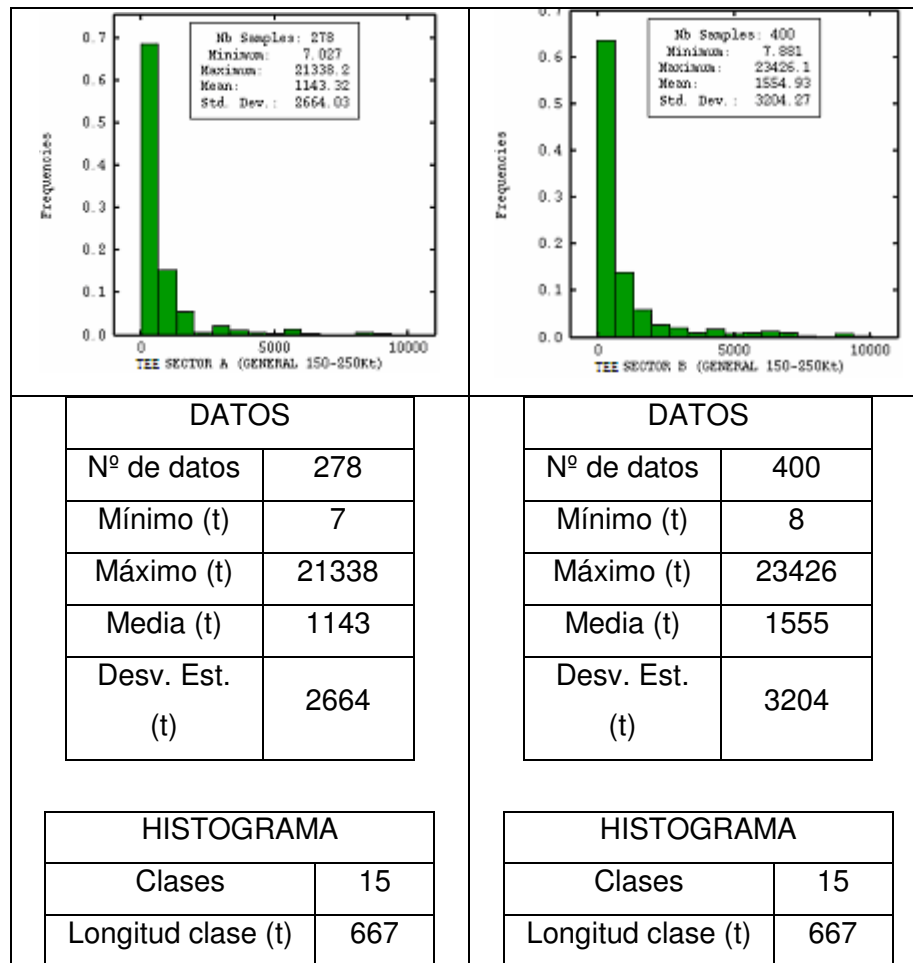


Gráfico 9-24. Histograma y estadísticas básicas de TEE del grupo de datos General (150 – 250Kt) por sectores.

9.4 ANEXO D: Test de hipótesis del ajuste de distribuciones

Las hipótesis a testear son que el TEE para distintos sectores siguen las siguientes distribuciones:

- SECTOR A: Lognormal (921.195,1737.36).
- SECTOR B: Lognormal (2047.64,3768.23).
- SECTOR C: Lognormal(5319.56,8050.39).

Las anteriores se evaluaron mediante el test de bondad de ajuste Chi-2, los resultados obtenidos se enuncian a continuación:

PARÁMETRO	SECTOR A	SECTOR B	SECTOR C
Número de clases	30	30	30
Número de parámetros	2	2	2
Grado del test Chi-2	27	27	27
Chi-2 experimental	35.26	31.74	32.04
Límite para Chi-2 > 5%	38.89	38.89	38.89
Límite para Chi-2 > 10%	35.56	35.56	35.56

Tabla 9-2. Resultados del test Chi-2 de bondad de ajuste.

Es importante destacar que el test realizado a los distintos sectores se realizó con los datos transformados por la función logaritmo natural, por lo que los resultados presentados anteriormente dan cuenta de esto.