UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y PLANIFICACION OPERACIONAL LOS BRONCES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CRISTOBAL ALONSO ORTIZ ROBLES

PROFESOR GUÍA:
SEBASTIAN BLANCO CERDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HANS GÖPFERT HIELBIG
PATRICIO QUIROGA FERRUZ

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas
POR: Cristóbal Alonso Ortiz Robles
Fecha: 06/03/2018
PROFESOR GUÍA: Sebastián Blanco Cerda

DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y PLANIFICACION OPERACIONAL LOS BRONCES

Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la minería es lograr cumplir con las expectativas del negocio, para lo cual año a año se realizan planes estratégicos que permitan alcanzar las metas establecidas, el problema ocurre cuando la operación obtiene un desempeño por debajo de lo planificado. En particular, el año 2012 Anglo American detecta que un gran porcentaje de sus activos no estaba cumpliendo con sus planes, lo que denota cierta falta de confiabilidad en la generación de estos.

En relación a lo anterior, el desarrollo de este trabajo consiste en construir un modelo de simulación simple que permita realizar un análisis rápido de la confiabilidad del plan minero, basándose fundamentalmente en los desempeños históricos de la operación. El modelo permitirá identificar, como un primer paso y de manera general, las limitaciones de capacidad y oportunidades que se puedan presentar. Este modelo formará parte del modelo operacional de Anglo American y toma por nombre Business Structure Performance Model (BSP).

El trabajo comienza con un análisis y levantamiento de los datos elegidos como parámetros o variables de entradas del modelo, luego se definen los ajustes de distribuciones a ciertas variables y se construye un modelo de la operación basado en la cadena de flujo de los procesos unitarios de la mina: servicio, perforación, tronadura, carguío y transporte. Además, se describe el modelo completo para su uso.

Una vez construido el modelo BSP, se valida respecto al año 2017, comparando los resultados reales de extracción obtenidos en ese período con los entregados por el modelo. Como resultado se obtiene que la extracción real total del año 2017 (110.5 Mton) se encuentra dentro del intervalo de confianza con un 90% de probabilidad de acierto entregado por el modelo (116.967 – 118.79 Mton). Luego, se aplica el modelo BSP al año 2018, donde se obtiene que la extracción total del plan para ese año (110.5 Mton) no se encuentra dentro del intervalo de confianza con un 90% de probabilidad de acierto que entrega el modelo, indicando que el plan no se estaría cumpliendo según el desempeño del año 2017. Se evalúan 3 escenarios de mejora, donde se obtiene que una buena alternativa estratégica para obtener una mayor probabilidad de cumplir con el plan y mejor aún, superarlo, es realizar tareas enfocadas en mejorar el uso de disponibilidad de la flota KOM 930 y el rendimiento operativo de las palas de 73 yd3, lo que permitiría con un 80% de probabilidad alcanzar un plan de 110.853 Mton de extracción total, 55.776 Mton de extracción de mineral y 55.053 Mton de extracción de estéril para el año 2018.

Finalmente, el modelo es capaz de proyectar la capacidad de extracción que podría tener la mina el año entrante, pero no es capaz de realizar o estimar el plan. Sin embargo, es una herramienta potente, ya que permite realizar un análisis rápido del desempeño de la mina, encontrar limitantes del proceso y evaluar diversos escenarios de mejora que ayuden a la estrategia del negocio.

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL AS A TOOL FOR ANALYSIS OF CAPACITY AND OPERATIONAL PLANNING LOS BRONCES

One of the great challenges that mining faces, is to achieve business expectations, for which strategic plans are made every year to achieve the established goals. The problem occurs when the operation obtains a performance below what is planned. In particular, in 2012 Anglo American detected that a large percentage of its assets were not complying with their plans, which indicated a certain lack of reliability in the generation of these.

In relation to the above, the development of this work consists of building a simple simulation model that allows a quick analysis of the reliability of the mining plan, based fundamentally on the historical performance of the operation. This model will identify, as a first step and in a general way, the capacity limitations and the opportunities that may exist. This model will be part of the Anglo American operational model and it is called Business Structure Performance Model (BSP).

The work begins with an analysis and study of the data chosen as parameters or variables of the model's inputs, then the distribution adjustments are defined to certain variables and a model of the operation is constructed, which is based on the flow chain of the mine´s unit processes: service, drilling, blasting, loading and transport. In addition, the complete model for its use is described.

Once the BSP model is built, it is validated with respect to 2017, comparing the real extraction results obtained in that period with those generated by the model. As a result, the total real extraction of the year 2017 (110.5 Mton) is within the confidence interval, with 90% probability of success, generated by the model (116.967 - 118.79 Mton). Then, the BSP model is applied to the year 2018, which indices that the total extraction of the plan for that year (110.5 Mton) is not within the confidence interval, with a 90% probability of success, that the model gives, indicating that the plan would not be achieved according to the performance of the year 2017. 3 improvement scenarios are evaluated, indicating that a good strategic alternative to obtain a greater probability to accomplish the plan, and better yet, to overcome it, is to perform tasks that are focused on improving the use of the KOM 930 fleet availability and the operational performance of the shovels of 73 yd3, which would allow, with an 80% probability, to achieve a plan of 110.853 Mton of total extraction, 55.776 Mton of ore extraction and 55.053 Mton of waste extraction for the year 2018.

Finally, the model is capable of projecting the extraction capacity that the mine could have the next year, but it is not capable of making or estimating the plan. However, it is a powerful tool, because it allows a quick analysis of the mine's performance, finding process limitations and evaluating various improvement scenarios, which help the business strategy.

A mis viejitos que siempre
han velado por mí y que son la razón de todo el
esfuerzo y motivación para seguir avanzando y así poder
entregarles la felicidad y el descanso que tanto merecen

AGRADECIMIENTOS

Este proceso, que no ha sido para nada fácil, comienza con un gran cambio en mi vida donde como familia tomamos la decisión de mudarnos desde la ciudad de Los Ángeles, lugar que me vio crecer, a Santiago. Por ello, primero que todo agradezco enormemente a mis viejitos y hermanos por el gran esfuerzo que debieron hacer al tomar esta decisión, donde en ese entonces el escenario no era el mejor, ya que mi viejo, que llevaba años trabajando por nosotros, se encontraba cesante. Agradezco, además el apoyo constante que recibí de mi familia desde el primer día en mi Universidad, nunca me faltó nada a pesar de que las condiciones no eran las mejores, pero siempre supimos como familia salir adelante y lo mejor fue que nunca estuvimos solos, nuestros cercanos siempre se hicieron presentes y nos brindaron su ayuda, por eso agradezco enormemente a cada uno de ellos, tíos, primos, primas, amigos y amigas que aportaron con su ayuda, no los nombro porque de verdad, todos se hicieron presente. Gracias viejito y viejita por el amor que me entregan constantemente, no somos mucho de decirnos cuanto nos amamos, pero tengo claro que es infinito; los amo mucho a pesar de que muchas veces no lo demuestre, lo mismo para mis dos hermanos, con quienes he compartido momentos maravillosos y muy entretenidos, nuestra unión se nota que es muy fuerte y estoy seguro que será así para siempre. Gracias por los valores que me entregaron y que me hacen ser la persona que soy ahora, siempre con humildad y respeto ante todos.

En mi vida tuve la fortuna de tener una infancia maravillosa y que pude disfrutar día a día con mis amigos del pasaje, días que no dejábamos de jugar y disfrutar de la "calle" y que sin lugar a dudas, son años en que se aprende y se crece como persona, gracias a cada uno de ustedes. Agradezco a mi curso de básica y al "4to Bonus Track", que me entregaron mucho, fueron un grupo muy bueno, muy unido y donde pude encontrar personas maravillosas que son parte de mi vida hasta ahora. En particular, quiero agradecer a mi amigo Manuel, alias el "sapo" y a su familia entera, son una familia que quiero mucho y que por muchos años me regalaron momentos increíbles, y les agradezco cada una de las vacaciones que disfrutamos juntos, que fueron muchas y nunca me pidieron nada a cambio, siempre me ayudaron a mí y a mi familia y créanme que nunca olvidaré cada una de las cosas que hicieron por mí, donde a pesar de la distancia y no tener la misma comunicación que antes con Manuel, él siempre estará presente para mí. Así como esta familia, existen muchas otras personas que me brindaron su apoyo incondicional, personas que tengo grabadas en mi cabeza y a quienes sin dudas me encargaré de devolverles la mano. No quiero dejar de mencionar a mi mejor amiga Andrea que a pesar de que el destino nos separó unos 500 km, el contacto sigue y la amistad crece, gracias amiga por estar siempre que te necesito y estar presente en mi vida. Gracias a mis amigos de San Bernardo que tuve la suerte de conocerlos y sentirme acompañado desde el momento que llegué, gracias Pancho y Pale por todo. Gracias a BH, un gran grupo de amigos de la u y que siguen hasta hoy, gracias por todos esos carretes y pichangas que hemos compartido, le agradezco en especial a Oscar Briones, parte de BH, quién me abrió las puertas para tener la posibilidad de realizar mi memoria en Anglo American. Gracias a Dios por cada segundo de mi vida y por las miles de oportunidades y bendiciones brindadas.

Por último, les doy las gracias a cada uno de los integrantes de mi comité, al Seba por darme esta oportunidad, ser excelente persona conmigo y siempre muy generoso, al Pato por lo buena persona que es y la buena disposición que siempre tuvo para enseñarme, y al profe Hans que siempre estuvo disponible para ayudarme cuando lo necesitaba y quién me guio de muy buena manera durante todo este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1
1.1. MOTIVACIÓN 1
1.2. OBJETIVOS 1
1.2.1. Objetivo General 1
1.2.2. Objetivos Específicos 1
1.3. ALCANCES 2
1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO 2
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES 4
2.1. OPERACIÓN LOS BRONCES 4
2.2. FLOTA LOS BRONCES 8
2.3. MODELO OPERACIONAL DE ANGLO AMERICAN (AOM) 9
2.4. BUSINESS IMPROVEMENT 10
2.5. GEOLOGÍA, RECURSOS Y RESERVAS 12
2.6. @RISK 13
CAPÍTULO 3: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 14
3.1. SIMULACIÓN 14
3.1. ESTADÍSTICA 15
3.2. OPERACIONES UNITARIAS RAJO ABIERTO 16
3.2.1. Perforación 17
3.2.2. Tronadura 17
3.2.3. Carguío y Transporte 18
3.2.4. Servicios 18
3.3. MODELO DE TIEMPO ANGLO AMERICAN 18
3.3.1. Definiciones de elemento primario o estado de tiempo 19
3.3.2. Indicadores claves de desempeño (KPI) 20
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL TRABAJO 23
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO 23
4.2. ANÁLISIS DE DATOS 35
4.2.1. Correlación disponibilidad y uso disponibilidad 36
4.2.2. Correlación rendimiento operativo (ton/hora) y distancia media (km): 37
4.2.3. Comportamiento periódico 37
4.2.4. Gráficas de control 39

4.3. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD 40
4.4. CAUSAS ESPECIALES 41
4.5. VALIDACIÓN DEL MODELO 43
4.5.1. Entradas 43
4.5.2. Resultados 48
CAPÍTULO 5: APLICACIÓN MODELO PARA EL AÑO 2018 50
5.1. CASO BASE 50
5.1.1. Entradas 50
5.1.2. Resultados 55
5.2. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS 57
5.2.1. Escenario 1 58
5.2.2. Escenario 2 62
5.2.3. Escenario 3 66
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES 72
CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES 73
CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA 74
CAPÍTULO 9: ANEXOS 75
9.1. Anexo A: Gráficos de control 75
9.2. Anexo B: Validación del modelo 81
9.3. Anexo C: Caso base 2018 92
9.4. Anexo D: Evaluación de Escenarios 103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1.Ubicación geográfica Mina Los Bronces. 4
Figura 2-2. Esquema operación Los Bronces 5
Figura 2-3. Gráfica cantidad de nieve caída por mes real 2016 (año completo) y 2017 (hasta Noviembre). 5
Figura 2-4. Gráficas producción Cu Fino (Kton). 6
Figura 2-5. Gráficas movimiento y exytracción mina (Kton). 6
Figura 2-6. Vista Mina Los Bronces, Mayo 2017. 7
Figura 2-7. Diseño de Fases Operación Los Bronces. 7
Figura 2-8. Pala Bucyrus Erie 495 B. 8
Figura 2-9. Komatsu 930. 9
Figura 2-10. Modelo operacional Anglo American 10
Figura 2-11. Estructura de BI dentro del Modelo operacional Anglo American (AOM). 11
Figura 2-12. Organigrama Business Improvement, Julio 2017. 11
Figura 2-13. Litologías Operación Los Bronces 12

Figura 2-14. Perfil del Modelo de Bloques,de la Operación Los Bronces (colindante a la operación Andina). 13
Figura 3-1. Flujograma de pasos para simular (Heizer y Render, 2004). 14
Figura 3-2. Procesos unitarios mina a cielo abierto 16
Figura 4-1. Flujo general que sigue el modelo. 24
Figura 4-2. Ejemplo gráfico de Salida del Modelo 25
Figura 4-3. Ejemplo de gráfico de Salida por operación unitaria. 26
Figura 4-4. Ejemplo de gráfico de Salida del Primer Nivel: Desarrollo y producción por fase. 26
Figura 4-5. Ejemplo gráfico del análisis de Segundo Nivel: Desarrollo y Producción por Fase. 27
Figura 4-6. Ejemplo gráfico de Salida tercer nivel: Desarrollo o producción por fase. 28
Figura 4-7. Ejemplo de gráfica de Salida del nivel de Stock y de control un proceso (invierno). 29
Figura 4-8. Flujo Modelo BSP Los Bronces. 30
Figura 4-9. Secuencia de la Simulación de Servicio, Perforación y Tronadura. 34
Figura 4-10. Secuencia Condicional Carguío. 34
Figura 4-11. Secuencia Condicional Transporte. 35
Figura 4-12. Secuencia condicional Mineral Expuesto 35
Figura 4-13. Correlación entre Disponibilidad y uso de Disponibilidad en verano e invierno para camiones. 36
Figura 4-14.Correlación entre Disponibilidad y uso de Disponibilidad en verano e invierno para palas 36
Figura 4-15. Correlación entre Rendimiento operativo y Distancia Media. 37
Figura 4-16. Tendencia sobre la Disponibilidad por día en Camiones. 37
Figura 4-17. Tendencia sobre la Disponibilidad de Uso por día en Camiones. 38
Figura 4-18. Tendencia sobre la Disponibilidad de Uso por día en Palas. 38
Figura 4-19. Tendencia sobre la Disponibilidad de Uso por día en Palas. 38
Figura 4-20. Ejemplo selección de datos en períodos estables de disponibilidad para la flota KOM 930, período invierno y verano. 39
Figura 4-21. Selección de Datos estables de disponibilidad de flota KOM 960, Período invierno y verano 40
Figura 4-22. Ejemplo ajustes a variables realizados con @Risk 41
Figura 4-23. Gráfico de Control extracción Fase Infiernillo 5. 42
Figura 5-1. Histogramas de probabilidad de extracción para el año 2018 55
Figura 5-2. Gráficos capacidad de Extracción de la Mina en la etapa de Desarrollo y Producción según modelo año 2018, caso base 57
Figura 5-3. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, caso base 58
Figura 5-4. Gráficos de capacidad operaciones unitarias por fase año 2018, caso base 58
Figura 5-5. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, Escenario 1. 59
Figura 5-6. Gráficos de capacidad operaciones unitarias por fase año 2018, Escenario 1 60
Figura 5-7. Histogramas de probabilidad de extracción de las simulaciones, Escenario 1. 61
Figura 5-8. Extracción Mineral fase Infiernillo 7 de cada simulación, Escenario 1. 62
Figura 5-9. Gráfico de capacidad operaciones unitarias extracción de mineral Fase Infiernillo 7, Escenario 1. 62
Figura 5-10. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, Escenario 2. 63

Figura 5-11. Gráfico de capacidad operaciones unitarias Infiernillo 5 año 2018, Escenario 2. 63
Figura 5-12. Histogramas de probabilidad de extracción de las simulaciones, Escenario 2. ... 65
Figura 5-13. Extracción Mineral fase Infiernillo 7 de cada simulación, Escenario 2. ... 66
Figura 5-14. Gráfico de capacidad operaciones unitarias Infiernillo 7 año 2018, Escenario 2. 66
Figura 5-15. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, Escenario 3. ... 67
Figura 5-16. Gráfico de capacidad operaciones unitarias Infiernillo 7 año 2018, Escenario 3. 68
Figura 5-17. Histogramas de probabilidad de extracción de las simulaciones, Escenario 3. ... 69
Figura 5-18. Extracción fase Infiernillo 5 de cada simulación, Escenario 3. ... 70
Figura 5-19. Extracción fase Infiernillo 7 de cada simulación, Escenario 3. ... 70
Figura 5-20. Gráfico de capacidad operaciones unitarias desarrollo Infiernillo 7 año 2018, Escenario 3. ... 71
Figura 9-1. Gráficos de Control para Camiones CAT 795. ... 75
Figura 9-2. Gráficos de Control para Camiones KOM 930. ... 76
Figura 9-3. Gráficos de Control para Camiones KOM 960. ... 76
Figura 9-4. Gráficos de Control para Palas 73 yd3. ... 77
Figura 9-5. Gráficos de Control para Palas 60 yd3. ... 78
Figura 9-6. Gráficos de Control para Palas 37 yd3. ... 79
Figura 9-7. Gráficos de Control de metros perforados por fase. ... 80
Figura 9-8. Ajustes distribución para flota CAT 795, año 2017. ... 81
Figura 9-9. Ajustes distribución para flota KOM 930, año 2017 ... 82
Figura 9-10. Ajustes distribución para flota KOM 960, año 2017 ... 83
Figura 9-11. Ajustes distribución para pala 73 yd3, año 2017 ... 84
Figura 9-12. Ajustes distribución para pala 60 yd3, año 2017 ... 85
Figura 9-13. Ajustes distribución para pala 37 yd3, año 2017 ... 86
Figura 9-14. Ajustes distribución ton /día para Perforación, año 2017 ... 87
Figura 9-15. Gráficos de control extracción Casino 2 e Infiernillo 5, año 2017 ... 88
Figura 9-16. Histogramas de probabilidad extracción total 2017. ... 89
Figura 9-17. Histogramas de probabilidad extracción mineral 2017. ... 90
Figura 9-18: Histogramas de probabilidad extracción estéril 2017. ... 91
Figura 9-19: Ajustes distribución para flota CAT 795, año 2018 ... 92
Figura 9-20. Ajustes distribución para flota KOM 930, año 2018 ... 93
Figura 9-21.Ajustes distribución para flota KOM 960, año 2018 ... 94
Figura 9-22. Ajustes distribución para pala 73 yd3, año 2018 ... 95
Figura 9-23. Ajustes distribución para pala 60 yd3, año 2018 ... 96
Figura 9-24. Ajustes distribución para pala 37 yd3, año 2018 ... 97
Figura 9-25. Ajustes distribución ton/día para perforación, año 2018 ... 98
Figura 9-26. Gráficos de control extracción Casino 5 e Infiernillo 7, año 2018 ... 99
Figura 9-27. Histogramas de probabilidad extracción total 2018. ... 100
Figura 9-28. Histogramas de probabilidad extracción mineral 2018. ... 101
Figura 9-29. Histogramas de probabilidad extracción estéril 2018. ... 102
Figura 9-30. Histograma probabilidad extracción de cada simulación por fase año 2018, Escenario 1 ... 103
Figura 9-31. Histograma probabilidad extracción de cada simulación por fase año 2018, Escenario 2 ... 104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Flota Operación Los Bronces hasta Mayo del 2017..... 8
Tabla 3-1. Categorías en modelo de tiempo de Anlgo American..... 19
Tabla 3-2.Concepto y descripción categoría de tiempo..... 19
Tabla 4-1. Operaciones unitarias y stocks presentes en el modelo..... 29
Tabla 4-2. Entradas del Modelo..... 32
Tabla 4-3. REM por cada Fase según plan año 2017. 43
Tabla 4-4. Parámetros para Stocks año 2017..... 44
Tabla 4-5. Distribuciones de probabilidad de cada proceso para el año 2017..... 44
Tabla 4-6. Distancia Media de para el 2017. 45
Tabla 4-7. Distribuciones para KPI de camiones año 2017..... 46
Tabla 4-8. Dsitribuciones KPI palas 2017 47
Tabla 4-9. Parámetros y distribuciones para causas especiales, Casino 2 año 2017 47
Tabla 4-10. Parámetros y distribuciones para causas especiales, Infiernillo 5 año 2017 48
Tabla 4-11. Parámetros y distribuciones para causas especiales, Infiernillo 7 año 2017 48
Tabla 4-12. Valores de la Capacidad de Extracción para el 2017, con 90% de confianza..... 48
Tabla 4-13. Comparación extracciones del año 2017..... 49
Tabla 5-1. REM por Fase año 2018..... 50
Tabla 5-2. Parámetros utilizados para los Stock año 2018 51
Tabla 5-3. Distribuciones de probabilidad de cada proceso para el año 2018..... 51
Tabla 5-4. Distancia Media utilizada según planificación año 2018..... 52
Tabla 5-5. Distribuciones para KPI camiones año 2018 53
Tabla 5-6. Distribuciones para KPI palas año 2018 54
Tabla 5-7. Parámetros y distribuciones para causas especiales del modelo, Infiernillo 5..... 54
Tabla 5-8. Parámetros y distribuciones para causas especiales del modelo, Infiernillo 7..... 55
Tabla 5-9. Valores de la Capacidad de Extracción para el 2018, con 90% de confianza..... 55
Tabla 5-10. Comparación extracciones año 2018..... 56
Tabla 5-11. Comparación extracciones Infiernillo 5 año 2018. 56
Tabla 5-12. Comparación extracciones Infiernillo 7 año 2018. 57
Tabla 5-13. Parámetros disponibilidad de los KOM 930, Escenario 1..... 59
Tabla 5-14. Parámetros disponibilidad KOM 930, Escenario 2..... 63
Tabla 5-15. Parámetros rendimiento operativo pala 73 yd3, Escenario 3. 67
Tabla 9-1.Asignación flota camiones año 2017..... 87
Tabla 9-2. Asignación palas año 2017..... 88
Tabla 9-3. Asignación flota camiones año 2018..... 98
Tabla 9-4. Asignación palas año 2018..... 99

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

El año 2012, Anglo American realiza un análisis de todos sus activos, donde se descubre que alrededor del 12% de ellos estaban cumpliendo con sus planes anuales, lo que llevó a la necesidad de indagar en las causas de este suceso y así poder mejorar este rendimiento. Dentro de estas causas, se detecta que los planes generados tienen una baja confiabilidad producto de la falta en el análisis previo de los datos o variables de entrada para la realización del plan, lo que se traduce en una sobreestimación de las capacidades.

El año 2014, Anglo American comenzó a implementar en sus principales operaciones un nuevo modelo de gestión denominado Anglo American Operating Model (AOM), el cual tiene por objetivo principal la realización de planes con una alta confiabilidad de cumplimiento en base a un esquema que conecte las expectativas del negocio junto a la planificación operacional, la gestión del trabajo y una retroalimentación, de manera continua y cíclica.

En particular, la operación Los Bronces con sus factores tanto internos como externos, asociados a las condiciones actuales de la mina, hacen que los procesos adquieran cierta variabilidad e inestabilidad, disminuyendo la posibilidad de realizar predicciones confiables.

Dentro del marco de Planificación Operacional del AOM se define un bloque que permita establecer los objetivos de desempeño, por lo cual nace la necesidad de crear un modelo de simulación que tiene por nombre “Business Structure Performance Model” (BSP) cuyo fin es realizar un análisis inicial a las variables que son principales para el diseño de los planes de producción, obteniendo las capacidades logradas con ello, y así identificar oportunidades y limitaciones en los ciclos de planificación futuros que ayuden a una mejor toma de decisiones, priorizar alternativas y a una evaluación de diversos escenarios, basándose en los procesos de la operación minera, intentando de alguna forma cuantificar las variables que generan incertidumbre en el plan, para finalmente obtener resultados que permitan el cumplimiento del plan.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es realizar un modelo de simulación aplicado a Los Bronces, enmarcado en el nuevo modelo de operación de Anglo American, que ayude a revisar y definir la confianza de cumplir los objetivos o expectativas del negocio.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para poder cumplir con el objetivo general, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Implementar el modelo de Simulación interno de Anglo American de acuerdo a las condiciones actuales de la mina Los Bronces.
- Validar modelo, analizar y comparar resultados.
- Análisis de capacidad actual de la mina e identificar cuellos de botella de la operación.
- Análisis para el plan del año entrante con data histórica del año anterior.
- Integrar modelo con proceso de planificación.

1.3. ALCANCES

Los alcances definidos para este trabajo consisten en:

- El modelo se centra en los procesos de operación de la mina LB, desde Servicio hasta el vaciado en el Chancador Primario.
- Se toma sólo la extracción de material de la mina y el material lixiviable se hace parte del estéril.
- No se consideran los costos ni los beneficios o ingresos de la mina.
- Se hace una distinción en la simulación entre la operación verano e invierno. El invierno considera los meses desde abril hasta septiembre y el verano los restantes.
- Se trabaja en Excel con una extensión llamada @Risk.
- Los datos de los planes utilizados para el desarrollo y posterior análisis de los resultados son datos reales y de plan entregados por la mina.

1.4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se describen los pasos a seguir para la realización de este trabajo:

1. **Inducción y familiarización**

Para todo trabajo o estudio en una operación minera siempre se requiere de una inducción y familiarización sobre la operación completa de Los Bronces, para comprender cada proceso involucrado, los estándares de seguridad, normas y reglas por las cuales se rige.

2. **Definición trabajo y revisión bibliográfica**

En este paso se busca definir bien los objetivos y alcances que tendrá el modelo a desarrollar junto con la posterior revisión bibliográfica relacionada al tema.

3. **Definición de los Indicadores claves.**

Se identifican y seleccionan las variables que se deben incluir en el modelo.

4. **Recopilación de datos**

Se hace uso de la plataforma Powerview con programación en lenguaje SQL, la cual permite obtener una base de datos desde Dispatch® y poder exportarla a Excel, lo que una vez definidas las entradas del modelo permitirá el levantamiento de datos y análisis de ellos.

5. **Reunión con personas claves**

Consiste en reunirse con agentes que tengan relación directa con cada proceso unitario de la mina y con agentes que sean parte del desarrollo del nuevo Modelo Operacional De Anglo American (AOM)

6. **Generación del modelo**

Se definen las entradas y salidas del modelo para su construcción, junto a todas las demás variantes que tenga y un análisis de los datos para la generación de las distribuciones y valores de entrada.

7. **Análisis y validación del Modelo**

Etapa en la cual una vez construido el modelo se valida mediante una comparación de lo que entregue para el 2017 contra el plan anual y lo real de ese año. Luego se corre el modelo para el año 2018 y se compara con el plan de ese año, para luego aplicar el modelo planteando diversos escenarios para un posterior análisis de los resultados.

8. **Entrega del modelo**

Consiste en una entrega del modelo a la gerencia de Business Improvement, con una presentación y con las recomendaciones y mejoras futuras a realizar en el modelo

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

2.1. OPERACIÓN LOS BRONCES

La mina Los Bronces es una propiedad de Anglo American (50,1%)[1], el yacimiento fue descubierto el año 1862 y en 1916 comienza a ser explotado por la compañía minera Disputada Las Condes y el año 2002 Anglo American adquiere esta propiedad.

Tiene como principal ruta de acceso el camino a Farellones (Ruta G-21) hasta Corral Quemado, donde empieza el camino hacia Paso Marchant y la mina. Su altura varía entre los 3000 y 4200 msnm.

En la figura 3.1 se observa su ubicación, que tiene como coordenadas geográficas 33º 01’ latitud Sur y 70º 18’ longitud Oeste, además se aprecia la particularidad de estar colindante a Andina, mina perteneciente a CODELCO.

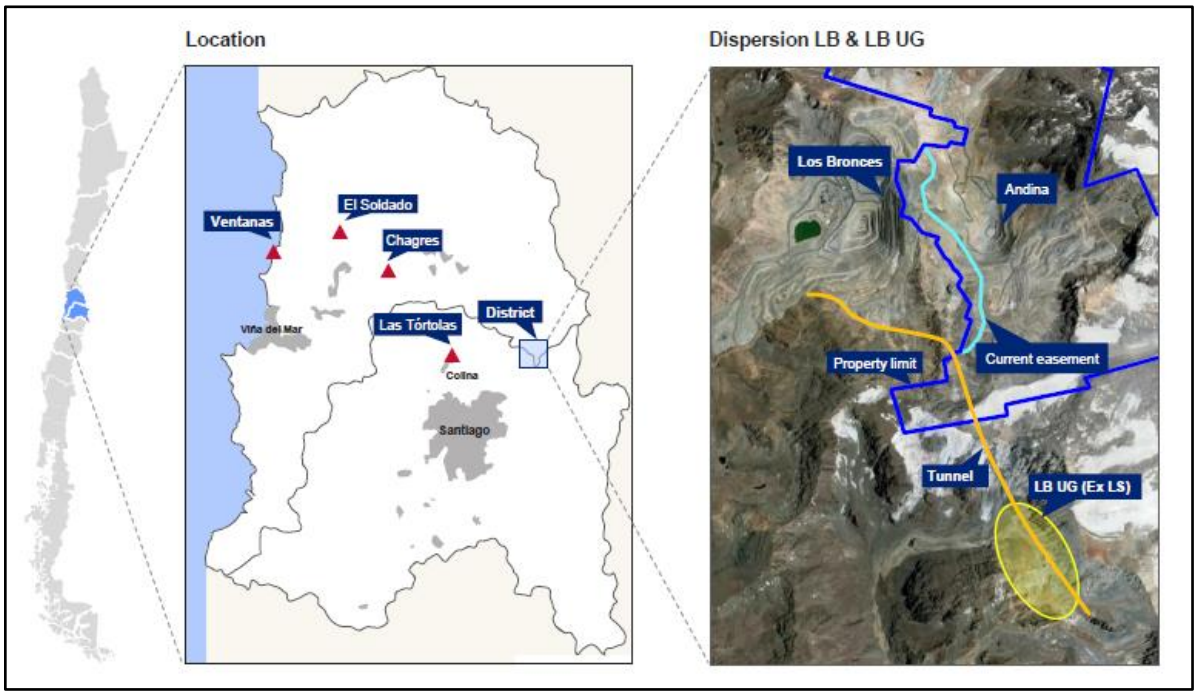


Figura 2-1.Ubicación geográfica Mina Los Bronces..

Los Bronces es una mina a rajo abierto de cobre y molibdeno, donde el mineral que se extrae es enviado a las plantas de Molienda Los Bronces y Confluencia, y luego es transportado por un mineroducto hacia la planta de flotación Las Tórtolas en el caso de Los Bronces y hacia la planta de flotación Las Tórtolas 2, en el caso de Confluencia donde finalmente se produce el cobre y molibdeno contenido en concentrados. Además, en la mina se realiza un proceso de lixiviación en

[1] Codelco-Mitsui dueños del 29,5%, y Mitsubishi de un 20,4%.

la planta San Francisco produciendo cobre en cátodos. A continuación se muestra un esquema que describe lo mencionado.

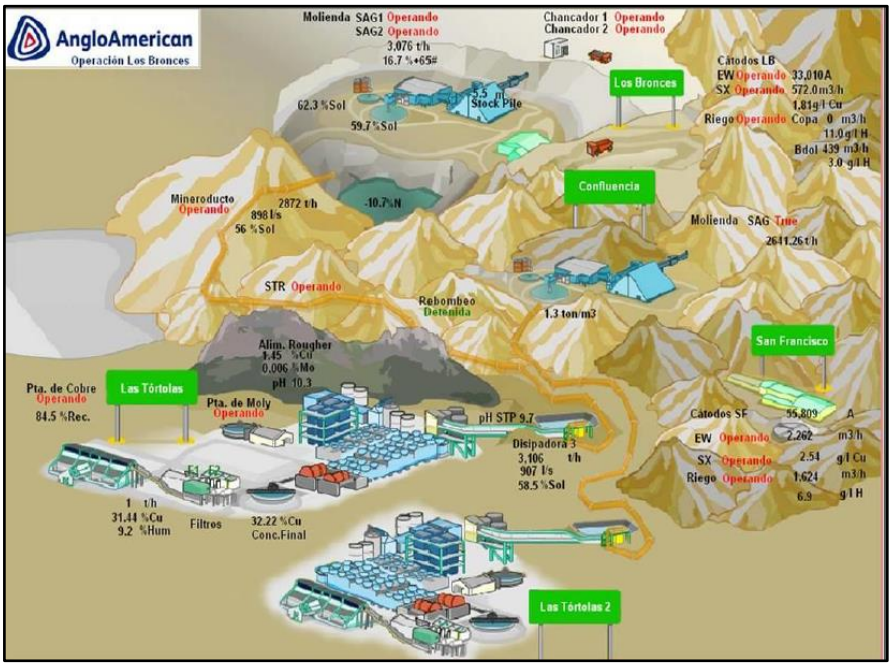


Figura 2-2. Esquema operación Los Bronces

Un factor que caracteriza a esta operación es su condición climática, ya que al encontrarse en la alta cordillera está expuesta a grandes caídas de nieve y bajas temperaturas durante todo el año, en particular en el período de invierno, el cual considera los meses desde abril a septiembre, mientras que la temporada de verano consiste en los otros 6 meses restantes. También en el verano ocurren tormentas eléctricas que son capaces de detener la operación.

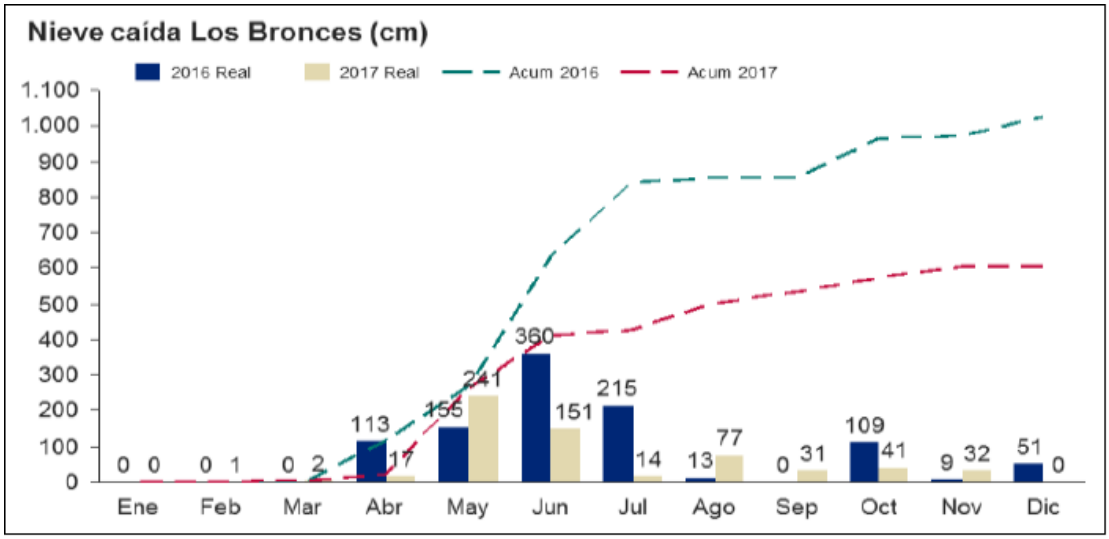


Figura 2-3. Gráfica cantidad de nieve caída por mes real 2016 (año completo) y 2017 (hasta Noviembre).

La operación ha experimentado un mal rendimiento en cuanto al cumplimento de sus planes, ya que desde el año 2015 al 2017 ha estado por debajo de este (figuras 3-4 y 3-5). Para Los Bronces el año 2016 tuvo una serie de sucesos que afectaron estos resultados, siendo el más significativo las huelgas del personal propio y contratistas.

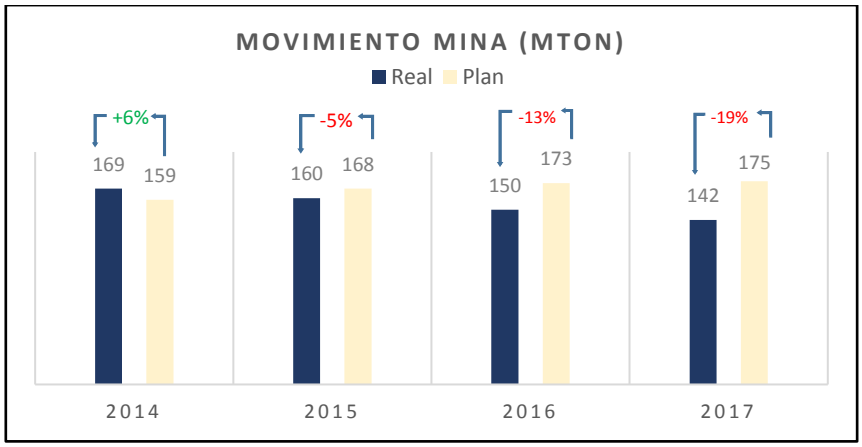


Figura 2-4. Gráficas producción Cu Fino (Kton).

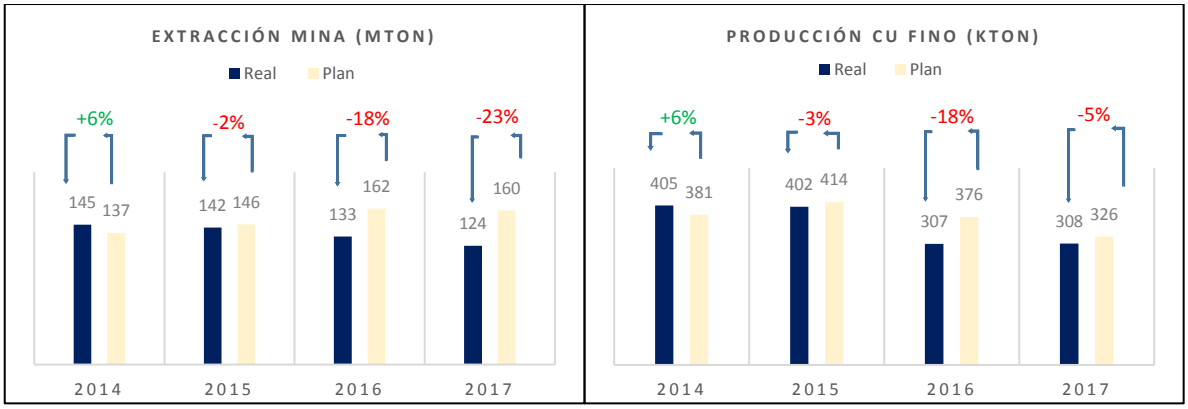


Figura 2-5. Gráficas movimiento y exytracción mina (Kton).

A Octubre del 2017, la mina cuenta con 5 fases activas en extracción: Casino 2, Donoso 2, Infiernillo 5, Infiernillo 7A y Donoso 1 (Figura 3-6), de las cuales Donoso 2 e Infiernillo 7 se encuentran en etapa de desarrollo y Donoso 1 en sus etapas finales y en vías de desaparecer.

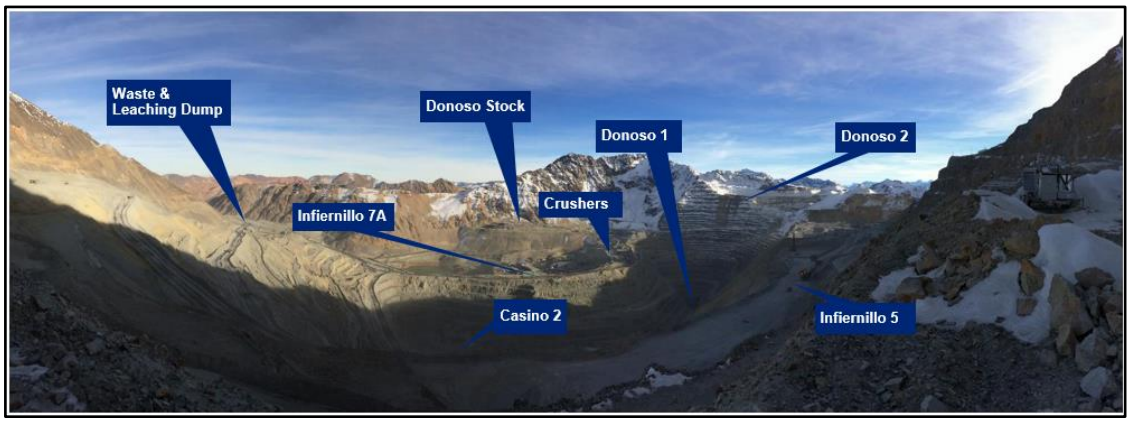


Figura 2-6. Vista Mina Los Bronces, Mayo 2017.

Existen 3 nuevas fases proyectadas para los siguientes años: Casino 3, Donoso 3 e Infernillo 6. La figura 3-7 muestra la ubicación y área de estás fases más las señaladas en el párrafo anterior que se encuentran operativas actualmente.

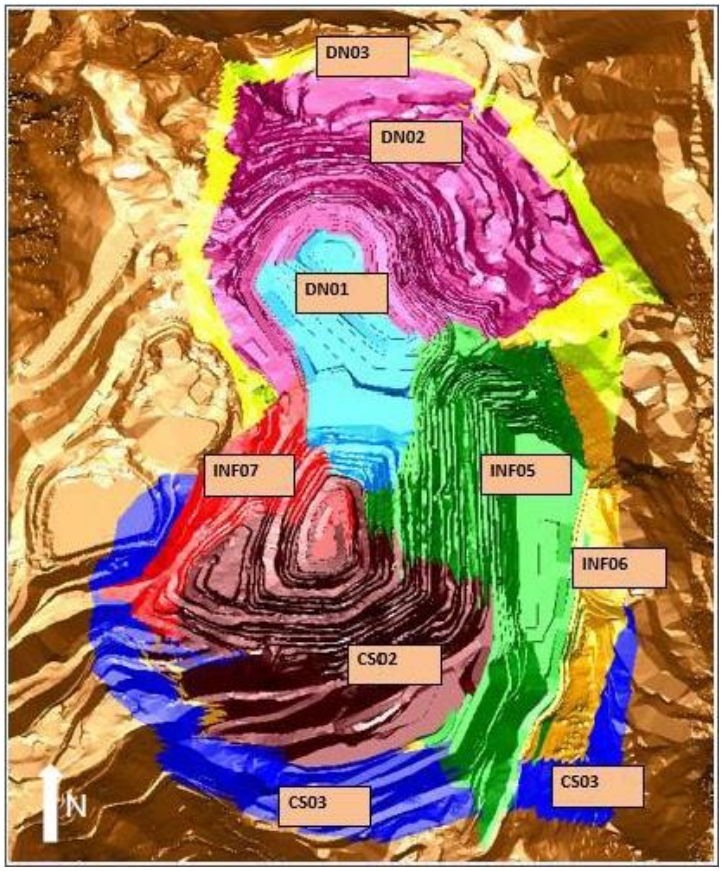


Figura 2-7. Diseño de Fases Operación Los Bronces.

2.2. FLOTA LOS BRONCES

Los Bronces cuenta con una amplia y variada flota de equipos como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2-1. Flota Operación Los Bronces hasta Mayo del 2017.

Equipo		Marca	Modelo	Cantidad	Capacidad
Perforadoras		Bucyrus Erie	49 R & 59 HR	4	10 5/8 “
		Atlas Copco	PV 351 & PV 251	7	10 5/8 “
Palas	**Eléctricas**	Bucyrus Erie	495BI	1	57 yd3
		Bucyrus Erie	495BII	2	60 yd3
		Bucyrus Erie/CAT	495-HR & 495-HR2	5	73 yd3
	Diésel	Komatsu	PC 5500	3	37 yd3
Cargador Frontal		Marathon LT	L-1850	2	31 yd3
Camiones		Komatsu	830E	8[2]	220 ton
		Komatsu	930E	51[3]	293 ton
		Komatsu	960E	2	323 ton
		Caterpillar	795F	11	323 ton

Figura 2-8. Pala Bucyrus Erie 495 B.

[2] A finales de septiembre del 2017 se dan de baja estos equipos.
[3] En Junio de 2017 se suman 6 nuevos Komatsu 930.

Figura 2-9. Komatsu 930.

2.3. MODELO OPERACIONAL DE ANGLO AMERICAN (AOM)

El AOM es un marco complejo con muchos niveles de detalle, el cual reúne a personas y sistemas para cumplir la estrategia y objetivos de Anglo American; describe las actividades básicas, la estructura y los principios necesarios para un proceso comercial exitoso en base a la generación planes con una alta confiabilidad de cumplimiento.

Este modelo operacional es un método de mejora empresarial y no una metodología, ya que si bien tiene elementos básicos consistentes para todos los procesos de negocio, el trabajo real emprendido, las herramientas y los sistemas involucrados en la implementación de los elementos del modelo pueden diferir ampliamente entre los procesos, en otras palabras, el AOM ayuda a un grupo de personas que trabajan juntas a producir un conjunto de resultados para comprender el trabajo que deben hacer para tener éxito y cómo las actividades laborales deben ser secuenciadas, asignadas y ejecutadas para que el grupo funcione como un equipo eficaz.

El modelo se basa en tres principios fundamentales:

1) **Proporcionar claridad:** Consiste en que los miembros del equipo tienen una comprensión clara de cómo su propio trabajo, y el trabajo de su equipo, produce resultados consistentes, mejorados y repetibles.
2) **Producir estabilidad:** La inestabilidad proviene de condiciones o acciones imprevistas que limitan nuestra capacidad de hacer predicciones confiables, por lo tanto, es necesario lograr que las operaciones sean lo más estables posibles y así obtener resultados predecibles.
3) **Reducir variabilidad:** Todos los procesos presentan cierta variabilidad, la clave es reducirla, ya sea en la etapa de entrada o dentro del proceso, ya que si se logra una menor variación en el rendimiento operativo se aumenta la capacidad y la eficiencia.

Su esquema se estructura por bloques interconectados (figura 3-10), donde cada uno tiene un mapa de procesos detrás de él y dentro de ese mapa de procesos se tiene una asignación de tareas y así sucesivamente. Los bloques bases del AOM son los siguientes:

- **Establecer expectativas del negocio:** Definir los criterios estratégicos.
- **Planificación Operacional:** Especificar la forma más rentable de operar un negocio.
- **Gestión de Trabajo:** Entregar el trabajo correctamente.
- **Retroalimentación:** Iniciar una acción de control eficaz cuando se requiera una intervención en el proceso.

En particular, el modelo desarrollado en este estudio (BSP) se enmarca en el bloque de planificación operacional para establecer los objetivos de desempeño.

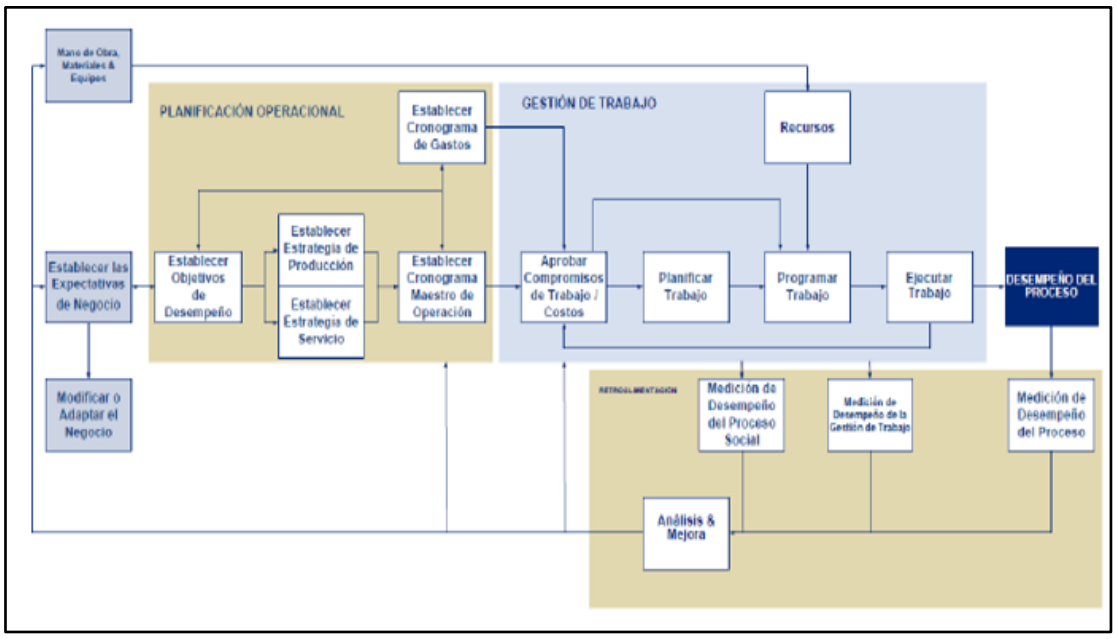


Figura 2-10. Modelo operacional Anglo American

Copyright © McAlear Management Consultants 2000

2.4. BUSINESS IMPROVEMENT

La Gerencia específica dentro de la operación en que se desarrolla este trabajo se denomina Business Improvement (BI) la cual juega un rol fundamental en el modelo operacional de Los Bronces, ya que se encarga de generar una retroalimentación a todos los procesos, haciendo un análisis diario mediante mediciones constantes de ellos para finalmente entregar una mejora. Ésta gerencia se divide en tres áreas: Riesgo, Mejoramiento, y Análisis y Reportes. Esta última se encarga de realizar reportabilidad y análisis diarios de toda la operación, tanto de la mina como de

la planta, para así mantener una información clara y ordenada para agentes de alto cargo de la compañía, y detectar los principales factores que más están afectando a la operación y que deben ser mejorados. A continuación se muestra el lugar que tiene BI dentro del modelo operacional de Anglo American.

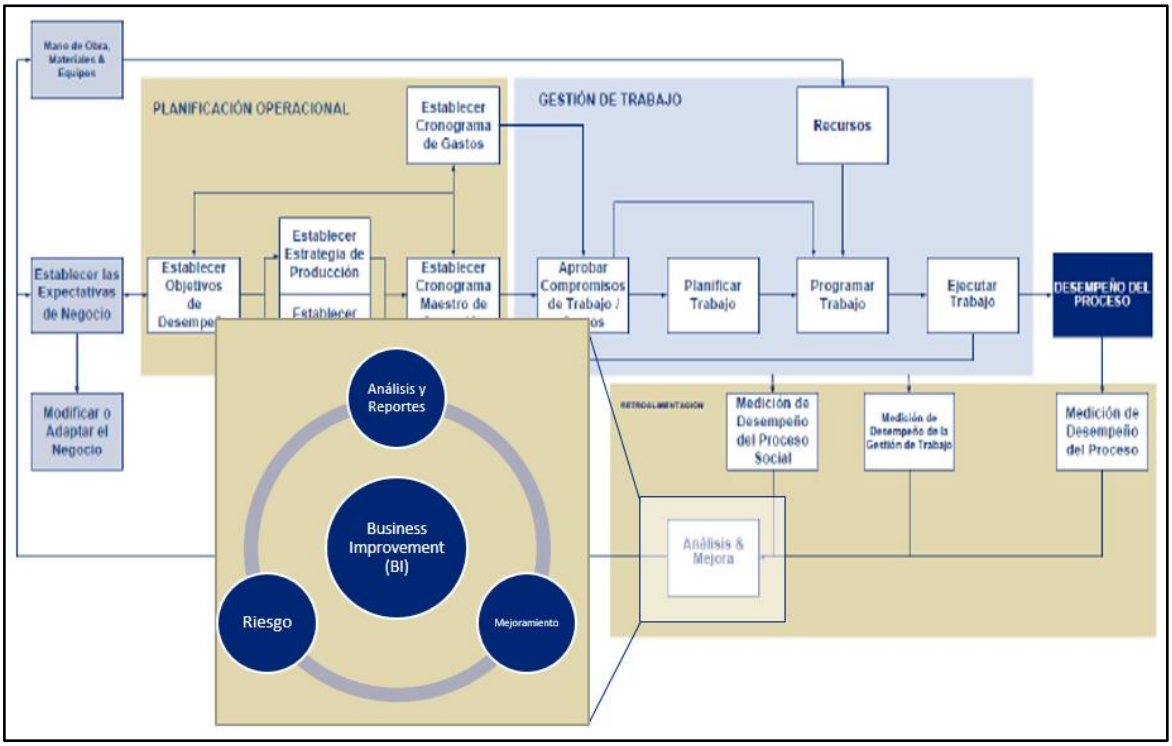


Figura 2-11. Estructura de BI dentro del Modelo operacional Anglo American (AOM).

El equipo de BI sigue la siguiente estructura organizacional:

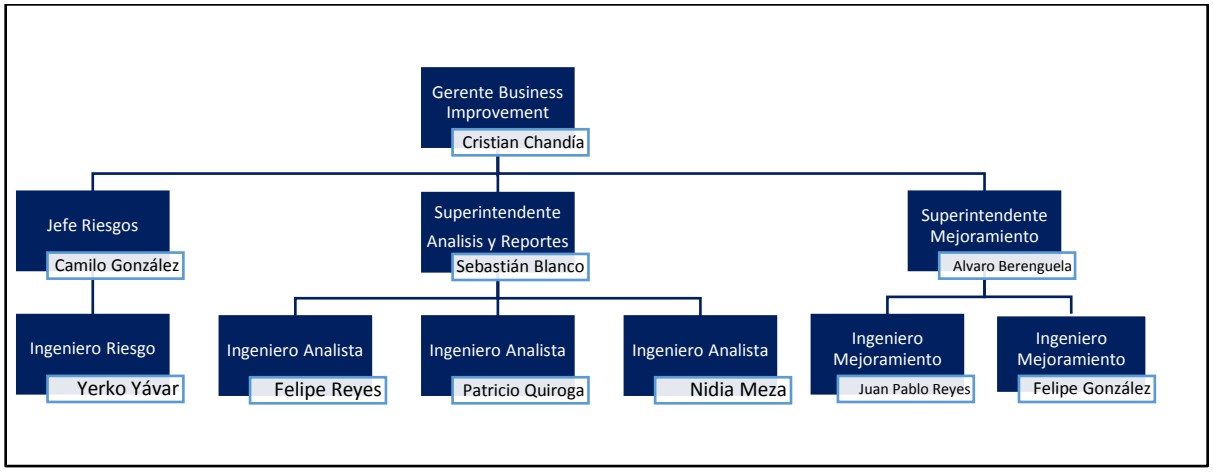


Figura 2-12. Organigrama Business Improvement, Julio 2017.

2.5. GEOLOGÍA, RECURSOS Y RESERVAS

El yacimiento Los Bronces, es un depósito tipo pórfido cuprífero con brechas hidrotermales de turmalina, dispuestas en un cuerpo tubular de dirección general N-S, cubriendo un área aproximada de 12 km^2.

El Pórfido Cuprífero presenta la zonación típica tanto en la alteración como mineralización, con su centro ubicado en el área de la mina Río Blanco, distante 1 Km hacia el E-N. El depósito cuprífero Rio Blanco-Los Bronces es el resultado de un proceso de concentración metálica llevado a cabo, principalmente por fluidos hidrotermales, durante las fases finales de la evolución magmática.

En cuanto a su mineralización, Los Bronces es una asociación compleja sulfuros de cobre-molibdeno. La mineralización económica significativa más temprana se observa en cuarzo-monzonita y cuarzo-monzodiorita con alteración potásica y brechas de biotita-magnetita asociadas. La mineralización está caracterizada por pirita-calcopirita-molibdenita con contenidos menores de bornita.

El mayor contenido de mineral está principalmente relacionado a brechas hidrotermales que forman un gran cuerpo elíptico de 2 Km de largo, 0.7 Km de ancho y 1 Km de profundidad.

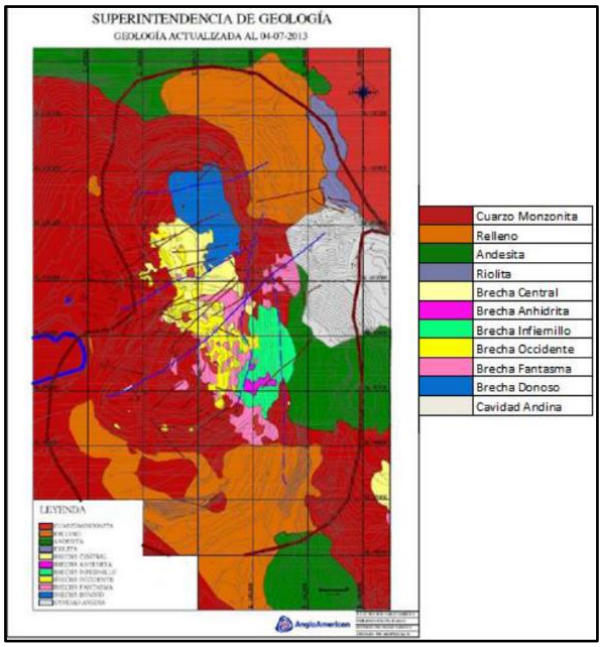


Figura 2-13. Litologías Operación Los Bronces

En el año 2012, la mina Los Bronces se estima con un LOM (life of mine) mayor a 30 años, en ese entonces el yacimiento contaba con 5700 millones de toneladas de recursos geológicos con ley media de 0.44% de Cu. Sus reservas mineras eran alrededor de 1513 millones de toneladas de sulfuros con una ley promedio 0.59% de Cu y 546 millones de toneladas de óxidos con una ley promedio de 0.30% Cu. A continuación se muestra un perfil del modelo de bloques de Los Bronces colindante a Andina:

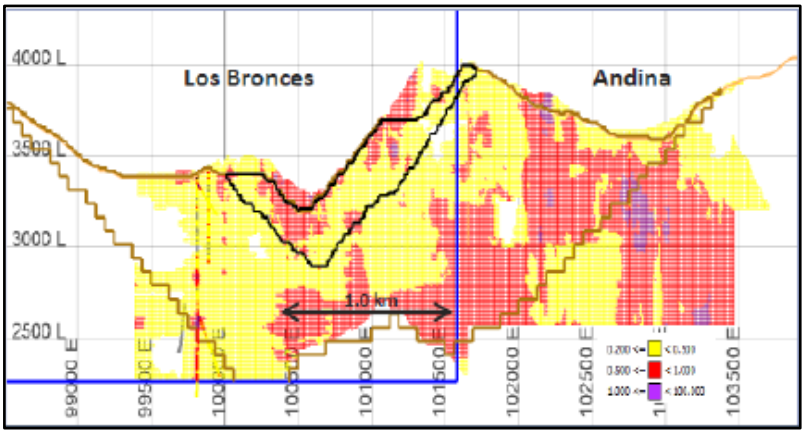


Figura 2-14. Perfil del Modelo de Bloques,de la Operación Los Bronces (colindante a la operación Andina).

2.6. @RISK

@Risk es un programa auxiliar para el análisis y la simulación de riesgo en Microsoft Excel, que permite modelar cualquier situación de riesgo, tanto en los negocios como en la ciencia o en la ingeniería, donde el usuario es quien debe decidir lo que es necesario analizar y, junto con las funciones de Excel, se podrán diseñar modelos que se adapten a las necesidades de análisis.

Tradicionalmente, los análisis han combinado las estimaciones de un solo "punto" de las variables de un modelo para predecir un solo resultado. Éste es el modelo estándar de Excel: una hoja de cálculo con una sola estimación de resultados. El uso de las estimaciones de las variables de un modelo se hace necesario porque los valores que realmente se obtendrán, no se conocen con certeza. Pero en la vida real, los planes tampoco se hacen realidad de la forma que se habían planeado. Es posible que en las estimaciones se pueda ser, a veces demasiado conservador y otras veces demasiado optimista. La combinación de errores en las estimaciones frecuentemente resultan en la estimación de un resultado significativamente diferente de lo que finalmente sucede en la realidad. La decisión que se tome basándose en los resultados "esperados" podría estar equivocada, y tal vez nunca se habría tomado si se hubiera tenido una idea más completa de todos los posibles resultados. Con @Risk se puede incluir la incertidumbre presente en las estimaciones para generar resultados que mostrarán todos los valores posibles.

@Risk utiliza una técnica denominada "simulación" para combinar todos los factores inciertos identificados en la situación que se desea modelar. De esta forma no se reduce a un solo número todo lo que se conoce de una determinada variable, sino que es posible introducir en las estimaciones todo lo que sabe sobre una variable, incluyendo su rango completo de valores posibles y ciertas medidas de probabilidad de cada valor. @Risk utiliza toda esta información, junto con el modelo de Excel para analizar los resultados posibles. Es como si pudiera llevar a cabo cientos de miles de análisis de escenarios al mismo tiempo; permite ver todo lo que puede pasar en esa situación una y otra vez, cada vez con una serie diferente de condiciones, obteniendo una serie diferente de resultados, donde @Risk genera resultados gráficos fáciles de comprender y de explicar para otros.

CAPÍTULO 3: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. SIMULACIÓN

Jerry Banks (1999) define a la simulación como una imitación de la operación de un proceso en el mundo real o de un sistema en el tiempo, donde se genera una historia artificial de este, y luego se pueden sacar conclusiones acerca de las características de funcionamiento del sistema real que se está representando.

Heizer y Render (2004) señalan una guía básica para poder llevar a cabo un proceso de simulación descrito en la figura 2-1.

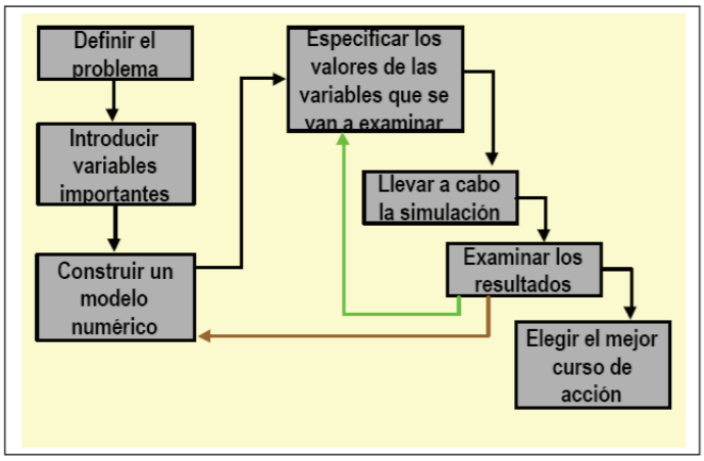


Figura 3-1. Flujograma de pasos para simular (Heizer y Render, 2004).

Según García *et al*, (2006) existen distintos modelos de simulación que permiten representar situaciones reales de diferentes tipos. Se pueden tener modelos físicos que consisten en simular con escenarios concretos, como por ejemplo, avión a escala que se introduce a una cámara por donde se hace pasar un flujo de aire, puede simular los efectos que experimentará un avión real cuando se vea sometido a turbulencia. La otra clase de modelos son los matemáticos, los cuales utilizan ecuaciones matemáticas como base para la simulación.

Los modelos matemáticos pueden ser continuos o discretos, estos se diferencian según las ecuaciones matemáticas que los componen, los primeros son aquellos en los que las relaciones entre las variables relevantes de la situación real se definen por medio de ecuaciones diferenciales, ya que éstas permiten conocer el comportamiento de las variables en cierto tiempo; mientras que los modelos discretos representan el comportamiento de lo que se quiere analizar mediante ecuaciones evaluadas en un punto determinado.

Otro tipo de clasificación es el de los modelos dinámicos o estáticos. Los modelos dinámicos son aquellos en los que el estado del sistema que se analiza cambia a través del tiempo. Por otro lado, los modelos estáticos representan un resultado bajo un conjunto de situaciones o condiciones determinado.

Por último, se tienen los modelos determinísticos y modelos probabilísticos (o estocásticos). Los primeros se refieren a relaciones constantes entre los cambios de las variables del modelo, mientras que los segundos involucran relaciones con valores aleatorios de las variables, con distribuciones de probabilidad. (García *et al*, 2006).

En este estudio se realiza una simulación de Montecarlo, que involucra un modelo estático, estocástico, el cual utiliza variables aleatorias asociadas a distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas del problema que se esté analizando, donde el objetivo del modelo de simulación consiste, precisamente, en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema.

Su nombre hace referencia al casino de Montecarlo (Mónaco), que es considerada la capital del juego de azar, por lo tanto, se le asocial al modelo por tener una base en la generación de valores aleatorios (azar). Sus primeros usos fueron durante la Segunda Guerra Mundial, en relación al desarrollo de la bomba atómica.

Una simulación de Montecarlo recoge repetidamente valores de una distribución de probabilidad definida por el usuario para las variables del modelo y genera múltiples escenarios como resultante. Ya que esos escenarios producen resultados similares en un modelo, cada escenario puede tener una estimación. (Mun, 2006).

3.1. ESTADÍSTICA

Según García *et al* (2006), las variables aleatorias son aquellas que tienen un comportamiento probabilístico en la realidad y deben cumplir las siguientes reglas de distribución de probabilidad:

- La suma de las probabilidades asociadas a todos los valores posibles de la variable aleatoria x e s uno.
- La probabilidad de que un posible valor de la variables x se presente siempre es mayor que o igual a cero.
- El valor esperado de la distribución de la variable aleatoria es la media de la misma, la cual a su vez estima la verdadera media de la población.

Si la distribución de probabilidad asociada a una variable aleatoria está definida por más de un parámetro, dichos parámetros pueden obtenerse mediante un estimador no sesgado. Por ejemplo, la varianza de la población *cr2* puede ser estimada usando la varianza de una muestra que es *s2*. De la misma manera, la desviación estándar de la población *cr*, puede estimarse mediante la desviación estándar de la muestra *s.* (García *et al*, 2006).

Para la generación de variables utilizadas en el modelo de simulación es necesario aplicar pruebas no paramétricas, ya que se desconoce cuál es su distribución de la población, entonces se realizan pruebas de bondad de ajuste que tienen por objetivo determinar si los datos se ajustan a una determinada distribución (Frias Navarro, D. 1997)

Para ello se hace uso de un software complementario con Excel denominado @Risk, Este programa da tres opciones de estadísticos para hacer el test de ajuste, estos son: Chi-cuadrado, Kolmogorov-Smirnov (K-S) y Anderson Darling (A-D).

La elección se basa en un estudio realizado por Pedrosa, I. *et al* (2015); estudio en el que se comparan estadísticos según el tamaño muestral. Las pruebas de A-D muestran una mejor capacidad de detección del ajuste para muestras pequeñas y medias.

También diferentes autores han señalado que la prueba de A-D es la más potente estadísticamente cuando se alude a pruebas basadas en funciones de distribuciones empíricas (Arshad, Rasool & Ahmad, 2003; Shahabuddin, et al., 2009 y EDF; Dufour, Farhat, Gardiol, & Khalaf, 1998); destacando respecto a las demás, ya que tiende a presentar un mejor poder de detección en todos los casos, exceptuando únicamente aquellos en los que la muestra es excesivamente grande, en donde la prueba A-D continúa la tendencia general de otros estadísticos, de incrementar su carácter conservador.

3.2. OPERACIONES UNITARIAS RAJO ABIERTO

La explotación de una mina a cielo abierto se realiza mediante un ciclo continuo de 4 procesos productivos principales, los cuales se señalan en la figura 3-2.

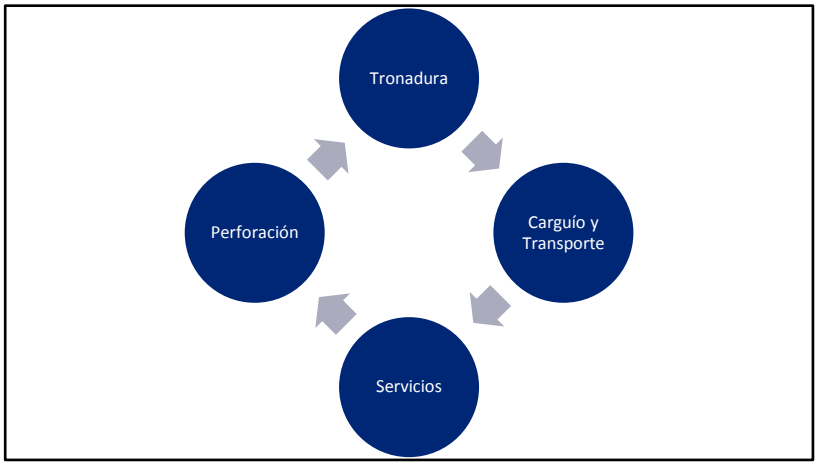


Figura 3-2. Procesos unitarios mina a cielo abierto

A continuación se describe cada uno de ellos:

3.2.1. Perforación

El objetivo del proceso de perforación en palabras simples es "Construir un espacio físico definido dentro de la roca que será removida (pozos de perforación), para luego en estos pozos colocar el explosivo que más tarde será detonado" (*Alejandro Vásquez, Benjamín Galdames, René Le-Feaux).*

La secuencia que sigue este proceso cuenta con los siguientes pasos:

- Programación de la ubicación de los pozos a perforar.
- Selección de los aceros a utilizar.
- Preparación de la zona de trabajo (topografía y limpieza).
- Posicionamiento de equipos (en cada tiro).
- Perforación (de cada tiro).
- Muestreo de detritus.
- Verificación de la calidad y cantidad de tiros perforados.
- Retiro del equipo del sector.

3.2.2. Tronadura

El objetivo del proceso es "Fracturar y remover el material requerido por el programa de producción, a una granulometría adecuada para su posterior manejo (carguío, transporte, chancado o botaderos)". (*Alejandro Vásquez, Benjamín Galdames, René Le-Feaux).*

La secuencia que sigue este proceso cuenta con los siguientes pasos:

- Preparación de la zona de trabajo (incluye el aislamiento del sector).
- Posicionamiento de equipos de carguío de explosivos.
- Introducción del explosivo y los accesorios necesarios.
- Control de calidad del explosivo (en ciertos casos).
- Entacado del pozo.
- Amarre según secuencia especificada.
- Revisiones de seguridad en el sector (y otros sectores involucrados).
- Primer aviso.
- Avisos posteriores y último aviso.
- Polvorazo (tronadura)
- Ventilación o limpieza del sector (hasta que la zona quede limpia).
- Revisión de seguridad (tiros quedados, bloques colgados).
- Quema de tiros quedados, descolgado de bloques, reducción secundaria.

3.2.3. Carguío y Transporte

El objetivo del proceso es "Retirar el material tronado de la frente y transportarlo adecuadamente a su lugar de destino" (*Alejandro Vásquez, Benjamín Galdames, René Le-Feaux).*

La secuencia que sigue este proceso cuenta con los siguientes pasos:

- Preparación de la zona de trabajo.
- Posicionamiento de equipos.
- Retirar el material tronado desde la frente de trabajo (carguío).
- Traspaso del material al equipo de transporte dispuesto para el traslado.
- Transporte del material a su lugar de destino (Planta, acopio, botaderos, etc.).
- Descarga del material.
- Retorno del equipo de transporte al punto de carguío (si es que se requiere su retorno).

3.2.4. Servicios

El objetivo del proceso es "mantener la faena en condiciones operativas, garantizando que las operaciones unitarias se realicen con el mejor rendimiento y el mínimo riesgo". (*Alejandro Vásquez, Benjamín Galdames, René Le-Feaux).*

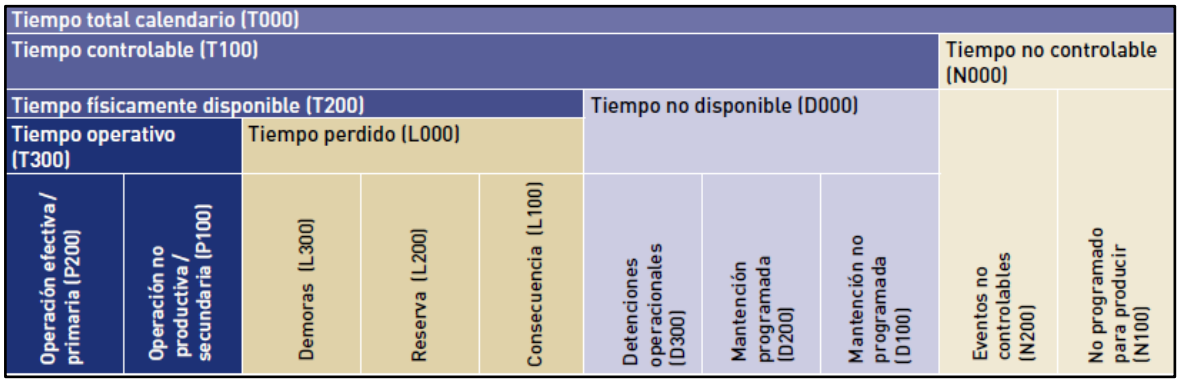
Las actividades que realiza este proceso se puede resumir en:

- Preparación de sellos para carguío.
- Construcción, habilitación y mantención de caminos y accesos (y otros).
- Mantención de Botaderos.
- Limpieza en sectores específicos.
- Manejo de materiales (no mineros).
- Apoyo directo a operaciones (carguío, traslado de equipos, etc.).

3.3. MODELO DE TIEMPO ANGLO AMERICAN

La estructura actual del modelo de tiempo de Anglo American se resume en la tabla 2-1. (ANGLO AMERICAN COPPER GS20, 2015):

Tabla 3-1. Categorías en modelo de tiempo de Anlgo American



A continuación se presenta una tabla con todas las categorías de tiempo, junto a su nomenclatura y descripción.

Tabla 3-2.Concepto y descripción categoría de tiempo

Categorías			Nom	Descripción
Disponible	Tiempo operativo	Operación efectiva / primaria	P200	Tiempo en el cual los equipos están operativos y siendo utilizados para **producción.**
		Operación no productiva / secundaria	P100	Tiempo en el cual los equipos están operativos y realizando actividades **no productivas** o secundarias.
	Tiempo perdido	Demoras	L300	Tiempo que implica un **retraso** en la producción.
		Reserva	L200	Tiempo asignado a equipos de **repuesto.** Inmediatamente disponibles para producción.
		Consecuencia	L100	Tiempo de detención del equipo producto de **eventos externos** a él.
Tiempo no disponible		Detenciones operacionales	D300	Tiempo de detención causada o requerida por **operaciones,** que implica que los equipos queden inoperables.
		Mantención programada	D200	Tiempo producto de trabajos de mantención **incluidos** en el plan de mantención semanal confirmado.
		Mantención no programada	D100	Tiempo producto de trabajos de mantención **no incluidos** en el plan de mantención semanal confirmado.
Tiempo no controlable		Eventos no controlables	N200	Tiempo atribuible a **factores externos** y fuera del control de la operación que afecta a toda la operación.
		No programado para producir	N100	Tiempo en el cual el equipo no está **programado** dentro del plan de producción.

Los conceptos del modelo de tiempo que son útiles para este trabajo se describen a continuación:

3.3.1. Definiciones de elemento primario o estado de tiempo

Un elemento primario o estado de tiempo es la agrupación de elementos secundarios o categorías de tiempo de una misma naturaleza.

Tiempo total calendario (T000)

Es el total potencial de horas disponibles.

- Anualizado = 24 x 365 = 8760 horas (considerando año no bisiesto)

- Mensual = 24 x 31 = 744 horas (considerando mes de 31 días)
- Semanal = 24 x 7 = 168 horas

Tiempo controlable (T100)

Es el tiempo atribuible a cualquier factor controlable por la operación.

Tiempo no controlable (N000)

Es el tiempo en que los equipos no están en condiciones de agregar valor por factores fuera del alcance de gestión de la operación.

Tiempo físicamente disponible (T200)

Tiempo en que el equipo se encuentra mecánica y operacionalmente disponible para cumplir su función de diseño.

Tiempo no disponible (D000)

Tiempo en que el equipo no se encuentra inmediatamente disponible para la producción. También comúnmente conocido como tiempo fuera de servicio.

Tiempo operativo (T300)

Tiempo en que el equipo se encuentra física y mecánicamente disponible para realizar su función de diseño y está siendo utilizado para alguna tarea, ya sea directa o indirectamente relacionada con la producción.

3.3.2. Indicadores claves de desempeño (KPI)

Son los indicadores que miden el rendimiento productivo del negocio, alinean los comportamientos con los objetivos del corto, mediano y largo plazo. A continuación se definen los indicadores de desempeño de los equipos que mayor impacto tienen en el negocio:

Tiempo controlable (TC)

Indica el porcentaje del tiempo total calendario del cual dispone la operación. Una operación con bajo tiempo de eventos no controlables, representa una eficaz definición de estrategia sobre el activo. Una operación con un TC bajo debe plantearse trabajar en sus planes de gestión estratégica del activo.

$$Tiempo\ Controlable\ (TC) = Tiempo\ Controlable / Tiempo\ Calendario [\%]$$

Utilización general (UG)

Indica el porcentaje del tiempo total calendario en que el equipo opera de forma efectiva. Es el indicador máximo de rendimiento, que señala el porcentaje del tiempo total calendario en que el equipo es utilizado de manera efectiva (explotación del activo).

$$Utilización\ General\ (UG) = Tiempo\ Operación\ Efectiva / Tiempo\ Calendario\ [\%]$$

Efectividad general de los equipos (OEE)

Indica el porcentaje de la eficiencia productiva de un equipo o proceso, involucrando indicadores de utilización, rendimiento y calidad (definida por cada unidad productiva). Es la jerarquía métrica de mayor nivel, puesto que se enfoca en cuán efectivamente se utilizan los equipos.

$$Efectividad\ general\ equipos\ (OEE) = UGx Producción\ Real / Producción\ Objetivo\ x\ Calidad\ Real / Calidad\ [\%]$$

Disponibilidad física (DF)

Indica el porcentaje del tiempo controlable en que el equipo se encuentra en condiciones inmediatas para realizar su función de diseño. Dado que la disponibilidad física del activo es resultado tanto de la mantención como de la operación, es que la gestión de este indicador no es sólo responsabilidad del área de mantención, sino también de operaciones.

$$Disponibilidad\ Física\ (DF) = Tiempo\ Físicamente\ Disponible / Tiempo\ Controlable\ [\%]$$

Disponibilidad mecánica/eléctrica (DME)

Indica el porcentaje del tiempo controlable en que el equipo está en condiciones mecánicas y/o eléctricas para estar operativo. Este indicador cuantifica el impacto de la gestión del área de mantención sobre la disponibilidad física, descontando así las indisponibilidades producidas o requeridas por la operación.

$$Disponibilidad\ Mecánica|Eléctrica\ (DME) = Tiempo\ en\ condición\ ME / Tiempo\ [\%]$$

Disponibilidad operacional (DO)

Indica que porcentaje del tiempo mecánica y/o eléctricamente disponible, el equipo está físicamente disponible. Este indicador cuantifica el impacto de la gestión del área de operación sobre la disponibilidad física, descontando así las indisponibilidades producidas o requeridas por la mantención.

$$Disponibilidad\ Operacional\ (DO) = Tiempo\ Físicamente\ Disponible / Tiempo\ en\ condición\ [\%]$$

Uso de disponibilidad física (UDF)

Indica que porcentaje del tiempo físicamente disponible el equipo se encuentra operativo. Es una medida clave para cuantificar las oportunidades de gestión sobre los activos, puesto que únicamente se ve afectada por la inutilización de los activos mientras estos se encuentran disponibles para hacerlo.

$$Uso\ de\ Disponibilidad\ Física\ (UDF) = Tiempo\ Operativo / Tiempo\ Físicamente\ [\%]$$

Eficiencia (EF)

Indica el porcentaje del tiempo operativo en que el equipo opera de forma efectiva. Es una medida significativa para cuantificar el requerimiento neto del equipo en una operación particular. Dado

que el tiempo operativo contiene la operación no productiva (como por ejemplo traslados, demoras inherentes al proceso y trabajos secundarios), es que este indicador se transforma en un reflejo potente de las necesidades para cada tipo de operación.

$$Eficiencia\ (EF) = Tiempo\ Operación\ Efectiva / Tiempo\ [\%]$$

Rendimiento efectivo (RE)

Indica el rendimiento medido en unidades de producción sobre el tiempo de operación efectiva.

$$Rendimiento\ Efectivo\ (RE) = Producción\ (metros\ o\ toneladas) / Tiempo\ Operación\ [u/hr]$$

Rendimiento operativo (RO)

Indica el rendimiento medido en unidades de producción sobre el tiempo en que el equipo se encuentra operativo.

$$Rendimiento\ Operativo\ (RO) = Producción\ (metros\ o\ toneladas) / Tiempo\ [u/hr]$$

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL TRABAJO

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO

El fin fundamental del modelo BSP es que basado en los datos históricos de la operación, se realicen simulaciones de distintos escenarios que permitan determinar un rango de capacidades confiables para el plan minero y también generar un análisis de capacidad de la mina, para así detectar los procesos que están limitando a la operación y las oportunidades que se presentan.

Los entregables del modelo son histogramas de probabilidad de extracción e histogramas de capacidad de las operaciones unitarias, con los cuales se obtienen indicadores estadísticos que sirven para un análisis de desempeño y planificación.

Lo que permite realizar el modelo BSP se puede resumir en los siguientes puntos:

- Permite una evaluación de escenarios rápida y eficiente dentro del ciclo de planificación minera, es decir, se puede usar para probar escenarios y los efectos sobre la operación.
- Puede identificar de manera confiable las oportunidades y limitaciones relacionadas con el flujo de mineral.
- Se puede usar para identificar cuellos de botella y procesos de alta variación.
- El modelo puede ayudar a priorizar los recursos en la operación (procesos críticos y niveles de buffer apropiados), e iniciativas para selección de proyectos asignando niveles de confianza de los distintos escenarios.

El modelo BSP modela el flujo de procesos como una simulación de Monte Carlo interdependiente y está desarrollado para identificar restricciones y oportunidades a nivel operativo en términos de producción. Esta simulación se realiza por medio del software @Risk que funciona como complemento de Excel.

El modelo utiliza distribuciones estadísticas de cada proceso para simular el flujo de material, donde entre cada uno de los procesos existen niveles de stocks que funcionan como buffers[4] para independizarlos, stocks que son calculados por la masa del flujo entrante menos la masa de flujo que sale, además cuentan con limites propios de capacidades.

El resultado final se mide por la salida del último proceso de la cadena durante un período de tiempo.

[4] Buffer tiene como concepto minimizar el impacto del flujo de material de un proceso en otro (amortiguar), para poder lograr una independencia entre ellos y así permitir que cada uno opere en sus máximas capacidades. En este caso los buffers son lugares de almacenamiento de material (stock) o también espacios físicos que quedan disponible en el caso de servicio y perforación.

En la figura 4-1 se ejemplifica lo mencionado anteriormente, donde se aprecia el esquema de flujo entre los procesos con sus gráficos de distribuciones y niveles de stock.

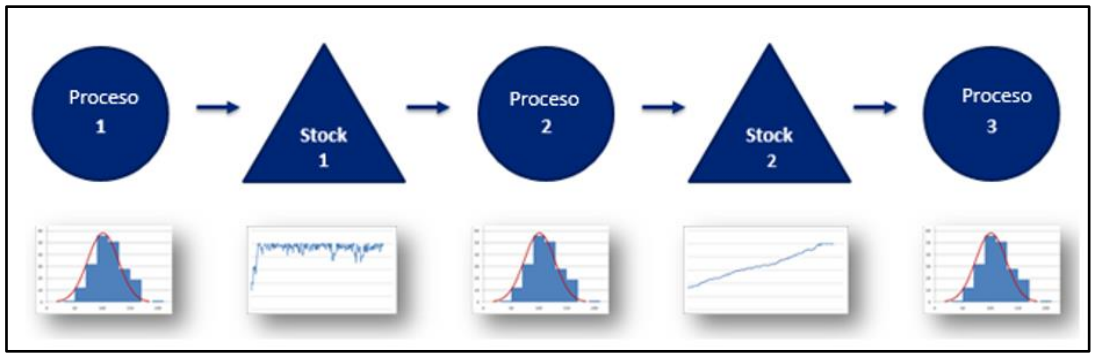


Figura 4-1. Flujo general que sigue el modelo.

Las principales entradas de modelo son distribuciones históricas de cada proceso, que generarán un valor en el intervalo de tiempo designado de este; también se tienen otras entradas fijas asociadas a cierto período como por ejemplo la distancia, la relación estéril/mineral, ente otras; junto a las capacidades de los stocks. El año de los datos que se consideran para generar las distribuciones corresponde al año anterior al que se analiza en el modelo y se hace una separación de ellos en verano e invierno.

Luego el modelo realiza la simulación con un número definido de repeticiones o iteraciones, donde a un mayor número de estas se mejora la precisión de los resultados en las salidas, pero se aumenta el tiempo de simulación y, por lo tanto, hay que buscar un valor acorde a lo que se requiera y a las capacidades de la CPU.

Cada vez que @RISK ejecuta una iteración del modelo, la salida se registra en un histograma, que puede ser de dos categorías. La primera categoría consiste en histogramas de extracción de material. (Figura 4-2).

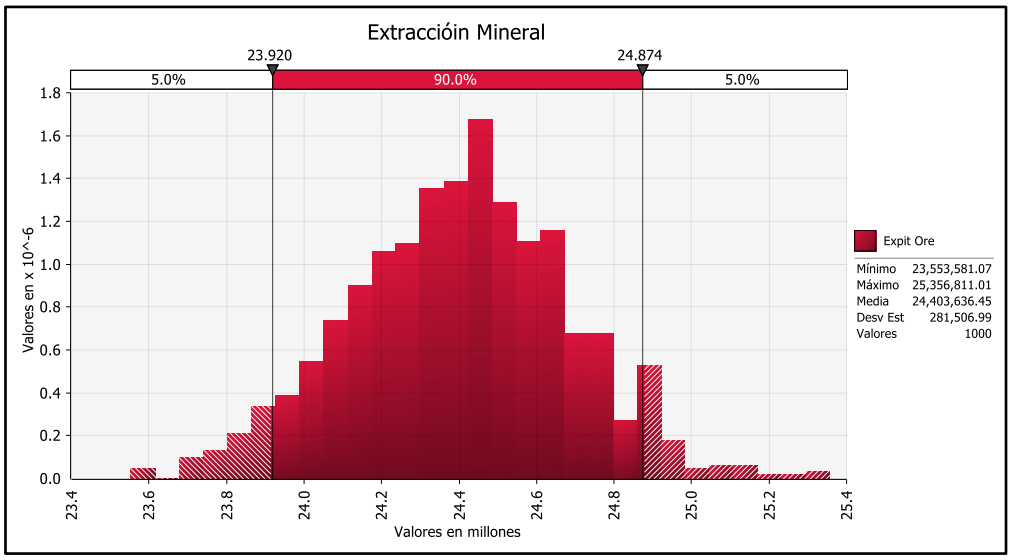


Figura 4-2. Ejemplo gráfico de Salida del Modelo

Estos histogramas se pueden utilizar para estudiar medidas estadísticas como la media, los niveles de confianza de alcanzar o superar los objetivos C80[5], P75[6], entre otros. Entonces una vez obtenido el histograma del modelo, se pueden realizar los siguientes análisis y/o acciones:

1) Reducir la variación del proceso, eliminando la gran extensión del histograma. Se sabe que la reducción de la variación de un proceso ayuda a optimizar el rendimiento.

2) Establecer y entregar objetivos: los niveles de confianza de alcanzar o superar objetivos (C80).

3) Implementar iniciativas para cambiar el proceso restrictivo, donde es importante tener en cuenta que si la media del proceso se desplaza hacia la derecha, se mejora la capacidad del proceso.

Una vez que se ha estudiado el histograma anterior y por ejemplo, se observa que no se está logrando el plan, se procede a analizar los histogramas de segunda categoría (Figura 4-3); que son histogramas de capacidad que señalan el proceso que estaría actuando como limitante (cuello de botella).

Los histogramas de capacidad muestran los resultados por distintos niveles, donde cada nivel es un despliegue más detallado de los procesos que involucra el nivel anterior. Un estudio de estos histogramas por nivel permite determinar el por qué la operación tiene bajo rendimiento y dónde se debe enfocar la atención para aumentarlo.

[5] C80 es un indicador estadístico interno de la operación Los Bronces que dentro de un gráfico de probabilidad toma el valor de la variable bajo el cual se encuentra el 20% de todos los valores e indica que existe un 80% de probabilidad de lograr o superar tal valor.
[6] P75 es el valor bajo el cual se encuentran el 75% por ciento de todos los valores del gráfico de probabilidad.

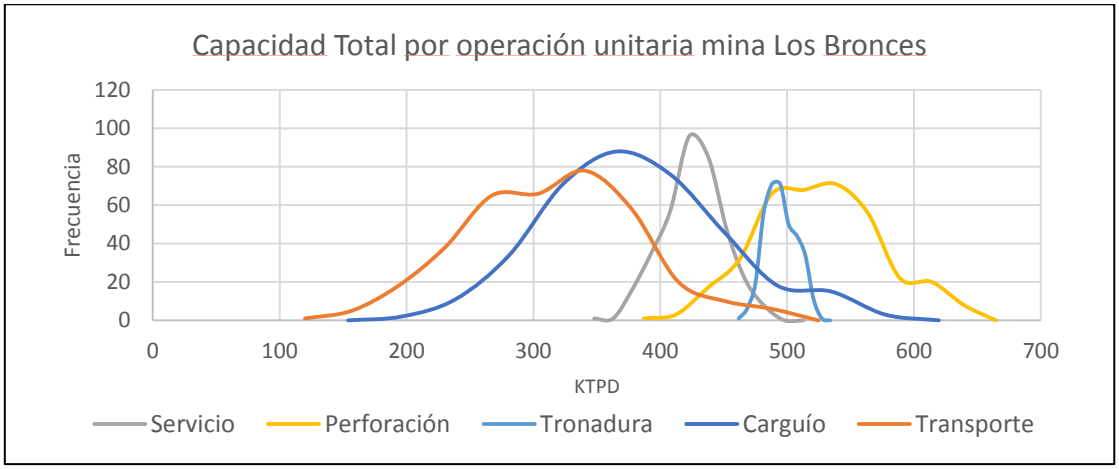


Figura 4-3. Ejemplo de gráfico de Salida por operación unitaria.

El primer nivel es un histograma que muestra el desarrollo y producción de todas las fases de la mina (figura 4-4), lo que permite dar una señal de si el cuello de botella está en la extracción de estéril o de mineral de acuerdo al objetivo que se tiene de cada uno de ellos dentro del plan.

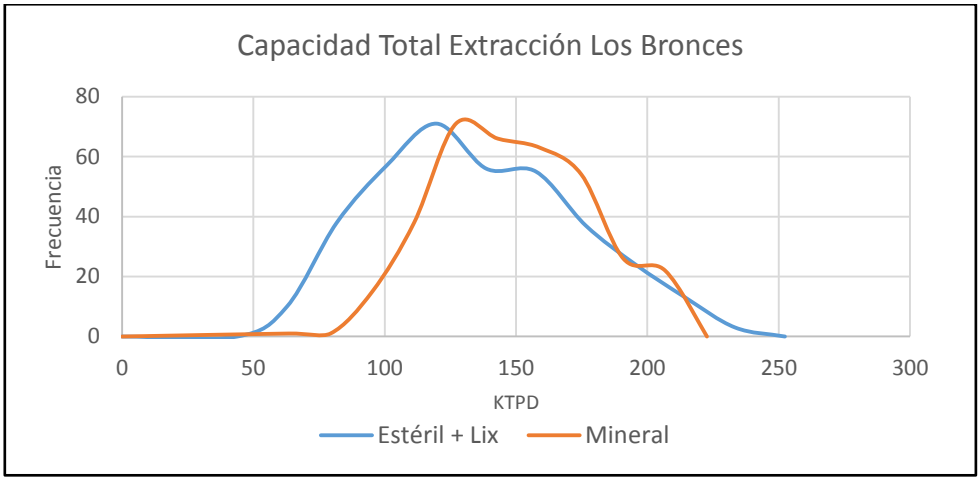


Figura 4-4. Ejemplo de gráfico de Salida del Primer Nivel: Desarrollo y producción por fase.

Luego, se procede a un análisis de un segundo nivel que muestra un despliegue del desarrollo y producción por fase y también un histograma de todas las operaciones unitarias de todas las fases juntas.

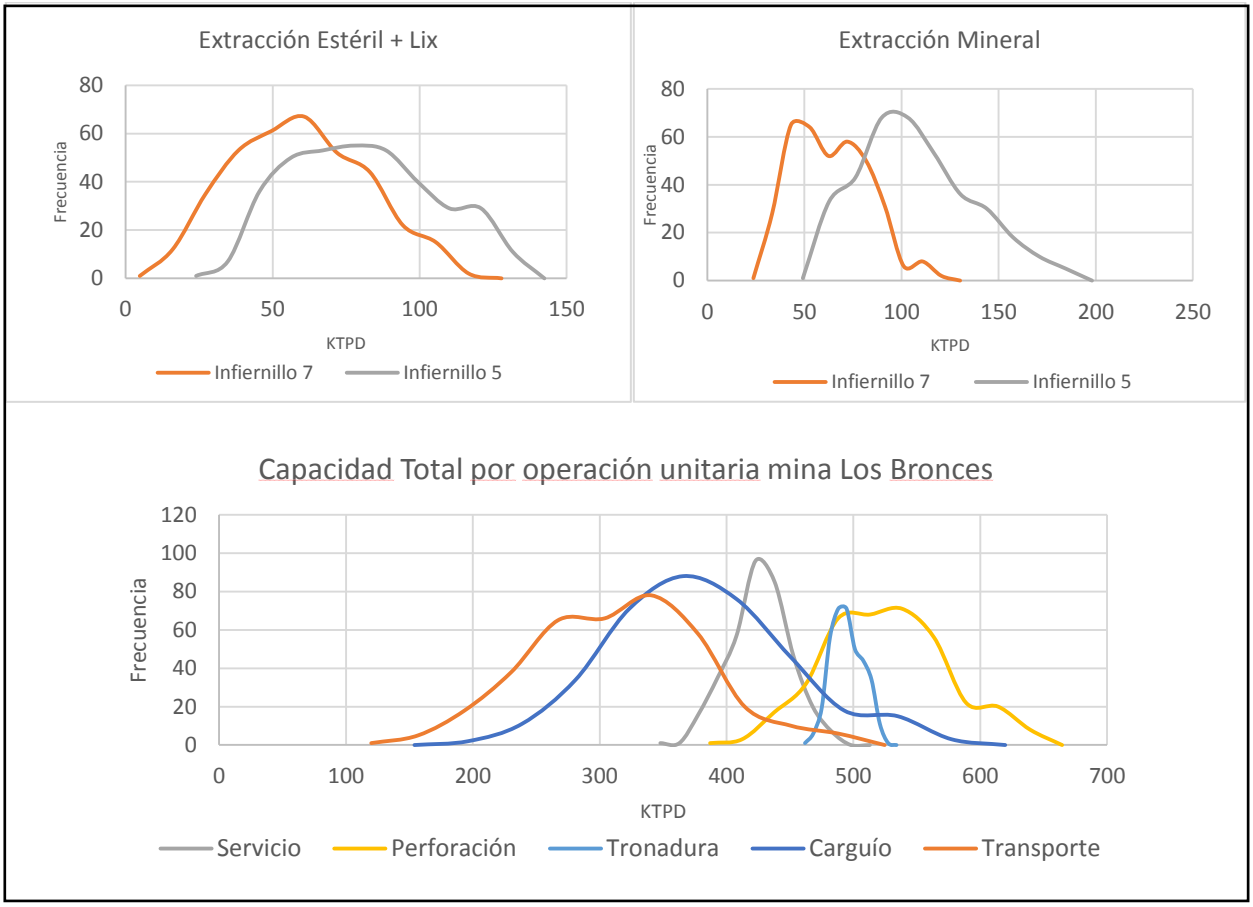


Figura 4-5. Ejemplo gráfico del análisis de Segundo Nivel: Desarrollo y Producción por Fase.

Donde, por ejemplo, en el histograma de operaciones unitarias se observa que el Transporte está siendo la restricción de capacidad de los demás procesos, por lo tanto, es el que requiere un enfoque. Esto se puede desplegar en un tercer nivel para un análisis más profundo que indica cada una de los procesos por desarrollo o producción y por fase (figura 4-6).

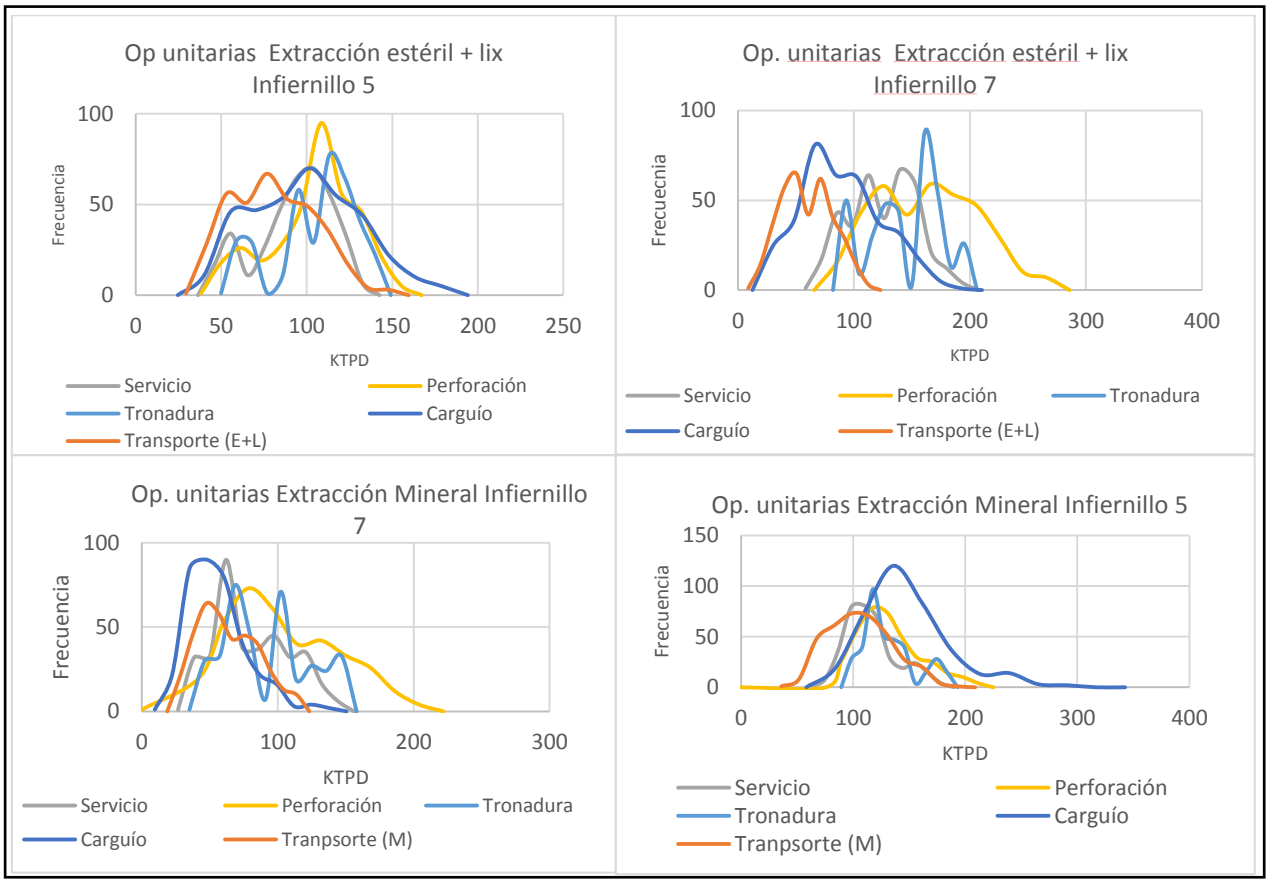


Figura 4-6. Ejemplo gráfico de Salida tercer nivel: Desarrollo o producción por fase.

Se puede apreciar que el primer histograma es más notorio el Transporte como cuello de botella del proceso para el desarrollo de la fase INF 7, por lo tanto, el primer enfoque está en mejorar ese proceso, para lo cual se pueden ir generando múltiples escenarios como nuevas asignaciones, agregar más camiones, mejorar KPI, entre otros; y en base a los resultados tener una opción para la estrategia a seguir.

También el modelo genera gráficas de la evolución diaria de los stocks y gráficas de control de cada proceso (figura 4-7), que muestra la variabilidad diaria de él.

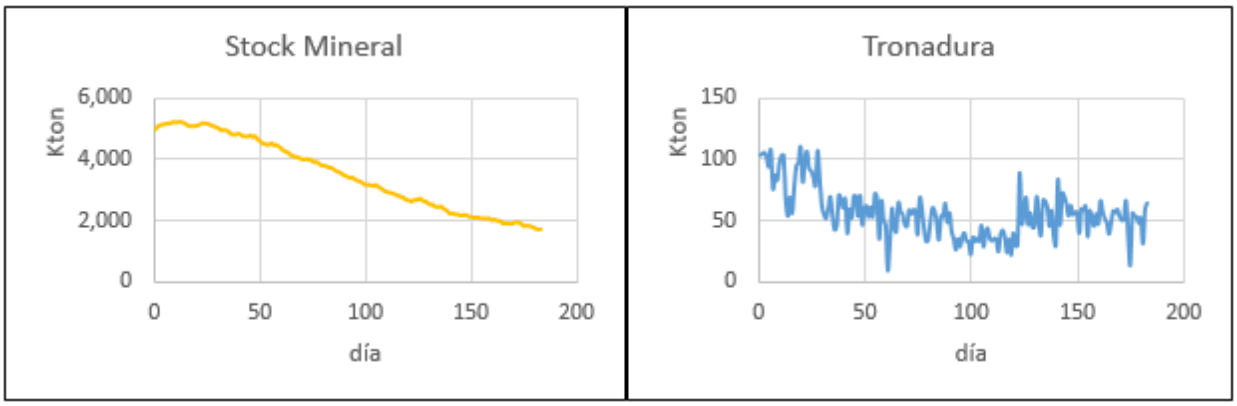


Figura 4-7. Ejemplo de gráfica de Salida del nivel de Stock y de control un proceso (invierno).

.

En particular el modelo BSP de Los Bronces involucra las operaciones unitarias de la mina y sus stocks respectivos:

Tabla 4-1. Operaciones unitarias y stocks presentes en el modelo.

Proceso	Stock
Servicio (S)	Stock Servicio (SS)
Perforación (P)	Stock Perforación (SP)
Tronadura (T)	Stock Tronadura (ST)
Carguío (C)	Botadero
Transporte(TR)	Mineral Expuesto (ME)
Chancado (CH)[7]	Stock Mineral (STOCK)

La figura 4-8 muestra el flujo del modelo de los Bronces, el cual se repite para cada una de las fases. Cuenta con una primera parte de Desarrollo (color gris) y luego con la Producción (color azul), la conexión está basada por el Mineral Expuesto que deja el Desarrollo de esa fase en el periodo de tiempo, lo que hace que el flujo sea continuo y dependiente.

A continuación se señala el flujo que sigue cada fase del modelo:

[7] El proceso de chancado no es considerado en la simulación, sólo señala el fin del flujo.

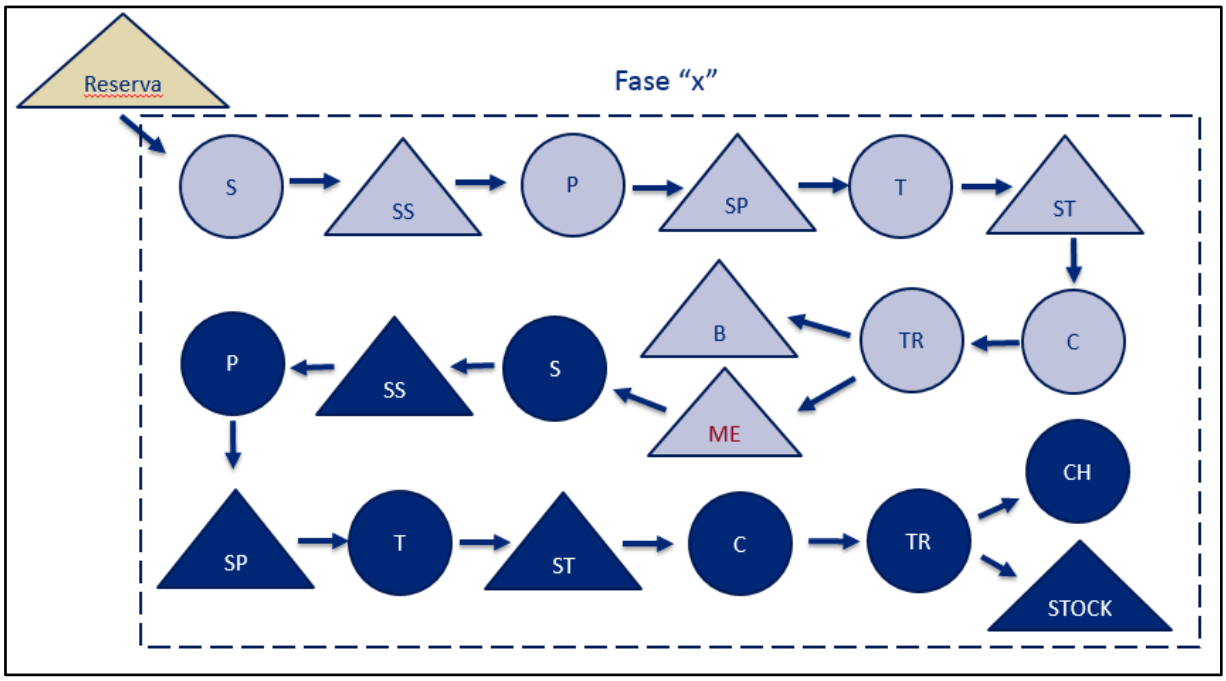


Figura 4-8. Flujo Modelo BSP Los Bronces.

Las variables de entrada del modelo BSP Los Bronces son:

- **Reserva Mineral:** Esta variable tiene una capacidad inicial que depende de la condición actual de la reserva de mineral que se tenga en Los Bronces el año que será modelado.
- **Relación Estéril/Mineral (REM):** Esta entrada se ingresa por mes y por fase.
- **Distancia media:** La distancia media se ingresa en kilómetros según el mes, la fase y tipo de material.
- **Stocks:** Los stocks de cada proceso tienen una capacidad inicial que se asigna con un número aleatorio dentro de un rango y con una capacidad máxima fija.
- **Procesos unitarios:** Cada uno de los procesos unitarios se ingresan con distribuciones en ton/día por fase en base a datos históricos de ellos.
- **Camiones:** Los camiones se ingresan según el número de ellos asignados por fase, flota, mes y tipo de material. También se ingresan los parámetros para las distribuciones de disponibilidad, uso disponibilidad y TKPH basados en datos históricos y según la flota que corresponda.
- **Palas:** Las palas se ingresan según el número de ellas asignados por fase, flota, mes y tipo de material. También se ingresan los parámetros para las distribuciones de disponibilidad, uso disponibilidad y rendimiento operativo basados en datos históricos y según la capacidad del balde.

La elección de las variables de entrada del modelo se basa en los KPI[8] fundamentales de la operación que se miden e informan diariamente, y que sirven para analizar el desempeño de la

[8] Principales indicadores de desempeño operacional.

operación. Por lo tanto, cualquier cambio o mejora aplicada se verá reflejada en estos indicadores, lo que permitirá generar los distintos escenarios para el modelo y así obtener resultados para el análisis. Los KPI utilizados son los siguientes:

- Rendimiento operativo (cada proceso)
- Disponibilidad (Carguío y Transporte)
- Uso de disponibilidad (Carguío y Transporte)
- Toneladas kilómetros por hora (Transporte)
- Distancia media (Transporte)

Para el proceso unitario de perforación, se utiliza un "índice de perforabilidad[9]" para transformar los metros perforados, que es la base de datos con la que se dispone, a toneladas por día. Este índice es entregado por agentes de la mina y es distinto por cada fase, ya que depende de la dureza y condiciones geomecánicas de la roca.

Importante dejar en claro que en la operación Los Bronces, para los procesos de servicio y tronadura no se tiene una base de datos rescatable para poder realizar un análisis de ellos, por lo tanto, se ajustan a distribuciones triangulares con parámetros de mínimo, más probable y el máximo valor de toneladas por día establecidos y entregados directamente por el agente participativo de cada área. El uso de distribuciones triangulares se basa en el comportamiento que se conoce tienen estos procesos, que tienden a seguir tal distribución y además, porque permite establecer de manera práctica el cambio de valores para los parámetros de la distribución al momento de testear distintos escenarios, donde una mejora en el desempeño se ve reflejada en un aumento de los tres parámetros. También, producto de lo anterior, para estos procesos no se hace una diferenciación entre verano e invierno, es decir, se toma una sola distribución para todo el año, sin embargo la estructura del modelo queda diseñada para que cuando se tenga una mejor base de datos de estos procesos se puedan tratar de forma diferenciada el verano y el invierno.

Otro punto a destacar, tiene que ver con el flujo y variables del modelo descritas, ya que los stocks mencionados no necesariamente existen físicamente en la operación. Se tiene que el botadero, el stock de material tronado y el stock de mineral sí tienen presencia real, pero los demás sólo representan la existencia de material disponible de cierto proceso para el que sigue, en los cuales tenemos que en servicio el stock representa las plataformas disponibles para que puedan ser perforadas, en perforación son los metros que ya están perforados anteriormente y no han sido tronados y disponibles para la tronadura, todo llevado a toneladas de material disponible, y finalmente en los procesos de carguío y transporte no existe un stock, ya que la pala extrae y carga material al camión, es decir, no hay posibilidad de dejar material disponible para que luego el camión lo transporte o viceversa, que la pala lo cargue si no hay un camión disponible; lo que se traduce en los tiempos de espera asociados a este proceso.

A continuación se señala una tabla resumen de las entradas del modelo:

[9] Índice determinado por el área de perforación, que representa las toneladas equivalentes a los metros perforados; basado en las características de la roca.

Tabla 4-2. Entradas del Modelo.

Variable	Unidad de medida	Tipo de ingreso	Parámetros	Detalle
Reserva Mineral	Ton	Valor Fijo	Capacidad Inicial	-
REM	-	Valor fijo	REM requerida	Por mes y por fase
Distancia media	km	Valor fijo	Distancia media estimada	Por mes, por fase, por tipo de material
Stock	Ton	Valor aleatorio y Valor fijo	Capacidad inicial (aleatorio) Capacidad máxima (fijo)	Por fase y distinción verano/invierno
Proceso Unitario	Ton/día	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por fase
Número de Camiones	-	Valor fijo	Número de camiones asignados	Por mes, fase, flota y tipo de material
Disponibilidad camiones	%	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por flota y distinción verano/invierno
Uso disponibilidad camiones	%	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por flota y distinción verano/invierno
TKPH camiones	Ton/km	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por flota y distinción verano/invierno
Número de palas	-	Valor fijo	Número de palas asignadas	Por mes, fase, capacidad y tipo de material
Disponibilidad palas	%	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por capacidad y distinción verano/invierno
Uso disponibilidad palas	%	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por capacidad y distinción verano/invierno
Rendimiento operativo palas	Ton/hora	Distribución	Según la distribución que lo represente	Por capacidad y distinción verano/invierno

Como todo modelo de simulación, la presencia de valores aleatorios, la dependencia y continuidad de una variable con otra requiere de restricciones condicionales que siguen cierta secuencia.

Antes de describir la secuencia de simulación se explican los siguientes conceptos asociados a ella:

- Proceso sin restricción (PSR): Valor aleatorio del proceso unitario que arroja el modelo tras una iteración.
- Restricción mínima (RM): Es el mínimo valor de los procesos unitarios sin restricción para la parte de desarrollo y para la producción, donde en esta última además de tomar sus procesos unitarios, se agrega la suma de la restricción mínima del desarrollo con el Mineral Expuesto.
- Proceso Actual anterior (PAA): Valor del proceso anterior restringido.
- Capacidad Actual del Stock: (CASP): Material disponible en el stock del proceso anterior.
- Proceso Actual (PA): Valor del proceso restringido.
- Capacidad máxima Stock (CMSP): Capacidad máxima del stock asociado al proceso que se está restringiendo.
- Capacidad Inicial Stock (CISP): Material disponible en el stock del proceso que se está restringiendo.
- Relación estéril mineral (REM): Relación entre el estéril y el mineral que debe ser extraído según el plan.
- Mineral expuesto sin restricción (MESR): Cantidad de mineral que queda expuesto debido al estéril extraído sin restricción.[10]
- Mineral expuesto con restricción (MECR): Cantidad de mineral que queda expuesto luego de ser restringido.
- Carguío Actual Estéril (CAE): Valor de cantidad de estéril (desarrollo) del proceso de carguío restringido.
- Capacidad Máxima Stock Mineral Expuesto (CAME): Máxima capacidad para el stock de mineral expuesto.
- Capacidad Inicial Stock Mineral Expuesto (CISME): Mineral disponible en el stock del Mineral Expuesto.

En la figura 4-9 se muestra cómo es la secuencia de la simulación del modelo para los procesos unitarios de servicio, perforación y tronadura:

[10] MESR= Estéril extraído sin restricción/REM

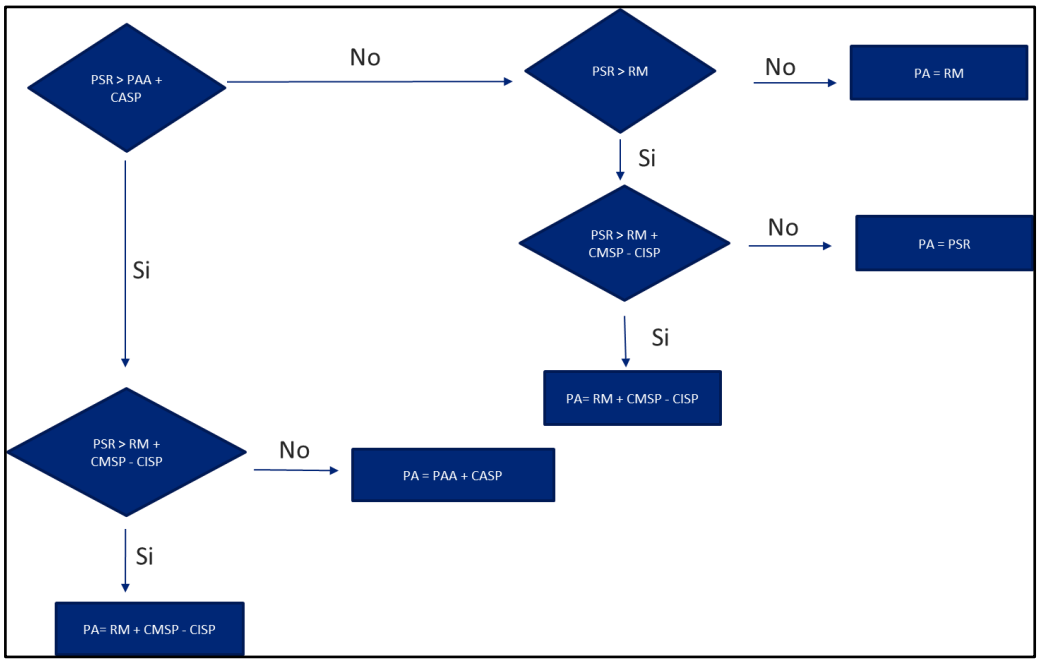


Figura 4-9. Secuencia de la Simulación de Servicio, Perforación y Tronadura.

Los procesos de carguío y transporte siguen otra secuencia condicional, debido a que son los últimos procesos del modelo y por la razón ya mencionada sobre la no existencia de stock entre ellos.

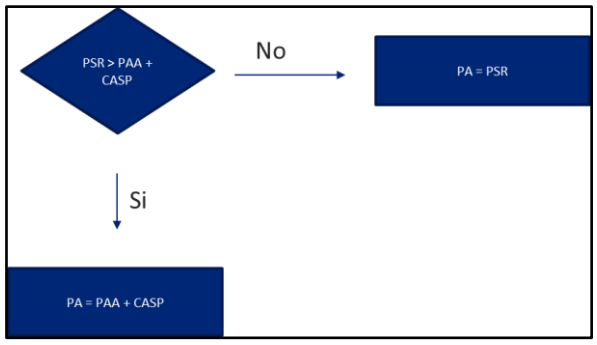


Figura 4-10. Secuencia Condicional Carguío.

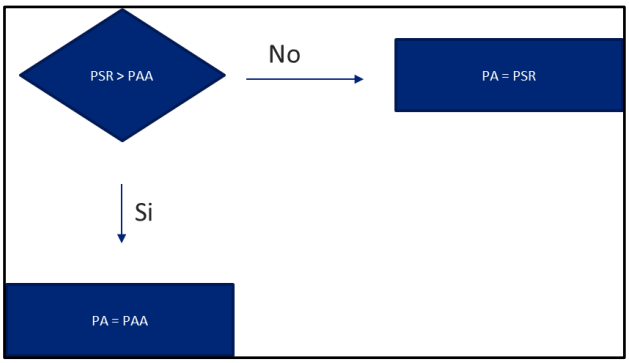


Figura 4-11. Secuencia Condicional Transporte.

Por último, para el mineral expuesto se aplica la secuencia condicional descrita en la figura 4-12., que restringe esta variable de tal forma que su valor dependa de la cantidad de estéril que fue extraído.

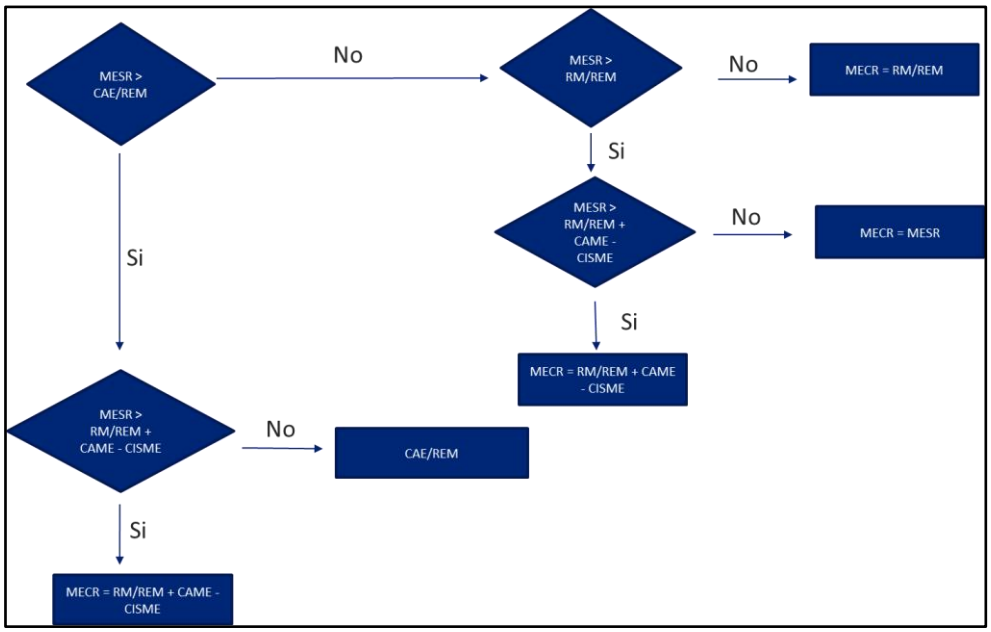


Figura 4-12. Secuencia condicional Mineral Expuesto

4.2. ANÁLISIS DE DATOS

La base fundamental para obtener un modelo que se acerque a la realidad radica en la calidad y representatividad de la base de datos que se utilicen. Por lo tanto, es imperativo hacer un análisis de ellos en cuanto a su comportamiento y dependencia.

También, para lograr un buen análisis de capacidad de los procesos y generar ajustes de distribuciones representativas, se deben utilizar datos en los períodos en que cada proceso haya sido estable y un buen filtro de valores.

4.2.1. Correlación disponibilidad y uso disponibilidad

Se analiza si existe una correlación entre las variables de disponibilidad y uso de disponibilidad para los camiones y palas, en verano y en invierno.

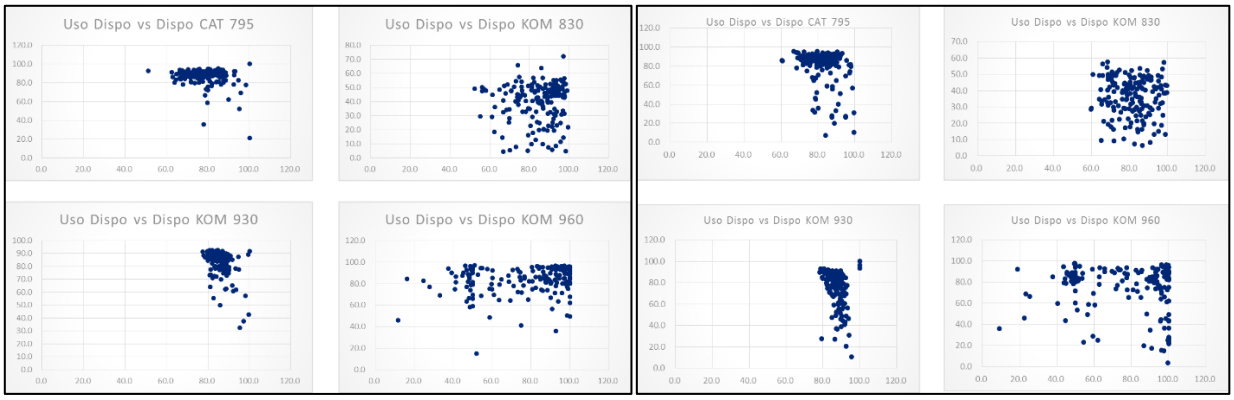


Figura 4-13. Correlación entre Disponibilidad y uso de Disponibilidad en verano e invierno para camiones.

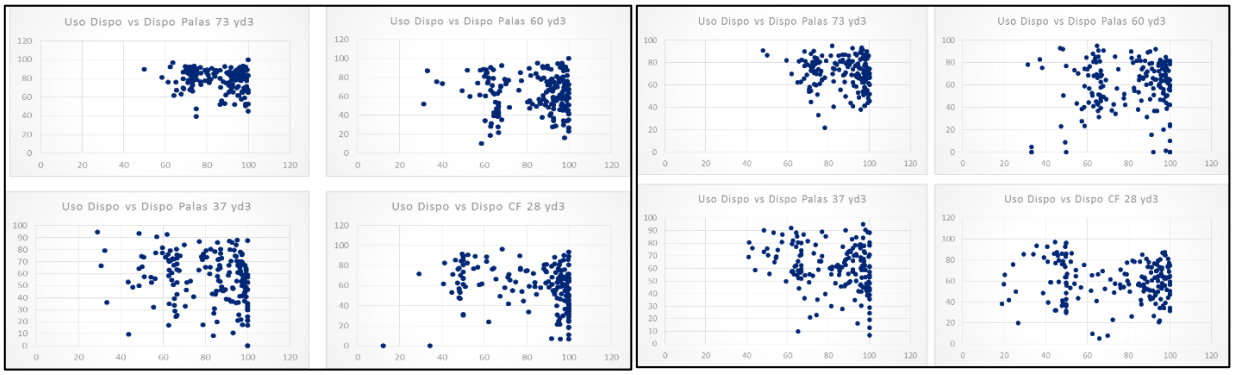


Figura 4-14.Correlación entre Disponibilidad y uso de Disponibilidad en verano e invierno para palas

Al observar cada gráfico se aprecia que existe una gran dispersión en los valores obtenidos, denotando que las variables son prácticamente independientes. También los valores de R cuadrado[11] (R^2) resultantes son muy cercano a cero para cada uno de los gráficos. Entonces, en base a lo analizado se determina que no existe correlación entre estas dos variables tanto para los camiones como para las palas, por lo tanto, pueden ingresarse en el modelo como valores aleatorios independientes.

[11] R^2 es un estadístico que se utiliza para determinar la bondad de ajuste de una regresión sobre un conjunto de datos, donde en este caso se están comparando dos variables y se busca una regresión capaz de representar alguna relación entre ellas. R^2 toma valores entre 0 y 1, donde si es cercano a 1 es un buen ajuste (>0,6) y si es cercano a 0 es un mal ajuste (<0.3). R^2 > 0.5 no es un buen ajuste, pero si denota cierta correlación entre las variables.

4.2.2. Correlación rendimiento operativo (ton/hora) y distancia media (km):

Para los camiones se analiza si hay correlación entre el rendimiento operativo y la distancia media.

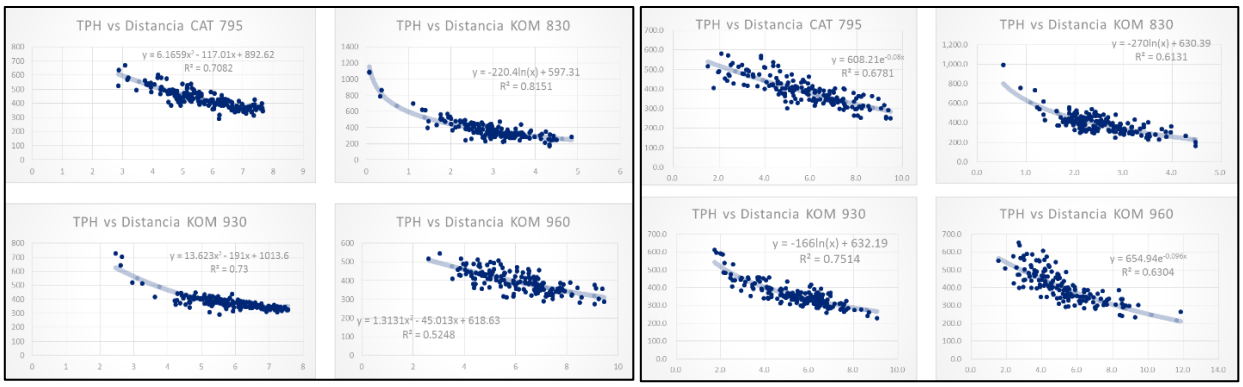


Figura 4-15. Correlación entre Rendimiento operativo y Distancia Media.

Se observa en las gráficas que existe una baja dispersión en los valores obtenidos, donde un mayor rendimiento operativo está relacionado a una menor distancia y vice versa, es decir, hay cierta dependencia de una variable con la otra. También los valores de R^2 resultantes de los ajustes representados son mayores a 0.6. Entonces, en base a lo analizado se determina que en vez de utilizar el rendimiento operativo, se utiliza el TKPH (toneladas kilómetros por hora) que representan de mejor manera el rendimiento del camión, que queda determinado por la distancia media que recorre.

4.2.3. Comportamiento periódico

Se analiza si existe alguna tendencia sobre la disponibilidad y el uso de disponibilidad de un día para otro.

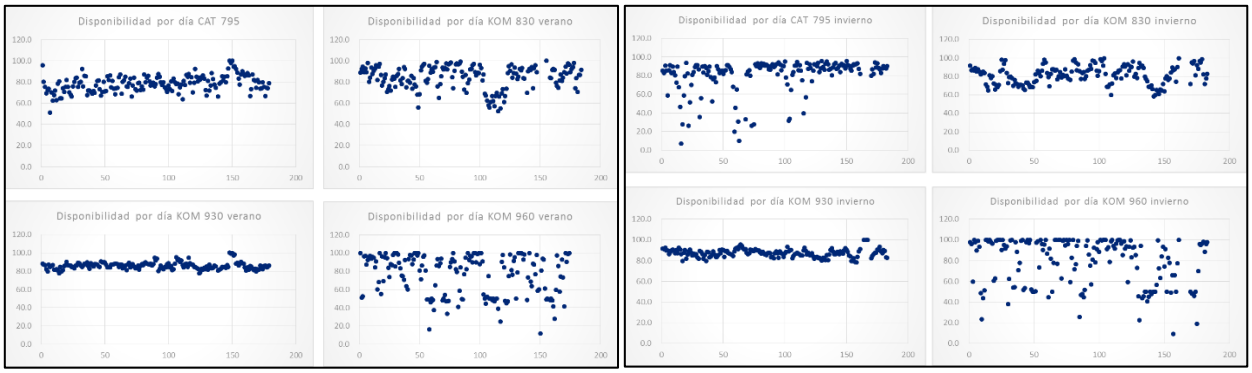


Figura 4-16. Tendencia sobre la Disponibilidad por día en Camiones.

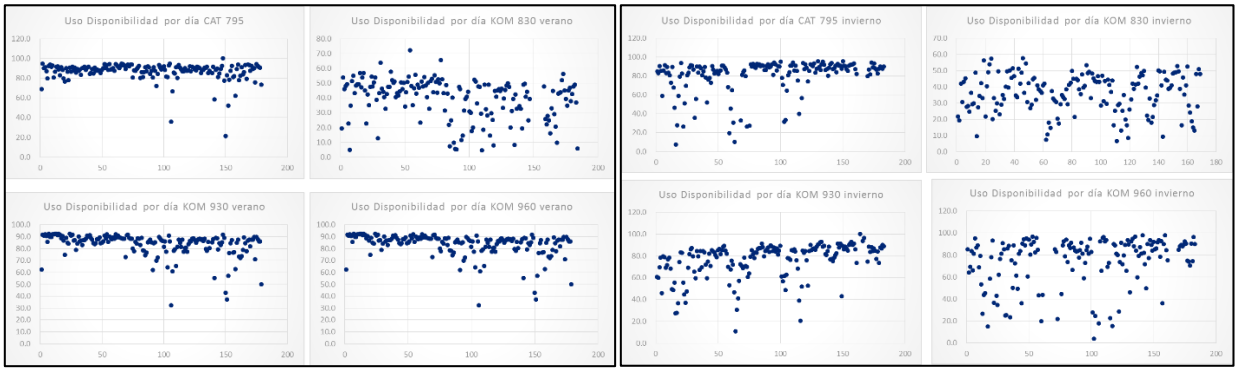


Figura 4-17. Tendencia sobre la Disponibilidad de Uso por día en Camiones.

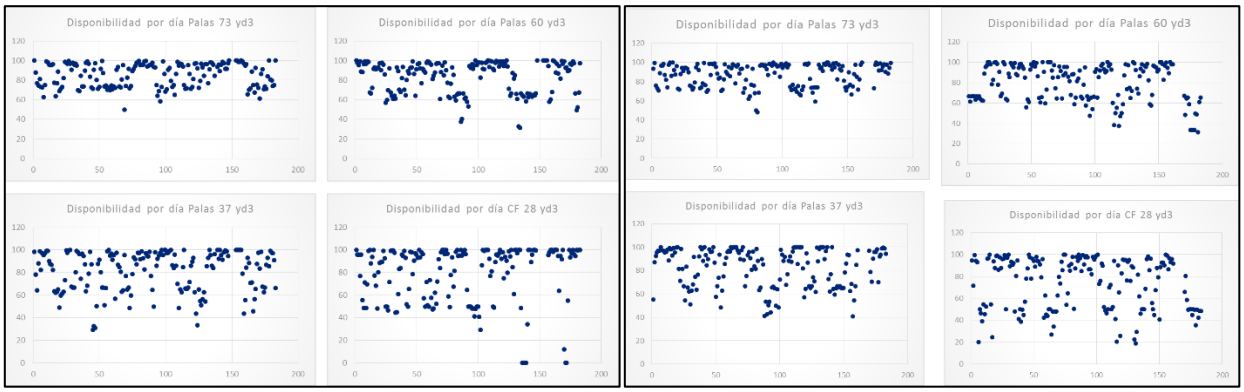


Figura 4-18. Tendencia sobre la Disponibilidad de Uso por día en Palas.

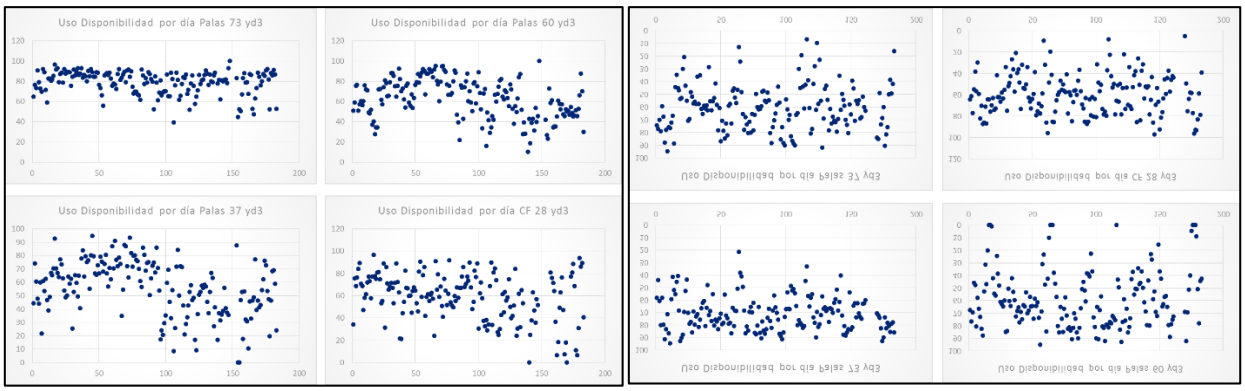


Figura 4-19. Tendencia sobre la Disponibilidad de Uso por día en Palas.

Al observar los gráficos se aprecia que existe una gran dispersión en los valores obtenidos, denotando que las variables son prácticamente independientes. También los valores de R^2 resultantes son muy cercano a cero para cada uno de los gráficos. Entonces, en base a lo analizado se determina que no existe correlación entre estas dos variables tanto para los camiones como para las palas, por lo tanto, pueden ingresarse en el modelo como valores aleatorios independientes.

4.2.4. Gráficas de control

La elección de los datos representativos para generar las distribuciones pertinentes que se requieren en el modelo, se hace mediante un análisis de las gráficas de control de la variable, donde se toman los valores de los períodos con mayor estabilidad y datos que no estén fuera de los límites de control, para los meses de verano y para los de invierno.

Como ejemplo, la figura 4-20 muestra la elección de datos en períodos estables de la variable disponibilidad para la flota KOM 930, se distingue que los meses a considerar en la elección de datos para el 2016 en el período del verano (círculo amarillo) se deja fuera el mes de diciembre, ya que es un mes que tiene valores muy inestables y bajo en comparación a los otros meses, además se hace un filtro de los valores bajo los límites de control y causas especiales como la huelga de septiembre, por lo cual los valores de esos días no son considerados.

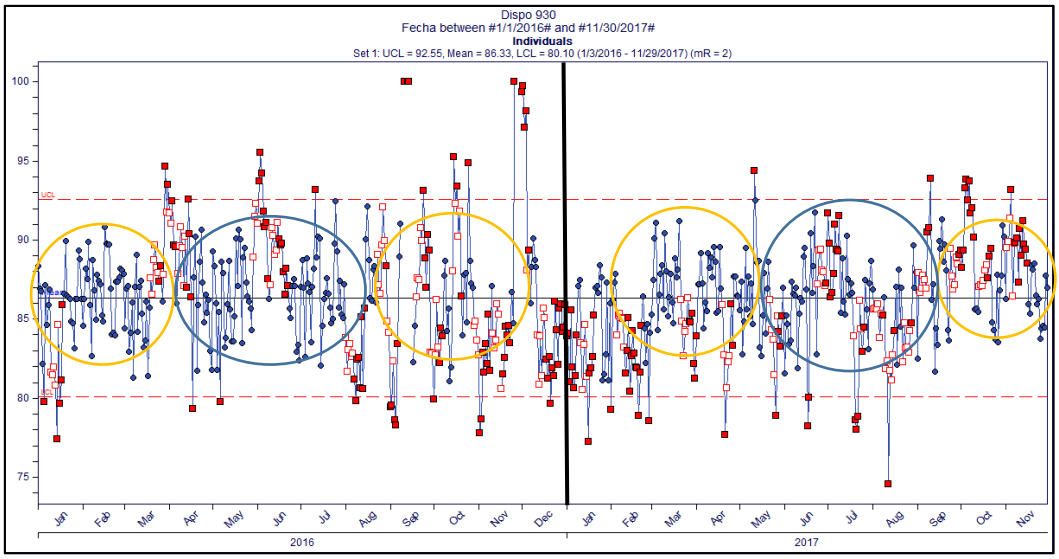


Figura 4-20. Ejemplo selección de datos en períodos estables de disponibilidad para la flota KOM 930, período invierno y verano.

Se aprecia que en estas variables no hay mucha diferencia en los períodos estables entre el verano e invierno (círculo azul), pero no se da siempre así y sí existen otras que si la tienen, como por ejemplo en el uso de disponibilidad del KOM 960 donde se ve claramente una mayor variabilidad e inestabilidad en los meses de invierno que en el verano (figura 4-21). Además, su variabilidad es muy afectada producto de que sólo se cuentan con 2 camiones KOM 960.

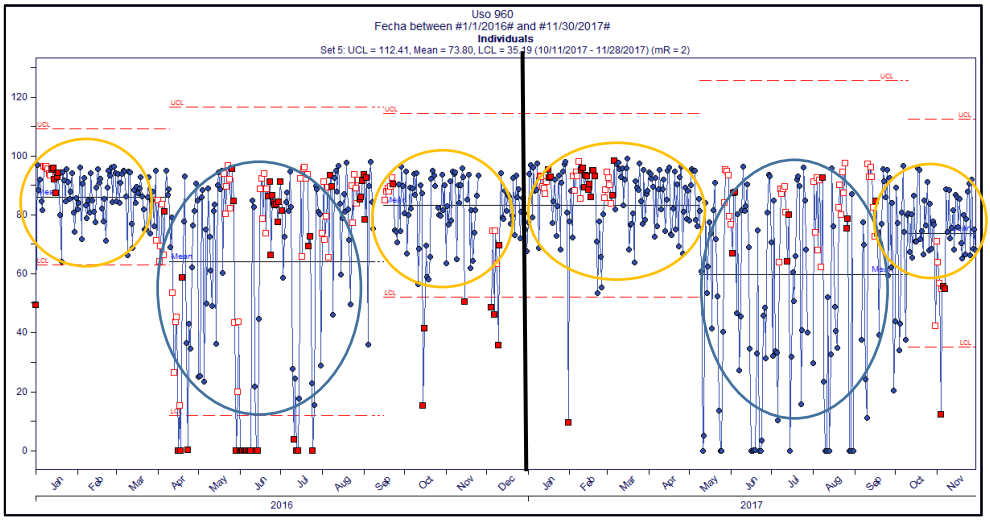


Figura 4-21. Selección de Datos estables de disponibilidad de flota KOM 960, Período invierno y verano

Se realiza esto para cada una de las variables involucradas en el modelo y que requieren un ajuste de distribución.

4.3. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Tras el análisis de los datos del año anterior al que se hará la simulación, se definen las distribuciones de probabilidad de las entradas que lo requieran (tabla 4-2) según el ajuste que entrega @Risk y el criterio propio para la elección del ajuste que mejor represente a la variable. A continuación se ejemplifican algunos ajustes realizados a ciertas variables.

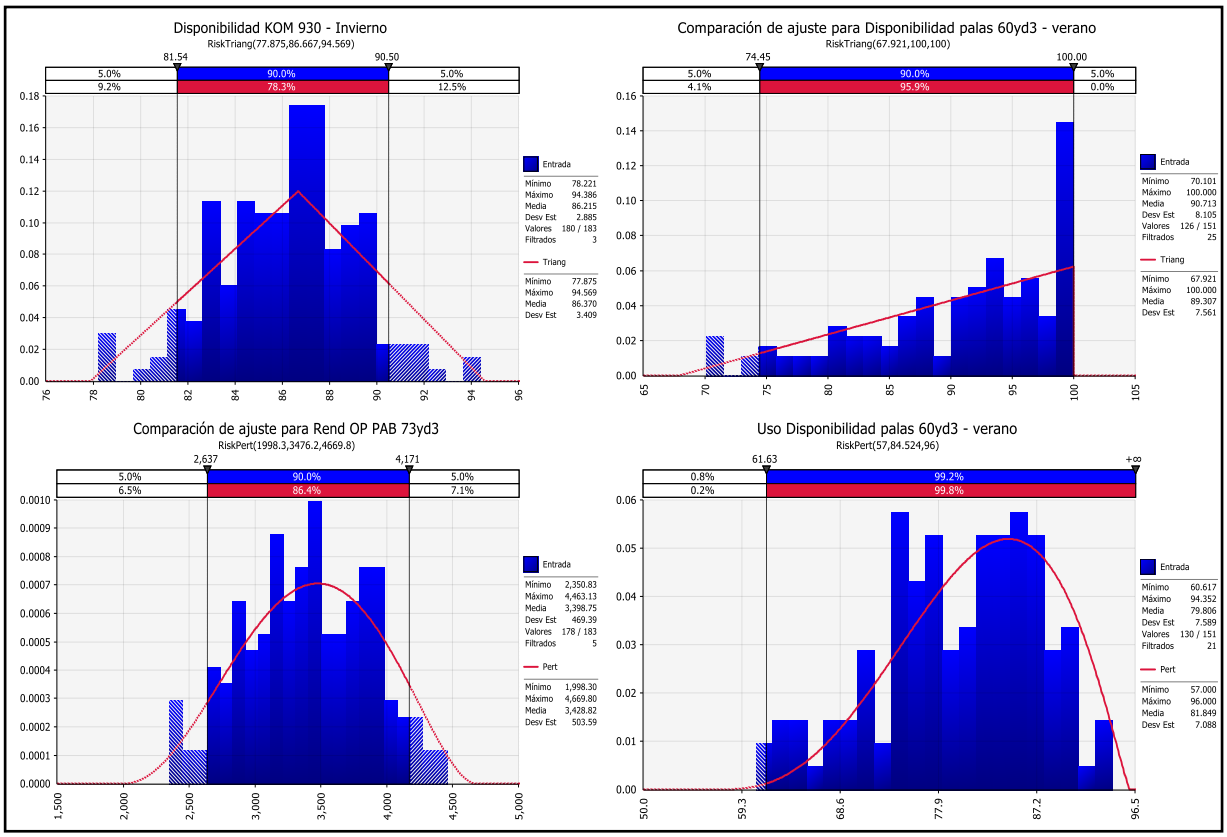


Figura 4-22. Ejemplo ajustes a variables realizados con @Risk

En este análsis es fundamental tener claro el comportamineto de las variables, ya que la mayoría de ellas son acotadas en un mínimo y/o máximo, donde por ejemplo, no se pueden obtener valores negativos en ningún caso, ni tampoco mayores que un 100% en el caso de las variables porcentuales.[12]

4.4. CAUSAS ESPECIALES

Para incluir incertidumbre al modelo, asociada a otros factores que afectan a la operación como por ejemplo, el efecto climático, problemas de acceso a una fase, etc. Se utilizan gráficas de control de la extracción total de cada fase del año anterior; con ellas se puede visualizar los días en que la extracción fue afectada (causas especiales y valores fuera del límite del control inferior). Para el caso que se tenga que simular una fase nueva, esta variable se debe estimar con un escenario conservador.

[12] En algunas circunstancias la distribución que mejor representa cierta variable tiene como parámetro máximo un valor superior al 100%, pero en el modelo existe la condición que impide que supere dicho valor.

Se cuentan los días en los que existe una causa especial o un valor bajo el límite de control, haciendo la diferenciación con los días en que la extracción es cero. Se construye una distribución de probabilidad de ocurrencia de los días contados sobre los días invierno y los días de verano por separado.

Para determinar el impacto que tiene en la extracción la ocurrencia de un evento descrito en el párrafo anterior, se tiene que para el caso de los días en que la extracción es cero, el impacto es directo de un 100%, para que en el modelo la extracción de ese día simulado sea cero, mientras que para los demás días, el impacto se calcula según una distribución Pert con parámetros de 20%,40% y 70%, parámetros que reflejan el porcentaje de impacto negativo sobre el valor de extracción simulado en ese día.

En la figura 4-23 se tiene un ejemplo de un gráfico de control de la extracción de la fase Infiernillo 5, en él se aprecia la existencia de 11 puntos bajo el límite de control inferior para invierno, de los cuales 6 se consideran puntos con días cero con impacto de 100% (círculos azules) y 5 con impacto asociada a la distribución Pert (círculos morados). Para el verano si bien se observan bastantes puntos bajo el límite de control inferior, hay que tener criterio para la selección de estos, ya que en este caso, se ve que la causa tiene que ver con que se destina a mover mayor remanejo de lo planificado, por lo cual sólo se tomaran algunos de ellos con el fin de no sobreestimar ni subestimar la situación que puede ser relevante al momento de simular; entonces se toman 3 días con cero extracción más 4 días de los otros (círculos amarillos).

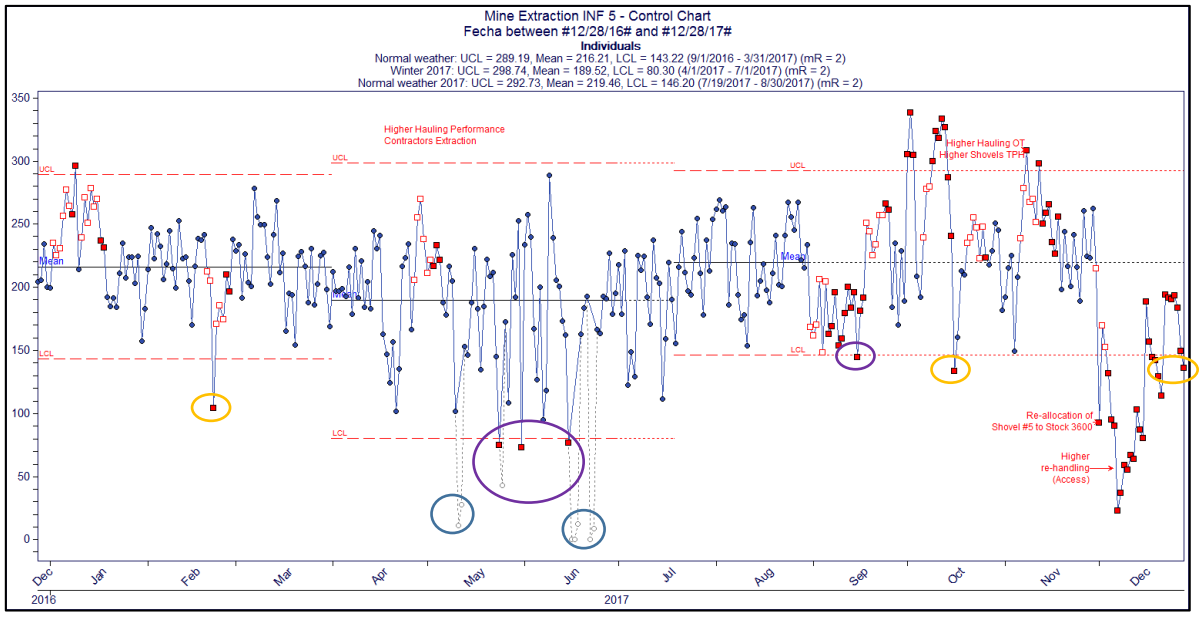


Figura 4-23. Gráfico de Control extracción Fase Infiernillo 5.

4.5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validar el modelo, se realiza una simulación con entrada de datos históricos del año 2016 y otros parámetros definidos según el plan generado para el año 2017, como lo son la REM, la distancia media, la asignación de camiones y de palas; y se compara con la extracción real que se obtuvo ese año.

4.5.1. Entradas

1) Fases

Las fases operativas para la mina Los Bronces el año 2017 son Donoso 2, Casino 2, Infiernillo 5 e Infiernillo 7; de las cuales Donoso 2 está en etapa de desarrollo y en manos de contratistas, por lo tanto, las fases incluidas en el modelo son Casino 2, Infiernillo 5 e Infiernillo 7.

2) REM

De las 3 fases a modelar, Casino 2 ya se encuentra en etapa de producción, mientras que Infiernillo 5 en vías de llegar a esta etapa e Infiernillo 7 prácticamente en desarrollo, lo que se traduce en una REM baja para Casino 2, y más elevada para Infiernillo 5 y 7. (tabla 4-3)

Tabla 4-3. REM por cada Fase según plan año 2017.

REM (#)	Casino 2	Infiernillo 5	Infiernillo 7
Enero	0.58	7.30	73.79
Febrero	0.56	3.02	106.22
Marzo	0.30	8.58	3.74
Abril	0.68	3.69	1.07
Mayo	0.36	3.51	7.95
Junio	0.80	2.72	11.79
Julio	0.40	2.86	0.94
Agosto	0.64	3.25	1.57
Septiembre	0.26	0.95	3.23
Octubre	0.51	1.99	1.34
Noviembre	0.54	1.72	1.40
Diciembre	0.60	2.61	1.63

3) Stocks

La tabla 4-4 describe los parámetros utilizados para los Stock del modelo.

Tabla 4-4. Parámetros para Stocks año 2017.

Stock	Capacidad inicial	Capacidad máxima
Reserva Mineral[13]	50000000	-
Servicio	Random (0,500)	2000
Perforación	Random (0,1200)	3000
Tronadura	Random (0,1800)	5000

4) Procesos unitarios

Las entradas de cada una de las distribuciones de probabilidad de los procesos unitarios son las que se especifican en la tabla 4-5.

El índice de perforabilidad utilizado es de 200 (ton/m) para Casino 2 y 185 (ton/m) para Infiernillo 5. En el caso de la fase Infiernillo 7 no se tiene información histórica, por lo tanto, se define su distribución de perforación mediante las estimaciones de los expertos del área, con un valor mínimo, el más probable y el máximo en toneladas por día según una distribución triangular.

Recordar que para servicio y tronadura, las distribuciones se definen según los agentes de cada área. Además se utiliza la función random para los parámetros mínimo y máximo, con el fin de integrar algo más de variabilidad al límite impuesto por el encargado del área.

Tabla 4-5. Distribuciones de probabilidad de cada proceso para el año 2017

Variable	Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Servicio Casino 2	Triangular	Random (170000,180000)	230000	Random (240000,260000)
Servicio Infiernillo 5	Triangular	Random (160000,170000)	220000	Random (230000,250000)
Servicio Infiernillo 7	Triangular	Random (165000,175000)	225000	Random (2350000,235000)
Perforación Casino 2	Triangular	159880	159940	600879
Perforación Infiernillo 5	Triangular	102378	102512	522233
Perforación Infiernillo 7	Triangular	100000	120000	400000
Tronadura Casino 2	Triangular	Random (220000,240000)	260000	Random (270000,280000)
Tronadura Infiernillo 5	Triangular	Random (210000,230000)	245000	Random (260000,270000)
Tronadura Infiernillo 7	Triangular	Random (215000,235000)	255000	Random (260000,280000)

[13] Esta variable no está actualizada a un valor real actual, y se coloca un número grande, ya que la reserva mineral aún no es crítica para Los Bronces, en el momento que esté terminando la vida de la mina sí es relevante para la simulación y debe actualizarse a un valor real.

5) Distancia media

La distancia media utilizada se coloca en el modelo según las que tiene estimada planificación para el año 2017.

Tabla 4-6. Distancia Media de para el 2017.

Distancia Media (km)	Casino 2		Infiernillo 5		Infiernillo 7	
	Mineral	Estéril + Lix	Mineral	Estéril + Lix	Mineral	Estéril + Lix
Enero	3.8	4.8	8.7	7.1	6.0	3.5
Febrero	4.0	4.6	9.7	7.2	5.8	2.8
Marzo	3.2	5.3	8.0	7.7	6.0	4.1
Abril	4.1	5.8	7.1	7.1	6.5	4.4
Mayo	4.3	5.6	7.2	6.3	5.8	3.7
Junio	4.5	5.9	7.2	7.0	5.8	4.2
Julio	3.3	4.5	8.1	6.5	6.1	3.3
Agosto	3.2	5.5	7.2	8.1	5.7	3.7
Septiembre	3.4	5.6	7.1	6.4	6.0	4.5
Octubre	3.7	5.9	7.7	6.6	6.3	3.6
Noviembre	3.7	7.1	6.6	6.9	5.7	4.7
Diciembre	4.0	6.5	8.0	7.7	6.3	5.1

6) Camiones

Para el año 2017 se tiene una flota 51 KOM 930, 11 CAT 795, 8 KOM 830 y 2 KOM 960. Su asignación para el modelo se encuentra disponible en el Anexo B, donde según el plan no se destinan camiones KOM 830 para la extracción.

Las distribuciones de probabilidad para los KPI de camiones son las señaladas en la tabla 4-7.

Tabla 4-7. Distribuciones para KPI de camiones año 2017

Variable	Período	Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3	Parámetro 4
Disponibilidad CAT 795	Verano	Pert	60.176	78.241	101	-
	Invierno	Pert	64.966	82.705	106.63	-
Disponibilidad KOM 930	Verano	Pert	77.156	84.573	101.79	-
	Invierno	Pert	77.862	85.978	101.89	-
Disponibilidad KOM 960	Verano	Triangular	45	100	100	-
	Invierno	Triangular	40	100	100	-
Uso Disponibilidad CAT 795	Verano	Triangular	71.628	90.971	100	
	Invierno	Pert	40	95.116	96	-
Uso Disponibilidad KOM 930	Verano	Pert	70	88.844	94	-
	Invierno	Kumaraswamy	5.0102	4.0337	30	103.028
Uso Disponibilidad KOM 960	Verano	Kumaraswamy	2.8157	0.70847	35	96.843
	Invierno	Pert	22	86.519	100	-
TKPH CAT 795	Verano	Pert	1329.3	2431.1	3400	-
	Invierno	Pert	449.63	2266.2	3217.3	-
TKPH KOM 930	Verano	Beta General	5.7932	2.035.9	1700	-
	Invierno	Triangular	912.34	2009.9	2648.9	-
TKPH KOM 960	Verano	Pert	1290.6	2306.6	3718.2	-
	Invierno	Pert	779.92	1977.6	3305.3	-

7) Palas

La flota de palas utilizadas para la extracción de estas fases según el plan del año 2017 corresponde a 6 palas eléctricas (PAB), 4 de 73yd3 (pala 8, 10,11 y 12) y 2 de 60 yd3 (pala 5 y 6) y 3 palas diésel (PHK) de 37yd3 (pala 9, 13 y 14); el cargador frontal no tiene asignación. En el Anexo B se encuentra la tabla que indica la asignación de palas por mes y por fase.

Tabla 4-8. Dsitribuciones KPI palas 2017

Variable	Estación	Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Disponibilidad pala 73 yd3	Verano	Triangular	60.218	100	100
	Invierno	Triangular	60.105	100	100
Disponibilidad pala 60 yd3	Verano	Triangular	49.068	100	100
	Invierno	Triangular	42.835	100	100
Disponibilidad pala 37 yd3	Verano	Triangular	27.456	100	100
	Invierno	Triangular	38.250	100	100
Uso Disponibilidad pala 73 yd3	Verano	Pert	35.384	84.769	100.59
	Invierno	Pert	20.367	77.855	96.061
Uso Disponibilidad pala 60 yd3	Verano	Pert	20	63.177	108.48
	Invierno	Pert	20	67.400	96
Uso Disponibilidad pala 37 yd3	Verano	Triangular	9.7494	70.281	96.770
	Invierno	Triangular	11.427	70.334	97.325
Rend. Operativo pala 73 yd3	Verano	Triangular	2716.1	3724.8	4773.3
	Invierno	Pert	2164.6	3277.9	5310.2
Rend. Operativo pala 60 yd3	Verano	Triangular	1972.4	3305.1	4484.4
	Invierno	Triangular	1458.2	2918.9	4257.8
Rend. Operativo pala 37 yd3	Verano	Pert	539.03	1448.7	2400
	Invierno	Triangular	540.46	1508	2411.3

8) Causas Especiales

Los parámetros y distribuciones utilizadas para las causas especiales según los gráficos de control del año 2016[14] (Anexo B) son:

Tabla 4-9. Parámetros y distribuciones para causas especiales, Casino 2 año 2017

		Días	Impacto
Verano	**Bajo límite de control**	12	Pert(20,40,70)
	Cero días	1	100%
Invierno	**Bajos límite de control**	15	Pert(20,40,70)
	Cero días	3	100%

[14] No se consideran los días de la huelga del año 2016.

Tabla 4-10. Parámetros y distribuciones para causas especiales, Infiernillo 5 año 2017

		Días	Impacto
Verano	**Bajo límite de control**	9	Pert(20,40,70)
	Cero días	1	100%
Invierno	**Bajos límite de control**	20	Pert(20,40,70)
	Cero días	8	100%

Debido a que Infiernillo 7 es una nueva fase para el año 2017 se estima el siguiente escenario conservador:

Tabla 4-11. Parámetros y distribuciones para causas especiales, Infiernillo 7 año 2017

		Días	Impacto
Verano	**Bajo límite de control**	7	Pert(20,40,70)
	Cero días	1	100%
Invierno	**Bajos límite de control**	10	Pert(20,40,70)
	Cero días	2	100%

4.5.2. Resultados

Tras la realización de la simulación, los histogramas de probabilidad resultantes entregan los siguientes valores de capacidades de extracción para el año 2017 con un 90% de confianza:

Tabla 4-12. Valores de la Capacidad de Extracción para el 2017, con 90% de confianza

Extracción de Mineral (Mton)	Extracción Material Estéril + Lix (Mton)	Extracción Total (Mton)
46.87 - 48.13	69.10 – 70.60	116.01 – 118.79

Con lo anterior, se tiene que la extracción real del año 2017 (ver tabla 4-13.) se encuentra dentro del intervalo de confianza con un 90% de probabilidad de acierto, lo que indica que el modelo estaría entregando valores acordes al desempeño logrado el año 2017 y que se mueven en un rango similar en cuanto al orden de magnitud.

También, al realizar una comparación entre indicadores estadísticos que entrega el modelo vs el real junto con la comparación entre el plan y el real, se obtiene que el plan está muy alejado y sobreestimado según la extracción real que se obtuvo el año 2017, mientras que el modelo entrega

indicadores de probabilidad con una baja variación de acuerdo a este, donde se tiene un 83% de probabilidad de alcanzar y haber logrado superar la extracción real que se obtuvo el 2017.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se tiene que, a diferencia del plan que se pretendía cumplir para el año 2017, el modelo se acerca más a los resultados reales que se alcanzaron ese año. En la sección de Anexo B se encuentran los histogramas de probabilidad de extracción entregados por el modelo para el año 2017.

Tabla 4-13. Comparación extracciones del año 2017

	Real (MTon)	**Plan (MTon)**	**Variación Real vs Plan**	**Modelo BSP (MTon)**	**Variación Real vs Modelo**
Extracción Mineral	48.992	56.65	-14%	47.198 (c80) 47.522 (P50) 47.790 (p75)	+4% +3% +3%
Extracción Estéril + Lix	67.975	89.66	-24%	68.478 (c80) 69.822 (P50) 70.191 (p75)	-1% -3% -3%
Extracción Total	116.967	146.305	-20%	116.69 (c80) 117.42 (P50) 117.95 (p75)	+0.24% -0.39% -0.83%

Entonces, los resultados y análisis realizados permiten validar que el modelo si es capaz de proyectar de buena manera y la capacidad de la mina según su desempeño histórico entregar un rango de probabilidades de extracción, para así poder realizar un análisis rápido de la confiablidad del plan y generar diversos escenarios para un análisis de las limitaciones y oportunidades que se presentan.

CAPÍTULO 5: APLICACIÓN MODELO PARA EL AÑO 2018

Para entender la utilidad del modelo BSP y cómo este puede ayudar a establecer estrategias y focos en la operación Los Bronces, se trabaja en la evaluación de escenarios para el año 2018.

5.1. CASO BASE

El caso base utiliza datos reales del año 2017 para la generación de las distribuciones y datos del plan realizado para el año 2018, como lo es la REM, la distancia media, la asignación de camiones y de palas.

5.1.1. Entradas

1) Fases

Las fases operativas para la mina Los Bronces el año 2018 serán Infiernillo 5, Infiernillo 7, Casino 2 y Donoso 2, de las cuales Casino 2 está en su etapa terminal y quedará en manos de contratistas, y Donoso 2 sigue en proceso de desarrollo e igual queda en manos de contratistas, por lo tanto, las fases incluidas en el modelo son Infiernillo 5 e Infiernillo 7.

2) REM

Ambas fases anteriores para el año 2018 estarán prácticamente en producción.

Tabla 5-1. REM por Fase año 2018.

REM (#)	Infiernillo 5	Infiernillo 7
Enero	1.16	1.08
Febrero	0.85	0.82
Marzo	0.36	1.83
Abril	1.02	0.88
Mayo	0.98	0.94
Junio	0.42	1.59
Julio	1.28	1.80
Agosto	0.83	0.76
Septiembre	0.58	0.76
Octubre	1.05	2.60
Noviembre	0.98	1.31
Diciembre	1.34	1.85

3) Stocks

La tabla 5-2. describe los parámetros utilizados para los Stock del modelo.

.

Tabla 5-2. Parámetros utilizados para los Stock año 2018

Stock	Capacidad inicial	Capacidad máxima
Reserva Mineral	50000000[15]	-
Servicio	Random (0,500)	2000
Perforación	Random (0,1200)	3000
Tronadura	Random (0,1800)	5000

4) Procesos unitarios

Las entradas de cada una de las distribuciones de probabilidad de los procesos unitarios son las que se especifican en la tabla 5-3.

El índice de perforabilidad utilizado es de 185 (ton/m) para Infiernillo 5 y 170 para Infiernillo 7.

Recordar que para servicio y tronadura, las distribuciones se definen según los agentes de cada área. Además se utiliza la función random para los parámetros mínimo y máximo, con el fin de integrar algo más de variabilidad al límite impuesto por el encargado del área.

Tabla 5-3. Distribuciones de probabilidad de cada proceso para el año 2018

Variable	Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Servicio Infiernillo 5	Triangular	Random (170000,180000)	220000	Random (250000,270000)
Servicio Infiernillo 7	Triangular	Random (160000,170000)	210000	Random (230000,250000)
Perforación Infiernillo 5	Pert	50000	232827	798887
Perforación Infiernillo 7	Triangular	39578	94360	366854
Tronadura Infiernillo 5	Triangular	Random (220000,240000)	245000	Random (260000,280000)
Tronadura Infiernillo 7	Triangular	Random (210000,230000)	240000	Random (250000,270000)

5) Distancia media

La distancia media utilizada se coloca en el modelo según las que tiene estimada planificación para el año 2018.

[15] Esta variable no es real, y se coloca un número grande, ya que la reserva mineral aún no es crítica para Los Bronces, en el momento que esté terminando la vida de la mina sí es relevante y debe actualizarse a un valor real.

Tabla 5-4. Distancia Media utilizada según planificación año 2018.

Distancia Media (km)	Infiernillo 5		Infiernillo 7	
	Mineral	Estéril + Lix	Mineral	Estéril + Lix
Enero	8.8	9.8	5.7	3.5
Febrero	6.8	6.3	5.0	3.7
Marzo	6.8	6.6	2.0	3.4
Abril	7.0	7.4	2.6	6.9
Mayo	6.0	7.3	3.0	6.7
Junio	6.5	7.6	3.0	5.8
Julio	6.7	6.5	2.8	3.6
Agosto	6.5	6.8	1.8	3.9
Septiembre	6.1	6.6	2.4	4.9
Octubre	7.0	6.0	3.4	6.1
Noviembre	7.2	6.3	2.9	6.7
Diciembre	5.7	7.7	3.2	6.6

6) Camiones

Para el año 2018 se tiene una flota de 56 KOM 930, 11 CAT 795 y 2 KOM 960. Su asignación es en base a lo establecido por planificación (Anexo C).

Las distribuciones de probabilidad para los KPI de camiones son las señaladas en la tabla 5-5.

.

Tabla 5-5. Distribuciones para KPI camiones año 2018

Variable	Período	Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3	Parámetro 4
Disponibilidad CAT 795	Verano	Triangular	56.078	79.558	93.512	-
	Invierno	Pert	54.869	77.482	95.518	-
Disponibilidad KOM 930	Verano	Beta General	8.5011	8.1783	71.982	99.576
	Invierno	Triangular	77.875	86.667	94.569	-
Disponibilidad KOM 960	Verano	Triangular	40	100	100	-
	Invierno	Triangular	19.697	100	100	-
Uso Disponibilidad CAT 795	Verano	Triangular	73.589	93.925	96	-
	Invierno	Triangular	39.636	93.213	95	-
Uso Disponibilidad KOM 930	Verano	Triangular	59.056	93.309	93.309	-
	Invierno	Pert	30.801	83.990	93	-
Uso Disponibilidad KOM 960	Verano	Triangular	32.935	99.273	99.273	-
	Invierno	Triangular	33.866	96.297	98	-
TKPH CAT 795	Verano	Pert	1719	2654.8	3500	-
	Invierno	Triangular	1800	2298.3	3200	-
TKPH KOM 930	Verano	Pert	1989.4	2324.2	3000	-
	Invierno	Pert	1800	2163	2844.5	-
TKPH KOM 960	Verano	Pert	1665.6	2367.4	4431.8	-
	Invierno	Pert	1400	2301.4	4098.7	-

7) Palas

La flota de palas utilizada según el plan del 2018 para le extracción de estas dos fases contempla el uso de 6 palas eléctricas (PAB), 4 de 73yd3 (pala 8, 10,11 y12) y 2 de 60 yd3 (pala 5 y 6) más una pala diésel (PHK14) de 37 yd3. En el Anexo C se encuentra la tabla que indica la asignación de palas por mes y por fase.

Tabla 5-6. Distribuciones para KPI palas año 2018

Variable	Estación	Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Disponibilidad pala 73 yd3	Verano	Triangular	63.699	100	100
	Invierno	Triangular	60.908	100	100
Disponibilidad pala 60 yd3	Verano	Triangular	67.921	100	100
	Invierno	Triangular	48.497	100	100
Disponibilidad pala 37 yd3	Verano	Triangular	51.08	100	100
	Invierno	Triangular	60	100	100
Uso Disponibilidad pala 73 yd3	Verano	Triangular	60	85.299	97
	Invierno	Pert	30	75.069	100
Uso Disponibilidad pala 60 yd3	Verano	Pert	57	84.524	96
	Invierno	Triangular	30.681	87.916	95
Uso Disponibilidad pala 37 yd3	Verano	Pert	20	51.793	103.76
	Invierno	Triangular	20	47.149	90
Rend. Operativo pala 73 yd3	Verano	Triangular	2786.4	3544.9	4805.4
	Invierno	Pert	1998.3	3476.2	4669.8
Rend. Operativo pala 60 yd3	Verano	Pert	2283.5	3058.3	4501
	Invierno	Triangular	1635.3	3097.8	4395.8
Rend. Operativo pala 37 yd3	Verano	Triangular	509.89	1422.2	2320.8
	Invierno	Pert	404.39	1134.6	2623.7

8) Causas Especiales

Los parámetros y distribuciones utilizadas para las causas especiales según los gráficos de control del año 2017 (Anexo C) son:

Tabla 5-7. Parámetros y distribuciones para causas especiales del modelo, Infiernillo 5.

		Días	Impacto
Verano	**Bajo límite de control**	5	Pert(20,40,70)
	Cero días	6	100%
Invierno	**Bajos límite de control**	4	Pert(20,40,70)
	Cero días	3	100%

Tabla 5-8. Parámetros y distribuciones para causas especiales del modelo, Infiernillo 7.

		Días	Impacto
Verano	**Bajo límite de control**	6	Pert(20,40,70)
	Cero días	2	100%
Invierno	**Bajos límite de control**	4	Pert(20,40,70)
	Cero días	2	100%

5.1.2. Resultados

Tras la realización de la simulación, los histogramas de probabilidad resultantes (figura 5-1) entregan los siguientes valores de capacidades de extracción para el año 2018 con un 90% de confianza

Tabla 5-9. Valores de la Capacidad de Extracción para el 2018, con 90% de confianza.

Extracción de Mineral (Mton)	Extracción Material Estéril + Lix (Mton)	Extracción Total (Mton)
52.409 - 53.517	51.762 - 52.869	104.239 - 106.289

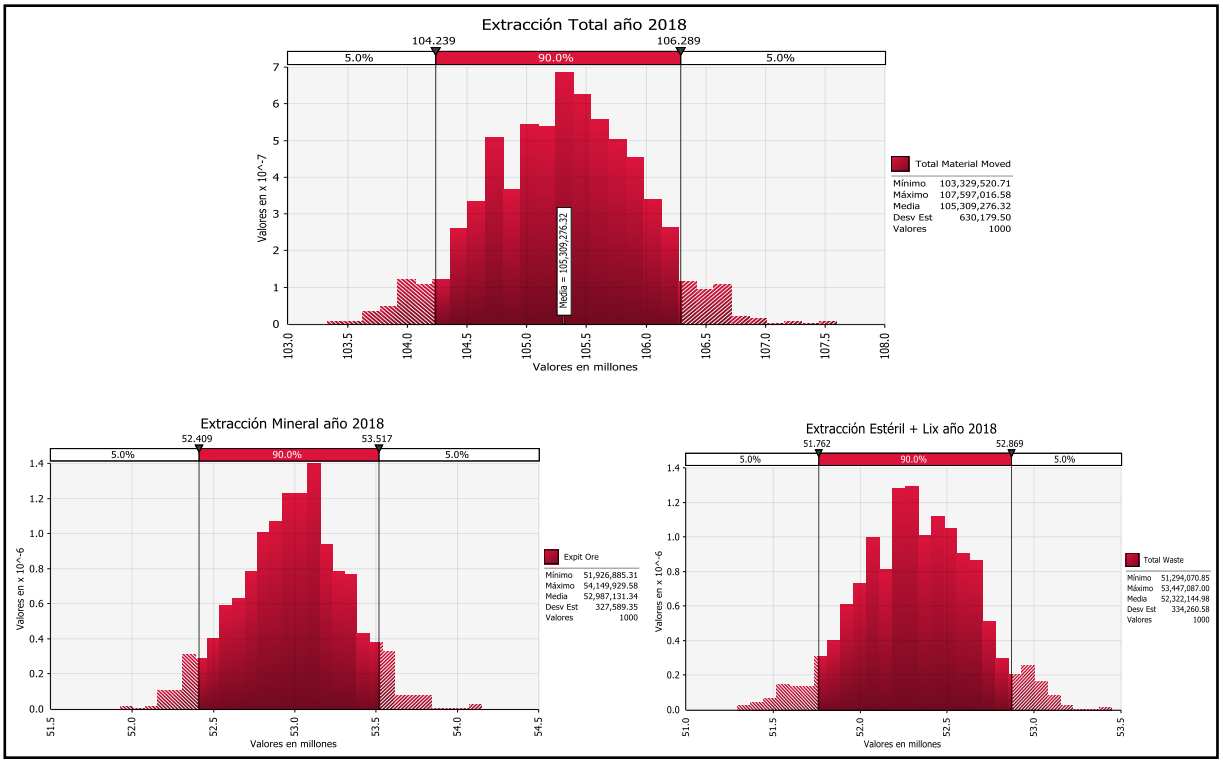


Figura 5-1. Histogramas de probabilidad de extracción para el año 2018

Con lo anterior, se tiene que la extracción total del plan para el año 2018 (tabla 5-10) no se encuentra dentro del intervalo de confianza con un 90% de probabilidad de acierto que entrega el modelo.

Tabla 5-10. Comparación extracciones año 2018.

	Plan 2018 (MTon)	Modelo BSP (MTon)	Variación Modelo vs Plan
Extracción Mineral	55.7	53.000 (c80)	-4.85%
		52.710 (P50)	-5.37%
		53.208 (P75)	-4.47%
Extracción Estéril + Lix	54.8	52.044 (c80)	-5.03%
		52.324 (P50)	-4.52%
		52.552 (P75)	-4.10%
Extracción Total	110.5	104.741 (c80)	-5.21%
		105.340 (P50)	-4.67%
		105.751 (P75)	-4.67%

Al analizar los resultados de extracción por fase (Tablas 5-11 y 5-12) se aprecia que ambas fases están por debajo del plan, en porcentajes similares, por lo cual no es posible centrarse en la mejora de una sola de ellas, sino que el foco debe ir en la mejora en el desempeño de ambas fases.

Tabla 5-11. Comparación extracciones Infiernillo 5 año 2018.

Infiernillo 5	Plan 2018 (MTon)	Modelo BSP (MTon)	Variación Modelo vs Plan
Extracción Mineral	37.309	35.749 (c80)	-4.18%
		35.942 (P50)	-3.66%
		36.115 (P75)	-3.20%
Extracción Estéril + Lix	31.932	30.211 (c80)	-5.39%
		30.367 (P50)	-4.90%
		30.494 (P75)	-4.50%

Tabla 5-12. Comparación extracciones Infiernillo 7 año 2018.

Infiernillo 7	Plan 2018 (MTon)	Modelo BSP (MTon)	Variación Modelo vs Plan
Extracción Mineral	18.360	17.003 (c80)	-7.39%
		17.14 (P50)	-6.64%
		17.249 (P75)	-6.05%
Extracción Estéril + Lix	22.856	21.783 (c80)	-4.69%
		21.973 (P50)	-3.86%
		22.066 (P75)	-3.46%

Por lo tanto, el modelo dice que basado en el desempeño del año 2017 no habría probabilidad de cumplir con el plan a menos que se defina una estrategia para una mejora de los rendimientos y resultados; y en el caso de no ser aplicado algún cambio se tendría que disminuir el objetivo planteado según los rangos entregados por el modelo.

5.2. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Debido a lo anterior, evalúan distintos escenarios que permitan llegar al objetivo, estableciéndose distintos focos estratégicos que lo permitan.

El modelo del caso base entrega los siguientes gráficos de capacidad de la mina.

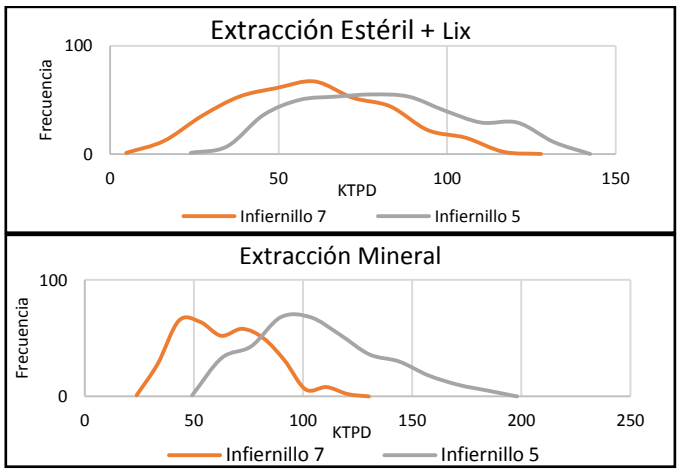


Figura 5-2. Gráficos capacidad de Extracción de la Mina en la etapa de Desarrollo y Producción según modelo año 2018, caso base

Los gráficos anteriores, en este caso, no permiten aclarar si el cuello de botella es por el desarrollo o la producción, ya que ambos están por debajo del plan en una diferencia muy similar.

Con un análisis de las operaciones unitarias sí se logra observar que la limitante de los procesos estaría siendo el Transporte.

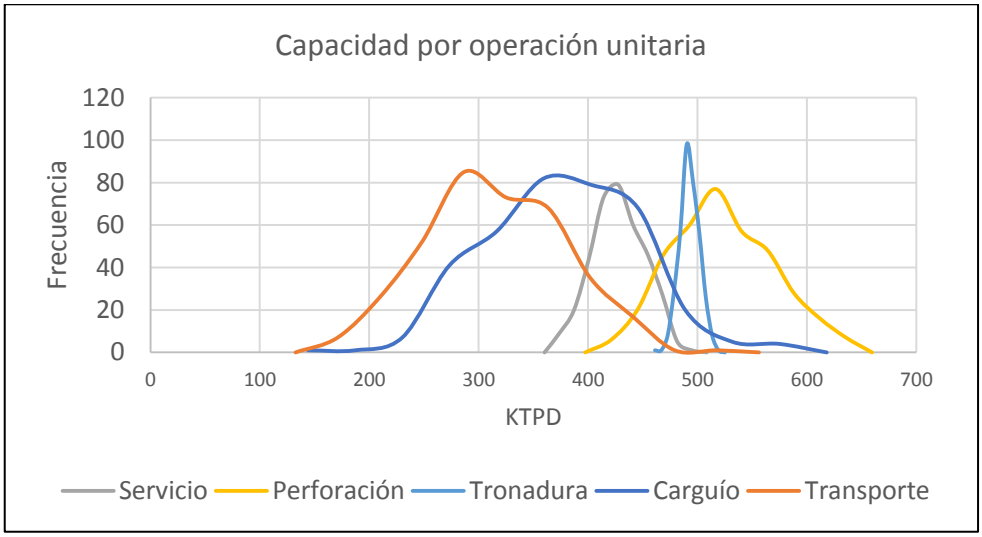


Figura 5-3. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, caso base

Luego, al revisar los histogramas de capacidad de las operaciones unitarias por fase y por desarrollo o producción (figura 5-4), se aprecia con más detalle que el transporte está actuando como limitante en el desarrollo de Infiernillo 7 y en el desarrollo y producción de Infiernillo 5, por lo tanto, se logra definir un enfoque para comenzar con el primer escenario que pueda mejorar los resultados.

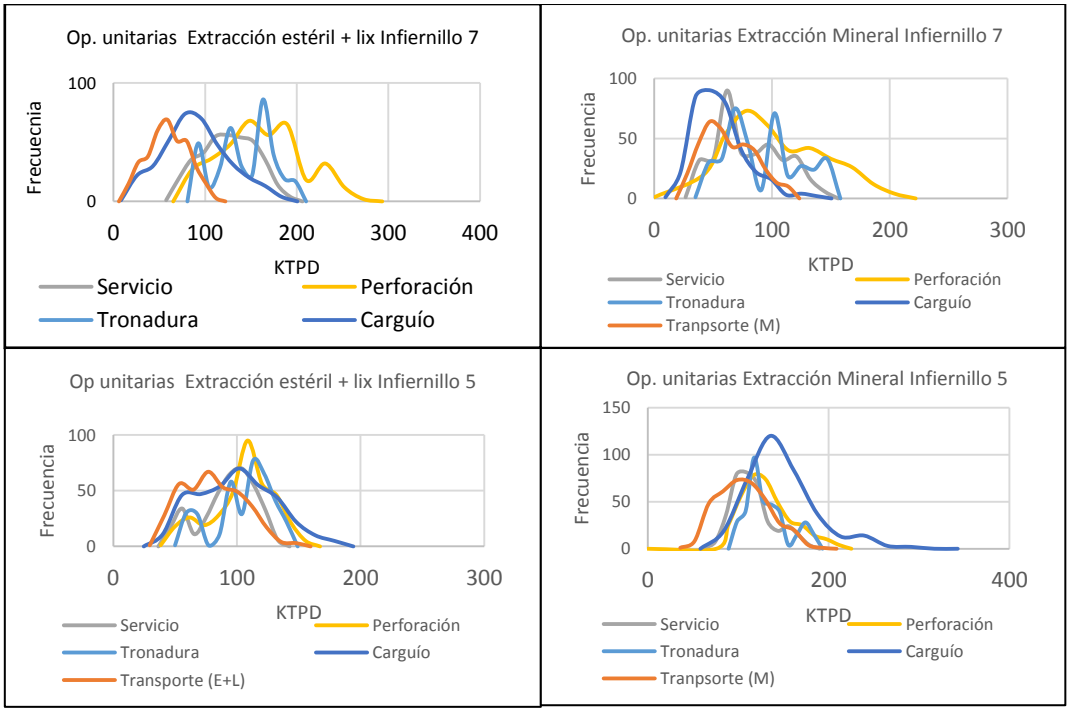


Figura 5-4. Gráficos de capacidad operaciones unitarias por fase año 2018, caso base

5.2.1. Escenario 1

Se evalúa la opción de lograr una mejora en el uso de disponibilidad de los KOM 930 en el período de verano, ya que es la principal flota que tiene Los Bronces y las condiciones de la mina son más favorables en esta época, otorgando un primer foco que permita lograr cambios de una forma más rápida y menos compleja. Se realizan 3 simulaciones con los cambios en los parámetros de la distribución del uso de disponibilidad de la flota que representan un valor mínimo, el más probable y el máximo para esta variable.

Tabla 5-13. Parámetros disponibilidad de los KOM 930, Escenario 1.

	Mínimo (%)	**Más probable (%)**	**Máximo (%)**
Simulación 1 (caso base)	59	93.3	95
Simulación 2	65	95	100
Simulación 3	75	95	100

El gráfico de capacidad de las operaciones unitarias total de la última simulación (figura 5-5) y también por fase (figura 5-6), muestra cómo el transporte mejora su rendimiento y se acerca a la capacidad de las palas, ya que a un mayor uso de los camiones, se logra su saturación, aun así sigue siendo una limitante, pero en menor medida. En particular, para Infiernillo 5 es más evidente el transporte como cuello de botella.

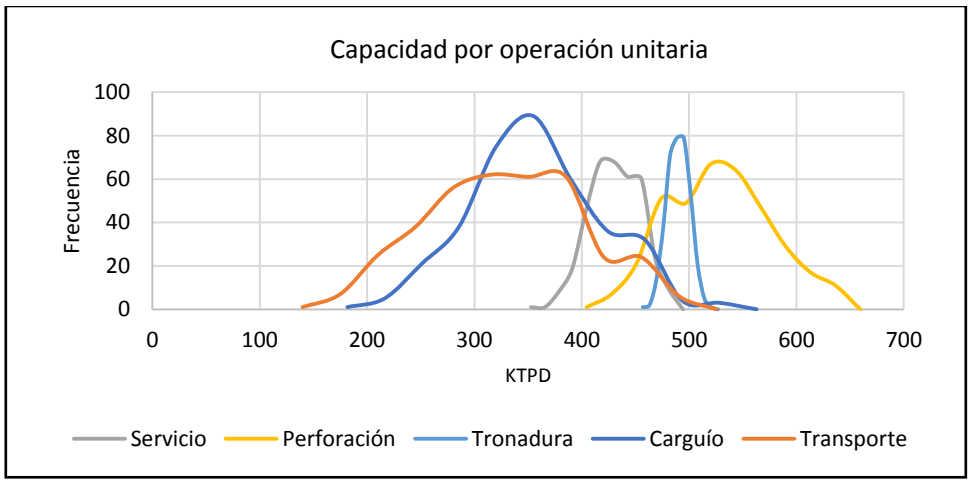


Figura 5-5. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, Escenario 1.

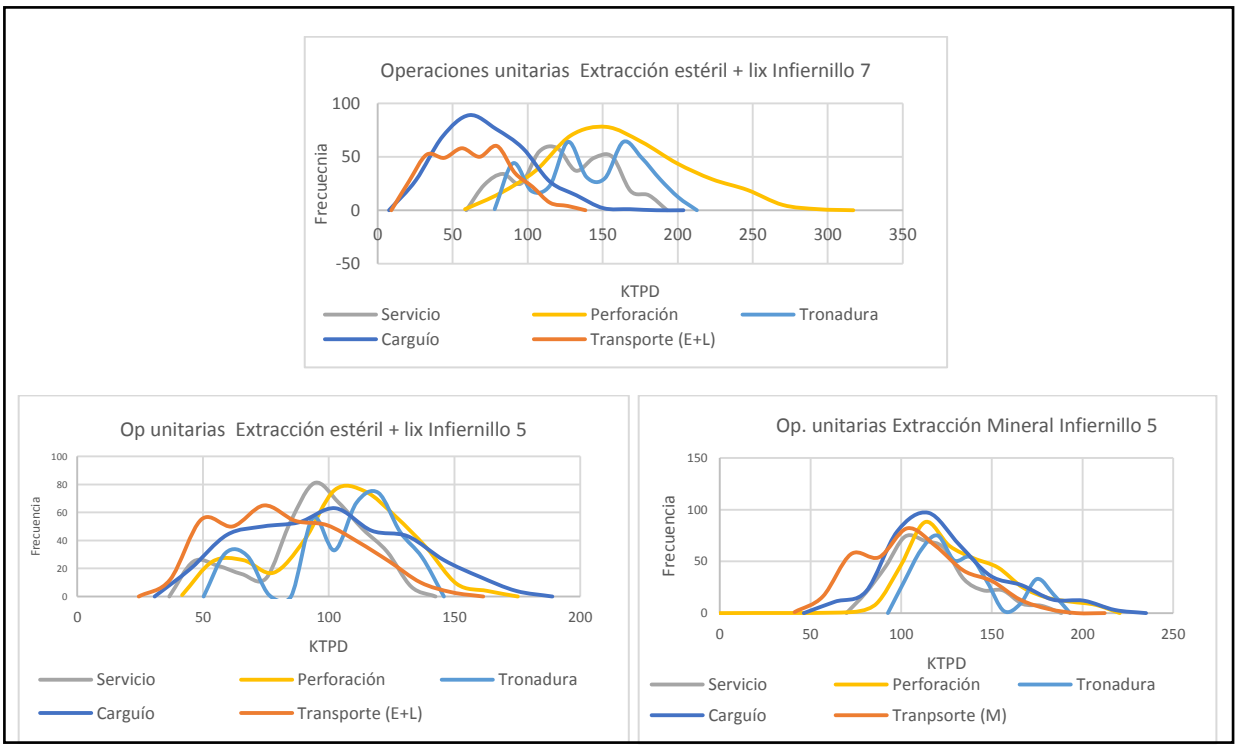


Figura 5-6. Gráficos de capacidad operaciones unitarias por fase año 2018, Escenario 1

Los histogramas de probabilidad para la extracción (figura 5-7) muestran cómo se alcanzan mejores resultados con las mejoras evaluadas.

La última simulación, indica que existe un 80% de probabilidad de lograr y superar una extracción total de 106.791 Mton, con una extracción de mineral de 53.346 Mton y de 52.035 Mton de estéril (C80). A pesar de la mejora en los resultados se tiene que no es probable obtener el plan presupuestado según este escenario.

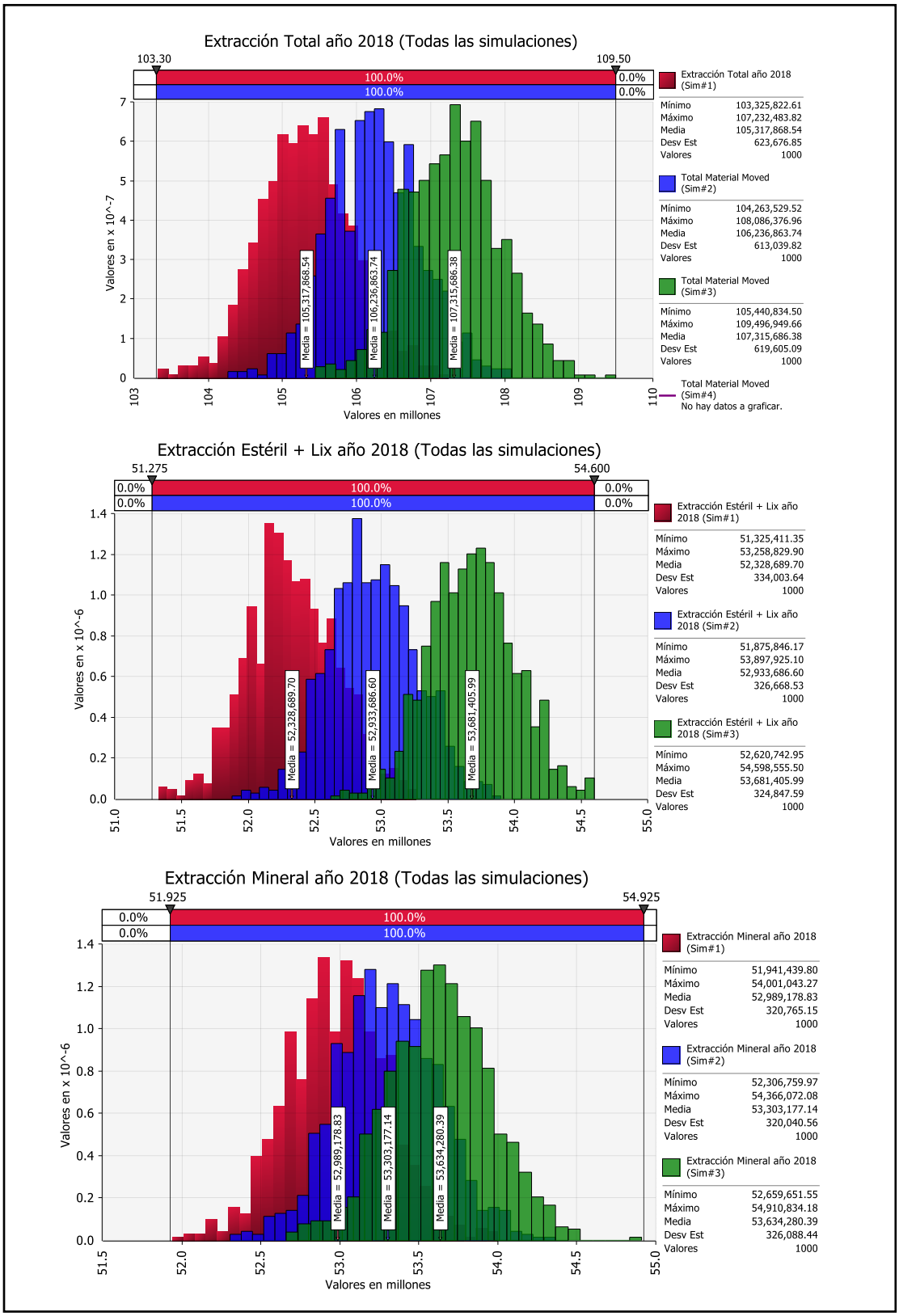


Figura 5-7. Histogramas de probabilidad de extracción de las simulaciones, Escenario 1.

En cuanto a la extracción por fases (Anexo D), existe una mejora en la extracción de mineral y de estéril de Infiernillo 5, pero en Infiernillo 7 sólo se mejora en el proceso de extracción de estéril, mientras que en la extracción de mineral su aumento no es significativo (figura 5-8) esto se debe principalmente porque el rendimiento de las palas en el verano están limitando el proceso, como se aprecia en la figura 5-9.

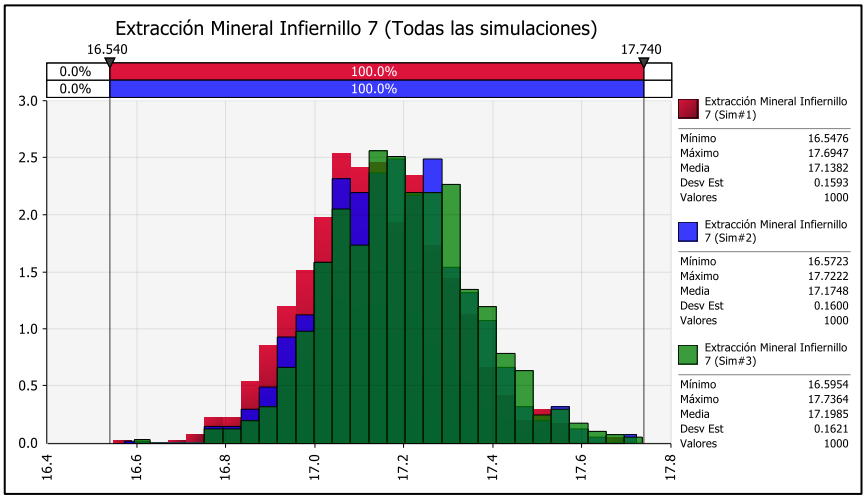


Figura 5-8. Extracción Mineral fase Infiernillo 7 de cada simulación, Escenario 1.

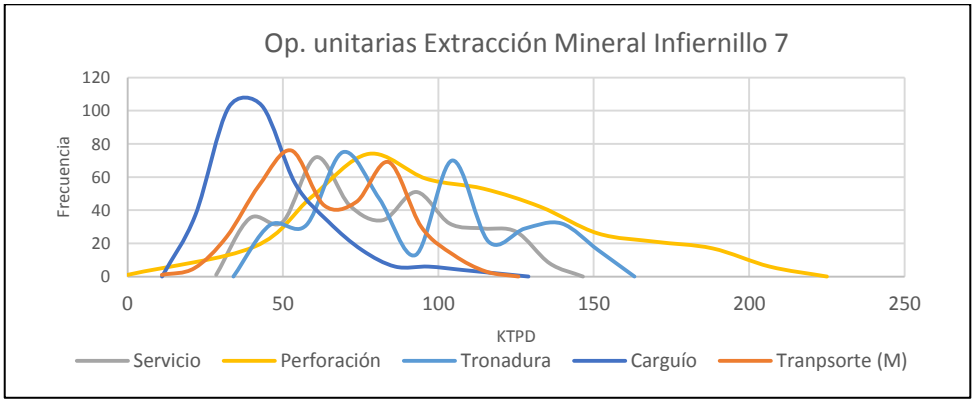


Figura 5-9. Gráfico de capacidad operaciones unitarias extracción de mineral Fase Infiernillo 7, Escenario 1.

5.2.2. Escenario 2

En vista de que el plan aún no es alcanzado se evalúa el escenario en el cual además de mejorar el uso de disponibilidad de los camiones KOM 930 para el verano, también se mejore para el período de invierno.

Tabla 5-14. Parámetros disponibilidad KOM 930, Escenario 2.

	Verano			Invierno		
	Mínimo (%)	Más probable (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	Más probable (%)	Máximo (%)
Simulación 1 (caso base)	59	93.3	95	30.8	83.9	93
Simulación 2	65	95	100	50	85	95
Simulación 3	75	95	100	60	90	98

El gráfico de capacidad de las operaciones unitarias total de la última simulación (figura 5-10) muestra cómo el transporte mejora su rendimiento y se acerca bastante a la capacidad de las palas. En particular, para Infiernillo 5 se ve que los camiones ya no son el cuello de botella de la operación como en el escenario anterior. (figura 5-11).

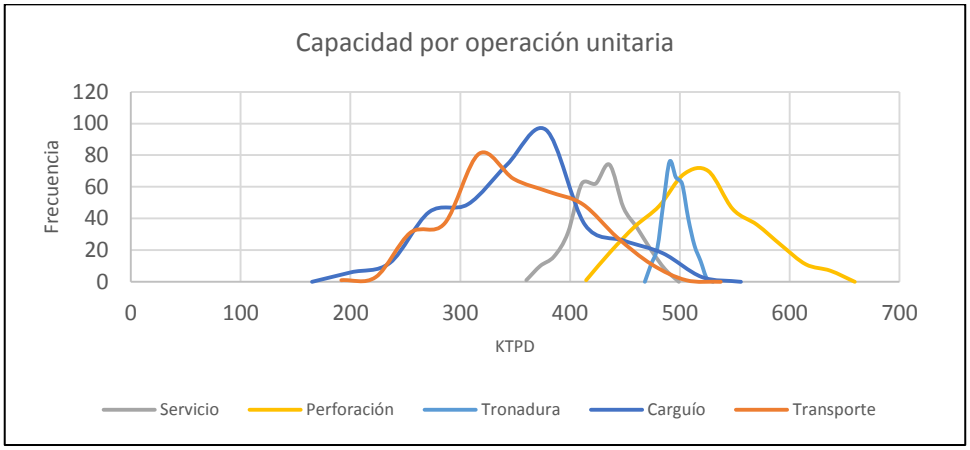


Figura 5-10. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, Escenario 2.

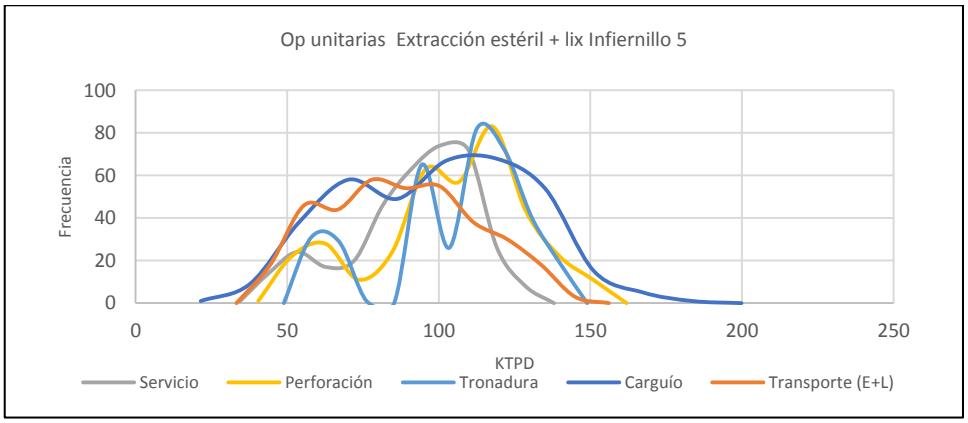


Figura 5-11. Gráfico de capacidad operaciones unitarias Infiernillo 5 año 2018, Escenario 2.

Los histogramas de probabilidad para la extracción (figura 5-12.) muestran cómo se alcanzan mejores resultados con las mejoras evaluadas.

La segunda simulación, dice que la probabilidad de cumplir con la extracción total el plan es casi nula (Percentil = 99.3%) y tiene un c80 de 108.483 Mton, mientras que la última indica que existe un 100% de probabilidad de superar el plan y hay un 80% de probabilidad de lograr y superar una extracción total de 111.280 Mton, con una extracción de mineral de 55.258 Mton y de 56.003 Mton de estéril (c80).

Por lo tanto, este escenario nos dice que si se quiere lograr alcanzar el plan y más aún, superarlo, es necesario aplicar estrategias para mejorar el uso de la disponibilidad de los KOM 930 y llegar a los parámetros especificados en la simulación 3.

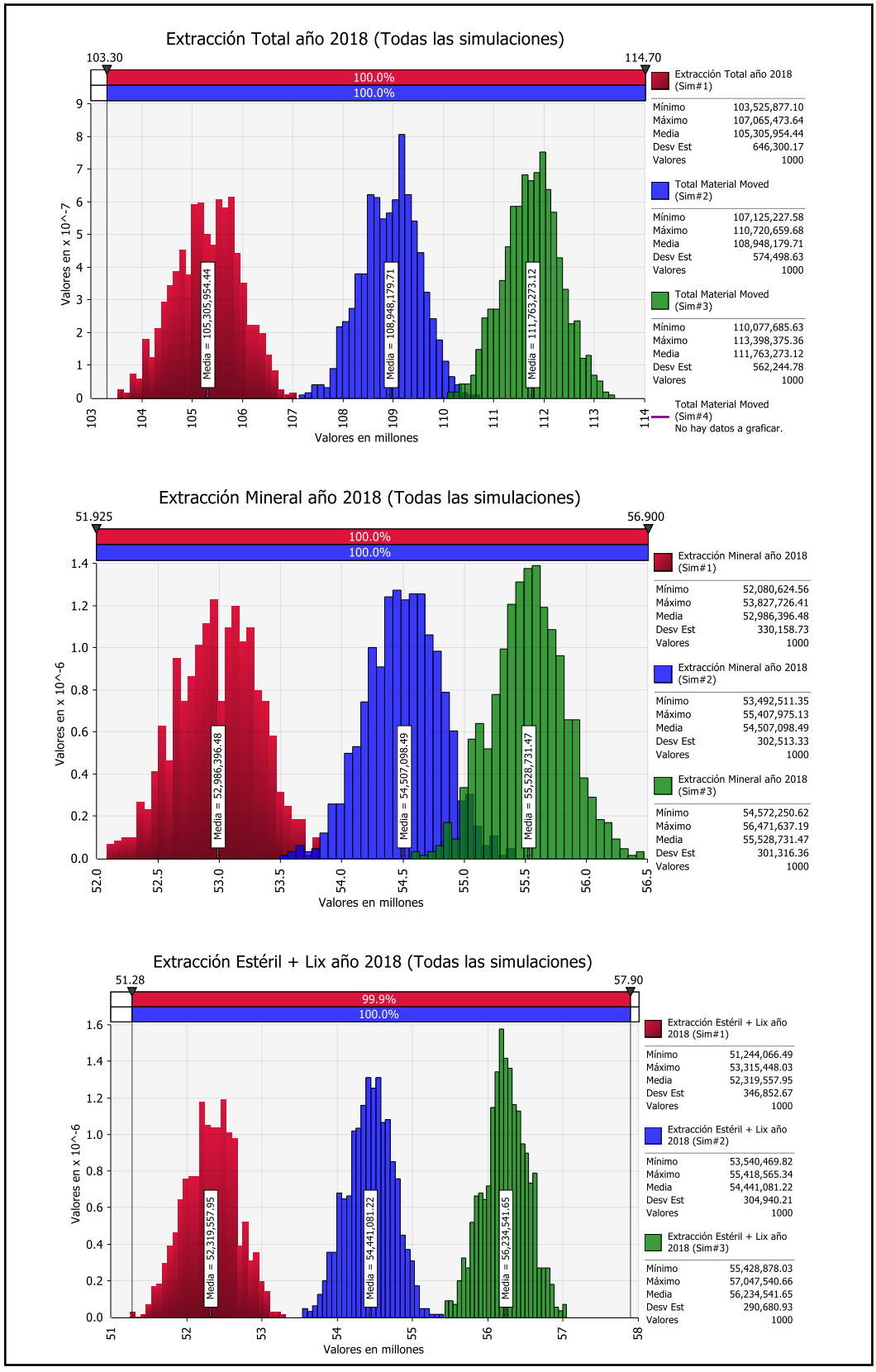


Figura 5-12. Histogramas de probabilidad de extracción de las simulaciones, Escenario 2.

A diferencia de los resultados para la extracción de mineral Infiernillo 7 en el escenario anterior, en este caso sí hay un aumento en ella, lo que muestra que en invierno las palas no limitan la operación para esta fase en ese período.

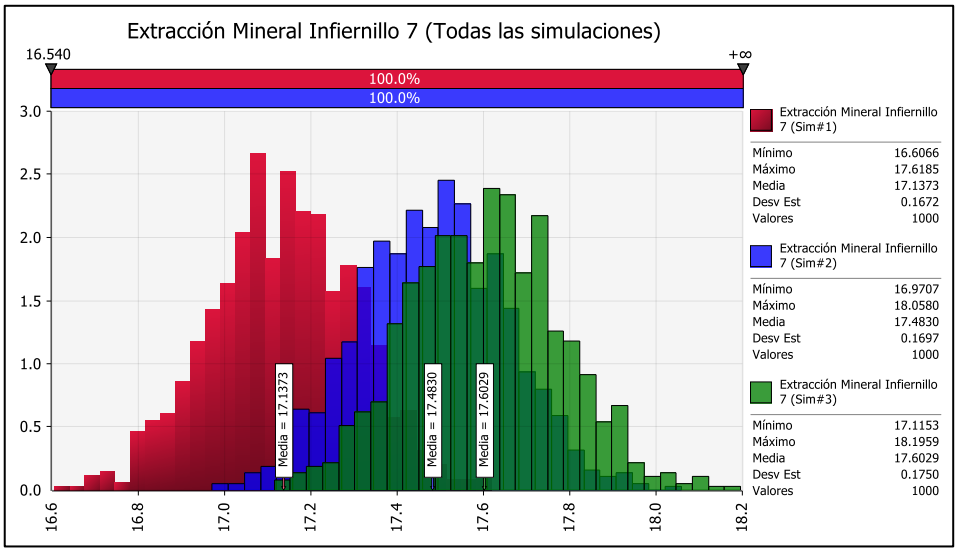


Figura 5-13. Extracción Mineral fase Infiernillo 7 de cada simulación, Escenario 2.

5.2.3. Escenario 3

Para este escenario se evalúa una mejora en el rendimiento de las palas, junto a la mejora en la disponibilidad de la flota KOM 930 igual a la simulación 2 en del escenario anterior, es decir, parámetros de 65, 95 y 100% para el verano y 50, 85 y 95% para el invierno; ya que según lo que se obtuvo en ese caso la extracción del modelo está cerca de llegar a lo propuesto por el plan y existe una limitante en las palas en la fase Infiernillo 7 (figura 5-14), entonces se analiza si al aumentar el rendimiento de estos equipos es posible lograr objetivo.

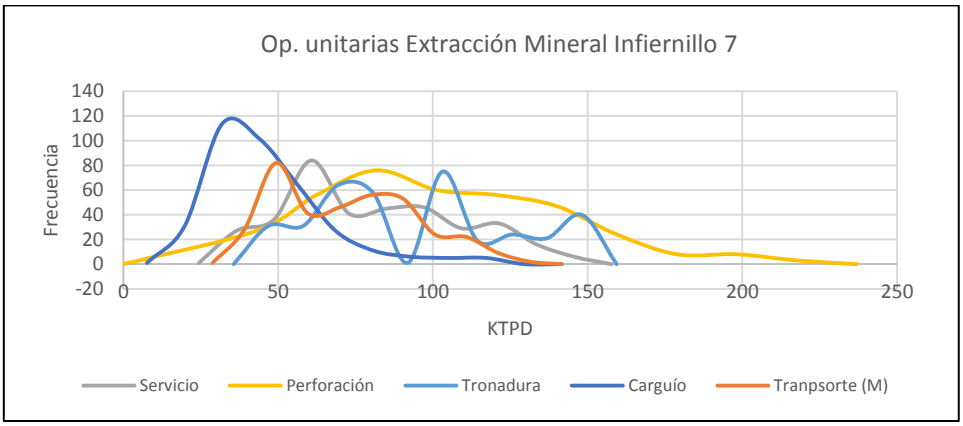


Figura 5-14. Gráfico de capacidad operaciones unitarias Infiernillo 7 año 2018, Escenario 2.

La evaluación se realiza para las palas de 73 yd3, ya que son las que representan una mayor peso en la extracción de la operación.

Tabla 5-15. Parámetros rendimiento operativo pala 73 yd3, Escenario 3.

	Verano			Invierno		
	Mínimo (tpd)	Más probable (tpd)	Máximo (tpd)	Mínimo (tpd)	Más probable (tpd)	Máximo (tpd)
Simulación 1 (caso base)	2800	3544	4805.4	3000	3600	4669.8
Simulación 2	2900	3700	4850	3100	3700	4700
Simulación 3	3000	3800	4900	3200	3900	4800

El gráfico de capacidad de las operaciones unitarias total de la última simulación muestra cómo carguío y transporte mejoran su rendimiento, pero siguen siendo cuello de botella de la operación.

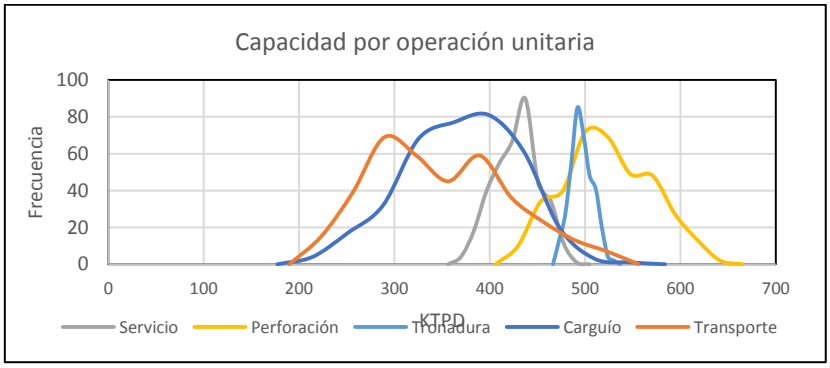


Figura 5-15. Gráfico capacidades por operación unitaria año 2018, Escenario 3.

Analizando el caso de Infiernillo 7 se observa que mejoró la situación, y que para la extracción de estéril en esta fase, el carguío ya no es cuello de botella del proceso de transporte.

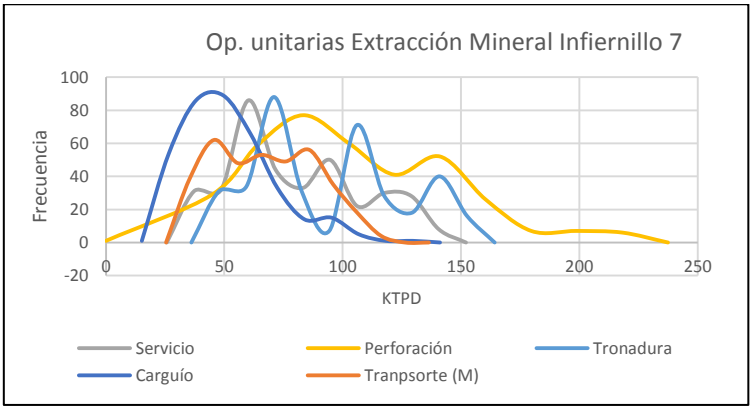


Figura 5-16. Gráfico de capacidad operaciones unitarias Infiernillo 7 año 2018, Escenario 3.

Los histogramas de probabilidad para la extracción (figura 5-17) muestran cómo se alcanzan mejores resultados con las mejoras evaluadas.

La segunda simulación indica que existe un 90% de probabilidad de alcanzar y superar el plan con un c80 de 110.853 Mton, mientras que la simulación número 3 dice que existe un 99,7% de probabilidad de alcanzar y superar el plan con un c80 de 111.593 Mton.

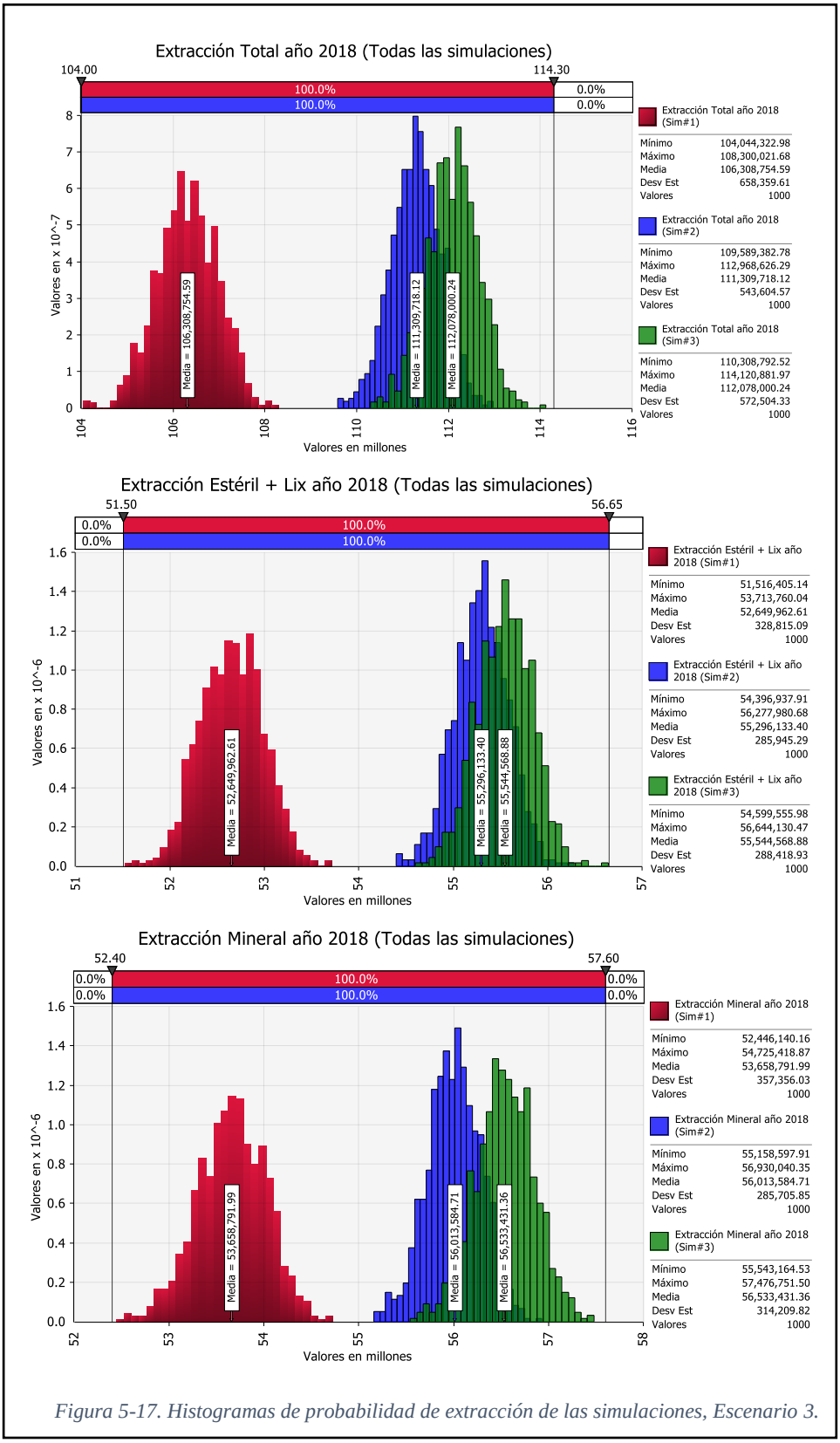


Figura 5-17. Histogramas de probabilidad de extracción de las simulaciones, Escenario 3.

Analizando las fases, la figura 5-18 muestra que en Infiernillo 5 prácticamente no hay diferencia en la extracción para estéril y mineral entre la simulación 2 y la 3, esto indica que en Infiernillo 5 el transporte pasa a ser una limitante en el último caso simulado.

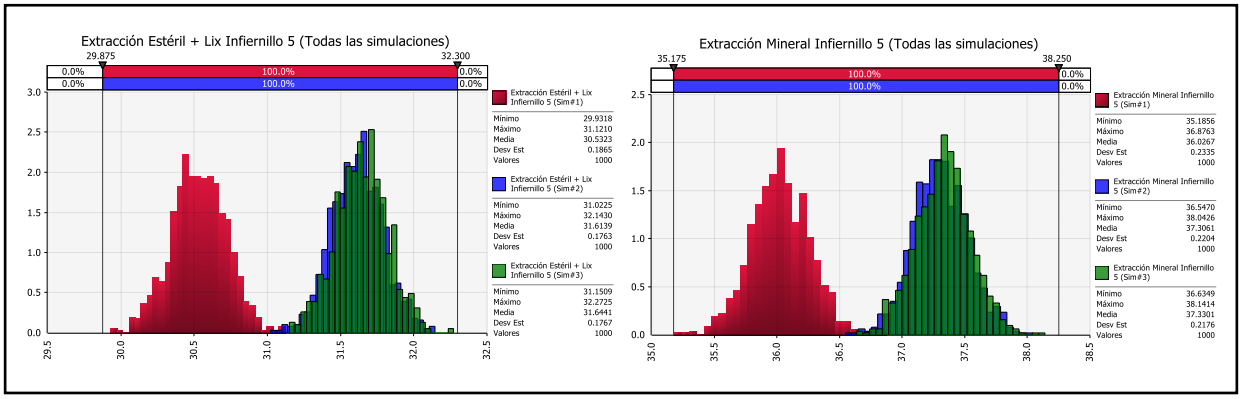


Figura 5-18. Extracción fase Infiernillo 5 de cada simulación, Escenario 3.

También se tiene que Infiernillo 7 tiene un salto menor en la extracción de estéril (figura 5-19), en comparación a la extracción de mineral, lo que refleja una situación similar a la de Infiernillo 5 donde el proceso de transporte pasa a limitar la operación, pero en una menor medida. En el gráfico de capacidad de la figura 5-20 se observa tal situación.

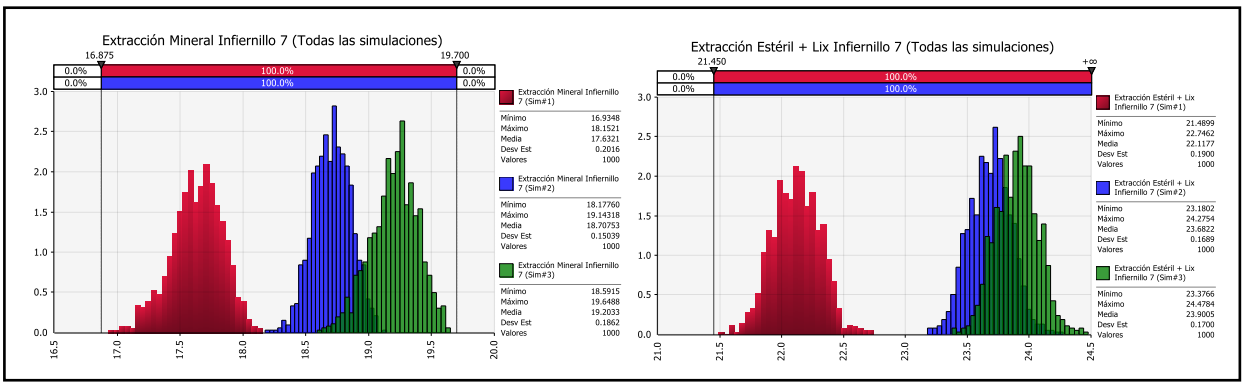


Figura 5-19. Extracción fase Infiernillo 7 de cada simulación, Escenario 3.

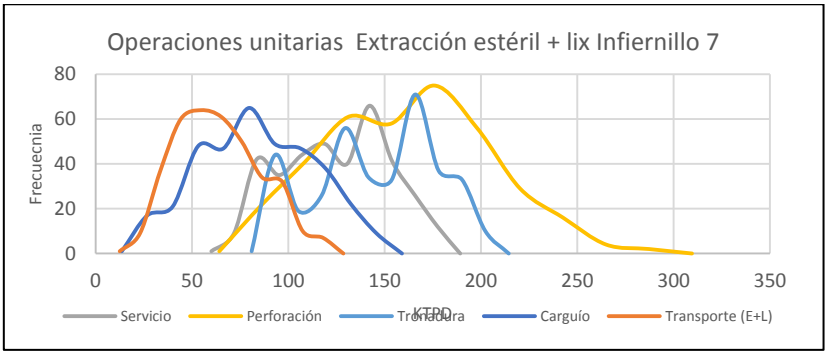


Figura 5-20. Gráfico de capacidad operaciones unitarias desarrollo Infiernillo 7 año 2018, Escenario 3.

Por lo tanto, mediante el análisis de todos los escenarios propuestos se tiene que una alternativa estratégica para obtener una mayor probabilidad de cumplir con el plan y mejor aún, superarlo, es realizar tareas enfocadas en mejorar el uso de disponibilidad de la flota KOM 930 y el rendimiento operativo de las palas de 73 yd3 para llegar a valores que se encuentren en los rangos planteados en la simulación número 2 del tercer escenario, lo que permitiría con un 80% de probabilidad alcanzar un plan de 110.853 Mton de extracción total, 55.776 Mton de extracción de mineral y 55.053 Mton de extracción de estéril para el año 2018.

Por último, es importante señalar que existen muchos otros escenarios que se pueden evaluar, como por ejemplo, reasignar los equipos, sumar nuevos equipos, quitar equipos, mejorar otros KPI, etc., y que podrían definir nuevos focos estratégicos, por lo tanto, es necesario tener un buen criterio y evaluar escenarios que sean factibles para las condiciones actuales de la mina, con metas posibles y que involucren un plan de acción que sea lo menos costoso posible; por ejemplo, el costo de una pala es aproximadamente 5 veces más que la de un camión, por lo cual es más recomendable evaluar la compra de uno o más camiones que la de una pala.

En este caso, si se quería mejorar el transporte, se podría haber evaluado un escenario en que se agreguen más camiones, pero hay factores que el modelo no refleja directamente y habría que tenerlo presente, tales como un posible aumento en la interferencia o también el tiempo que demoraría en llegar un equipo a la faena una vez realizada la compra, por lo tanto, además de los argumentos ya mencionados durante el capítulo se prefiere generar escenarios de mejoras en los KPI.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

El modelo BSP es una herramienta que puede agregar valor a Los Bronces, ya que esta operación lleva años sin cumplir el plan minero, lo que demuestra una falta de control en los procesos y en la estrategia que se define, como también la posibilidad de que exista una falta de criterio en la planificación o en la entrega de información para el plan.

El aporte fundamental del modelo está en que va a permitir realizar un análisis más profundo de cada uno de los procesos involucrados y obtener un resultado de forma rápida de la probabilidad de cumplimiento del plan según sus capacidades. Además de detectar un foco estratégico en una primera instancia.

La utilidad del modelo será efectiva siempre y cuando se tenga una base de datos sólida y robusta, acompañado de un buen análisis de los datos, para que las capacidades históricas de los procesos sean representativos y para tener entradas consistentes, obteniéndose así un resultado de la simulación cercano a la realidad. También, cabe mencionar, que la historia no siempre es representativa para algunos casos, debido a que no siempre existen escenarios análogos de un año para otro.

Respecto a lo anterior, en este estudio se ve la deficiencia que tiene la operación Los Bronces sobre la base de datos para servicios y tronadura, ya que no cuenta con una información ordenada y confiable en el sistema como los demás procesos; por lo tanto, mientras no exista esa información, el modelo no va a lograr una mayor precisión en el momento que los procesos de servicio y tronadura sean las limitantes de la operación. Actualmente, planificación realiza sus planes obviando estos procesos y asume que se cumplirá al cien por ciento con el programa, siendo que en la realidad no es así.

En base a los resultados obtenidos durante el desarrollo de este estudio, se puede concluir que el modelo sí es capaz de entregar resultados con rangos de valores acordes a la magnitud que opera la mina, ya que tanto para la extracción de material real del año 2017 como para el plan del año 2018 se tienen valores similares y acordes con la realidad.

Si bien el modelo es capaz de indicar él o los procesos que están limitando la operación, no permite ver la causa raíz de estos o los múltiples otros factores que estén afectando tal operación unitaria, como por ejemplo, las congestiones producidas por el tráfico de equipos o la geometría de la mina que afectan directamente a los procesos.

Para modelar fases que recién comienzan a operar en el año que se va a simular, el modelo puede presentar una falta de representatividad de estas, ya que no se cuenta con el desempeño histórico de la nueva fase, sin embargo, las estimaciones conservadoras de los expertos sirven para tener una aproximación a su comportamiento, y también se tiene que las variables de entrada al modelo más significativas (KPI equipos) son independiente de la fase.

Finalmente, el modelo, si bien proyecta la capacidad de extracción que podría tener la mina el año entrante, no es para nada una herramienta para realizar o estimar el plan, sino que va a permitir definir estrategias para lo que viene en base al comportamiento histórico de la operación.

CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES

El objetivo final del modelo BSP dentro del AOM es lograr simular la operación completa de Los Bronces, por lo tanto, es recomendable seguir desarrollando el modelo para incorporar los procesos del negocio completo. Agregando el remanejo es posible obtener un resultado del movimiento total de la mina, y luego, integrando la planta es posible detectar los procesos limitantes y las oportunidades de mejora en un sistema consolidado en el cual se llegue al cobre fino como producto final.

Al momento de integrar lo mencionado en el párrafo anterior, es fundamental llevar cada uno de los procesos a una unidad equivalente o normalizada para que se puedan comparar y analizar todos los procesos tanto de la mina como de la planta.

Es imperativo comenzar a armar una buena base de datos para los procesos que no la tienen, como lo es servicio, tronadura y perforación, ya que si bien éste último proceso cuenta con un índice que transforma los metros perforados a toneladas equivalentes, no tiene una base de datos sólida y automatizada, Por lo tanto, se sugiere que la operación comience a desarrollar una base de datos robusta de los procesos mencionados, lo que favorecerá a todos, permitiendo mejor análisis del comportamiento de los procesos, de manera más confiable y con ello poder encontrar oportunidades de mejora y lograr una mejor planificación.

Por último, se recomienda agregar ingresos y costos al modelo, ya que con eso se puede analizar de mejor forma qué escenario es el más conveniente dentro de todos los que generen un aumento en el rendimiento de la operación. Con ello se podrá elegir un foco estratégico que no involucre mucho costo y se logre una pequeña mejora o una alternativa que sea más costosa, pero que la mejora sea mucho más considerable.

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

[1] JERRY BANKS. 1999. Introduction to Simulation. En: PROCEEDINGS OF the 1999 Winter Simulation Conference. Atlanta, GA 30067, U.S.A. AutoSimulations, Inc. pp 7-13.

[2] García E., García H. & Cárdenas L. 2006. Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel. Pearson Educación, Primera Edición. México.

[3] CONTRERAS C., C. F. 2016. Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo Block/Panel Caving. Memoria para optar al título de ingeniería civil de minas. Santiago, Universidad de Chile, FCFM. 86p.

[4] BRIONES O., O. A. 2017. Mejoramiento del sistema de gestión de pérdidas operacionales en la mina Los Bronces. Memoria para optar al título de ingeniería civil de minas. Santiago, Universidad de Chile, FCFM. 106p.

[5] LOPEZ J. 2008. Guía básica para la simulación de Monte Carlo. Editorial AENOR.

[6] MUN J. 2006. Modelling risk, applying monte carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[7] TORKANAMI E. 2013. Linkage of Truck-and-shovel Operations to Short-term Mine Plans Using Discrete Event Simulation. Tesis para optar al grado de master de ciencia en ingeniería en minas. Edmonton, Alberta, Universidad de Alberta. 179p.

[8] Pedrosa, I., Juarros-Basterretxea, J., Robles-Fernández, A., Basteiro, J., & García-Cueto, E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar?. Universitas Psychologica, 14(1), 245-254.

[9] Frias Navarro, D. 1997. Universidad de Valencia [en línea] http://www.uv.es/friasnav/SupuestosParametrica.pdf [consulta: 20 Julio 2017]

[10] ANGLO AMERICAN COPPER. 2015. Modelo de tiempo global Anglo American. Santiago, 19p.

[11] ERCELEBI, S.G. 2009. Optimization of shovel-truck system for surface miningChile. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, (109), 433-439

[12] ARSHAD, Rasool & Ahmad. 2003. Anderson Darling and Modified Anderson Darling Tests for Generalized Pareto Distribution. Journal of Applied Sciences, (3), 85-88

[13] PALADISE CORPORATION. 2013. Guia para el Uso @Risk Programa para de complemento para el análisis y simulación de riesgos en Microsoft Excel. 6th ed, New York, EEUU. 952p

[14] ANGLOAMERICAN [2017]. Los Bronces Overview September 2017 [Power point]. Santiago, Chile. 20p

CAPÍTULO 9: ANEXOS

9.1. Anexo A: Gráficos de control

Se muestran los gráficos de control que se utilizan para la elección de los datos para los períodos de invierno y verano para el año 2016 y 2017.

Camiones

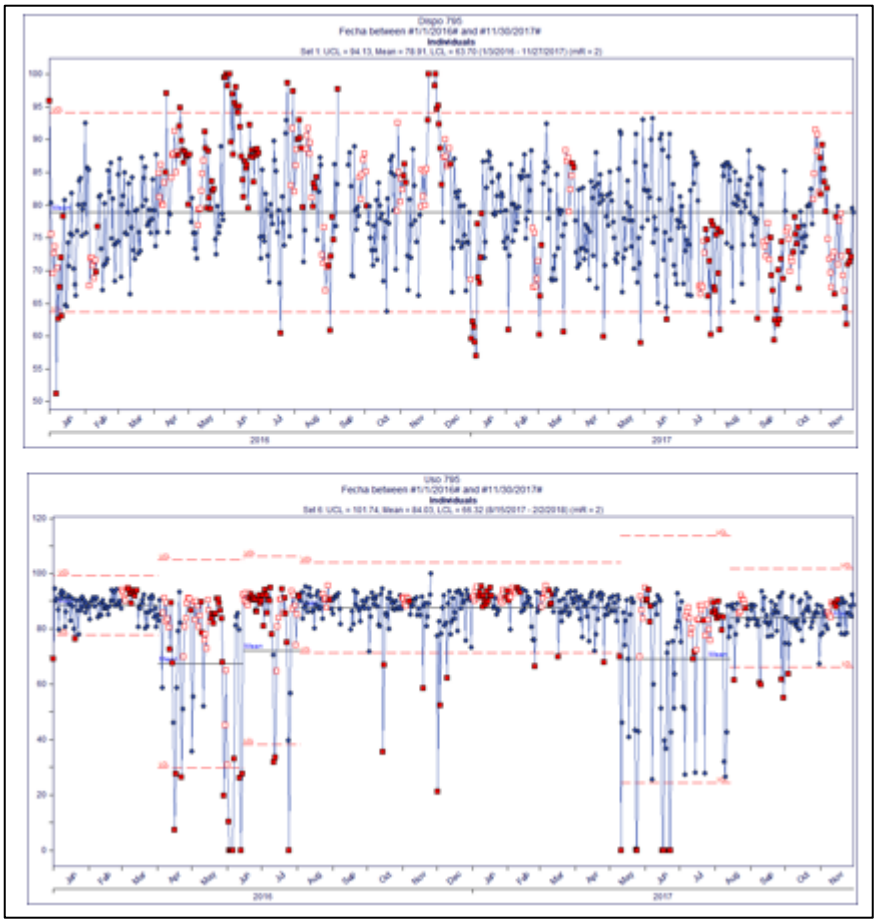


Figura 9-1. Gráficos de Control para Camiones CAT 795.

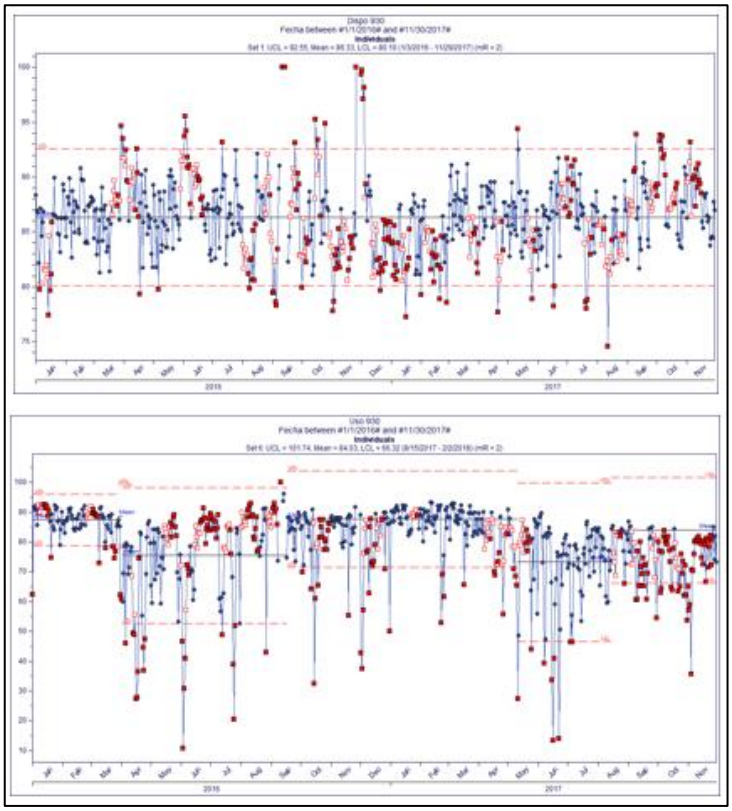


Figura 9-2. Gráficos de Control para Camiones KOM 930.

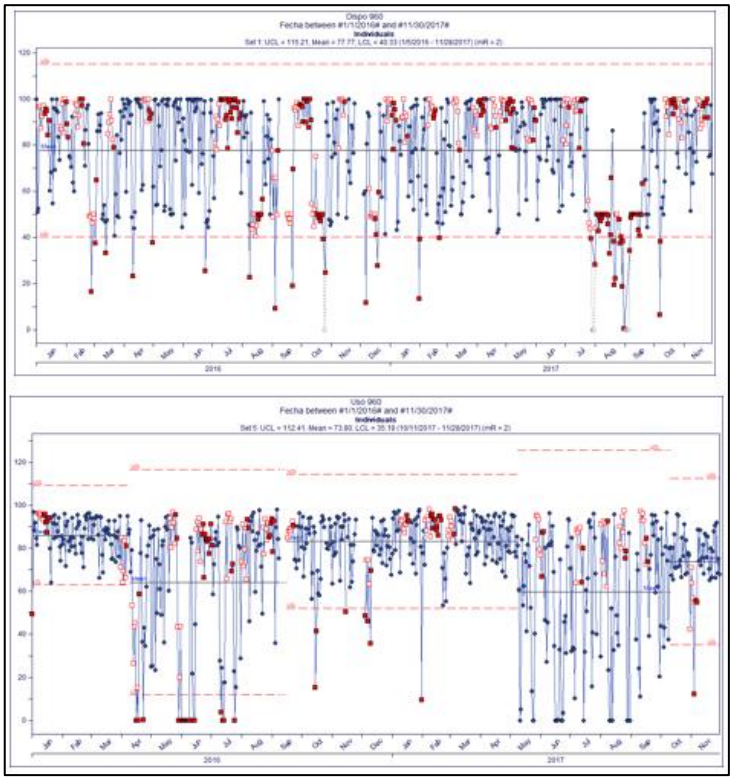


Figura 9-3. Gráficos de Control para Camiones KOM 960.

Palas

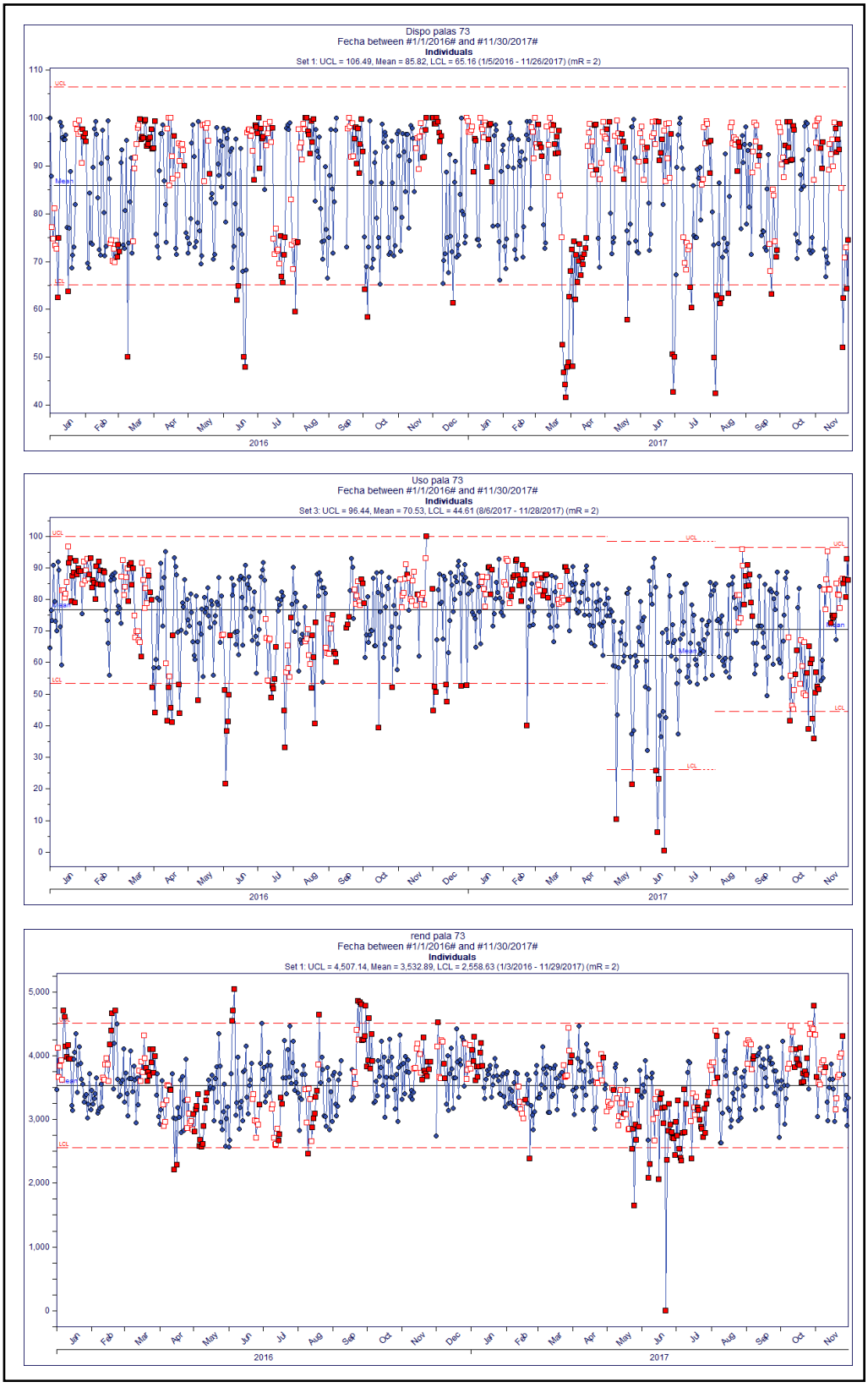


Figura 9-4. Gráficos de Control para Palas 73 yd3.

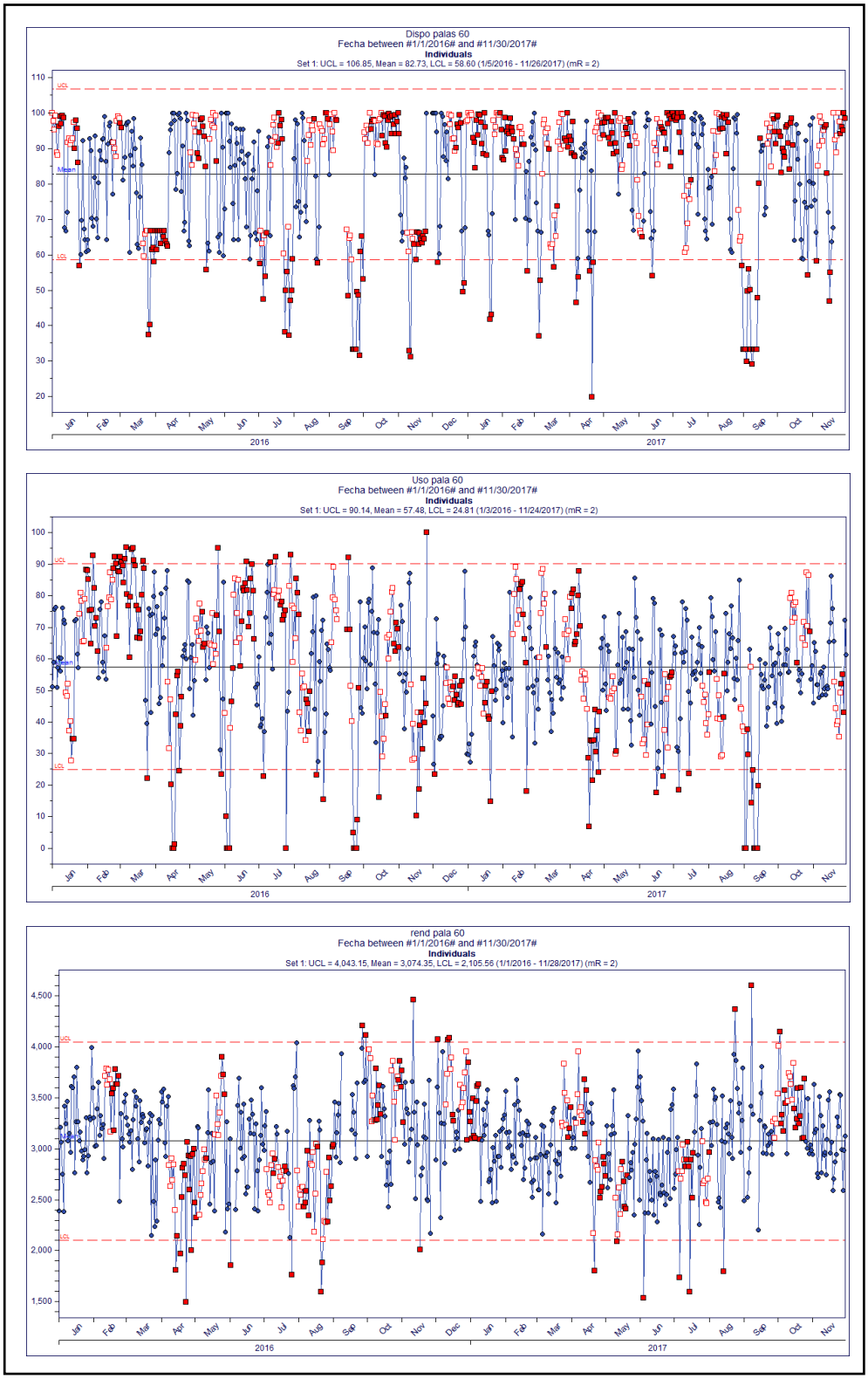


Figura 9-5. Gráficos de Control para Palas 60 yd3.

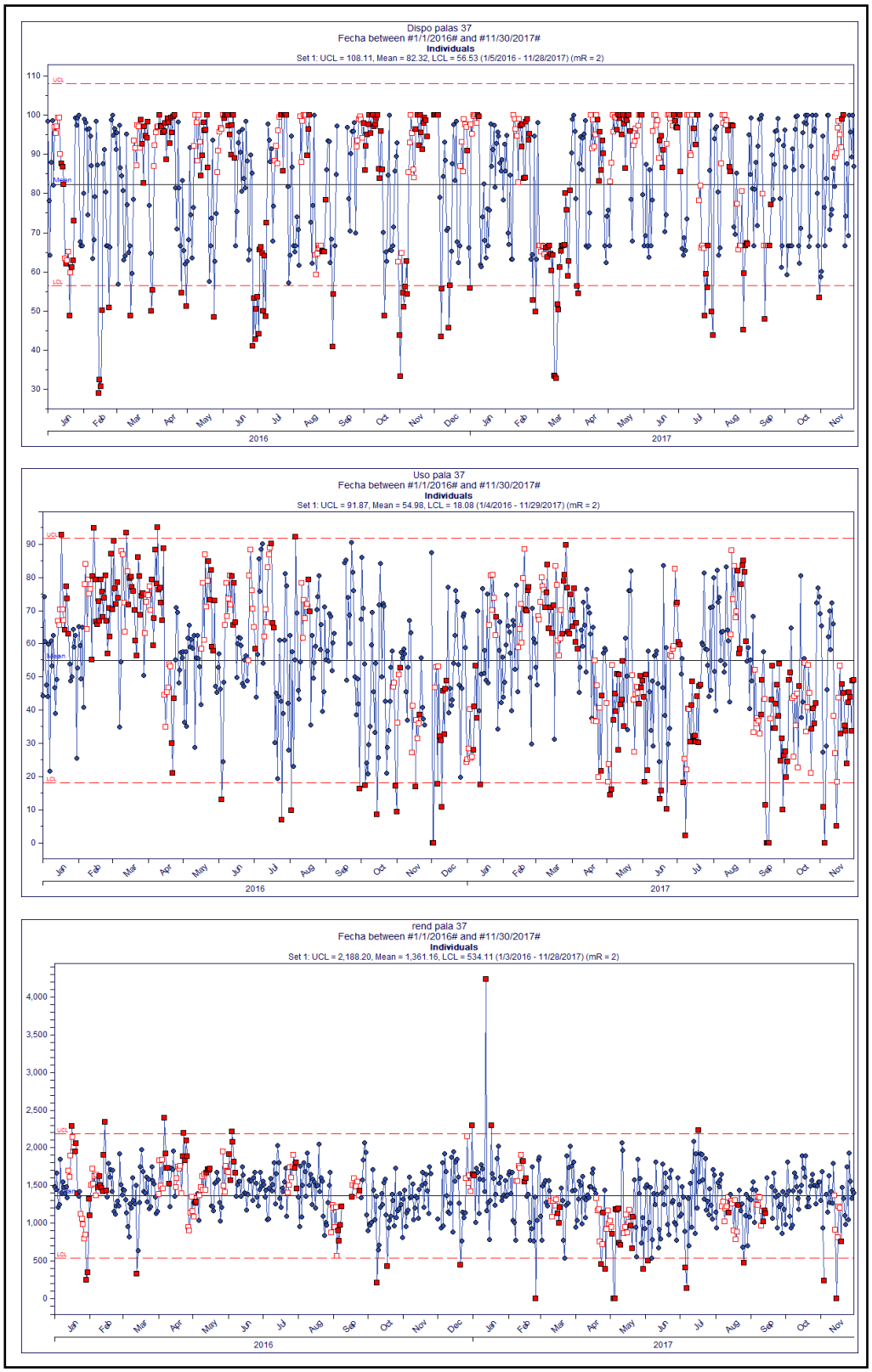


Figura 9-6. Gráficos de Control para Palas 37 yd3.

Perforación

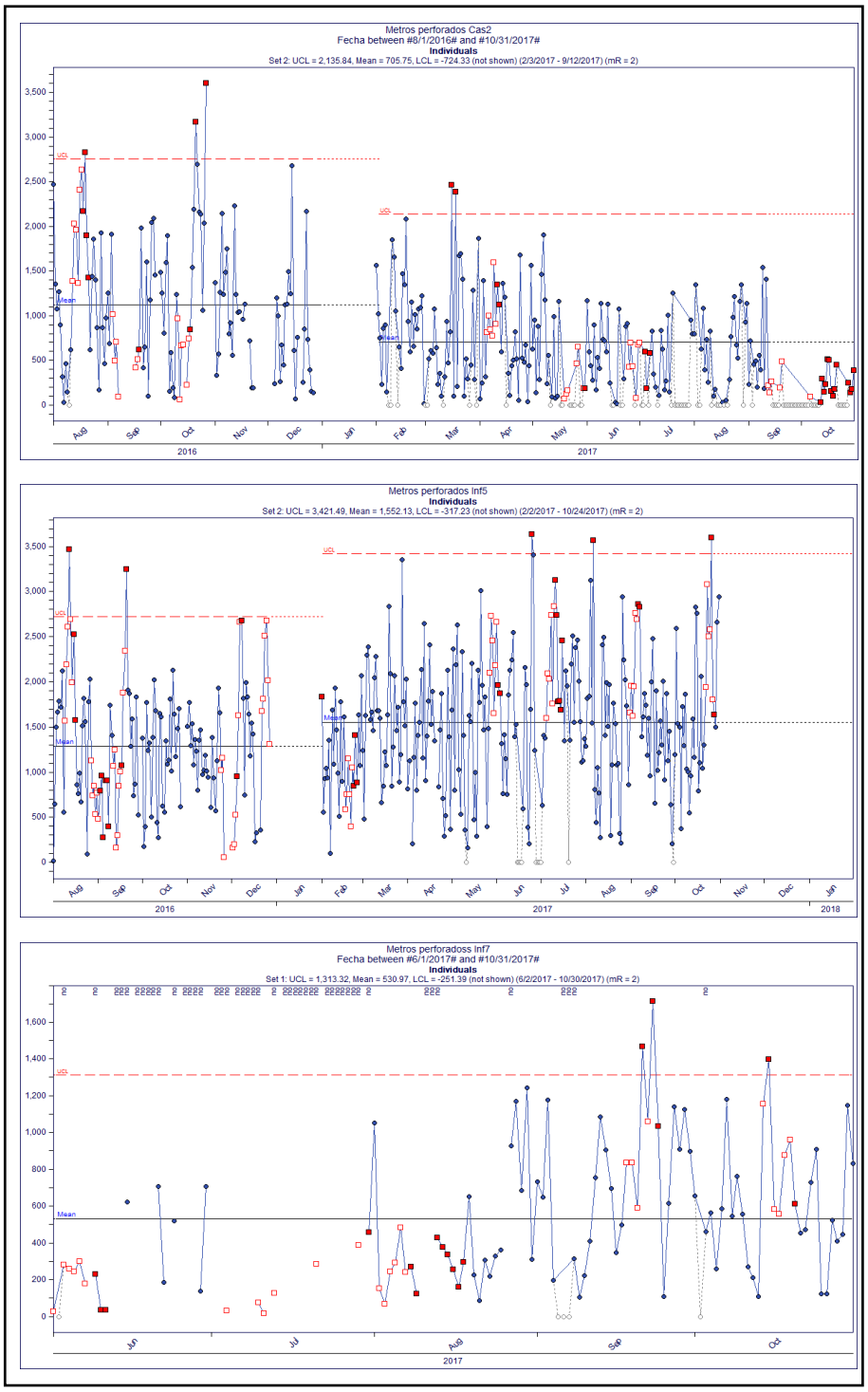


Figura 9-7. Gráficos de Control de metros perforados por fase.

9.2. Anexo B: Validación del modelo

Se señalan los ajustes de distribución a los datos del año 2016 de las variables utilizadas para simular el año 2017.

Camiones

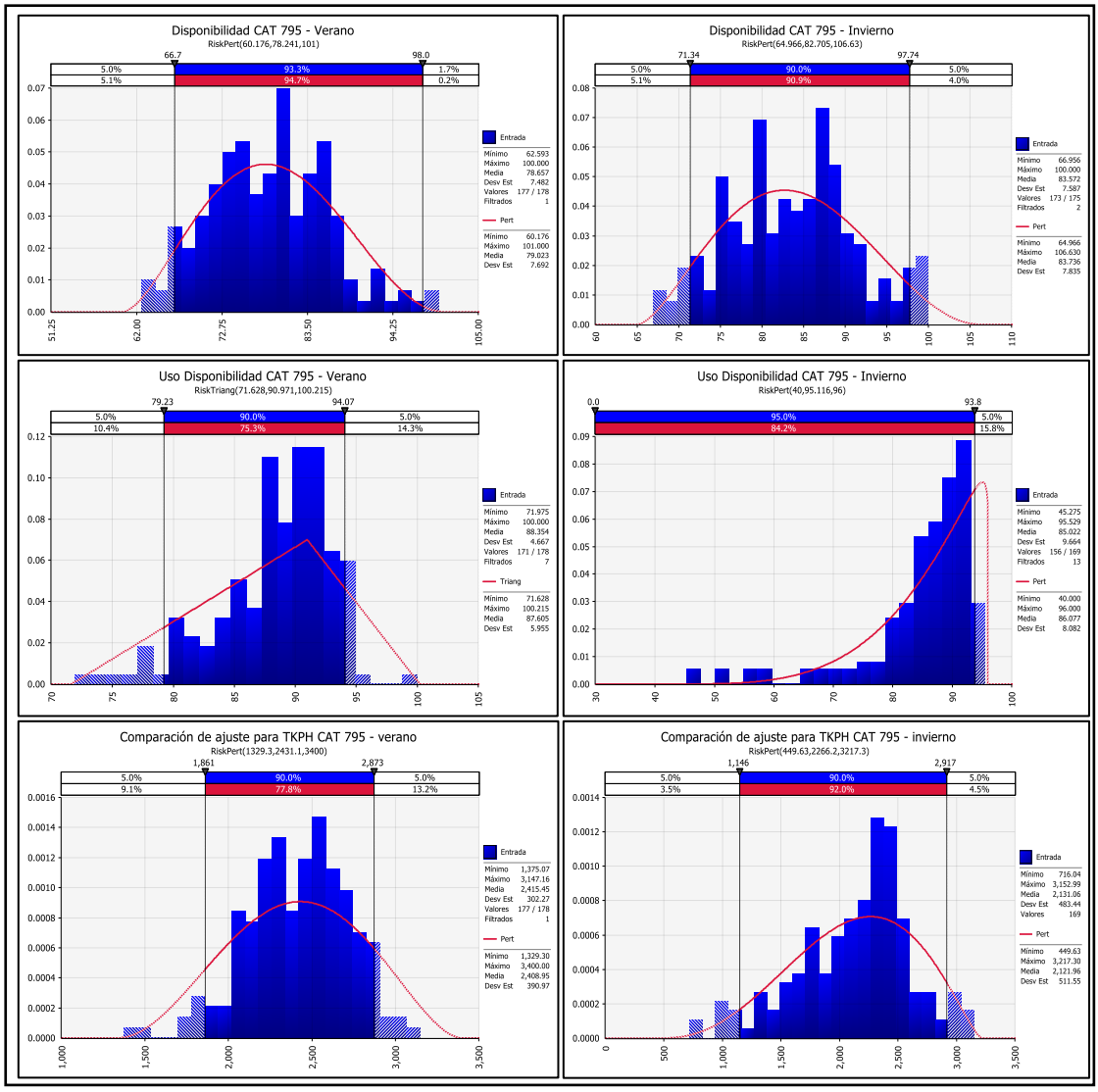


Figura 9-8. Ajustes distribución para flota CAT 795, año 2017

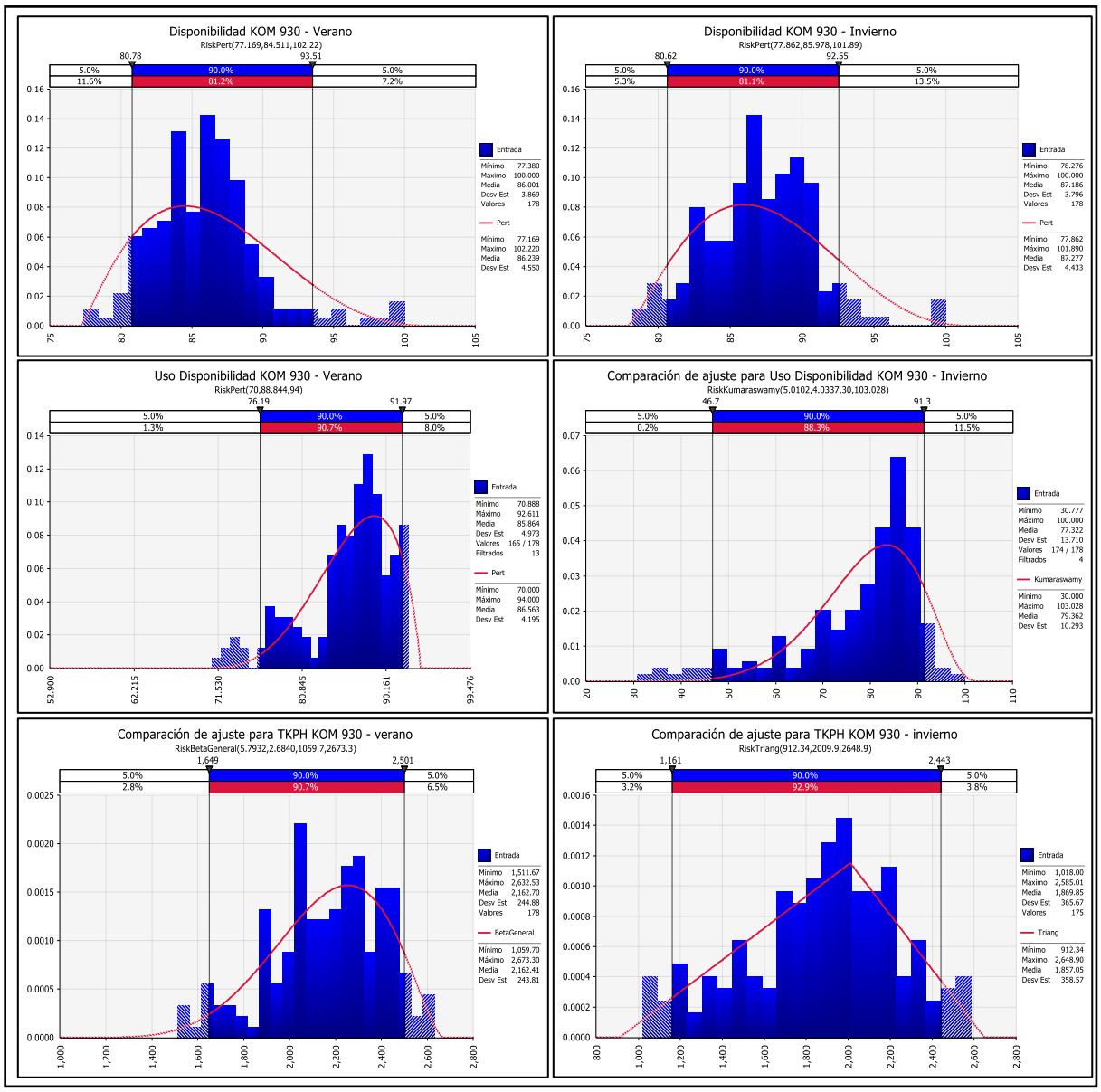


Figura 9-9. Ajustes distribución para flota KOM 930, año 2017

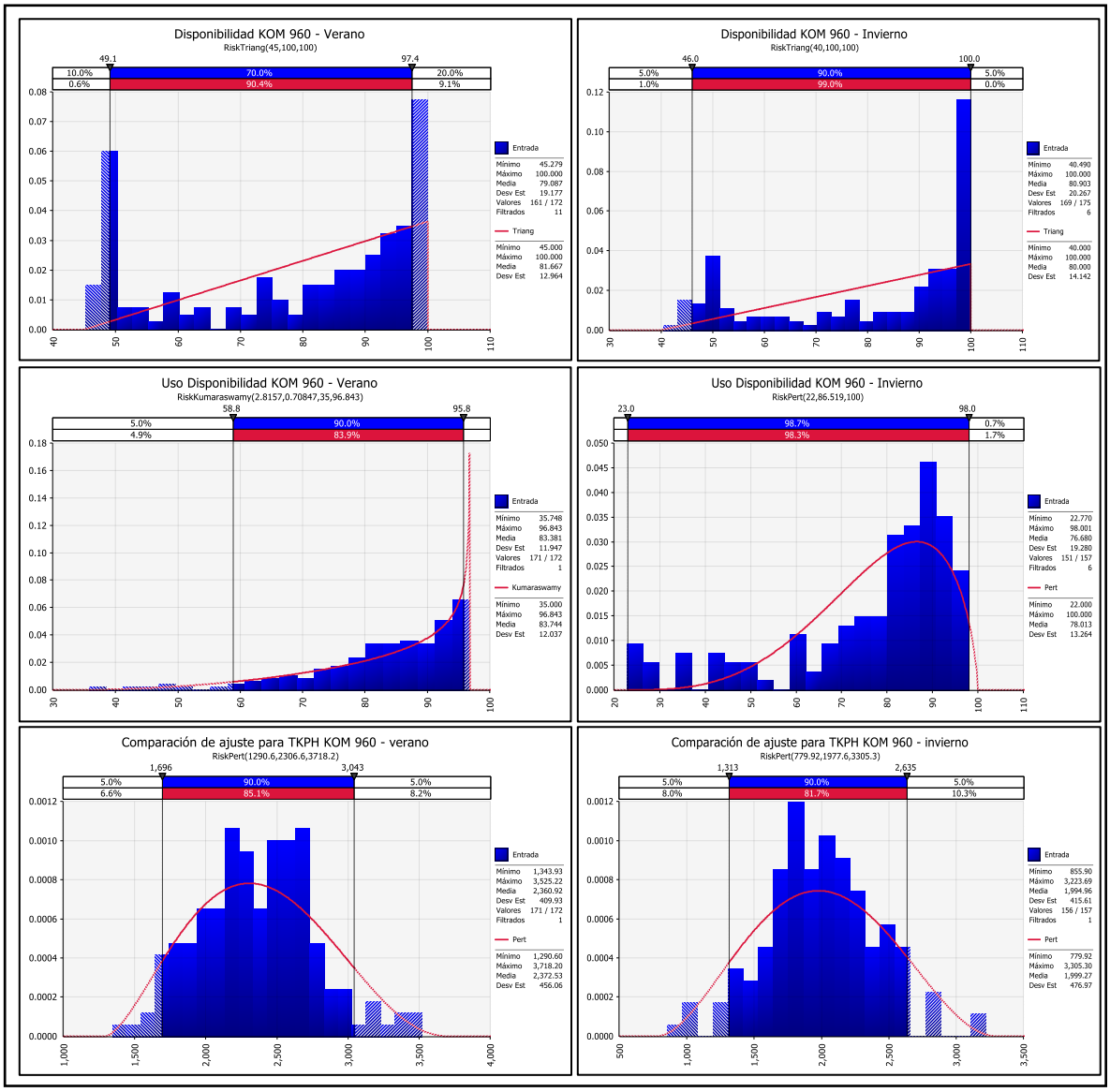


Figura 9-10. Ajustes distribución para flota KOM 960, año 2017

Palas

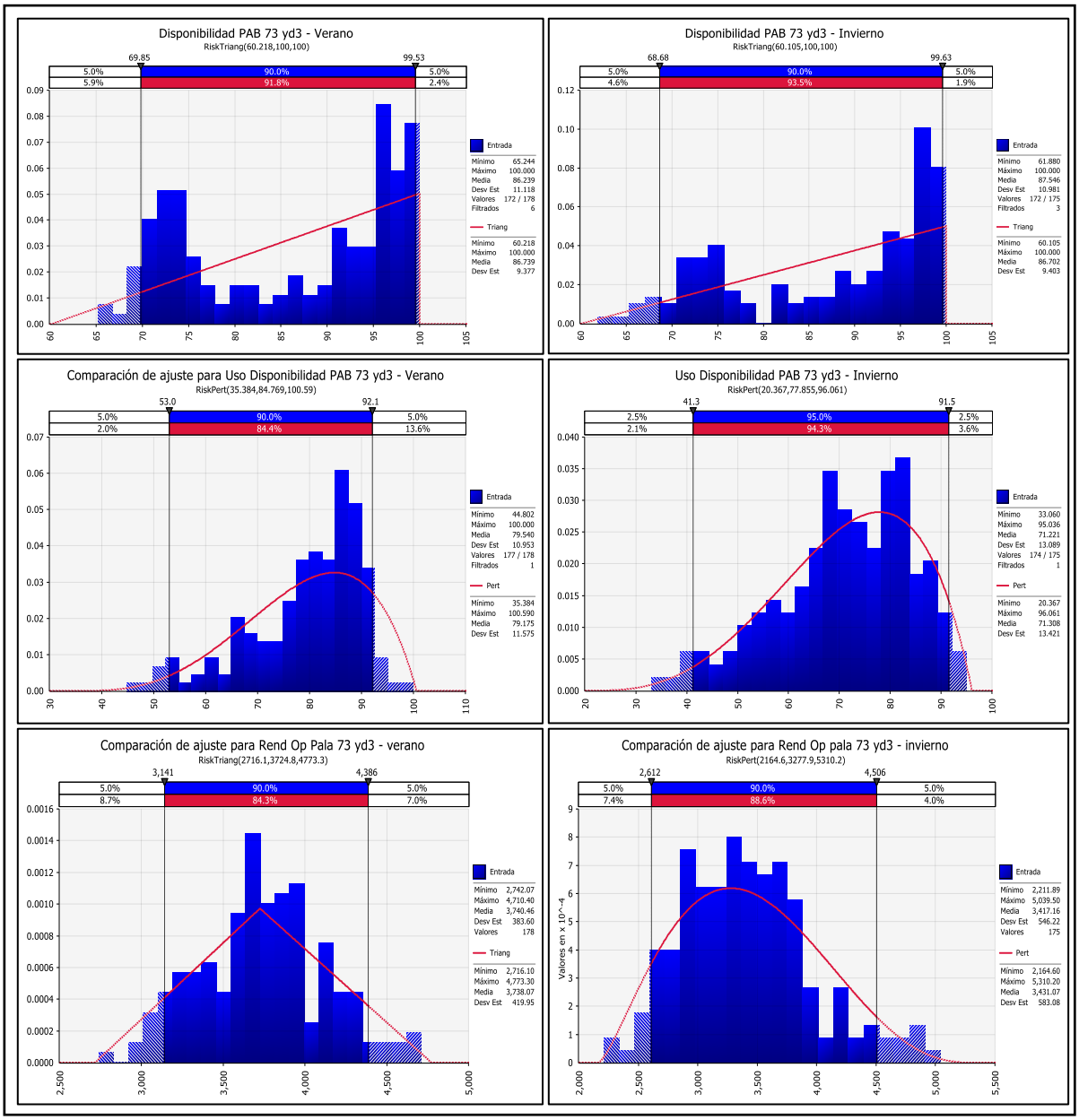


Figura 9-11. Ajustes distribución para pala 73 yd3, año 2017

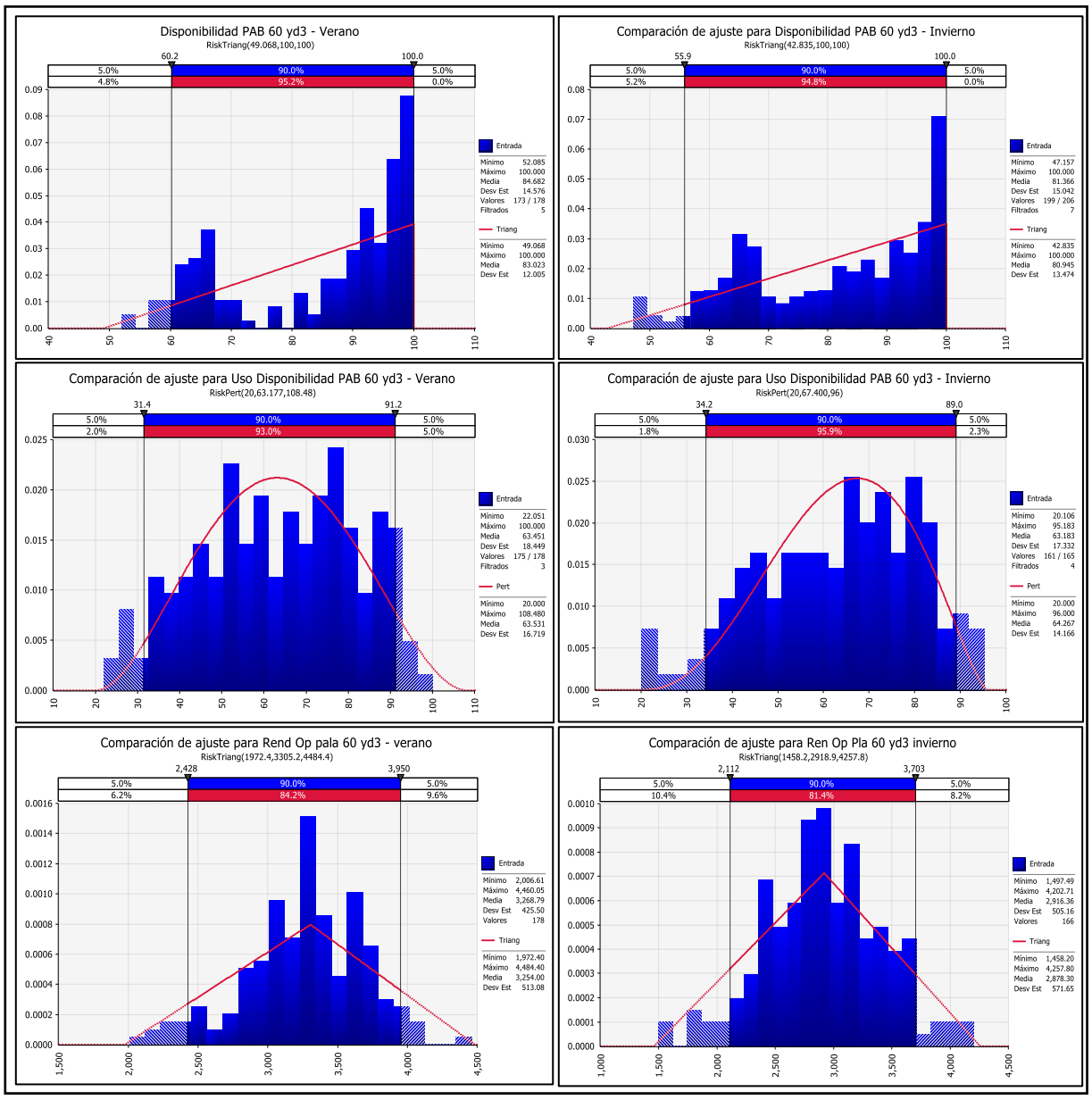


Figura 9-12. Ajustes distribución para pala 60 yd3, año 2017

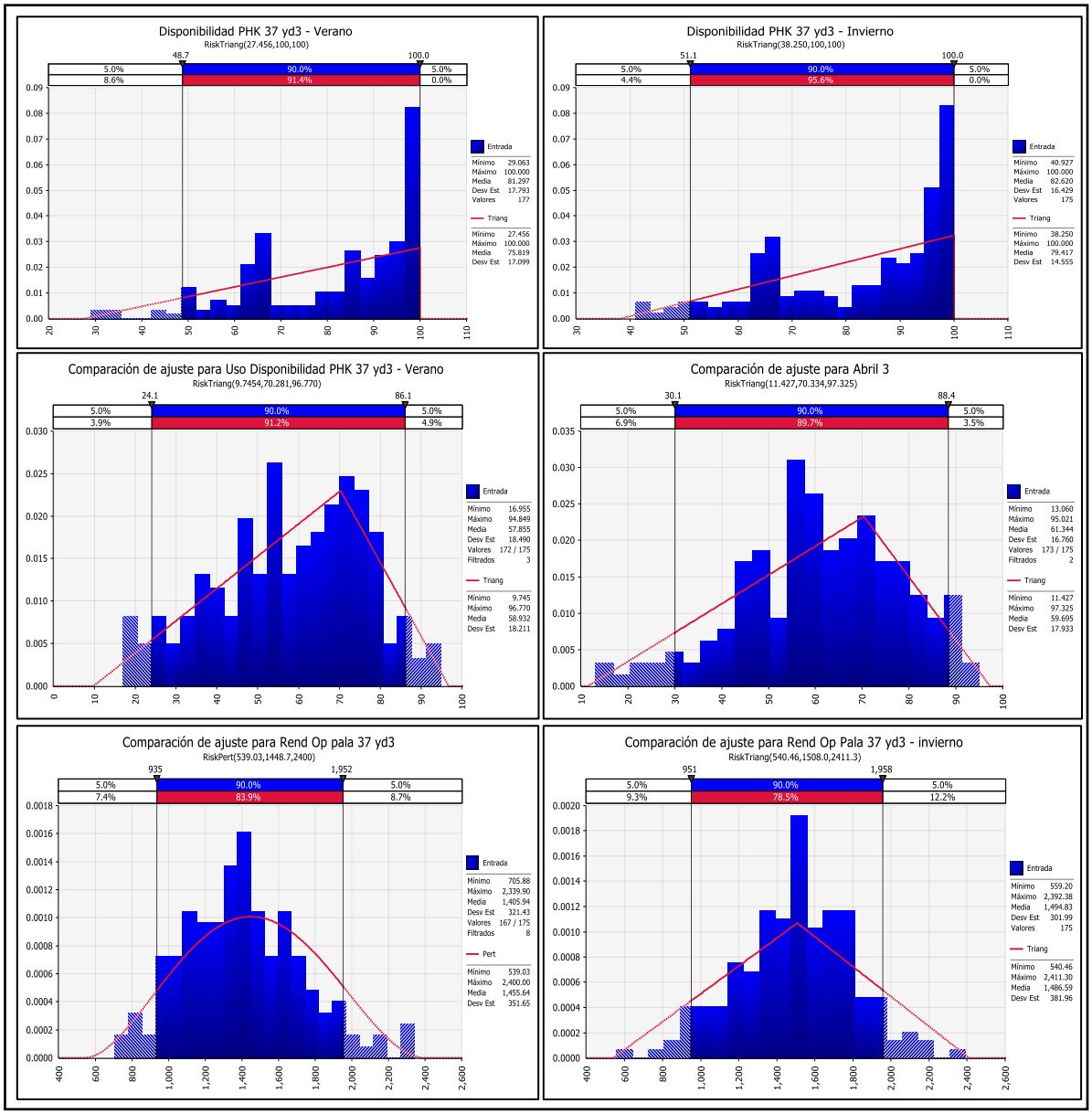


Figura 9-13. Ajustes distribución para pala 37 yd3, año 2017

Perforación

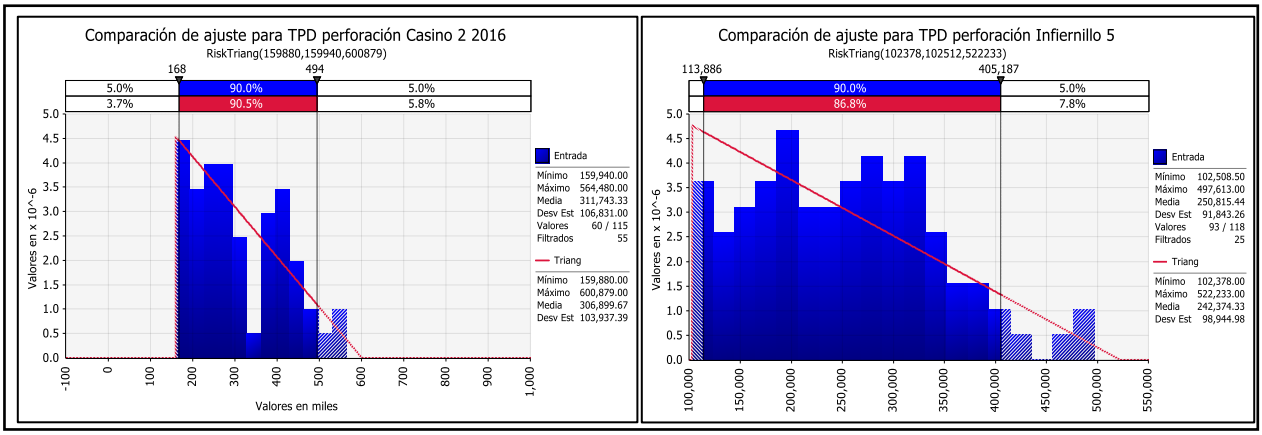


Figura 9-14. Ajustes distribución ton /día para Perforación, año 2017

Asignación equipos

Tabla 9-1.Asignación flota camiones año 2017.

	Casino 2		**Infiernillo 5**						**Infiernillo 7**	
	KOM 930		CAT 795		KOM 930		KOM 960		KOM 930	
	Estéril + Lix	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**
Enero	8	12	10	1	10	1	1	1	6	1
Febrero	7	13	8	3	8	3	1	1	3	1
Marzo	5	12	10	1	10	1	1	1	5	3
Abril	8	11	9	2	9	2	1	1	3	4
Mayo	7	13	8	3	8	3	1	1	5	2
Junio	11	11	8	3	8	3	1	1	6	1
Julio	6	14	8	3	8	3	1	1	4	5
Agosto	10	11	8	3	8	3	1	1	4	3
Septiembre	3	10	5	6	5	6	1	1	6	3
Octubre	4	7	7	4	7	4	1	1	4	4
Noviembre	5	9	7	4	7	4	1	1	4	4
Diciembre	4	6	8	3	8	3	1	1	8	7

Tabla 9-2. Asignación palas año 2017.

	Casino 2		Infiernillo 5			Infiernillo 7	
	PAB 73 yd3	**PHK 37 yd3**	**PAB 73 yd3**	**PAB 60 yd3**	**PAB 37 yd3**	**PAB 73 yd3**	**PHK 37 yd3**
Enero	2	1	1	2	1	1	-
Febrero	2	1	1	2	1	1	-
Marzo	2	1	1	2	1	1	-
Abril	2	1	1	2	1	1	-
Mayo	2	1	1	2	1	1	-
Junio	2	1	1	2	1	1	1
Julio	2	1	1	2	1	1	1
Agosto	2	1	1	2	1	1	-
Septiembre	2	-	1	2	1	1	-
Octubre	2	-	1	2	1	1	-
Noviembre	2	-	1	2	1	1	-
Diciembre	1	-	1	2	1	2	-

Causas especiales

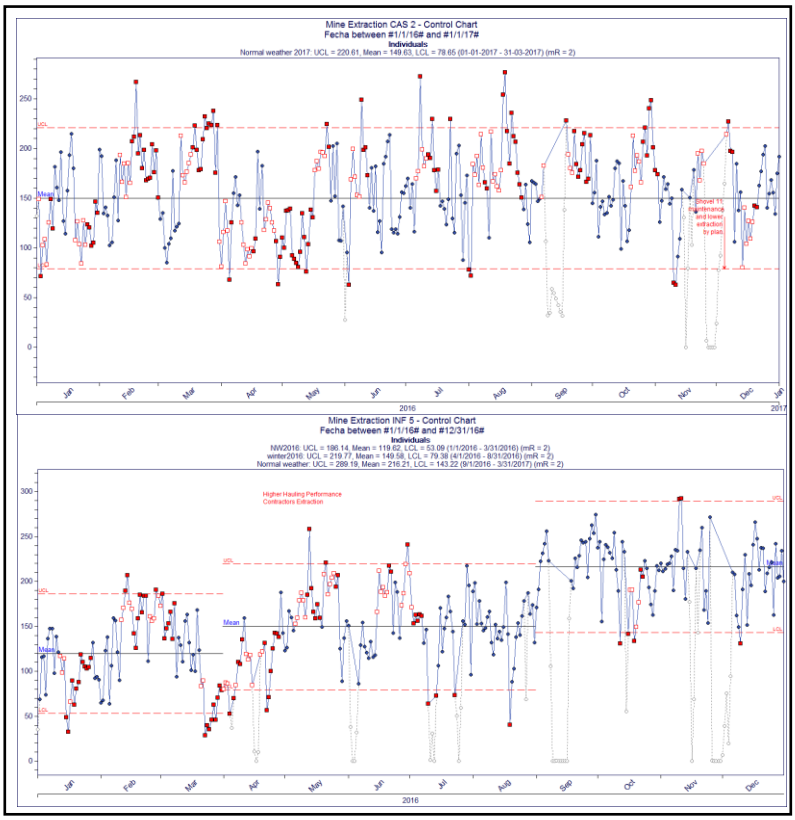


Figura 9-15. Gráficos de control extracción Casino 2 e Infiernillo 5, año 2017

Resultados modelo 2017

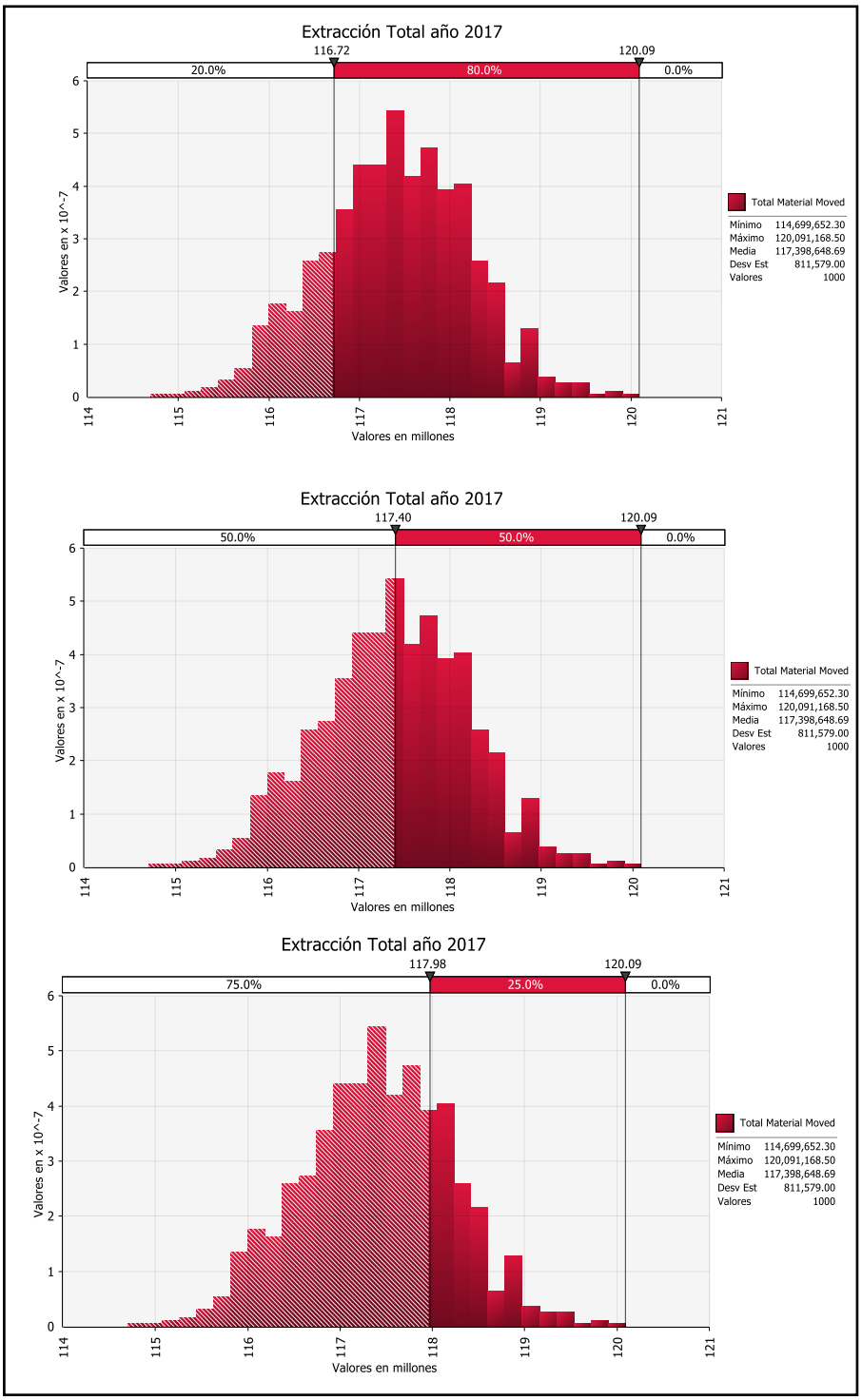


Figura 9-16. Histogramas de probabilidad extracción total 2017.

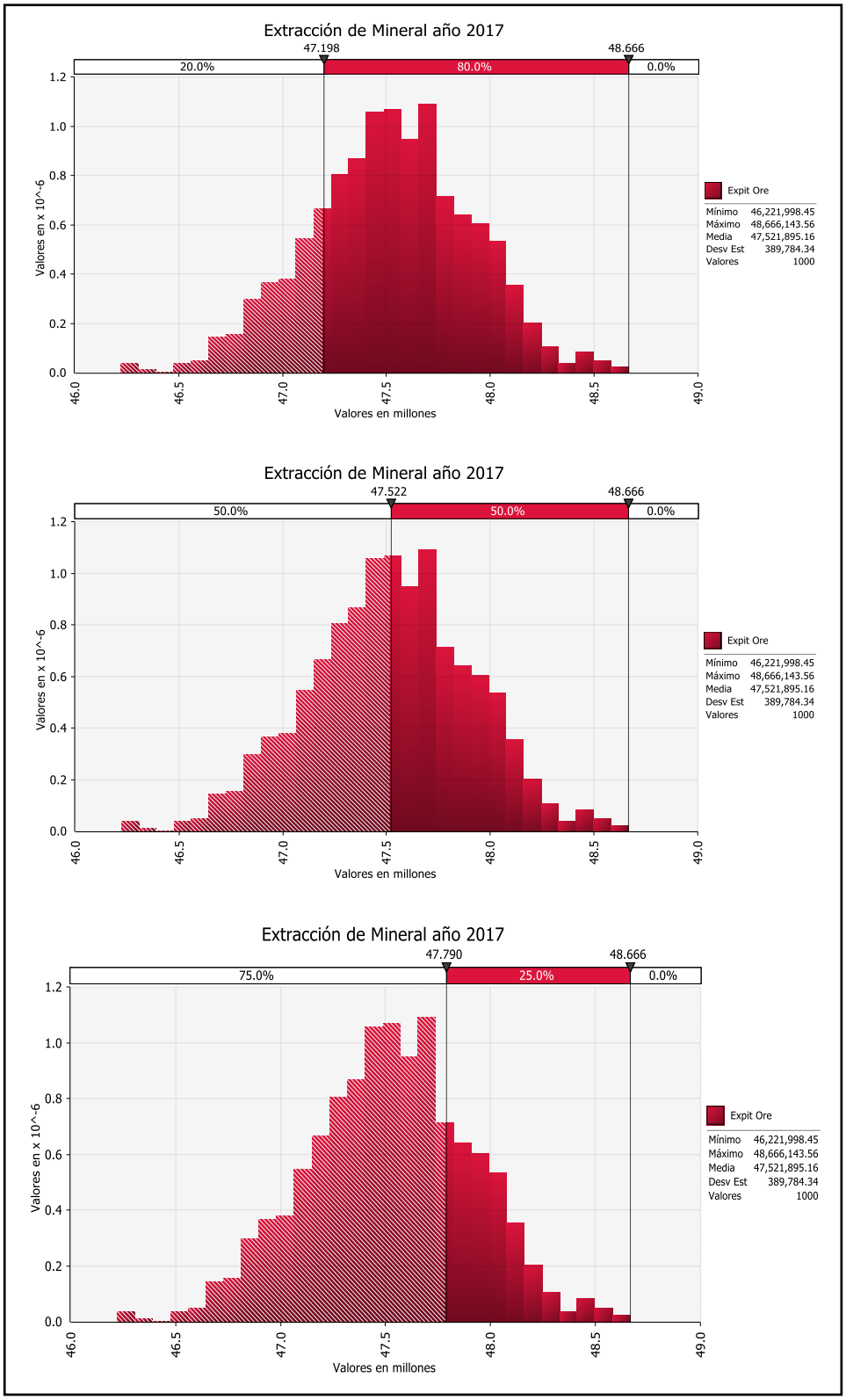


Figura 9-17. Histogramas de probabilidad extracción mineral 2017.

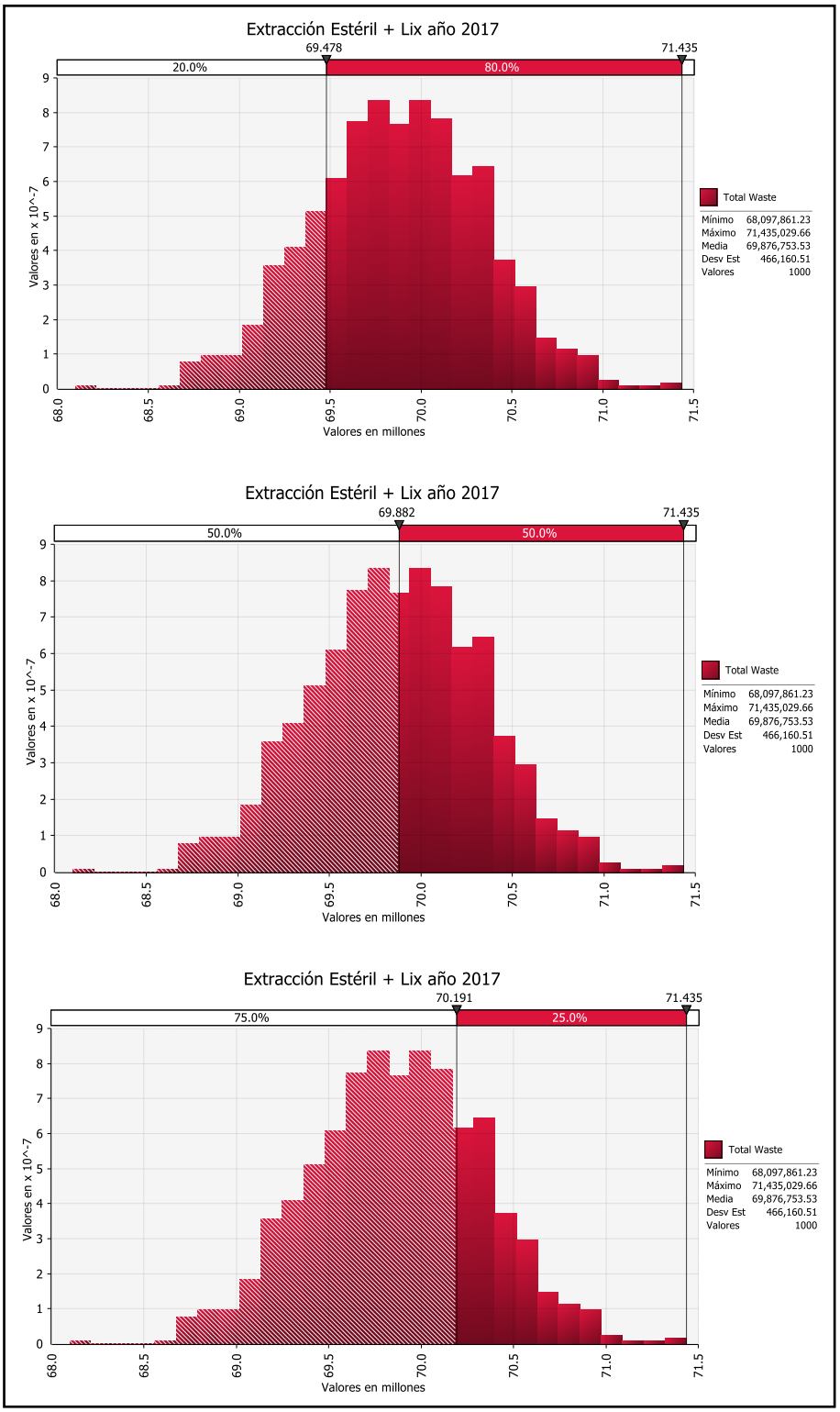


Figura 9-18: Histogramas de probabilidad extracción estéril 2017.

9.3. Anexo C: Caso base 2018

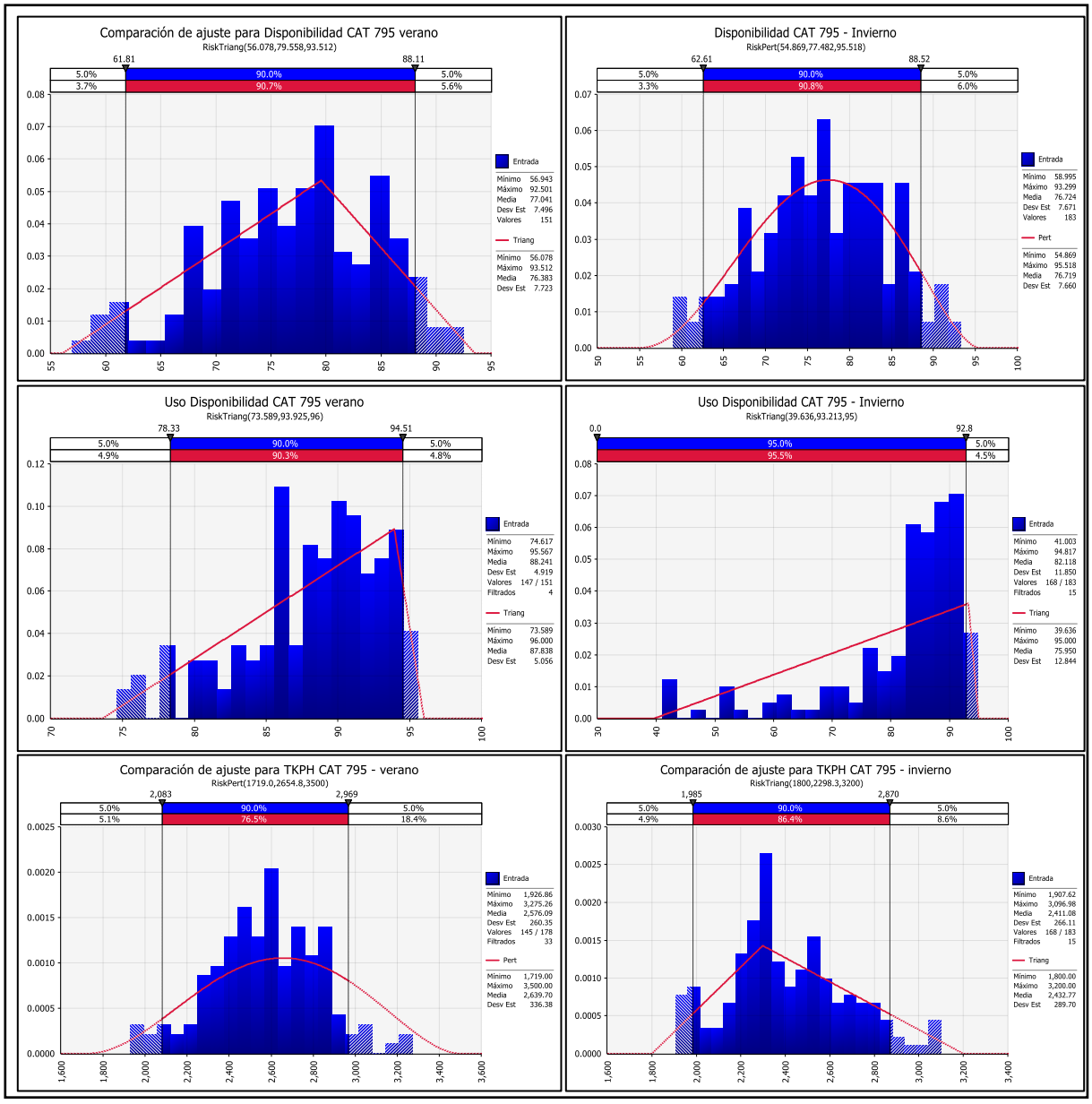


Figura 9-19: Ajustes distribución para flota CAT 795, año 2018

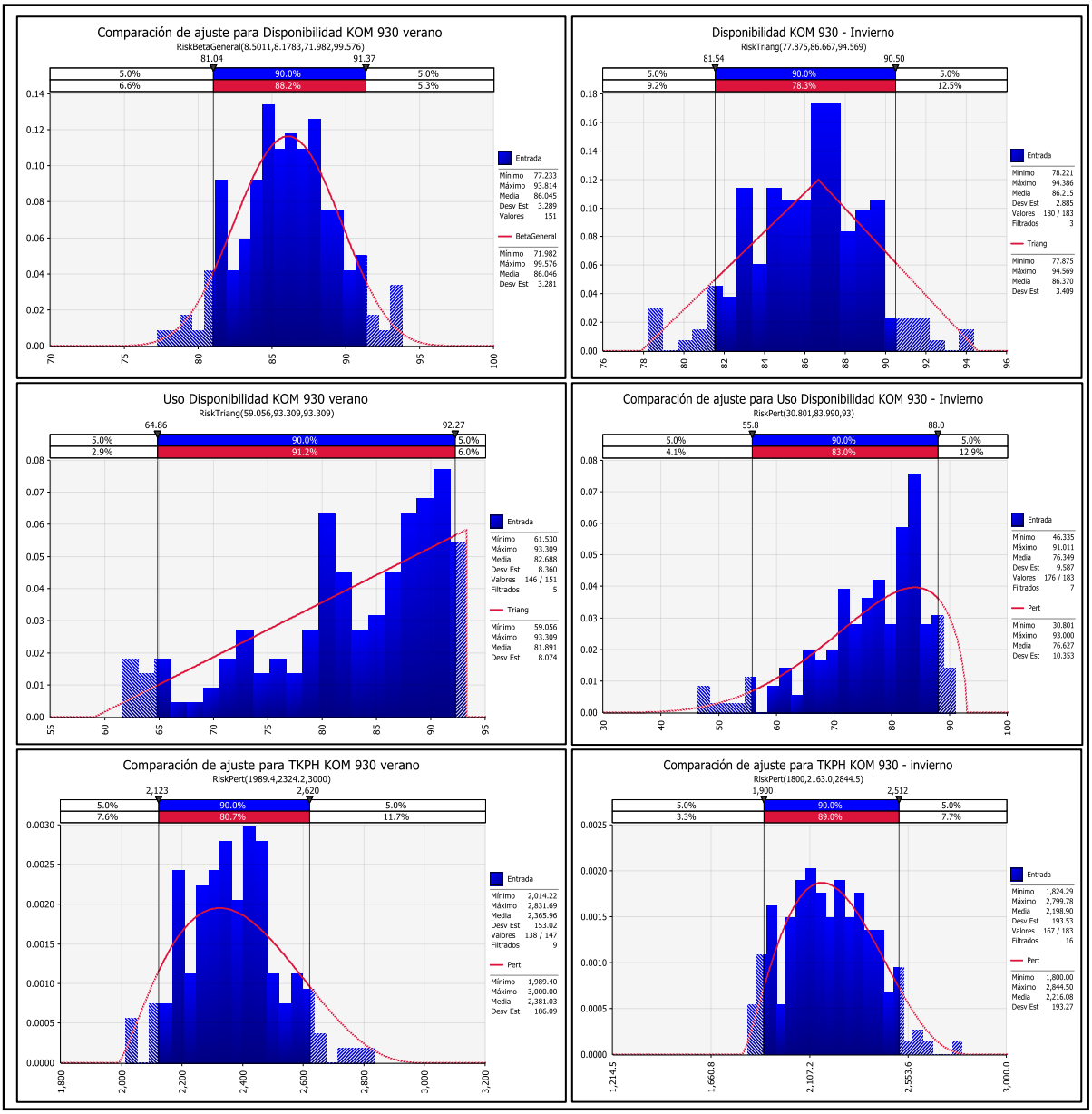


Figura 9-20. Ajustes distribución para flota KOM 930, año 2018

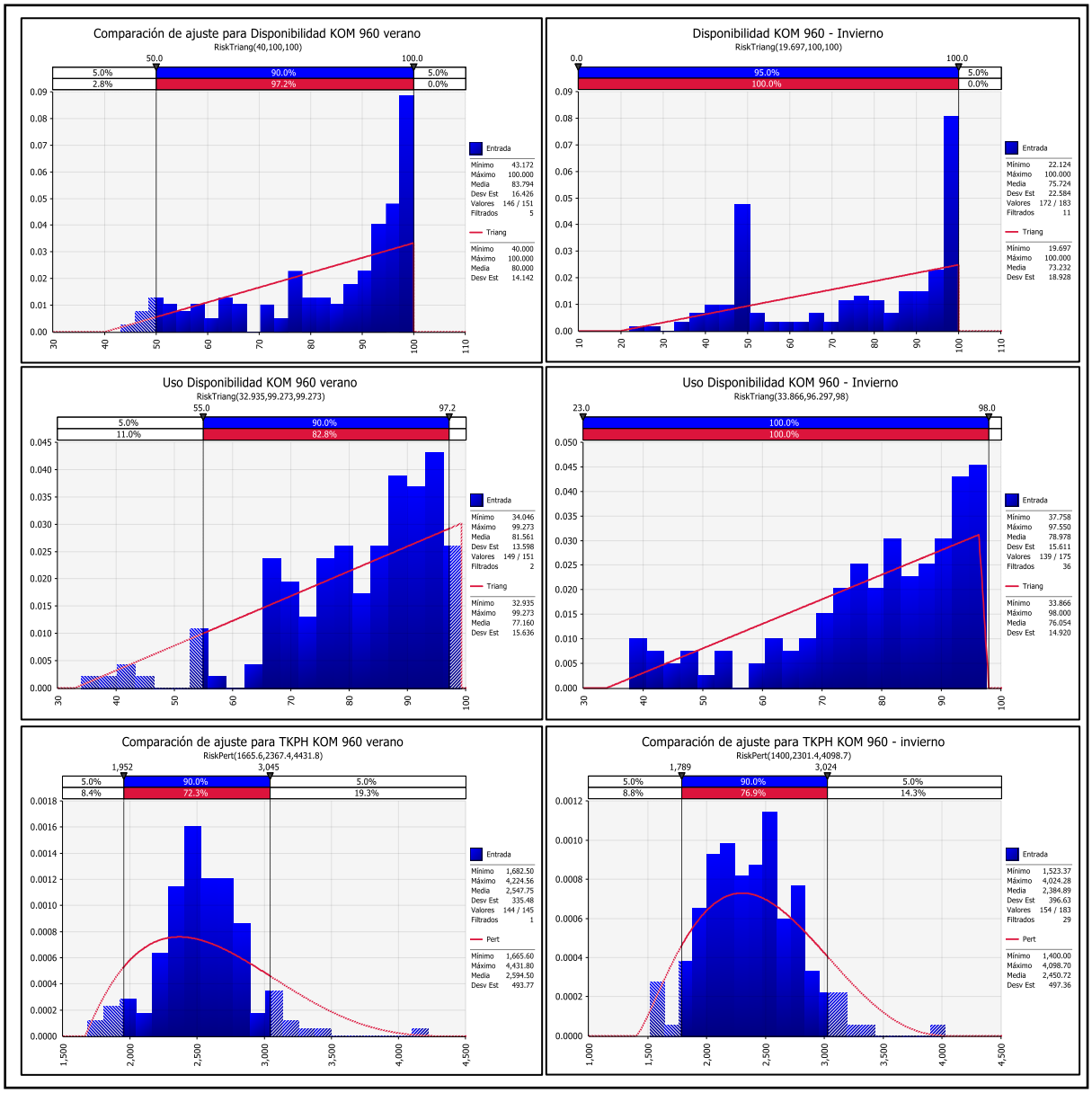


Figura 9-21.Ajustes distribución para flota KOM 960, año 2018

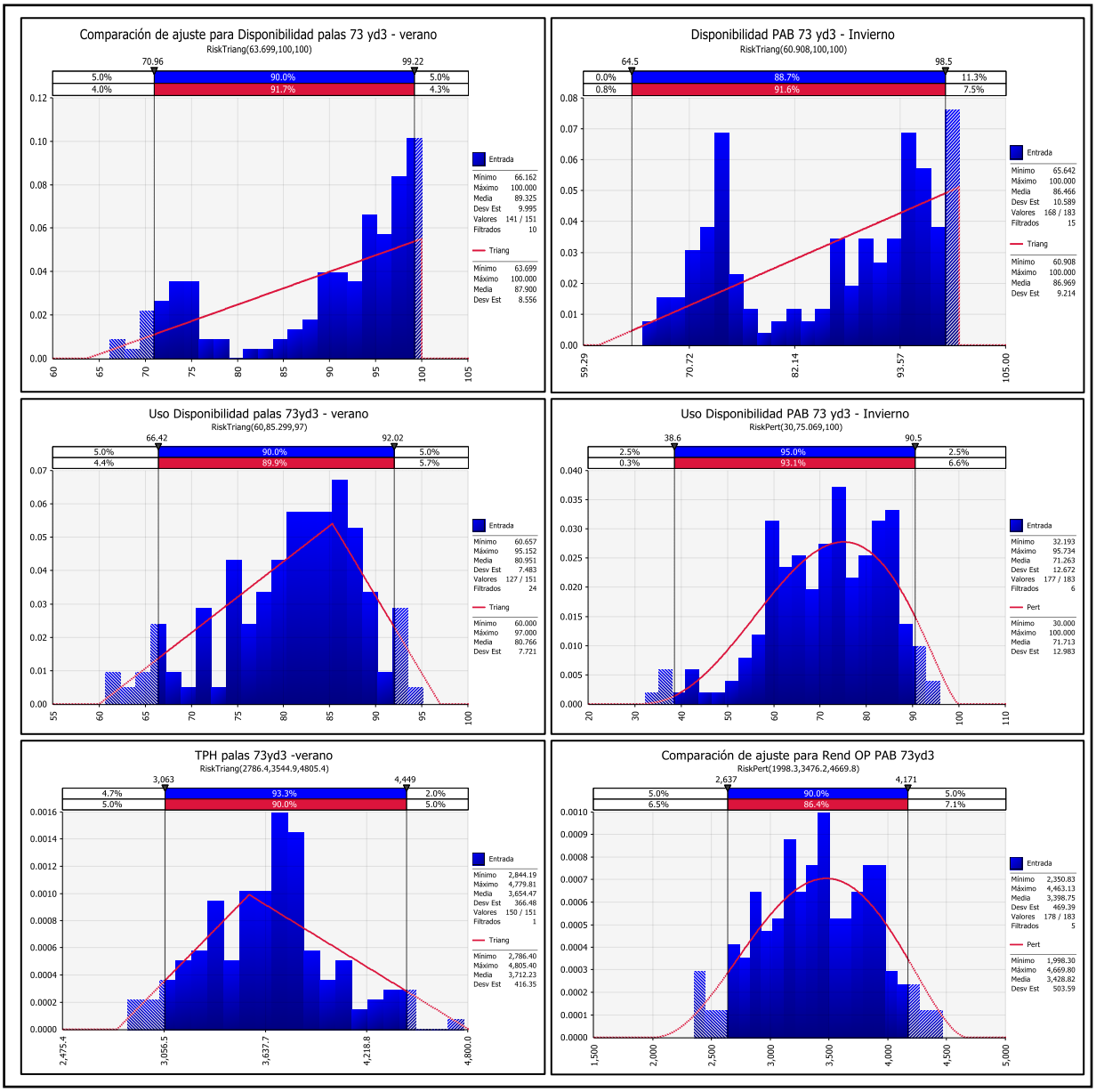


Figura 9-22. Ajustes distribución para pala 73 yd3, año 2018

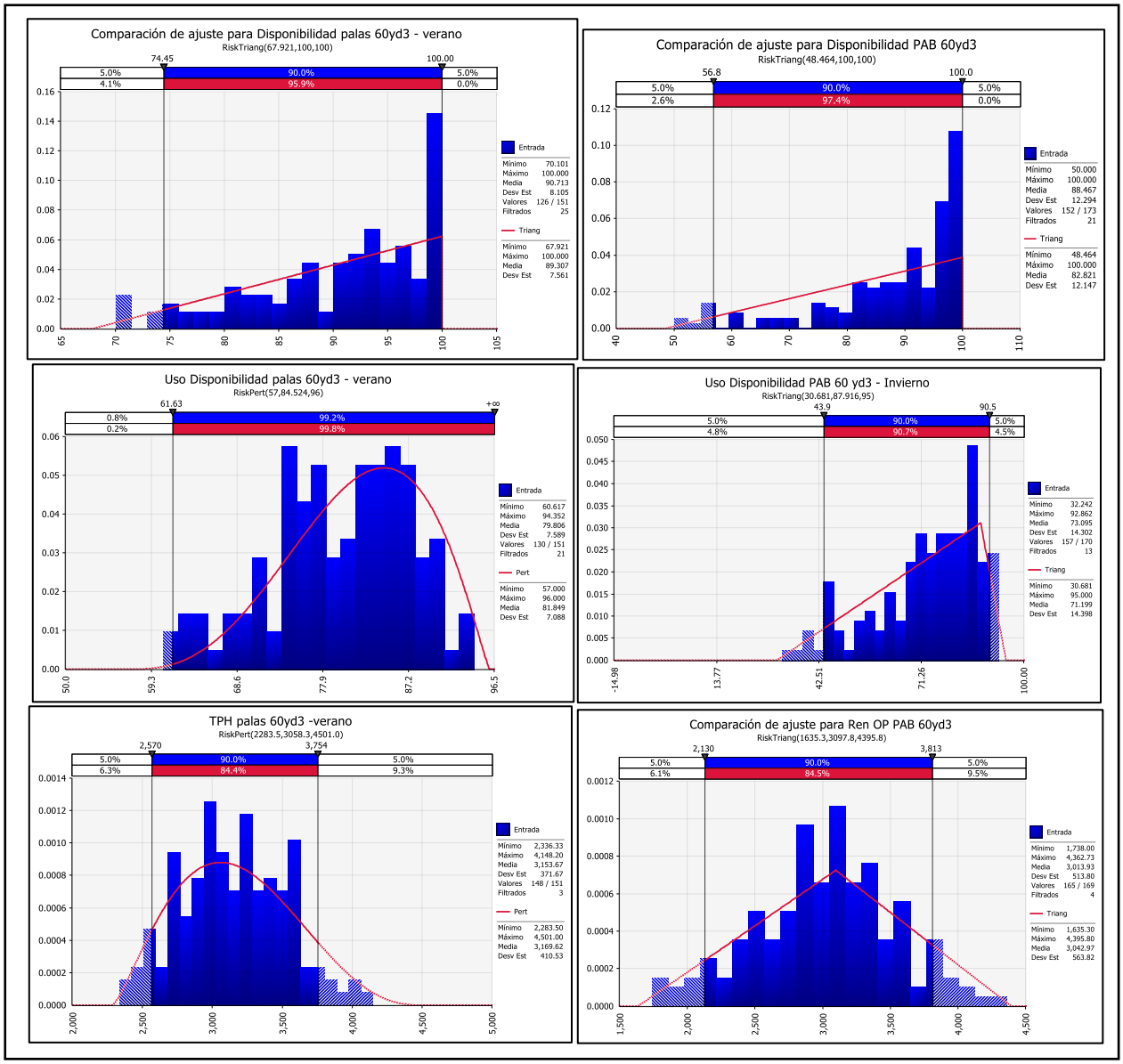


Figura 9-23. Ajustes distribución para pala 60 yd3, año 2018

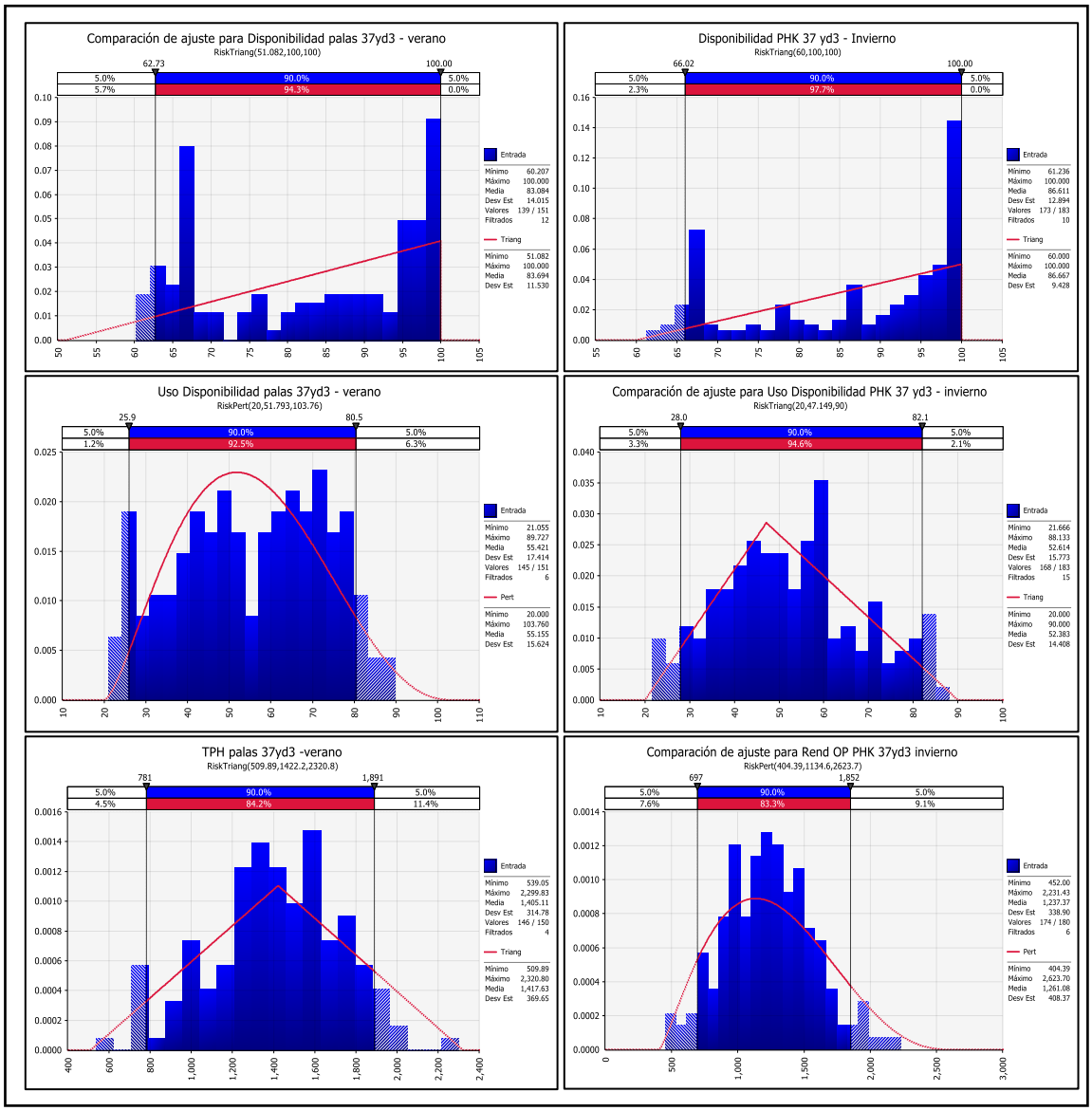


Figura 9-24. Ajustes distribución para pala 37 yd3, año 2018

Perforación

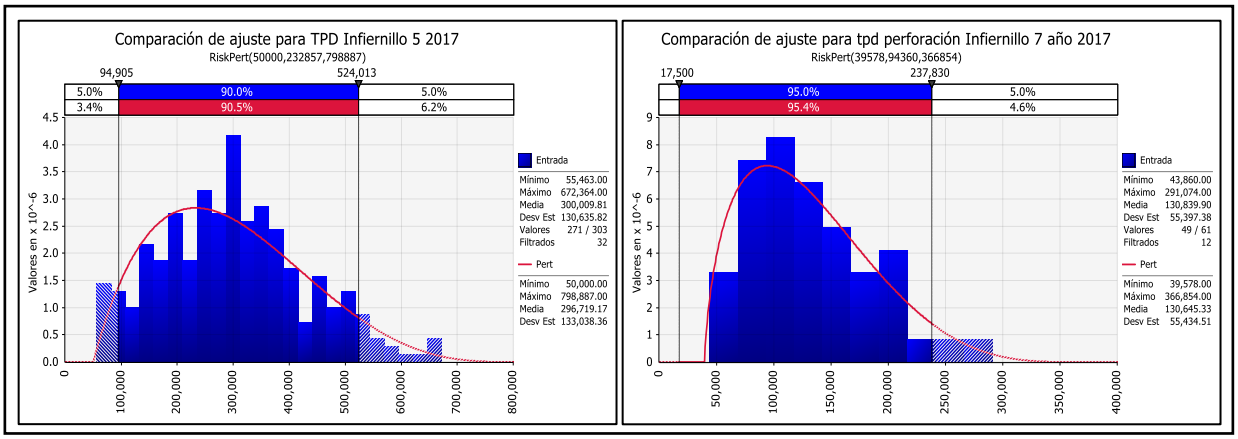


Figura 9-25. Ajustes distribución ton/día para perforación, año 2018

Asignación equipos

Tabla 9-3. Asignación flota camiones año 2018

	Infiernillo 5						Infiernillo 7	
	CAT 795		KOM 930		KOM 960		KOM 930	
	Estéril + Lix	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**	**Estéril + Lix**	**Mineral**
Enero	6	5	11	9	1	1	5	6
Febrero	5	6	8	12	1	1	6	10
Marzo	3	8	5	15	1	1	8	4
Abril	6	6	12	14	1	1	8	8
Mayo	6	6	11	13	1	1	6	5
Junio	4	8	8	18	1	1	8	4
Julio	7	5	12	12	1	1	13	6
Agosto	5	6	8	13	1	1	10	8
Septiembre	4	7	11	15	1	1	7	6
Octubre	6	6	11	12	1	1	12	3
Noviembre	6	6	13	13	1	1	12	6
Diciembre	6	5	16	12	1	1	13	5

Tabla 9-4. Asignación palas año 2018

	Infiernillo 7		Infiernillo 5	
	PAB 73 yd3	**PHK 37 yd3**	**PAB 73 yd3**	**PAB 60 yd3**
Enero	1	1	2	2
Febrero	2	1	2	2
Marzo	2	1	2	2
Abril	2	1	2	2
Mayo	2	1	2	2
Junio	2	1	2	2
Julio	2	1	2	2
Agosto	2	1	2	2
Septiembre	2	1	2	2
Octubre	2	1	2	2
Noviembre	2	-	2	2
Diciembre	2	1	2	2

Causas especiales

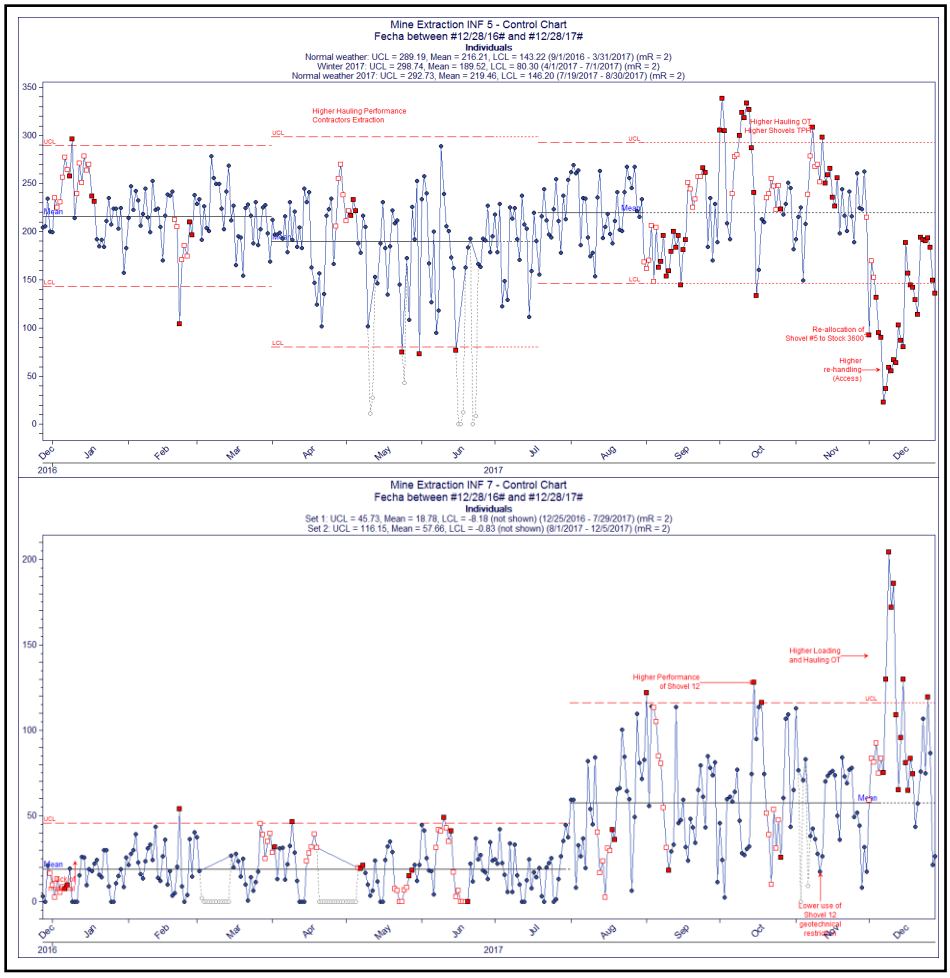


Figura 9-26. Gráficos de control extracción Casino 5 e Infiernillo 7, año 2018

Resultados modelo 2018

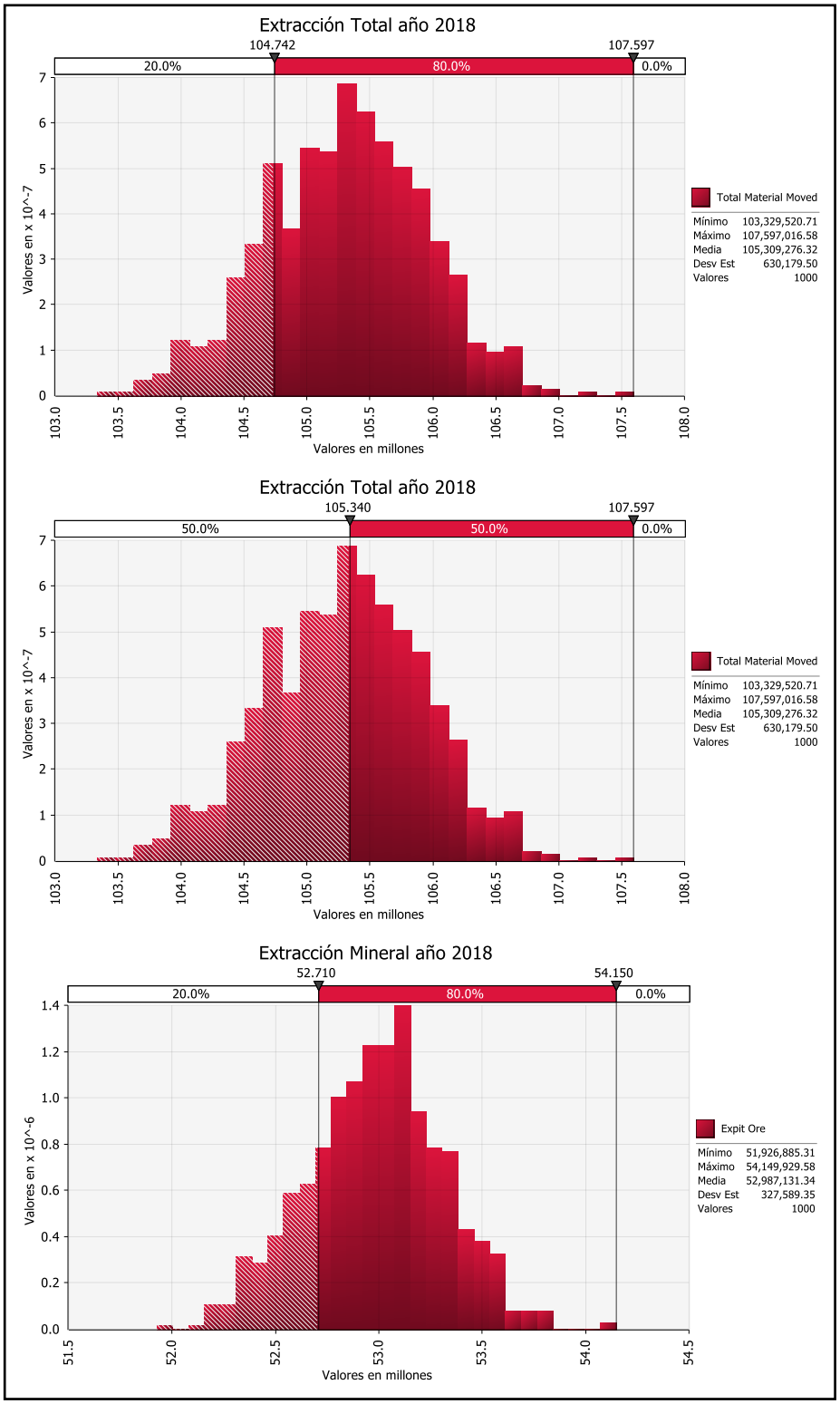


Figura 9-27. Histogramas de probabilidad extracción total 2018.

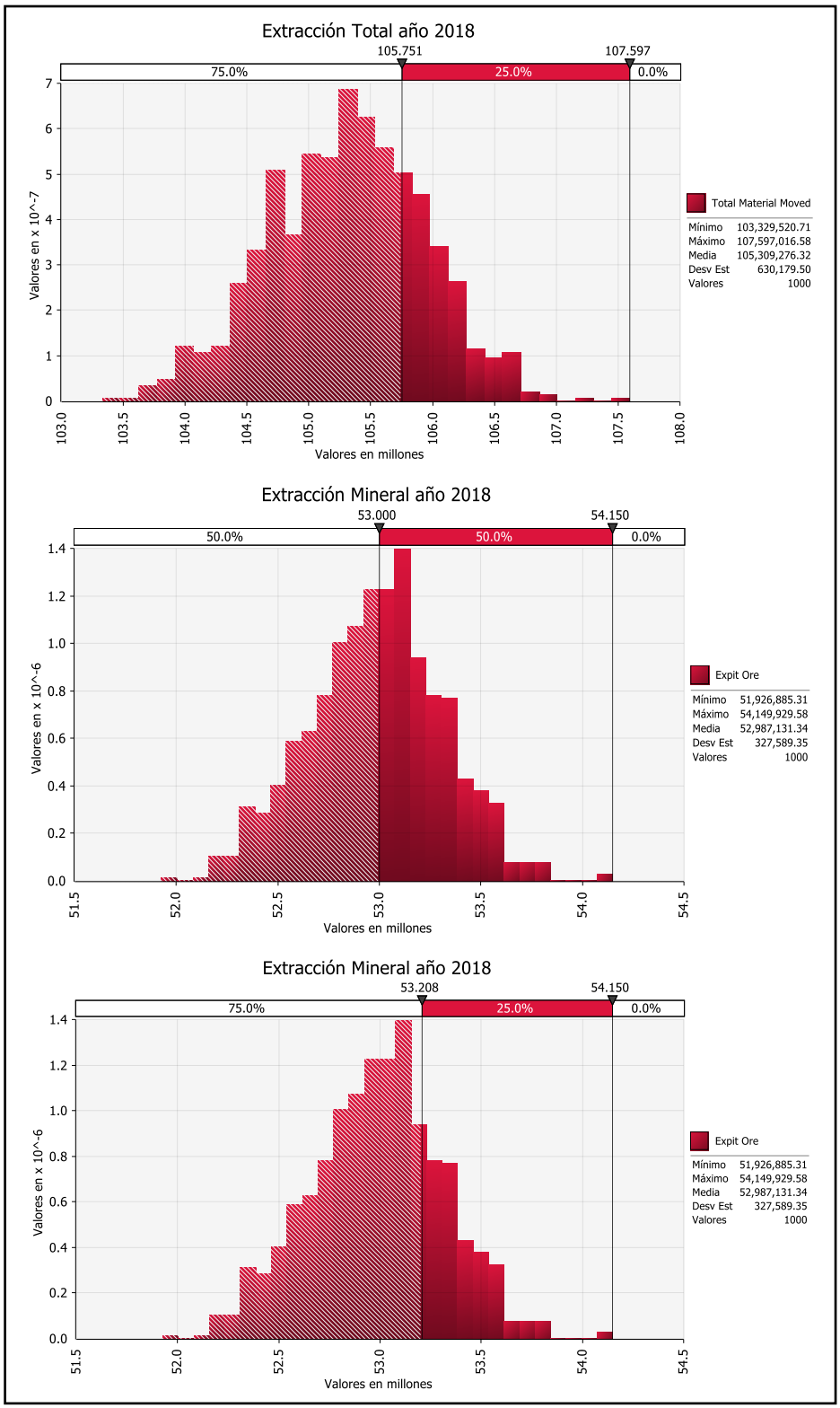


Figura 9-28. Histogramas de probabilidad extracción mineral 2018.

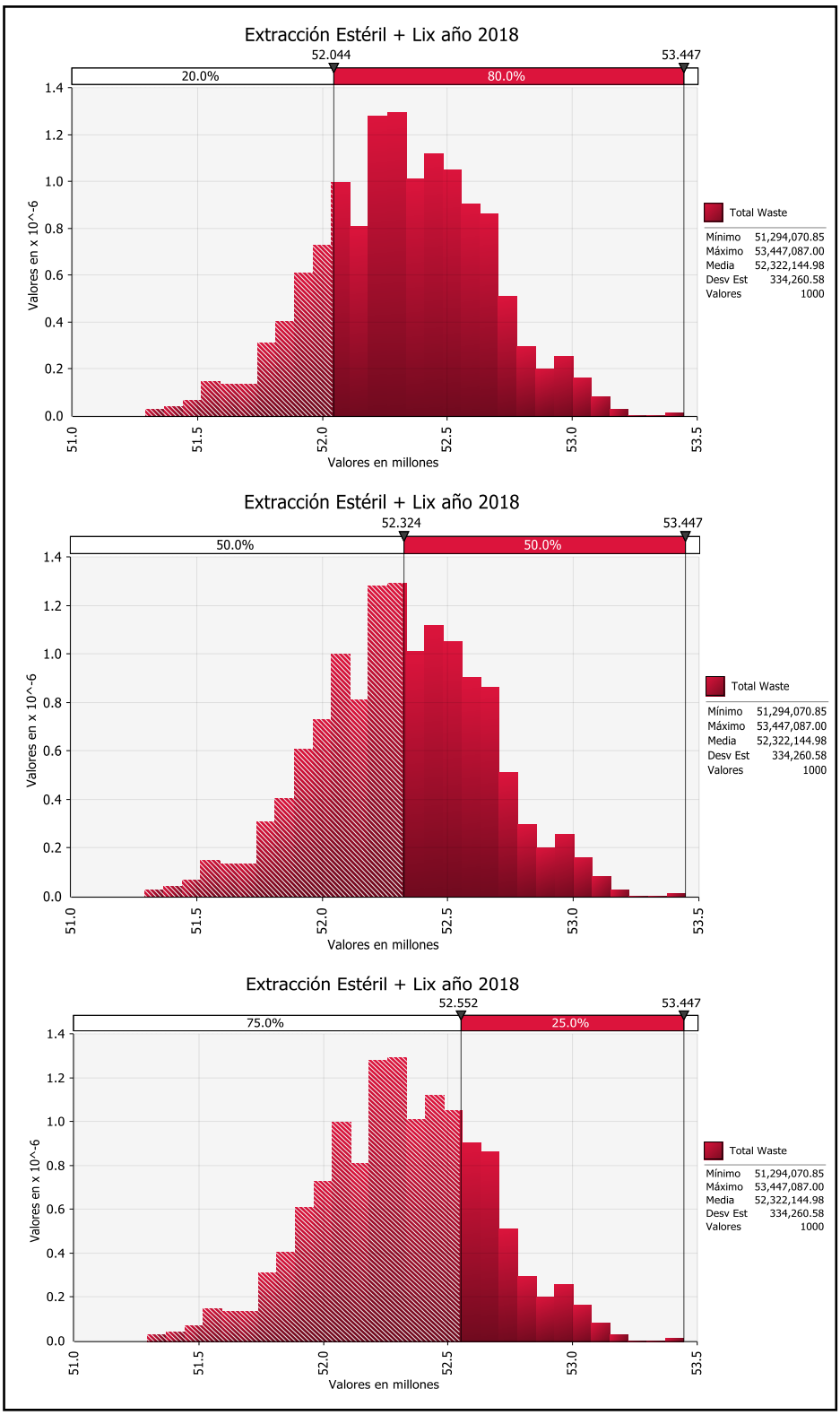


Figura 9-29. Histogramas de probabilidad extracción estéril 2018.

9.4. Anexo D: Evaluación de Escenarios

Escenario 1

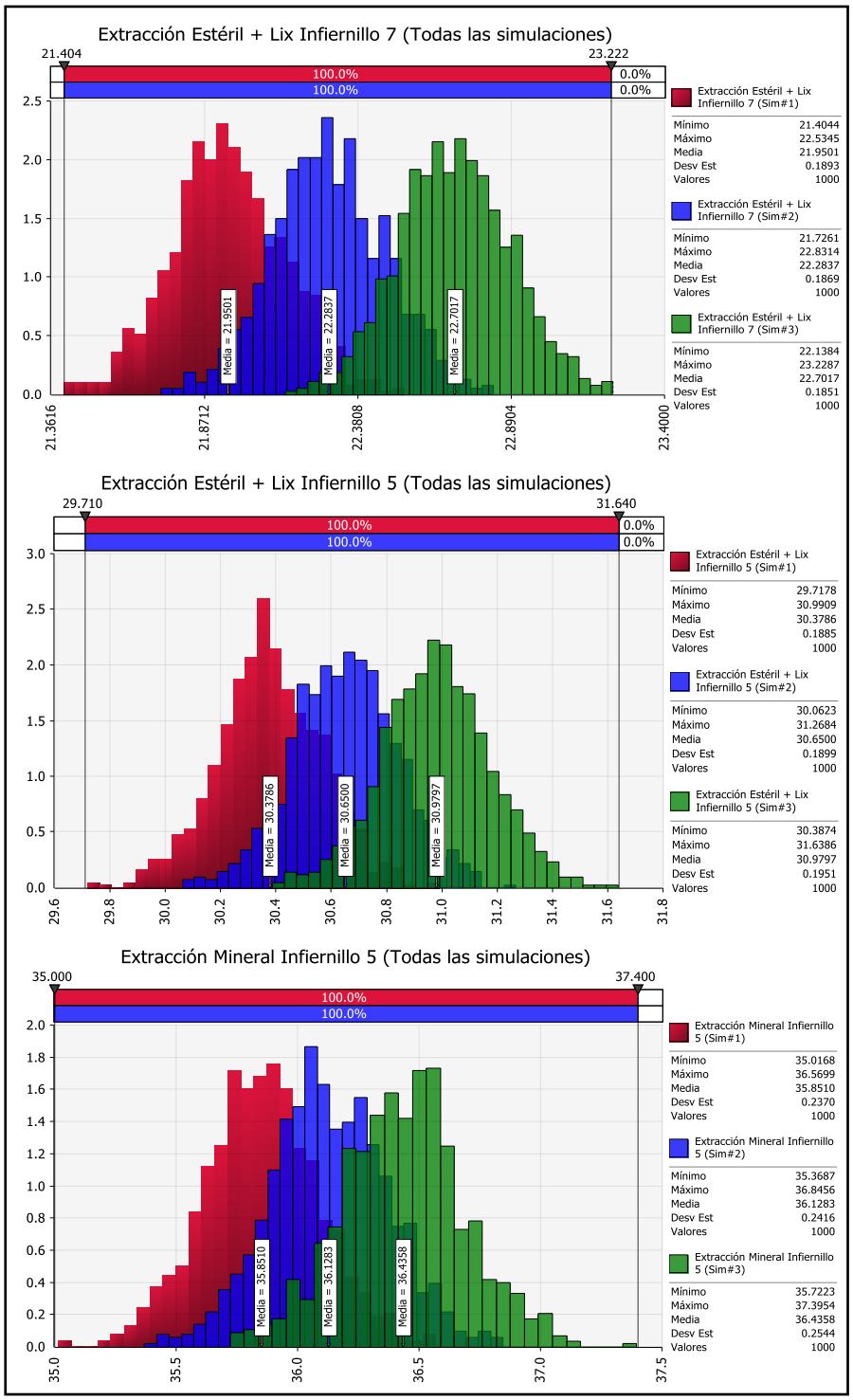


Figura 9-30. Histograma probabilidad extracción de cada simulación por fase año 2018, Escenario 1

Escenario 2

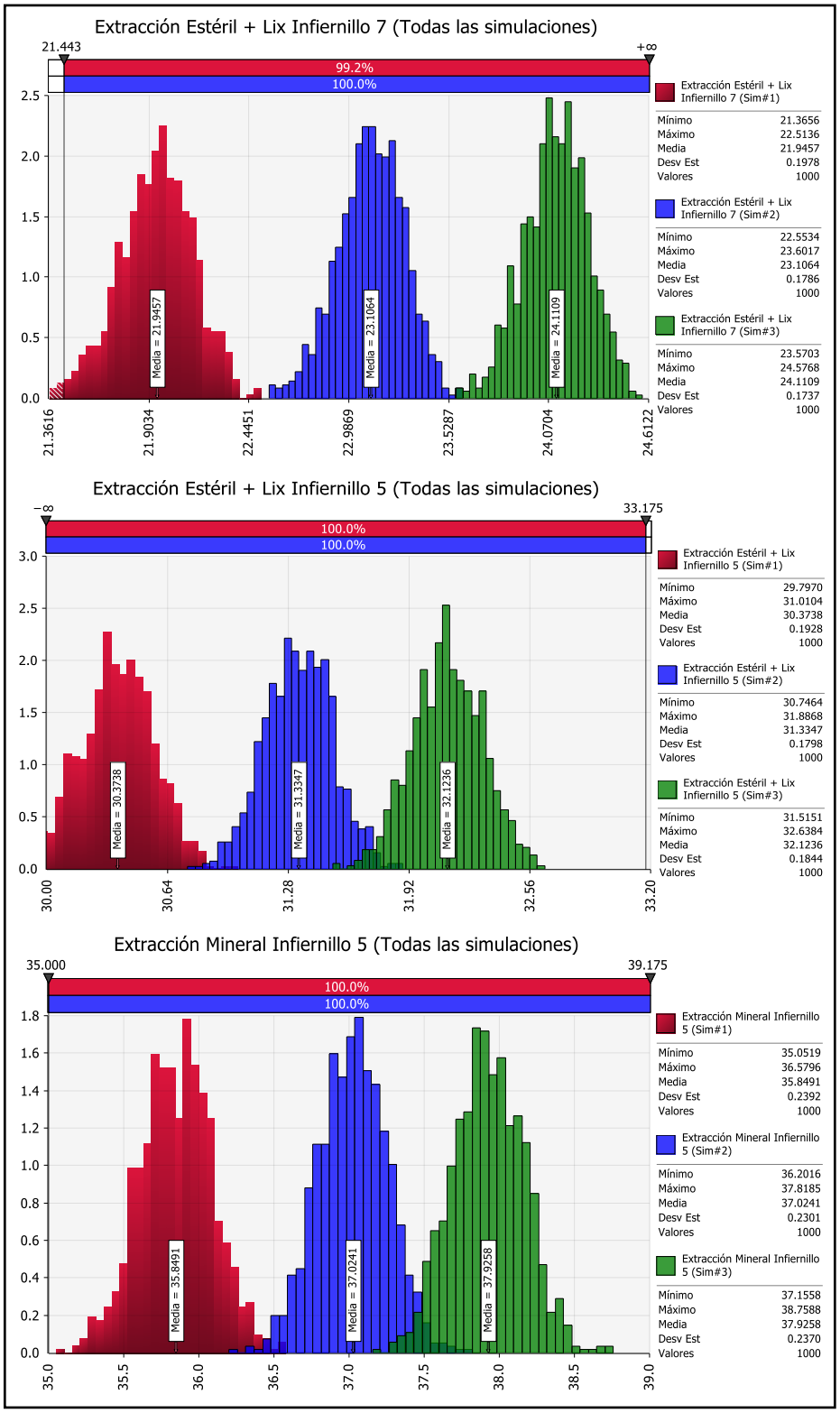


Figura 9-31. Histograma probabilidad extracción de cada simulación por fase año 2018, Escenario 2